



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo

**Correções na determinação do nível de potência sonora
obtido através da técnica da intensimetria**

Luiz Antonio Perrone Ferreira de Brito

Campinas, 2006

Universidade Estadual de Campinas

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo

**Correções na determinação do nível de potência sonora obtido
através da técnica da intensimetria**

Luiz Antonio Perrone Ferreira de Brito

Orientado por: Prof^a. Dr^a. Stelamaris Rolla Bertoli

Tese de Doutorado apresentada à
Comissão de Pós Graduação da Faculdade
de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo
da Universidade Estadual de Campinas,
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Doutor em Engenharia Civil, na
área de concentração de Edificações.

Campinas, 2006

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

B777c Brito, Luiz Antonio Perrone Ferreira de
Correções na determinação do nível de potência sonora obtido através da técnica da intensimetria / Luiz Antonio Perrone Ferreira de Brito.--Campinas, SP: [s.n.], 2006.

Orientador: Stelamaris Rolla Bertoli
Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Ruído - Medição. 2. Poluição sonora. 3. Acústica arquitetônica. I. Bertoli, Stelamaris Rolla. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Título em Inglês: Corrections in the determination of the sound power level obtained through intensimetry technique

Palavras-chave em Inglês: Sound intensity, Sound power, Intensity technique

Área de concentração: Edificações

Titulação: Doutor em Engenharia Civil

Banca examinadora: Paulo Roberto Gardel Kurka, Rogério Pirk, Lucila Chebel Labaki e Regina Coeli Ruschel

Data da defesa: 02/07/2006

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

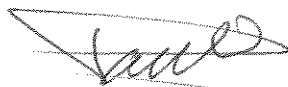
**Correções na determinação do nível de potência sonora obtido através
da técnica da intensimetria**

Luiz Antonio Perrone Ferreira de Brito

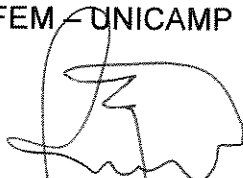
Defesa de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora constiuída por:



Profª. Drª. Stelamaris Rolla Bertoli
Presidente e Orientadora / FEC – UNICAMP



Prof Dr Paulo Roberto Gardel Kurka
FEM – UNICAMP



Prof Dr Rogério Pirk
CTA – IAE



Profª Drª Lucila Chebel Labaki
FEC – UNICAMP



Profª Drª Regina Coeli Ruschel
FEC - UNICAMP

Campinas, 02 de Junho 2006

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade e capacidade de aproveitá-la.

Agradeço à minha esposa Cristiane e filhas Camila e Giovana com a paciência devido às minhas ausências, necessárias para conclusão deste trabalho.

Agradeço a Prof^a Dr^a Stelamaris Rolla Bertoli pela orientação e pelos ensinamentos nestes anos de convivência.

Agradeço ao Eng Rodrigo Calixto da empresa Furnas Centrais Elétricas e Eng Dr Rogério Pirk do Instituto de Aeronáutica e Espaço do Centro Técnico da Aeronáutica por terem cedido os equipamentos e laboratórios necessários para execução deste trabalho.

Agradeço as Sras Maria de Fátima Ferreira Neto, e Maria Luiza Carvalho, e aos Srs Obadias Pereira Silva Jr, Daniel Celante e Cândido Magno pela colaboração durante as medições realizadas.

SUMÁRIO

	Lista de Tabelas	VIII
	Lista de Figuras	IX
	Lista de Siglas	XIV
	Resumo	XVII
	Abstract	XVIII
1	INTRODUÇÃO	19
1.1	JUSTIFICATIVA	20
1.2	OBJETIVOS	23
1.2.1	Objetivos específicos	23
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	23
2	APRESENTAÇÃO DA TÉCNICA	25
2.1	TÉCNICA DE INTENSIMETRIA	25
2.2	EVOLUÇÃO DA TÉCNICA	30
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	40
3.1	DETERMINAÇÃO DA INTENSIDADE SONORA ATRAVÉS DA INTENSIMETRIA	40
3.2	DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA SONORA ATRAVÉS DA INTENSIMETRIA	46
3.3	ERROS DE MEDIÇÃO DE INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA	49
3.3.1	Erros sistemáticos inerentes a intensimetria	50
3.3.2	Erros aleatórios associados ao processamento de sinais	60
3.3.2.1	Erro devido ao desarranjo de fase do sistema de medição	62
3.3.2.2	Erro devido à absorção da fonte	72
3.3.2.3	Erro devido às condições ambientais	76

3.3.2.4	Erro devido ao campo acústico da fonte	77
3.3.2.5	Erro devido à equalização da pressão estática dos microfones	78
3.3.2.6	Erro devido ao desarranjo de fase na presença de elevado ruído de fundo	79
3.3.2.7	Erro de amostra espacial na presença de elevado ruído de fundo	81
3.3.2.8	Erro devido ao tempo de integração na presença de elevado ruído de fundo	83
3.2.2.9	Erro gerado pela velocidade do fluxo de ar, turbulência e protetores de vento no desempenho da sonda	85
3.4	INFLUÊNCIA DA DIMENSÃO DA SUPERFÍCIE DE MEDIÇÃO NA DETERMINAÇÃO DO NÍVEL DE POTÊNCIA SONORA	86
3.5	INCERTEZAS DE MEDIÇÃO DO NÍVEL DE POTÊNCIA SONORA OBTIDO POR OUTROS MÉTODOS	90
4	METODOLOGIA	92
4.1	SELEÇÃO DA NORMA UTILIZADA	92
4.2	SELEÇÃO DO EQUIPAMENTO E SISTEMA DE CALIBRAÇÃO	93
4.2.1	Seleção do analisador de frequência	93
4.2.2	Seleção dos microfones e seu posicionamento na sonda de medição	93
4.2.3	Sistema de calibração	94
4.2.4	Equipamento selecionado	96
4.3	PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO	100
4.3.1	Determinação da dimensão da superfície de medição	103
4.3.2	Critérios para se atingir a precisão adequada	105
4.3.3	Procedimento de Varredura	106
4.4	DETERMINAÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÃO	107
4.5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	108
5	RESULTADOS E ANÁLISE	109
5.1	CONDIÇÃO AMBIENTAL DE ALTO RUÍDO DE FUNDO, BAIXO TEMPO DE REVERBERAÇÃO E VOLUME DA SALA DE 487 m ³	110

5.2	CONDIÇÃO AMBIENTAL DE BAIXO RUÍDO DE FUNDO, BAIXO TEMPO DE REVERBERAÇÃO E VOLUME DA SALA DE 487 m ³	116
5.3	CONDIÇÃO AMBIENTAL DE ALTO RUÍDO DE FUNDO, ALTO TEMPO DE REVERBERAÇÃO E VOLUME DA SALA DE 5100 m ³	124
5.4	CONDIÇÃO AMBIENTAL DE ALTO RUÍDO DE FUNDO, BAIXO TEMPO DE REVERBERAÇÃO E VOLUME DA SALA DE 78 m ³	131
5.5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	137
6	CONCLUSÃO	142
	REFERÊNCIAS	148
Apêndice A	CONDIÇÕES AMBIENTAIS	158
Apêndice B	ÍNDICES DE CAMPO	160
Apêndice C	RESULTADOS OBTIDOS	165
Apêndice D	ERROS	174

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Desvio padrão sugerido pela norma ISO 9614-2 (1995)	60
Tabela 3.2	Desvio padrão sugerido pela norma ISO 9614-3 (2002)	61
Tabela 4.1	Índices de correção dos microfones de campo livre B&K4181 fornecidos pelo fabricante	98
Tabela 4.2	Comparação das áreas das superfícies utilizadas em relação à área da fonte e do suporte de medição	104
Tabela 4.3	Resumo das medições realizadas em cada condição ambiental	104
Tabela 5.1	Resumo da análise dos resultados	141
Tabela 6.1	Comparação entre a metodologia utilizada neste trabalho e a ISO 9614-2 (1995) para seleção do equipamento de medição	144
Tabela 6.2	Comparação entre a metodologia utilizada neste trabalho e a ISO 9614-2 (1995) para o procedimento de medição	145
Tabela 6.3	Comparação entre a metodologia utilizada neste trabalho e a ISO 9614-2 (1995) para a correção dos resultados	147

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Distribuição dos vetores devido à interferência de fontes externas, Fahy (1995).	47
Figura 3.2	Superfície de contorno de uma fonte sonora, Bruel Kjaer (1997)	48
Figura 3.3	Erro causado pela aproximação de diferença finita na intensimetria, Bruel & Kjaer (1997)	51
Figura 3.4	Erro devido à aproximação de diferenças finitas para diferentes separações de microfones segundo as equações 3.28a, 3.28b e 3.29 para ondas planas	54
Figura 3.5	Erro do nível de intensidade sonora devido à aproximação de diferenças finitas e ressonância da cavidade dos microfones de 1/2", para uma onda plana de incidência axial com diferentes separações de microfones, Jacobsen, Cutanda e Jhul (1996)	56
Figura 3.6	Erro do nível de intensidade sonora devido à aproximação de diferenças finitas e ressonância da cavidade dos microfones de 1/2", para uma onda plana devido à variação do ângulo de incidência do vetor intensidade, Jacobsen, Cutanda e Jhul (1996):	57
Figura 3.7	Erro do nível de potência sonora devido à aproximação de diferenças finitas e ressonância da cavidade dos microfones de 1/2", para uma onda plana de incidência axial com diferentes separações de microfones, sem ruído de fundo na condição de campo livre, Jacobsen, Cutanda e Jhul (1998)	58
Figura 3.8	Erro do nível de potência sonora devido à aproximação de diferenças finitas e ressonância da cavidade dos microfones de 1/2", para uma onda plana de incidência axial com diferentes separações de microfones, na condição de campo livre, Jacobsen, Cutanda e Jhul (1998)	59
Figura 3.9	Desarranjo e diferença de fase entre dois vetores, Fahy (1995).	63
Figura 3.10	Esquema de posicionamento da sonda para correção do erro de fase, Jacobsen (1991)	65
Figura 3.11	Valor típico do Índice Pressão Intensidade residual, δ_{PII} , Fahy (1995).	70
Figura 3.12	Valor do $e_{\phi}(l)$ e seu correspondente valor de $10 \log (1 + e_{\phi}(l))$, em função do Índice de Erro de Fase, L_{ϕ} , Fahy (1995).	70
Figura 4.1	Posicionamento de microfones para calibração, Fahy (1995).	95
Figura 4.2	Analizador de Frequência B&K 2260, Sonda de Intensimetria B&K 3595, Microfones B&K 4181, e protetor de vento.	97
Figura 4.3	Analizador de Frequência Larson Davis 3200.	97

Figura 4.4	Valor típico do ruído elétrico do analisador de frequência B&K 2260 Bruel & Kjaer (1997)	98
Figura 4.5	Valor típico do ruído elétrico do analisador de frequência Larson Davis 3200	98
Figura 4.6	Valor do Índice Pressão Intensidade Residual, δ_{PI0} , obtido através da calibração interna do analisador de frequência B&K 2260, Bruel Kjaer (1997)	99
Figura 4.7	Calibração de sensibilidade dos microfones com calibrador B&K 4231, Bruel Kjaer (1997)	100
Figura 4.8	Ilustração da calibração das fases dos transdutores com calibrador B&K 3541, Bruel Kjaer (1997)	100
Figura 4.9	Ilustração das varreduras ortogonais da sonda em uma superfície de medição, Bruel Kjaer (1997)	107
Figura 5.1	Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M1 a M6, superfície 40	111
Figura 5.2	Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M7 a M12, superfície 60	111
Figura 5.3	Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M13 a M18, superfície 80	111
Figura 5.4	Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M19 a M24, superfície 110	111
Figura 5.5	Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M25 a M30, superfície 130	111
Figura 5.6	Desvios da média logarítmica das superfícies 40 (M1 a M6), 60 (M7 a M12), 80 (M13 a M18), 110 (M19 a M24), e 130 (M25 a M30) obtidas através da ISO 9614-2 (1995), sem correção, em relação a ISO 3741 (1999)	112
Figura 5.7	Fator de superfície (F_{sup}) das superfícies 40 (M1 a M6), 60 (M7 a M12), 80 (M13 a M18), 110 (M19 a M24), e 130 (M25 a M30)	112
Figura 5.8	Somatória das médias logarítmicas dos erros das superfícies 40 (M1 a M6), 60 (M7 a M12), 80 (M13 a M18), 110 (M19 a M24), e 130 (M25 a M30) devido à diferença de fase na presença de elevado ruído de fundo, tempo de amostra e tempo de integração	113
Figura 5.9	Índice de Pressão Intensidade de Absorção, δ_{abs} , das superfícies 40 (M31 a M33), 60 (M34 a M36), 80 (M37 a M39), 110 (M40 a M42), e 130 (M43 a M45)	114
Figura 5.10	Média logarítmica dos erros das superfícies 40 (M1 a M6), 60 (M7 a M12), 80 (M13 a M18), 110 (M19 a M24), e 130 (M25 a M30)	114
Figura 5.11	Desvios da média logarítmica das medições das superfícies 40 (M1 a M6), 60 (M7 a M12), 80 (M13 a M18), 110 (M19 a M24), e 130 (M25 a M30), com correções, obtidas através da ISO 9614-2 (1995), em relação a ISO 3741 (1999)	115
Figura 5.12	Desvios dos valores globais em dB(A) da média logarítmica das medições M1 a M30 em relação a ISO 3741 (1999) sem correções	116

Figura 5.13	Desvios dos valores globais em dB(A) da média logarítmica das medições M1 a M30 em relação a ISO 3741 (1999) com correções	116
Figura 5.14	Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M46 a M51, superfície 40	117
Figura 5.15	Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M42 a M57, superfície 60	117
Figura 5.16	Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M58 a M63, superfície 80	117
Figura 5.17	Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M64 a M69, superfície 110	117
Figura 5.18	Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M70 a M75, superfície 130	117
Figura 5.19	Desvios da média logarítmica das superfícies 40 (M46 a M51), 60 (M52 a M57), 80 (M58 a M63), 110 (M64 a M69), e 130 (M70 a M75), obtidas através da ISO 9614-2 (1995), sem correção, em relação a ISO 3741 (1999)	118
Figura 5.20	Fator de superfície (F_{sup}) das superfícies 40 (M46 a M51), 60 (M52 a M57), 80 (M58 a M63), 110 (M64 a M69), e 130 (M70 a M75)	119
Figura 5.21	Somatória das médias logarítmicas das superfícies 40 (M46 a M51), 60 (M52 a M57), 80 (M58 a M63), 110 (M64 a M69), e 130 (M70 a M75), dos erros de diferença de fase na presença de elevado ruído de fundo, tempo de amostra e tempo de integração	119
Figura 5.22	Índice de Pressão Intensidade de Absorção das superfícies de 40 (M76 a M78), 60 (M79 a 81), 80 (M82 a M84), 110 (M85 a M87), e 130 (M88 a M90)	120
Figura 5.23	Média logarítmica dos erros das superfícies 40 (M76 a M78), 60 (M79 a M81), 80 (M82 a M84), 110 (M85 a M87), e 130 (M88 a M90), devido a absorção da fonte	120
Figura 5.24	Desvios da média logarítmica das medições das superfícies 40 (M46 a M51), 60 (M52 a M57), 80 (M58 a M63), 110 (M64 a M69), e 130 (M70 a M75), com correções, obtidas através da ISO 9614-2 (1995), em relação a ISO 3741 (1999)	121
Figura 5.25	Desvios dos valores globais em dB(A) da média logarítmica das medições M46 a M75 em relação a ISO 3741 (1999) sem correções	121
Figura 5.26	Desvios dos valores globais em dB(A) da média logarítmica das medições M46 a M75 em relação a ISO 3741 (1999) com correções	121
Figura 5.27	Média logarítmica dos erros das superfícies 40 (M46 a M51), 60 (M52 a M57), 80 (M58 a M63), 110 (M64 a M69), e 130 (M70 a M75), devido a absorção da fonte utilizando o $\delta_{pi, ZERO}$ obtido nas superfícies 40 (M31 a M33), 60 (M34 a M36), 80 (M37 a M39), 110 (M40 a M42), e 130 (M43 a M45)	122
Figura 5.28	Desvios da média logarítmica das superfícies 40 (M46 a M51), 60 (M52 a M57), 80 (M58 a M63), 110 (M64 a M69), e 130 (M70 a M75), com correções devido ao efeito da absorção utilizando o $\delta_{pi, ZERO}$ obtido nas superfícies 40 (M31 a M33), 60 (M34 a M36), 80 (M37 a M39), 110 (M40 a M42), e 130 (M43 a M45) em relação a ISO 3741 (1999)	123
Figura 5.29	Desvios dos valores globais em dB(A) da média logarítmica das medições	

	M46 a M75 devido ao efeito da absorção, utilizando o $\delta_{pi, ZERO}$ apenas na condição de baixo tempo de reverberação e baixo ruído de fundo, em relação a ISO 3741 (1999) com correções	123
Figura 5.30	Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M91 a M96, superfície 40	125
Figura 5.31	Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M97 a M102, superfície 60	125
Figura 5.32	Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M103 a M108, superfície 80	125
Figura 5.33	Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M109 a M114, superfície 110	125
Figura 5.34	Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M115 a M120, superfície 130	125
Figura 5.35	Desvios da média logarítmica superfícies 40 (M916 a M96), 60 (M97 a M102), 80 (M103 a M108), 110 (M109 a M114), e 130 (M115 a M120), obtidas através da ISO 9614-2 (1995), sem correção, em relação a ISO 3741 (1999)	127
Figura 5.36	Fator de superfície (F_{sup}) superfícies 40 (M916 a M96), 60 (M97 a M102), 80 (M103 a M108), 110 (M109 a M114), e 130 (M115 a M120)	127
Figura 5.37	Somatória das médias logarítmicas superfícies 40 (M91 a M96), 60 (M97 a M102), 80 (M103 a M108), 110 (M109 a M114), e 130 (M115 a M120) devido as erros devido a diferença de fase na presença de elevado ruído de fundo, tempo de amostra e tempo de integração	127
Figura 5.38	Índice de Pressão Intensidade de Absorção das superfícies de 40 (M121 a M123), 60 (M124 a 126), 80 (M127 a M129), 110 (M130 a M132), e 130 (M133 a M135)	128
Figura 5.39	Média logarítmica dos erros devido a absorção da fonte das superfícies de 40 (M91 a M96), 60 (M97 a 102), 80 (M103 a M108), 110 (M109 a M114), e 130 (M115 a M120)	128
Figura 5.40	Desvios da média logarítmica superfícies 40 (M916 a M96), 60 (M97 a M102), 80 (M103 a M108), 110 (M109 a M114), e 130 (M115 a M120), com correções, obtidas através da ISO 9614-2 (1995), em relação a ISO 3741 (1999)	129
Figura 5.41	Desvios dos valores globais em dB(A) da média logarítmica das medições M91 a M120 em relação a ISO 3741 (1999) sem correções	129
Figura 5.42	Desvios dos valores globais em dB(A) da média logarítmica das medições M91 a M120 em relação a ISO 3741 (1999) com correções	129
Figura 5.43	Média logarítmica dos erros superfícies 40 (M91 a M96), 60 (M97 a M102), 80 (M103 a M108), 110 (M109 a M114), e 130 (M115 a M120) devido a absorção da fonte utilizando o $\delta_{pi, ZERO}$ obtido nas superfícies 40 (M31 a M33), 60 (M34 a M36), 80 (M37 a M39), 110 (M40 a M42), e 130 (M435 a M45)	130
Figura 5.44	Desvios da média logarítmica superfícies 40 (M91 a M96), 60 (M97 a M102), 80 (M103 a M108), 110 (M109 a M114), e 130 (M115 a M120), devido a absorção da fonte utilizando o $\delta_{pi, ZERO}$ obtido nas superfícies 40 (M31 a M33), 60 (M34 a M36), 80 (M37 a M39), 110 (M40 a M42), e 130 (M435 a M45), obtidas através da ISO 9614-2 (1995) em relação a ISO 3741 (1999)	130

Figura 5.45	Desvios dos valores globais em dB(A) da média logarítmica das medições M46 a M75 devido ao efeito da absorção, utilizando o $\delta_{pi, ZERO}$ apenas na condição de baixo tempo de reverberação e baixo ruído de fundo, em relação a ISO 3741 (1999) com correções	131
Figura 5.46	Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M135 a M141, superfície 40	132
Figura 5.47	Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M142 a M147, superfície 60	132
Figura 5.48	Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M148 a M153, superfície 80	132
Figura 5.49	Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M154 a M159, superfície 110	132
Figura 5.50	Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M160 a M166, superfície 130	132
Figura 5. 51	Desvios da média logarítmica superfícies 40 (M136 a M141), 60 (M142 a 147), 80 (M148 a M153), 110 (M154 a M159), e 130 (M160 a M166) obtidas através da ISO 9614-2 (1995), sem correção, em relação a ISO 3741 (1999)	134
Figura 5.52	Fator de superfície (F_{sup}) para as superfícies 40 (M136 a M141), 60 (M142 a 147), 80 (M148 a M153), 110 (M154 a M159), e 130 (M160 a M166)	134
Figura 5.53	Somatória das médias logarítmicas dos erros devido a diferença de fase na presença de elevado ruído de fundo, tempo de amostra e tempo de integração para as superfícies 40 (M136 a M141), 60 (M142 a 147), 80 (M148 a M153), 110 (M154 a M159), e 130 (M160 a M166)	134
Figura 5.54	Índice de Pressão Intensidade de Absorção das superfícies 40 (M136 a M141), 60 (M142 a 147), 80 (M148 a M153), 110 (M154 a M159), e 130 (M160 a M166)	135
Figura 5.55	Média logarítmica dos erros devido a absorção da fonte das superfícies 40 (M136 a M141), 60 (M142 a 147), 80 (M148 a M153), 110 (M154 a M159), e 130 (M160 a M166)	135
Figura 5.56	Desvios da média logarítmica das superfícies 40 (M136 a M141), 60 (M142 a 147), 80 (M148 a M153), 110 (M154 a M159), e 130 (M160 a M166), com correções, obtidas através da ISO 9614-2 (1995), em relação a ISO 3741 (1999)	136
Figura 5.57	Desvios dos valores globais em dB(A) da média logarítmica das medições M46 a M75 em relação a ISO 3741 (1999) sem correções	136
Figura 5.58	Desvios dos valores globais em dB(A) da média logarítmica das medições M46 a M75 em relação a ISO 3741 (1999) com correções	136

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Raio de uma esfera fictícia que envolve a fonte
A	Área da superfície do volume de medição
A_0	Amplitude da onda
B	Largura da banda de frequência
c	Velocidade do som no ar
d	Distância de separação entre os microfones
e	Energia sonora
e	Número neperiano
$e(l)$	Erro normalizado da intensidade sonora
$e_\phi(l)$	Erro normalizado da intensidade sonora devido ao desarranjo de fase
$e(p)$	Erro normalizado da pressão sonora
$e(u)$	Erro normalizado da velocidade da partícula
$e_{abs}(W)$	Erro normalizado da potência sonora devido à absorção da fonte
$e_{am}(W)$	Erro normalizado da potência sonora devido a quantidade de amostra
$e_t(W)$	Erro normalizado da potência sonora devido ao tempo de varredura
$e_\phi(W)$	Erro normalizado da potência sonora devido ao desarranjo de fase
f	Frequência da onda sonora em Hz
f_0	Frequência central de 1/1 de oitava em Hz
F_2	Índice pressão intensidade sonora com o valor da intensidade sonora em módulo, ISO 9614-1
F_3	Índice pressão intensidade sonora com o valor real da intensidade, ISO 9614-1
F_{PI}	Índice pressão intensidade sonora com o valor da intensidade sonora em módulo, ISO 9614-2
F_{sup}	Fator de superfície
$F_{+/-}$	Índice de potência parcial, ISO 9614-2
G_{12}	Parte imaginária da densidade de espectros cruzados dos microfones 1 e 2
h	Metade da distância de separação entre os microfones na sonda de medição
I_0	Componente da Intensidade sonora residual
I_i	Valor médio da intensidade sonora no eixo da sonda
$I(n)$	Intensidade sonora média na direção do vetor $\vec{n}$
$I(t)$	Intensidade sonora média na direção do vetor $\vec{n}$ em função do tempo
$I(W)$	Intensidade sonora no domínio da frequência
$I_{n,medida}$	Intensidade sonora média na direção do vetor $\vec{n}$ obtida durante as medições
$I_{n,zero}$	Intensidade sonora média na direção do vetor $\vec{n}$ obtida no “zero teste”
I_r	Componente real da intensidade sonora

$\hat{I}_r$	Componente estimada da intensidade sonora sujeita a erros de medição
I_{ref}	Valor de referência da intensidade sonora (10^{-12} w/m^2)
k	número da onda
K	Fator de erro de fase
l	Comprimento total da linha de varredura
L_D	Capacidade dinâmica da instrumentação
$Le(l)$	Erro da intensidade sonora média na forma logarítmica (dB)
$Le(W)$	Erro da potência sonora média na forma logarítmica (dB)
$Le_{abs}(W)$	Erro normalizado da potência sonora na forma logarítmica (dB) devido a absorção da fonte sonora
L_i	Nível de intensidade sonora
L_p	Nível de pressão sonora
L_ϕ	Índice de erro de fase
$\vec{n}$	Direção do vetor intensidade
N_{eq}	Número de variáveis estatísticas independentes
p	Pressão sonora do média
$\langle p^2 \rangle$	Pressão sonora média quadrática
$\langle p_0^2 \rangle$	Pressão sonora média quadrática residual
$p(n,t)$	Pressão Sonora na direção do vetor $\vec{n}$ no tempo t
p_1 e p_2	Pressão sonora medida nos pontos 1 e 2 em função do tempo
p_{ref}^2	Valor de referência da pressão sonora quadrática
$p'(t)$	Primeira derivada da pressão sonora em função do tempo
$p''(t)$	Segunda derivada da pressão sonora em função do tempo
P_1 e P_2	Pressão sonora média medida pelos microfones 1 e 2
$P_e(t)$	Erro no valor de pressão sonora devido a aproximação de diferença finita calculado através de uma série de Taylor
r	Distância entre a fonte e a superfície de medição
r_1 , r_2	Distância entre a fonte e os microfones 1 e 2
Re	Parte real da densidade espectral cruzada
R_{pz}	Função de correlação cruzada
S_0	Área da superfície do volume de medição
S_{pz}	Função de densidade espectral cruzada
t	Tempo
T	Tempo médio de integração
T_{60}	Tempo de reverberação para um decaimento de 60 dB
u	Velocidade instantânea da partícula
$u(n)$	Velocidade da partícula na direção do vetor n

$U_e(t)$	Erro na velocidade da partícula devido aproximação por diferença finita calculada através de uma série de Taylor
w	Fator de peso
W	Potência sonora
$W_{\text{absorvida}}$	Potência sonora absorvida pela fonte ou superfície de medição
W_{medida}	Potência sonora obtida através da intensimetria
W_{real}	Potência sonora real
W_s	Potência sonora média
W_{tot}	Potência sonora total do ambiente
v	Velocidade de varredura
V	Volume do ambiente
δ_{abs}	Índice pressão intensidade sonora absorvida
δ_{PI}	Índice pressão intensidade sonora
$\delta_{\text{PI,zero}}$	Índice pressão intensidade sonora obtida durante o “zero teste”
δ_{PI0}	Índice pressão intensidade sonora residual
ϕ_i	Diferença de fase entre as ondas sonoras captadas pelos microfones 1 e 2
ϕ_s	Desarranjo de fase entre os canais do sistema de medição
ϕ_0	Diferença de fase entre as ondas sonoras captadas pelos microfones 1 e 2 de uma onda plana de referencia
ϕ_1 e ϕ_2	Ângulos de fase captados pelos microfones 1 e 2
λ	Comprimento de onda
π	Número pi
ρ_o	Densidade do fluido
ω	Freqüência angular da onda sonora medida em radianos
Δ_r	Distância de separação entre os microfones 1 e 2
$\partial / \partial t$	Derivada de uma função em relação ao tempo
$\partial / \partial n$	Derivada de uma função em relação a posição
$\int dt$	Integral de uma função em relação ao tempo
$\int d\tau$	Integral de uma função em relação ao tempo
$\int dw$	Integral de uma função em relação a freqüência
$\nabla I(t)$	Gradiente do vetor intensidade sonora no domínio do tempo
$ \quad $	Módulo de uma função

BRITO, L. A. P. F. **Correções na determinação do nível de potência sonora obtido através da técnica intensimetria**, 2006, 181pp, Tese (Doutorado), Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas

RESUMO

Várias cidades brasileiras estão enfrentando problemas de poluição sonora. O ruído de tráfego é a principal causa de incômodo seguido pelo ruído gerado pelos equipamentos utilizados na construção civil. É imperativo que sejam criados parâmetros para controlar a emissão e propagação do ruído gerado pela construção civil para manter uma certa qualidade de vida nas grandes cidades. O nível de potência sonora é um importante parâmetro para análise da propagação sonora no meio ambiente. Pode-se determinar o nível de potência sonora através da medição de intensidade sonora, *in situ*, mesmo na presença de outras fontes de ruído. Assim não é necessária a remoção do equipamento analisado para câmaras anecóicas ou reverberantes. Este trabalho estuda as correções na determinação do nível de potência sonora obtido através da técnica da intensimetria. Deve-se destacar a compilação do estado da arte sobre o assunto. Foram selecionados uma norma e um sistema de medição que possam ser utilizados nos canteiros de obras e indústrias ligadas a construção civil. Os resultados das medições do nível de potência sonora de uma furadeira elétrica, com e sem ruído de fundo, obtidos através da norma ISO 9614-2 (1995) foram comparados aos obtidos em uma câmara reverberante através da norma ISO 3741 (1999). Esta comparação permitiu o estudo de três novos índices de campo, Fator de Absorção, Fator de Superfície e Fator de Relação da Área da Fonte e da Superfície de Medição, que foram utilizados de base para análise dos erros no resultado final do nível de potência sonora, formando uma metodologia confiável, que pode ser utilizada no controle do ruído ambiental

Palavras chave: Intensidade sonora, Potência sonora, Técnica da intensimetria

BRITO, L. A. P. F. **Corrections in the determination of the sound power level obtained through intensimetry technique**, 2006, 181pp, Tese (Doutorado), Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas

ABSTRACT

Many Brazilian cities are facing noise pollution problems. Traffic noise is the main cause of inconvenience followed by noise generated by equipments used in civil construction. In order to maintain a certain life quality level in large cities it is paramount to control noise emission and propagation generated by civil construction. Sound power level is an important parameter to analyze environmental sound propagation. The sound power level can be determined through *in situ* measurement of sound intensity even in the presence of other sound sources. Therefore, it is not necessary to remove the analyzed equipment to anechoic or reverberation chambers. This work studies the corrections in the determination of the sound power level obtained through intensity technique. The state of art compilation about the subject should be pointed out. Both a standard and a measurement system, which can be used at construction sites and industries related to civil construction, were selected. Results from the sound power level measurements of an electric drill, with and without background noise, acquired through the standard ISO 9614-2 (1995) were compared to those acquired in a reverberation chambers through the standard ISO 3741 (1999). This comparison allowed to study three new field indicators, the Absorption Factor, the Surface Factor and the Relation of Source to Measured Surface Area Factor which were used as base in the error analysis of the final result on sound power level, providing a reliable methodology that can be used in the control of environmental noise.

Key words: Sound Intensity, Sound power, Intensity technique

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Cada vez mais, as grandes cidades têm sido alvo da deterioração da qualidade de vida em uma das causas é o excesso de ruído (MORAES e LARA, 2005). A poluição sonora causa danos à saúde (física e psicológica) da população (NIEMEYER e SANTOS, 2001) e, do ponto de vista da percepção dos cidadãos, pode ser considerado um dos principais elementos de degradação ambiental na escala urbana (PEREIRA e SLAMA, 2001). Este efeito negativo da poluição sonora é devido, em geral, ao crescimento desordenado das cidades, já que muitas delas não possuem um Plano Diretor para organizar seu meio urbano colocando lado a lado zonas industriais e de entretenimento com zonas residenciais.

Devido a esta realidade muitos trabalhos foram realizados nos últimos anos no sentido de identificar e buscar soluções para este crescente problema. A grande maioria destes trabalhos ficou concentrada no ruído gerado pelo trânsito de automóveis e veículos utilitários. Segundo Schimtt et al (2000) na cidade de Porto Alegre a predominância das reclamações sobre excesso de ruído encaminhadas à Prefeitura Municipal se originam das casas de espetáculos e boates no horário noturno, e das prestadoras de serviço ligadas à construção civil no horário diurno. A intervenção do poder público no primeiro caso é relativamente simples, pois as fontes geradoras de ruído são facilmente identificáveis e existe legislação pertinente para a solução. O mesmo não acontece com as atividades da construção civil. O ritmo de crescimento das cidades é constante e a construção civil é a grande impulsora deste crescimento, não podendo ser simplesmente proibida. Nos últimos anos a construção civil tem utilizado processos construtivos industrializados, como estruturas metálicas, sistemas de vedação e divisórias pré-moldadas o que têm contribuído para o aumento da poluição sonora. Sattler, Rott e Coradine (1995), em uma pesquisa com a população sobre o ruído ambiental na cidade de Porto Alegre, obtiveram como resposta que a construção civil é a segunda maior fonte de ruído naquela cidade para 50% dos 321 entrevistados, ficando apenas atrás do ruído gerado pelo tráfego de veículos pesados. Rolla (1996) verificou que o ruído gerado por

máquinas e equipamentos na construção civil é a segunda maior fonte de incômodo à comunidade na região de Campinas, sendo superada apenas pelo ruído do tráfego de automóveis.

Assim, para haver um certo nível de conforto nas grandes cidades o ruído gerado pela construção civil e suas atividades afins devem ser estudados e controlados.

1.1 JUSTIFICATIVA

Para ser possível o controle do ruído gerado pela construção civil e pelas atividades industriais afins é necessário, em primeiro lugar, identificar as fontes geradoras de ruído e mensurar a energia sonora irradiada. Desta maneira haverá uma base de dados confiável para estudos da propagação do ruído ambiental em um segundo momento.

Os equipamentos de pequeno porte são a grande maioria dos equipamentos utilizados nos canteiros de obras e em instalações industriais que servem de apoio à construção civil. Serralherias, caldeirarias, serrarias, marmorarias são exemplos de pequenas indústrias que se espalham pelo meio urbano e nos canteiros de obras e trabalham predominantemente com furadeiras, serras de disco e corte, lixadeiras de disco e corte, serras tico-tico, de fita, que são considerados equipamentos de pequeno porte. Maia (2001) realizou um levantamento sobre as fontes de ruído na construção civil e obteve os níveis de pressão sonora de vários equipamentos em suas condições de trabalho. Com muita facilidade o nível de pressão sonora destes equipamentos superou a marca de 100dB(A). Portanto estes equipamentos, apesar do pequeno porte, são responsáveis por uma parcela considerável da degradação das condições ambientais.

O ruído irradiado por uma fonte sonora pode ser quantificado por pelo menos três grandezas: pressão, potência e intensidade sonora. O nível de pressão sonora de um equipamento pode ser obtido através de um medidor de pressão sonora, mas é altamente influenciável por fatores como a reflexão, difração, absorção e difusão sonora, proporcionados por paredes e objetos em um campo fechado e também pela distância entre a fonte de ruído e o medidor em campos abertos. O nível de potência sonora não é

influenciado pelas características dos campos abertos ou fechados sendo uma característica intrínseca da fonte, válido em qualquer situação. O conhecimento do nível de potência sonora de um equipamento permite que este seja classificado através desta grandeza, sendo portanto uma ferramenta importante na sua classificação quanto a emissão de energia sonora. O nível de intensidade sonora pode ser determinado a partir da pressão sonora, como mostra Gerges (1992). Mas neste processo obtêm-se apenas a parte escalar da intensidade e também deve ser executado em salas com características acústicas especiais. Para determinação da direção e sentido pode-se utilizar a técnica da intensimetria proposta por Fahy (1977a). Esta técnica permite que as medições sejam realizadas no campo, sem necessidade de câmaras anecóicas ou reverberantes. Permite também, a partir do vetor intensidade sonora, obter a potência sonora da fonte pela integração deste vetor sobre a área da superfície de um volume pré-determinado.

O estudo da influência que uma fonte sonora produzirá em um dado ambiente é a principal aplicação prática da determinação do nível de potência sonora. É também a grandeza acústica mais indicada em que se pode basear para comparações entre equipamentos de diferentes fornecedores e para o controle por legislação e regulamentações. Metodologias de estudo da propagação do ruído ambiental são baseados no nível de potência sonora dos equipamentos. Mas os processos de obtenção do nível de potência sonora através da pressão sonora utilizados atualmente são dispendiosos e demorados pela necessidade de serem executados em salas com características acústicas especiais. Este fato gera quase que um desconhecimento da potência sonora irradiada por este tipo de equipamentos.

Desta maneira, a determinação do nível de potência sonora de equipamentos de pequeno porte ligados à construção civil, de uma maneira rápida e prática, assume um papel tão importante no controle do ruído ambiental.

A técnica da intensimetria é uma alternativa para determinação do nível de potência sonora, sendo possível implementá-la no seu próprio local de trabalho. Esta característica torna conveniente sua utilização na construção civil e em ambientes industriais, pois os equipamentos não precisam ser removidos, continuam produzindo e o tempo e custo de medição é sensivelmente menor que o gasto pelo método de pressão.

Atualmente a utilização da técnica da intensimetria para a determinação do nível de potência sonora de equipamentos é pouco utilizada. Alguns fatores contribuem para esta situação:

A técnica da intensimetria apresenta uma série de obstáculos na obtenção do resultado real do nível de potência sonora, o que vem sendo estudado por um grande número de autores. Segundo Jacobsen (2001), *“a grande quantidade de erros possíveis na técnica de intensimetria é refletida na extensa quantidade de trabalhos publicados, dispersos em artigos e textos, além de uma norma internacional extremamente complicada”*. As normas: ISO 9614-1 (1993) *Acoustics determination of sound power levels of noise sources using sound intensity – Measurements in discrete points* e ISO 9614-2 (1995) *Acoustics determination of sound power levels of noise sources using sound intensity – Measurements for scanning*, que regulamentam este método em alguns pontos não são muito objetivas. A norma: a ISO 9614-3 (2002) *Acoustics determination of sound power levels of noise sources using sound intensity – Precision method by scanning* que estabeleceu métodos mais precisos, mas com condições de medições muito rigorosas. A publicação mais completa e recente sobre o tema é a de Fahy (1995). Desde então muitas metodologias de determinação dos erros de medição e correção de resultados foram estudadas e publicadas, mas estão dispersas em vários trabalhos. Essas metodologias ainda não foram testadas em conjunto e algumas vão contra as normas em vigor, pois incorporam evoluções nos equipamentos e a experiência adquirida com o passar dos anos.

Outra característica da intensimetria é a matemática envolvida para o bom entendimento do método, nem sempre trivial e acessível o que limita ou desencoraja sua maior utilização, além de como já dito, não haver um estudo atualizado e agrupado sobre os desvios de medição.

Assim, para que seja possível a difusão e utilização da técnica de intensimetria para determinação do nível de potência sonora de equipamentos de pequeno porte utilizados na construção civil e indústrias de suporte é necessário um melhor conhecimento dos erros de medição e as possíveis metodologias de correção. Desta maneira, a técnica da intensimetria auxiliará na criação de um banco de dados atualizado das principais fontes

emissoras de ruído ao ambiente urbano, que servirá de base para futuras análises ambientais e novas legislações.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é determinar os erros associados à medição do nível de potência sonora de máquinas e equipamentos de pequeno porte ligados à construção civil através da técnica de intensimetria a partir do desenvolvimento e novos índices de campo de modo que possam ser eliminados, minimizados ou implementadas correções no resultado final.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos fazem parte de uma metodologia para se atingir o objetivo principal. Assim, podem ser divididos da seguinte maneira:

- Agrupar a evolução da técnica de intensimetria, principalmente a partir do ano de 1995, de modo que este conhecimento esteja disponível em apenas um documento.
- Determinar o peso de cada erro no valor final do nível de potência sonora obtido pela técnica da intensimetria e quais parâmetros influem na sua evolução.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho como um todo deve gerar produtos de maneira que os objetivos listados sejam atingidos.

No Capítulo 2 a técnica de obtenção do nível de potência sonora através da intensimetria é apresentada, junto a uma revisão histórica e bibliográfica do tema.

A teoria com a fundamentação matemática e física da obtenção da intensidade são apresentadas no Capítulo 3. Os pensamentos dos principais pesquisadores sobre o assunto são agrupados, explicitados e discutidos de forma a torná-los acessíveis a profissionais em nível de graduação para que a técnica seja mais difundida. As fontes de erro no processo de medição são analisadas e possíveis correções propostas junto com os indicadores de campo tradicionais e os novos propostos neste trabalho. São apresentadas as equações necessárias para determinação dos erros e índices de campo.

A apresentação de uma metodologia de medição baseada na seleção de uma norma adequada aos objetivos deste trabalho, a seleção de um sistema de medição que atenda os requisitos desta norma, os cuidados com as condições ambientais, os critérios de validação dos resultados através dos índices de campo e os procedimentos de correção dos valores obtidos compõem o Capítulo 4. Neste Capítulo, também é selecionada uma metodologia de medição de precisão que será considerada como referência nos cálculos dos erros.

No Capítulo 5 são discutidos os erros oriundos do processo de medição utilizado. Os índices de campo são analisados de maneira que se possa eliminar ou quantificar os erros envolvidos no processo.

As conclusões serão apresentadas no Capítulo 6, onde é discutida a influência de cada tipo de erro no nível de potência sonora obtido e quais parâmetros influem nestes erros, bem como as sugestões para continuidade deste trabalho. São apresentadas também recomendações práticas para o procedimento de medição em comparação a norma ISO 9614-2 (1995).

Para uma melhor seqüência de leitura do texto, algumas informações serão apresentadas em quatro Apêndices. No Apêndice A são apresentadas as condições ambientais e as características físicas dos locais de medição. Os índices de campo obtidos durante as medições estão no Apêndice B e os valores do nível de potência sonora no Apêndice C. No Apêndice D estão mostrados os erros calculados neste trabalho.

CAPÍTULO 2

APRESENTAÇÃO DA TÉCNICA

O desenvolvimento e domínio de técnicas de predição da propagação de ruído no meio ambiente é de extrema necessidade para a manutenção de uma certa qualidade de vida nas grandes cidades. O nível de potência sonora é a grandeza que serve como base para este estudo, mas sua obtenção é dificultada devido à necessidade da utilização de câmaras especiais. Como alternativa, pode-se obter o nível de potência sonora através da intensimetria. A técnica da intensimetria é conhecida desde o início do século passado, mas demorou a ser utilizada comercialmente devido às limitações dos sistemas de medições disponíveis. Somente com o desenvolvimento de analisadores *Fast Fourier Transform* (FFT) é que foi possível sua utilização comercial. Neste capítulo são apresentadas as vantagens da determinação do nível de potência sonora de uma fonte por meio da técnica da intensimetria e a evolução do método.

2.1 A TÉCNICA DA INTENSIMETRIA

Dentre os parâmetros acústicos que podem ser utilizados no estudo da propagação do ruído ambiental destacam-se o nível de pressão sonora, o nível de potência sonora e o nível de intensidade sonora.

O nível de pressão sonora de um equipamento é obtido através de um medidor de pressão sonora, mas é altamente influenciável por fatores como a reflexão, difração, absorção e difusão sonora, produzidos por paredes e objetos em um campo fechado e pela distância entre a fonte de ruído e o medidor em um campo aberto. Assim, para sua obtenção, são necessários ambientes especiais, conhecidos como câmaras anecóicas, com características especiais que eliminem estes efeitos. Estas câmaras simulam as condições de um campo livre, sem a influência das ondas refletidas pelas paredes e teto. O altíssimo poder de absorção dos revestimentos internos destas câmaras elimina o

campo reverberante, conseguindo-se assim, condições semelhantes ao campo livre, onde a energia sonora se dispersa sem reflexões. As medições do nível de pressão sonora de uma fonte obtidas em uma câmara anecóica não são válidas para campos fechados. Também não são válidas para campos abertos devido às diferenças de temperatura e pressão do ar, direções dos ventos, condições topográficas do local e características acústicas do solo (vegetação ou concreto). Pode-se concluir então que o nível de pressão sonora é uma característica de uma fonte em uma dada condição meteorológica e de contorno não podendo ser extrapolado para uma outra condição não devendo ser utilizado em metodologias que estudam a propagação do ruído ambiental.

O nível de potência sonora é uma característica intrínseca da fonte, não sendo influenciado pelas características dos campos abertos e fechados, válido em qualquer situação. O conhecimento do nível de potência sonora de um equipamento é uma ferramenta muito valiosa na caracterização de uma fonte de ruído. Deve ser utilizado para a predição futura do nível de pressão sonora de um equipamento desde que sejam determinadas suas condições de contorno, caso esteja em um campo fechado, ou a uma dada distância da fonte, caso esteja em um campo aberto. O nível de potência sonora pode ser determinado em câmaras reverberantes, semi-reverberantes e anecóicas. As câmaras reverberantes são compostas de paredes altamente reflexivas e não paralelas que tem por objetivo a criação de um campo acústico difuso, ou seja, a energia sonora deve ser distribuída uniformemente no volume da câmara. As câmaras semi-reverberantes possuem um campo acústico parcialmente difuso, gerado por um alto campo reverberante. Pode-se considerar como câmaras semi-reverberantes os próprios locais onde os equipamentos estão instalados e funcionando. Para a determinação do nível de potência sonora nestas condições utiliza-se uma fonte de potência sonora calibrada. Por comparação entre medições do nível de pressão sonora a várias distâncias entre a fonte calibrada e a fonte de ruído em análise, determina-se o nível de potência sonora, pois a variação do nível de potência sonora é proporcional a variação do nível de pressão sonora. Porém, este método é passível de vários erros como variação da diretividade da fonte e campo reverberante não uniforme.

Os métodos de medição de nível de pressão sonora e nível de potência sonora são estabelecidos por autores como Beranek (1988), Gerges (1992), Norton (1996) e Smith et

al, (1996) e pela série de normas ISO 11200 *Acoustics, noise emitted by machinery and equipment* (1995) e ISO 3740 *Acoustics determination of sound power level of noise sources* (2000). que apresentam a metodologia de medição e os erros inerentes de cada método.

A necessidade de uso de câmaras reverberantes, semi-reverberantes ou anecóicas para determinação do nível de potência sonora ou nível de pressão sonora acarreta alguns inconvenientes. A construção e manutenção destes locais requerem altos investimentos e tecnologia avançada para sua utilização, sendo disponíveis em apenas alguns institutos de pesquisa e empresas especializadas no assunto. Requerem também que o equipamento seja deslocado até a câmara e que o mesmo fique inoperante por um período de tempo, trazendo prejuízos à empresa proprietária, já que o mesmo deixará de produzir. Em algumas situações existe a dificuldade de se colocar o equipamento que será analisado em funcionamento nas mesmas condições em que é operado na realidade, pois depende de outros para operar ou porque apenas uma parte pode ser transportada para a análise. As condições de temperatura e umidade da câmara também podem não ser as mesmas do seu local de operação. Ou seja, mesmo com muitos cuidados, a medições feita em uma câmara, seja ela anecóica ou reverberante induz a alguns erros e inconvenientes.

O nível de intensidade sonora de uma fonte geradora de ruído é definido como sendo a razão do fluxo normal da energia acústica através de uma unidade de área, sendo uma grandeza vetorial. É proporcional ao quadrado da pressão sonora e pode ser obtida indiretamente através desta, simulando as condições de campo livre em uma câmara anecóica, como mostra Gerges (1992). A pressão sonora é uma grandeza escalar, portanto a determinação da intensidade sonora a partir desta não expressa o caráter vetorial, fundamental para a análise dos principais pontos irradiadores de ruído de uma fonte. Em máquinas e equipamentos pode-se determinar e estudar as suas principais fontes de ruído, uma engrenagem ou correia, por exemplo. A determinação do nível de intensidade sonora como grandeza vetorial pode ser obtida através do produto da pressão sonora pela velocidade instantânea de uma partícula em uma dada direção e sentido. Pode-se obter de uma maneira relativamente simples a pressão sonora de uma fonte, sendo que o mesmo não ocorre com a velocidade instantânea da partícula. Para se obter

a velocidade instantânea da partícula usa-se a equação do movimento de fluidos não viscosos. Olson (1932) mostrou através desta equação que o produto da densidade do fluido pela variação da velocidade da partícula em um espaço de tempo é igual ao gradiente da pressão sonora em uma dada distância conhecida. O gradiente do nível de pressão sonora pôde ser obtido através do uso de dois microfones separados por uma distância pré-estabelecida e, conhecendo a densidade do fluido, determina-se à variação da velocidade da partícula e conseqüentemente o nível de intensidade sonora. Estando estes microfones posicionados de maneira perpendicular ao fluxo de energia sonora obtêm-se o valor máximo do nível de intensidade sonora. Esta técnica de obtenção do nível de intensidade sonora de uma fonte é conhecida por intensimetria. Por um longo período não pode ser utilizada, pois os equipamentos eletrônicos disponíveis não possuíam capacidade de memória suficiente para processamento dos dados coletados. Fahy (1977a, 1977b e 1977c), Chung (1977) e Chung e Pope (1978), de maneira independente, desenvolveram uma técnica de aquisição de dados através da densidade espectral cruzada dos sinais dos microfones, otimizando o sistema de medição e originando uma série de outros trabalhos e publicações.

Das grandezas acústicas, o nível de potência sonora é o que permite melhores condições de predição e controle da propagação do ruído no meio ambiente, por não ser influenciada pelo meio. Para sua determinação é necessário o uso de câmaras especiais ou através da intensimetria.

A determinação do nível de potência sonora em câmaras reverberantes possui uma série de dificuldades práticas de transporte e logística, além de serem necessários locais que requerem altos investimentos de construção e manutenção. Estas podem ser contornadas através da intensimetria, utilizando a relação entre potência e intensidade sonora. A capacidade da intensimetria de mensurar as características vetoriais da intensidade sonora permite determinar o valor máximo do vetor intensidade quando os microfones estiverem na posição perpendicular ao mesmo. Fazendo a integração do vetor intensidade sonora pela área da superfície de um volume pré-definido que envolva a fonte de ruído pode-se obter o nível de potência sonora da fonte analisada. O sistema de medição, em teoria, não é influenciado por ondas sonoras refletidas ou irradiadas por outras fontes, que são externas ao volume que define a superfície de medição. Estas ondas, por estarem em

uma fase diferente das ondas irradiadas diretamente pela fonte sonora analisada, não são captadas pela sonda. Esta característica possibilita a obtenção do nível de potência sonora de fontes de ruído durante seu funcionamento normal, em seu local de trabalho, sem necessidade de interrupções de produção.

As normas: ISO 9614-1 (1993), *Acoustics determination of sound power levels of noise sources by sound intensity measurement – measurements in discrete points*, ISO 9614-2 (1995), *Acoustics determination of sound power levels of noise sources by sound intensity measurement – measurements for scanning* e ISO 9614-3 (2002), *Acoustics determination of sound power levels of noise sources using sound intensity – precision method by scanning* estabelecem os métodos para obtenção do nível de potência sonora através do nível de intensidade sonora.

A ISO 9614-1 (1993), é baseada em uma malha com áreas pré-determinadas, considerados pontos discretos, que subdivide toda a superfície de um volume de medição que envolve a fonte. A sonda de aquisição de dados é posicionada perpendicularmente em cada um desses pontos discretos, onde permanece estática por um período a fim de se eliminar a variação temporal da pressão sonora. A distância entre a sonda de medição e a fonte de ruído é determinada pela dimensão do volume de medição. Esta deve levar em conta as condições do campo acústico do local, as condições ambientais, como temperatura por exemplo. As medições devem ser feitas em banda de frequência de 1/1 de oitava ou 1/3 oitava, nunca diretamente na escala de compensação “A”, que pode ser determinado através da somatória das medições das bandas de frequência de oitava. A malha deve conter ao menos um ponto discreto por m^2 , e em caso de pequenas superfícies devem ser feitas no mínimo 10 medições. A norma estabelece índices de campo que avaliam o campo acústico analisado. Os índices de campo validam ou não a medição. Apresenta também valores máximos de desvio padrão das medições realizadas em bandas de frequência de 1/1 de oitava, 1/3 de oitava, e lineares ponderados na escala “A”.

Na ISO 9614-2 (1995) a sonda de medição permanece em movimento, método de varredura, sobre toda a área da superfície do volume de medição. Os cuidados para determinação da distância entre a sonda e a fonte de ruído são os mesmos do método dos

pontos discretos. Este procedimento é mais ágil que o anterior, mas introduz a dificuldade de manter a sonda em uma velocidade constante, sempre a mesma distância da fonte, e posicionada perpendicularmente à superfície do volume de medição. Estabelece também valores de índices de campo e de desvio padrão para bandas de frequência de 1/1 de oitava e 1/3 de oitava, e lineares ponderados na escala “A”.

Na ISO 9614-3 (2002) também é utilizado o método de varredura. Esta difere da ISO 9614-2 (1995) nos índices de campo, que são mais numerosos e específicos, e no desvio padrão máximo que é mais restritivo. Determina também algumas características mínimas do equipamento de medição.

Segundo Astrup (1997), Fahy (1997) e Jacobsen (2001) os procedimentos de pontos discretos e por varredura apresentam resultados bastante realistas sendo o método de varredura mais prático e rápido.

2.2 EVOLUÇÃO DA TÉCNICA

A intensidade sonora é um fluxo de energia que atravessa perpendicularmente uma unidade de área em uma dada direção, sendo, portanto um vetor, tendo que ser caracterizada pela sua magnitude, sentido e direção e pode ser determinada pelo produto da pressão acústica e da velocidade instantânea da partícula. O princípio da intensimetria foi formulado por Olson (1932, APUD Fahy 1995), utilizando uma sonda com dois microfones que obtinham a pressão sonora. A dificuldade de medição com o sistema proposto era a impossibilidade do posicionamento dos dois microfones no mesmo ponto do espaço. Bolt (1943, APUD Fahy 1995), a fim de determinar a impedância acústica de materiais, *in loco*, desenvolveu a técnica de dois microfones de pressão, deixando uma base para o método atualmente utilizado. Baker (1955, APUD Fahy 1995) utilizou um anemômetro de fio quente, para determinação da velocidade da partícula, em combinação com um microfone de pressão para obter a intensidade sonora. Esta técnica não evoluiu devido à alta influência dos deslocamentos de ar não relacionados ao fluxo da energia acústica gerada pela fonte, dificultando sua utilização em campo. Shults (1956, APUD

Fahy 1995), seguindo o recomendado por Bolt (1943, APUD Fahy 1995), utilizou uma sonda com dois microfones posicionados de costas um para o outro. Estes dois microfones, separados por uma pequena distância, menor que o comprimento de onda de interesse, obtinham valores da pressão que integrados no tempo e subtraídos entre si determinavam o valor da intensidade sonora. O posicionamento dos microfones costa-costa sobrecarregou os circuitos eletrônicos, possibilitando resultados razoáveis apenas em laboratório e para campos acústicos relativamente simples. O trabalho pioneiro na determinação da potência sonora a partir da intensidade sonora foi apresentado por Zyl, Burger e Andersen (1973, APUD FAHY, 1995). Eles propuseram a utilização de um microfone de pressão e outro de velocidade para a obtenção da intensidade sonora concluindo posteriormente a seguir pela superioridade da técnica de utilização de dois microfones de pressão (Zyl, BURGER E ANDERSEN 1979, APUD FAHY, 1995). Desenvolveram também um medidor de intensimetria analógico com uma grande largura de banda e capacidade dinâmica de medição. Nesta mesma época, na Suíça, Lambrich e Stahel (1977) desenvolveram um medidor de intensidade sonora analógico para frequências entre 50 e 500 Hz a ser utilizado na análise do interior de automóveis. Pavic (1977) desenvolveu um sistema misto de sinais digitais e analógicos utilizando dois microfones de pressão e um medidor de nível de pressão sonoro, baseado na técnica apresentada por Olson (1932). Os resultados obtidos estavam influenciados pelo erro de aproximação de diferenças finitas que são sistemáticos a utilização de dois microfones de pressão.

No início da década de 1970 a tecnologia de processamento de sinais foi desenvolvida rapidamente originando os processadores *Fast Fourier Transform* (FFT). Miller (1976, APUD Fahy 1995) foi provavelmente, em sua dissertação de mestrado, o primeiro pesquisador a propor a utilização da parte imaginária da intensidade no domínio da frequência através de um analisador FFT, (FAHY, 1995). Simultaneamente Alfredson (1977) utilizou dois microfones posicionados face-face para determinar a intensidade sonora irradiada por um motor multi-cilíndro a partir dos coeficientes de Fourier expressando a parte real e imaginária. Neste trabalho, Alfredson não separou os microfones com um cilindro sólido, necessário para definição da separação acústica e evitar os efeitos indesejáveis da difração. Lambert e Badie-Cassanet (1977, APUD Fahy

1995), baseados nas transformadas complexas de Fourier, utilizaram dois microfones próximos e testaram um sistema de medição desenvolvido por eles em testes realizados em uma câmara anecóica, para o campo próximo, e para campo distante em uma câmara reverberante. Os resultados obtidos foram consistentes para frequências entre 63 Hz e 10 KHz, mas com erros da ordem de 6 dB abaixo de 200 Hz na câmara reverberante. Os erros neste trabalho foram originados pelo desarranjo de fase entre os microfones.

Fahy (1977a, 1977c), orientador de Miller, propôs a utilização de dois microfones de pressão e um medidor de pressão sonora para determinação da intensidade acústica irradiada. Ainda nesses trabalhos, o autor discutiu os erros de desarranjo de fase dos analisadores de frequência e dos microfones utilizados no processamento dos sinais para ondas planas e para campos sonoros gerados por fontes monopolo e dipolo e o erro de aproximação de diferença finita. Novamente Fahy (1977b), baseado nas conclusões finais de Miller (1975) sobre a densidade de espectros cruzados, estabeleceu definitivamente as bases da intensimetria utilizadas nos sistemas comerciais em nossos dias. Este método consiste na análise de Fourier dos sinais obtidos diretamente dos microfones, conseguindo assim, uma melhor performance dos sistemas de medição. Fahy (1978) realizou medições de intensidade sonora em um aspirador de pó. As medições foram realizadas em um laboratório que não possuía tratamento acústico, apenas o mobiliário e equipamentos. As medições foram realizadas entre 250 e 4000 Hz a diversas distâncias da fonte e houve uma boa correlação entre os resultados.

Paralelamente Chung (1977) e Chung e Pope (1978) desenvolveram uma formulação baseada na parte imaginária da densidade de espectros cruzados entre dois microfones próximos para determinação do ruído irradiado por automóveis. Sua formulação era equivalente à desenvolvida por Lambert e Badie-Cassanet (1977) e Alfredson (1977). Posteriormente Chung (1978) apresentou uma técnica de correção dos erros de fase dos canais dos microfones em concordância com o desenvolvido por Miller (1975) e Fahy (1977a, 1977b e 1977c).

A técnica que combina dois microfones de pressão dominou as pesquisas por um bom período. Somente no início dos anos 1980, após as publicações de Bjor e Krystal (1982) e Nordby e Bjor (1984), a técnica que utiliza um microfone de pressão e outro de velocidade

foi resgatada devido à melhoria na tecnologia de microfones de velocidade. Atualmente os sistemas comerciais disponíveis no mercado utilizam dois microfones de pressão, posicionados face-face.

A partir do início da década de 1980 as pesquisas se voltaram para a correção das principais fontes de erro da intensimetria, sejam os erros sistemáticos devido as aproximações matemáticas, ou erros aleatórios devido a imprecisão do sistema de medição e variação das condições ambientais. Krishnappa (1981) analisou o desarranjo de fase dos canais do analisador de frequência, inclusive dos microfones e amplificadores, e desenvolveu um sistema de calibração que visava minimizar os erros. Thompsons e Tree (1981) discutiram o erro gerado pela aproximação de diferença finita em função da distância de separação dos microfones e da frequência central analisada. Concluíram que se deve determinar uma distância ótima entre a fonte e a superfície de medição em função destes parâmetros. Pascal (1982) analisou os erros sistemáticos da intensimetria e concluiu que o limite de medição em alta frequência é determinado pela aproximação de diferença finita. O desarranjo de fase dos canais do medidor de pressão sonora limita os resultados na baixa frequência. Watkinson e Fahy (1984) estudaram os erros causados pelo posicionamento e tipos de microfones utilizados na intensimetria. Desaconselharam a utilização de microfones de 1/4", e concluíram que: o posicionamento face-face dos microfones trás melhores resultados, que o espaçador cilíndrico sólido é sensível em relação as diferenças de fase, que a sensibilidade dos microfones de pressão e campo livre são similares e que pode haver uma ressonância na cavidade do microfone que poderia compensar os erros de aproximação de diferença finita. Hübner (1984) apresentou alguns índices de campo que poderiam certificar a precisão da medição realizada. A evolução destes índices são utilizados pela série ISO 9614 para validar os resultados obtidos. Watkinson (1986) estudou o desarranjo de fase dos transdutores e determinou alguns critérios de precisão de resultados.

Paralelamente ao estudo dos erros da intensimetria outras utilidades além da determinação do nível de potência sonora foram sendo vislumbradas. Watkinson (1978a, 1978b) utilizou a intensimetria para determinar coeficientes de absorção sonora de materiais. Pettersen (1981) determinou o fluxo de potência acústica de uma onda plana direcionada contra uma barreira finita e concluiu da possibilidade da utilização da

intensimetria em várias outras áreas. Dalan e Cohent (1981) determinaram a irradiação acústica das placas de revestimento da cabine de um avião através da intensimetria. Wang e Crocker (1982) determinaram a perda de transmissão acústica em estruturas aeronáuticas. Sato et al (1981) utilizando este método, determinaram coeficientes de absorção sonora em escritórios. Alfredson (1988) estudou o campo acústico próximo de uma placa vibrante utilizando a intensimetria e determinou o fluxo vetorial da mesma, que variava de valores positivos a negativos, conforme a posição da medição.

A década de 1990 foi muito produtiva no campo da intensimetria. As fontes de erro foram analisadas exaustivamente e o método continuou se expandindo para outras áreas. Lay (1991) utilizou uma distância de 50 mm entre os microfones para determinação de fontes de ruído próximas a paredes, sob a influência de ondas refletidas. A norma ISO 9614-1 *Acoustics determination of sound power levels of noise sources using sound intensity – Measurements in discrete points* foi publicada no ano de 1993 e a ISO 9614-2 *Acoustics determination of sound power levels of noise sources using sound intensity – Measurements for scanning*, foi publicada em 1995. Com isso ficaram estabelecidos procedimentos de medição e principalmente os índices de campo. Estes índices servem para analisar as condições ambientais e do campo acústico irradiado pela fonte sonora. Caso não sejam satisfeitos não se deve continuar com o procedimento de medição, pois levaria a valores irreais. Guy (1993) propôs um método de correção para ondas estacionárias que inclui a troca das posições dos microfones para minimizar os desarranjos de fase. Andersen e Jonasson (1996) compararam os resultados das séries ISO 9614 (1993) e ISO 11200 (1995) para determinação do nível de pressão sonora. Conclui que a série ISO 11200 (1995) além de necessitar locais apropriados para medições superestima os resultados. Hongisto e Saine (1996) compararam os resultados de medições de nível de potência sonora de um motor a diesel segundo as normas ISO 9614-2 (1995) e ISO 3746 (1995) utilizando microfones separados por 50 mm para frequências de 25 a 1250 Hz e 6 mm de separação para as frequências de 1250 a 10000 Hz. Utilizaram uma superfície de medição que totalizou 94,8 m² que foi dividida em outros 32 segmentos para a realização da varredura. Alertaram para que o ruído de fundo seja de pelo menos 7 dB menor que o da fonte analisada, pois caso contrário, inverteria a direção do vetor intensidade causando valores negativos. Li e Qiu (1996), na tentativa de diminuir

os erros causados pela velocidade do fluxo de ar de algumas fontes, como ventoinhas de motores elétricos, introduziram um terceiro microfone no sistema de medição. Apesar da metodologia ser complexa os resultados foram bons. Abdou e Guy (1997) estudaram o mapeamento de vetores de intensidade sonora. Concluíram que a maior fonte de erro era a diferença de fase dos canais do sistema de medição. Utilizaram duas distâncias de microfones, 50 mm para as frequências de 250 a 1000 Hz e 12 mm para as medições de 1000 a 8000 Hz. Astrup (1997) analisou uma série de medições em equipamentos como uma motosserra e motores a diesel. Devido à limitação da capacidade dinâmica do equipamento também utilizou duas separações diferentes para os microfones. Estudou a influência de materiais absorvedores dentro da superfície de medição. Pettersen e Olsen (1997) analisaram os erros do método de varredura. Concluíram que o ruído de fundo pode ser uma grande fonte de erro mesmo com índices de campo favoráveis e que a variação da densidade de varredura tem pouca influência no resultado das medições. Fahy (1997) apresentou as normas da série ISO 9614 e seus índices de campo que servem para validar a medição do nível de intensidade sonora. Hickling et al (1997) analisaram as diferenças de resultados obtidos em locais de características diferentes como salas reverberantes e escritórios de trabalho. Concluíram que a imagem refletida pelas paredes é coerente com a fonte em análise e interfere nos resultados. Giljohann e Zorah (1998) compararam medições realizadas através da intensimetria com a estimativa teórica obtida através do método de elementos finitos, sendo que a intensimetria foi utilizada para validar os resultados obtidos teoricamente. Castanha e Kurka (1999) utilizaram a técnica da intensimetria para determinação do nível de potência sonora da caixa de marcha e de um motor a diesel. Conseguiram identificar qual componente do motor era o maior irradiador de ruído, devido à característica vetorial da intensidade sonora.

O trabalho do pesquisador Finn Jacobsen pode e deve ser analisado a parte, tão rica foi sua produção, principalmente na análise das incertezas de medição. A qualidade de seu trabalho pode ser atestada pelo número de vezes em que foi citado como referência. Ao todo foram cerca 143 citações, entre os anos de 1988 e 2005, contadas apenas nas revistas *Acústica*, *Applied Acoustics*, *Journal of Acoustical Society of América* e *Journal of Sound and Vibration*. As citações publicadas em anais de congressos e outras revistas

não estão contabilizadas. Jacobsen (1989a e 1989c) estudou os erros aleatórios nas medições de intensidade e potência sonora. Concluiu que estes erros não dependem do equipamento utilizado e sim do campo reverberante, da uniformidade do campo espacial, da diretividade da fonte e do tempo de integração, mas não do procedimento de medição. A existência de fontes externas coerentes com a fonte analisada ou ruídos elétricos pode facilitar a inversão do sinal do vetor intensidade diminuindo a precisão das medições. Jacobsen (1991a) desenvolveu um procedimento de correção do desarranjo de fase dos canais do sistema de medição que utiliza um autofalante. Esta correção pode ser conseguida de maneira simples. Em seguida Jacobsen (1991b) estudou os erros de amostra para medições de potência sonora pelo método dos pontos discretos e varredura. Demonstrou que se o campo próximo à fonte for muito reativo, invertendo o sinal do vetor intensidade, deve-se afastar a superfície de medição da fonte independente das condições ambientais. Identificou outras fontes de erros na determinação da potência sonora como a aproximação de uma integral de superfície em uma integral de linha e recomendou o aumento da velocidade de varredura em pontos da superfície de medição onde possam ocorrer ruídos não estacionários, já que o erro causado pela variação da velocidade de deslocamento da sonda não é significativo. Jacobsen (1992) analisou a interferência do tamanho da amostra, dos erros de desarranjo de fase e dos erros associados ao tempo de medição na determinação da potência sonora. Desenvolveu equações para correção destes erros e parâmetros para o melhor posicionamento da superfície de medição. Jacobsen (1993) estudou medições de intensimetria de fonte que irradiam baixos níveis de intensidade sonora e demonstrou que o ruído elétrico é uma fonte de erro aleatório e não sistemático, e que este erro tende a crescer em medições abaixo de 40 dB. Jacobsen e Olsen (1994) analisaram a influência da equalização da pressão estática nas cavidades dos microfones para compensação da variação da pressão atmosférica. Concluíram ser causa de erros consideráveis sendo proporcionais ao erro gerado pelo campo reativo e equivalente à diferença de fase entre a pressão e a velocidade da partícula. Os maiores erros podem acontecer próximos a fonte de ruído e nas baixas frequências, mas decaem rapidamente com o afastamento da sonda de medição da fonte. O ruído de fundo não influencia na equalização da ventilação dos microfones. Desenvolveu um indicador de erro e sugeriu um método de correção. Jacobsen Cutanda e Juhl (1996) através do método de elementos de contorno, analisaram microfones de pressão e confirmaram a previsão de

Wattkinson e Fahy (1984), que haviam apontado a possibilidade da ressonância da cavidade dos microfones da sonda incrementar o valor da pressão sonora e assim compensar o erro de diferença finita que é negativo. Jacobsen e Ding (1996) estudaram as diferenças de resultados obtidos entre o método convencional de perda de transmissão sonora de paredes e os obtidos através da intensimetria. Jacobsen (1997) analisou várias fontes de erro na determinação da potência sonora. Concluiu que o campo próximo acarreta dificuldades nas medições, portanto em locais sem ruído de fundo significativo, deve-se afastar a superfície de medição. Os erros aleatórios podem ser eliminados com a repetição de medições e seu posterior tratamento estatístico. Os fluxos de ar com velocidade acima de 5 m/s devem ser evitados pois este erro não pode ser quantificado. Recomenda a utilização de dois microfones com separações diferentes na presença de elevado ruído de fundo e a correção do erro de desarranjo de fase dos canais de medição. Jacobsen Jacobsen Cutanda e Juhl (1998) confirmaram o resultado de Jacobsen Jacobsen Cutanda e Juhl (1996) e acrescentaram que a melhor distância de separação entre os microfones é seu diâmetro e o melhor posicionamento é o face-face. Jacobsen (2000) faz um levantamento do conhecimento acumulado no campo da intensimetria, analisando a utilização de microfones pressão-pressão e pressão-velocidade.

Na década 1990 a procura por novas utilizações da intensimetria continuou. Lay e Burgess (1991) utilizaram separadores de 12 mm para medir a perda de transmissão sonora de uma parede divisória na faixa de 100 a 5000 Hz. Lima, Pacheco e Gerges (1994) e Gerges (1994) utilizaram a técnica da intensimetria em motores automotivos para identificar as principais fontes de ruído. Gerges (1995) apresentou as possibilidades de utilizações da técnica de intensimetria que estava começando a ser divulgada no Brasil. Weyna (1995) apresentou medições de perda de transmissão sonora em paredes divisórias em embarcações pelo método dos pontos discretos, conforme ISO 9614-1 (1993). Aproveitando a característica vetorial da intensidade sonora foi possível a localização dos pontos com menor perda de transmissão sonora. Descreveu também o campo acústico estrutural em pequenos espaços, como cabines de embarcações, onde o vetor espacial da intensidade acústica determina o isolamento acústico das paredes divisórias. Villot (1996) utilizou a intensimetria para a determinação da passagem de energia sonora por janelas, podendo analisar a eficiência das borrachas de vedação das esquadrias. Sullivan e Gibbs

(1996) também utilizaram a intensimetria para determinar a diferença na eficiência de isolamento acústico entre paredes e janelas. Nightingale (1996), utilizou 900 pontos discretos com 12 mm de separação entre os microfones para determinação do isolamento acústico em edificações residenciais. Hickling e Lee (1997) desenvolveram métodos de medição do nível de intensidade sonora automáticos para máquinas de grande porte. A medição consiste na movimentação da aparelhagem em torno de uma semi-esfera que envolve o equipamento em questão para a obtenção do nível de potência sonora do equipamento como uma forma de controle de qualidade. Duarte e Costa Filho (1998) determinaram o nível de potência sonora em dutos de ar condicionado nas frequências até 2000Hz.

No início deste século as pesquisas continuaram. A norma ISO 9614-3 foi publicada em 2002. Esta estabelece índices de campo mais restritivos que analisam as condições de medição com mais rigor, levando a resultados mais precisos. Keith, Krishnappa e Chiu (2000) sugeriram que o ruído de fundo seja pelo menos 6 dB menor que a fonte analisada e que as medições sejam realizadas a 1,5 m das paredes para se evitar a interferência das ondas sonoras refletidas. Hübner e Wittstock (2001) apresentaram um método de correção do nível de potência sonora devido a absorção que pode ocorrer dentro da superfície de medição. Este método foi denominado pelos autores como “zero teste”. Yano, Tachibana e Suzuki (1998 e 2001) apresentaram estudos de medição da determinação da potência sonora em condições complexas e concluíram pela boa precisão do método por varredura. Kim e Cho (2001) fizeram um mapeamento da intensidade sonora de um compressor e junto com outros métodos determinaram a intensidade da energia irradiada. Ginn et al (2002) estudaram através da técnica de elementos de contorno o processo de calibração, de fase e sensibilidade, dos microfones em campo. Souza e Gerges (2002) e Souza (2003) realizaram medições de potência sonora em vários tipos de ambientes, industriais e escritórios, com elevado ruído de fundo e apresentaram alguns métodos de correções e um novo procedimento de varredura. Park, Sigmund e Mogeau (2003) analisaram a perda de transmissão acústica da borracha de vedação da porta de um automóvel. Jacobsen e Juhl (2004) analisaram os erros nas altas frequências e propuseram a substituição da média aritmética entre os sinais de pressão dos microfones por um sistema de pesos. Hubner e Wittstock (2004) analisaram a

série ISO 9614, parte 1, 2 e 3 comparando seus índices de campo e sugerindo algumas correções de resultados. Keith, Krishinappa e Chiu (2004) compararam os procedimentos de determinação da potência sonora através da intensidade e da pressão sonora através da série ISO 3740 (2000). Concluíram não haver vantagens significativas na precisão de resultados entre as metodologias. Cvetkovic, Prascevic e Mihajlov (2004) utilizaram uma sonda com espaçamento de 12 mm e cobriram a faixa de frequência de 50 a 10 KHz com erros menores que 1 dB em comparação com outras configurações de microfones e espaçadores.

A geração de conhecimento na área da intensimetria, apesar de numerosa, ainda deixa algumas questões em aberto. A distância de separação entre a sonda e a fonte sonora ainda não está bem fundamentada, existindo apenas algumas recomendações. A extensão do limite superior de frequências que podem ser medidas não foi confirmada pela série ISO 9614 apesar dos inúmeros trabalhos publicados. O procedimento de varredura perante fluxos de ar de alta velocidade, comuns em sistemas de refrigeração de motores, não foi estabelecido. Há apenas a recomendação para que a velocidade máxima seja de 4 m/s. Está em andamento a revisão da série ISO 9614 desde setembro de 2003, ou seja, no momento toda contribuição para o assunto é bem vinda.

O Brasil não possui uma produção significativa sobre este tema. Talvez pelo custo do sistema de medição ser elevado, o que desestimula sua utilização. Mas, um melhor conhecimento da técnica implicará em uma maior divulgação e procura pela técnica da intensimetria, o que pode originar condições comerciais mais acessíveis na aquisição de equipamentos de medição.

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A técnica da intensimetria, apesar da praticidade de poder ser implementada em campo, possui diversas fontes de erros. Vários autores vêm pesquisando e desenvolvendo metodologias para minimizar essas incertezas de medição o que gerou nos últimos anos uma grande variedade de publicações em congressos e revistas especializadas. Neste capítulo busca-se organizar este conhecimento de forma que possibilite o entendimento físico e matemático da técnica, tornando-a mais acessível bem como comparar as opiniões e idéias de vários pesquisadores da área.

3.1 DETERMINAÇÃO DA INTENSIDADE SONORA ATRAVÉS DA INTENSIMETRIA

A obtenção da intensidade sonora através da intensimetria é conseguida através da medição com uma sonda com dois microfones de pressão separados por uma distância pré-estabelecida que enviam os sinais obtidos para um analisador de frequência, como proposto por Olson (1932).

A determinação da intensidade sonora de uma fonte através da pressão sonora é uma grandeza escalar, pois a pressão sonora é a mesma em todas as direções não possuindo características vetoriais. A velocidade da partícula causada pela movimentação do fluido, por ser uma grandeza vetorial, não é a mesma em todas as direções. Devido a esta característica, em uma dada direção n , o valor da intensidade, $I(n)$, é dado pelo valor da média temporal da pressão instantânea multiplicado pela velocidade instantânea da partícula naquela direção. Assim, como mostra a equação 3.1, pode-se determinar a intensidade sonora de uma fonte na sua forma vetorial.

$$I(n) = \frac{1}{T} \int_0^t p(n,t) \vec{u}(n,t) dt \quad 3.1$$

Sendo T o período de tempo em que a intensidade média, $I(n)$, é determinada, p a pressão sonora instantânea do fluido e $\vec{u}$ sua velocidade instantânea. A equação de *momentum* de escoamento de um fluido não viscoso mostra que em campos de pequenas amplitudes a pressão sonora no espaço é proporcional a variação instantânea da velocidade da partícula como mostra a equação 3.2, sendo ρ_0 a densidade do fluido.

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} \quad 3.2$$

A velocidade da partícula do fluido pode ser obtida da equação 3.2 e tem a seguinte forma:

$$u(n) = -\frac{1}{\rho_0} \int_0^t \frac{\partial p}{\partial n} dt \quad 3.3$$

A variação instantânea da pressão p pode ser aproximada pela diferença finita de seu valor escalar, conforme a equação 3.4:

$$\frac{\partial p}{\partial n} \cong \frac{\Delta p}{\Delta r} \cong \frac{p_2 - p_1}{d} \quad 3.4$$

Sendo $\Delta p = (p_2 - p_1)$, e p_1 e p_2 a pressão sonora instantânea medida nos pontos 1 e 2 com a utilização de dois microfones de pressão posicionados a uma distância Δr . Caso Δr seja igual a distância de separação entre os microfones, d , e substituindo a equação 3.4 em 3.3 se obtém a equação 3.5 que fornece o valor aproximado da velocidade instantânea da partícula. A aproximação de diferença finita em que resultou a equação 3.4 só é válida quando a distância entre os microfones é pequena em relação ao comprimento de onda gerado pela fonte em questão, impondo um limite superior nas frequências analisadas.

$$u(n) = -\frac{1}{d * \rho_0} \int_0^t (p_2 - p_1) d\tau \quad 3.5$$

A pressão $p(n,t)$ também pode ser determinada por aproximação através da média aritmética entre os valores obtidos em dois pontos no espaço, similar ao utilizado na equação 3.4, como mostra a equação 3.6.

$$p(n,t) = \frac{(p_2 + p_1)}{2} \quad 3.6$$

Substituindo os valores aproximados da velocidade da partícula, equação 3.5, e da pressão sonora, equação 3.6, na equação 3.1 obtém-se o valor aproximado da intensidade sonora média na direção do vetor $\vec{n}$, $I(n)$, como mostra a equação 3.7

$$I(n) = \frac{1}{2 * d * \rho_0} \frac{1}{T} \int_0^T \left\{ (p_2 + p_1) \int_0^t (p_2 - p_1) d\tau \right\} dt \quad 3.7$$

Para funções estacionárias no tempo pode-se considerar que $x \frac{dx}{dt} = y \frac{dy}{dt} = 0$ e

$x \frac{dy}{dt} = -y \frac{dx}{dt}$. Sendo p_1 a derivada no tempo de $\int p_1 dt$ temos que:

$$\begin{aligned} x(t) &= \int p_1 dt \\ \frac{dx(t)}{dt} &= \frac{d\left(\int p_1 dt\right)}{dt} = p_1(t) \\ p_1(t) * \int p_1(t) &= 0 \end{aligned} \quad 3.8a$$

$$\begin{aligned} y(t) &= \int p_2 dt \\ \frac{dy(t)}{dt} &= \frac{d\left(\int p_2 dt\right)}{dt} = p_2(t) \\ p_2(t) * \int p_1(t) &= -p_1(t) \int p_2(t) dt \end{aligned} \quad 3.8b$$

Fatorando a equação 3.7

$$I(n) = \frac{1}{2 * \rho_0 * d} \frac{1}{T} \left[p_1(t) \int_{-\infty}^t p_1(\tau) d\tau - p_1(t) \int_{-\infty}^t p_{2_1}(\tau) d\tau + p_2(t) \int_{-\infty}^t p_1(\tau) d\tau - p_2(t) \int_{-\infty}^t p_2(\tau) d\tau \right] \quad 3.9$$

Substituindo as equações 3.8a e 3.8b na equação 3.9 obtemos a equação 3.10:

$$I(n) = -\frac{1}{\rho_0 * d} \lim_{T \rightarrow 0} \frac{1}{T} \left[\int_0^T p_1(t) \int_{-\infty}^t p_2(\tau) d\tau \right] dt \quad 3.10$$

Com a equação 3.10 pode-se determinar o valor da intensidade sonora instantânea na direção do vetor $\vec{n}$ medindo a pressão sonora com dois microfones separados por uma distância d .

O valor da intensidade média em um campo sonoro estacionário pode ser obtido diretamente da equação 3.10 como mostra a equação 3.11. Substituindo a equação 3.11 na equação 3.10 e resolvendo a integral, obtém-se o valor da intensidade sonora $I(n)$ em função da pressão sonora P_1 e P_2 obtidas com dois microfones separados por uma distância d

$$\begin{aligned} p_1 &= P_1 e^{(i\omega t + \phi_1)} \\ p_2 &= P_2 e^{(i\omega t + \phi_2)} \end{aligned} \quad 3.11$$

$$I(n) = \frac{P_1 P_2 \sin(\phi_1 - \phi_2)}{2 * \rho_0 * w * d} \quad 3.12$$

Como os microfones de pressão estão próximos, os ângulos de fase ϕ_1 e ϕ_2 possuem valores aproximados. Assim, $\phi_1 - \phi_2 \ll 1$, portanto $\sin(\phi_1 - \phi_2)$ pode ser aproximado por $(\phi_1 - \phi_2)$, como mostra a equação 3.13:

$$I(n) = \frac{P_1 P_2 (\phi_1 - \phi_2)}{2 * \rho_0 * w * d} \quad 3.13$$

A equação 3.13 pode ser reescrita de uma outra forma, pois $\omega = kc$; sendo k o número de onda e c a velocidade do som no ar e ω a frequência da onda em radianos. A equação 3.13 torna-se:

$$I(n) = \frac{P_1 P_2 (\phi_1 - \phi_2)}{2 * \rho_0 * k * c * d} \quad 3.14$$

A intensidade sonora média em qualquer direção é dependente do tempo (FAHY, 1995). Assim no caso de se usar dois microfones de pressão, pode-se obter a distribuição espectral através da análise dos sinais por filtros idênticos. Para a implementação da equação 3.7, as operações de soma, subtração e integração devem ser executadas pelos filtros, e somente após, a média temporal deve ser obtida (FAHY, 1995). Neste processo o momento da filtragem e processamento dos sinais pode otimizar a capacidade do sistema de medição. Em campos sonoros estacionários, ao invés da equação 3.7, pode-se implementar a equação 3.10. A vantagem deste processo é que deve-se executar apenas a operação de integração. Estes métodos de obtenção da intensidade sonora média são conhecidos como “*análise direta de frequência*” (FAHY, 1995).

Fahy (1977a, 1977b 1977c) e Chung (1977) e Chung e Pope (1978), separadamente, desenvolveram o que é considerada “*análise indireta da frequência*” (FAHY, 1995). Esta é baseada nas transformadas de Fourier para o domínio da frequência dos sinais obtidos no domínio do tempo pelos microfones de pressão. Este modo de processamento dos sinais otimiza e economiza memória do sistema de medição. A partir da equação 3.10 pode-se escrever sua função de correlação cruzada, R_{pz} , equação 3.15:

$$R_{pz}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \right) \int_{-\infty}^T p_1(t) * z_2(t + \tau) dt \quad 3.15$$

Sendo $\int p_2(\tau) d\tau = z_2(t)$. No domínio da frequência (transformada de Fourier) a equação 3.15 pode ser reescrita:

$$R_{pz}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{pz}(w) * e^{i w \tau} dw \quad 3.16$$

Sua correspondente função de densidade espectral cruzada, S_{pz} , (transformada inversa de Fourier) é dada por 3.17:

$$S_{pz}(w) = \frac{1}{2 * \pi} \int_0^{\infty} R_{pz}(\tau) * e^{-i w \tau} d\tau \quad 3.17$$

A parte escalar do vetor intensidade sonora médio pode ser obtido com $\tau = 0$, ou seja, $I(n) = R_{pz}(0)$.

$$I(n) = R_{pz}(0) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{pz}(w) dw \quad 3.18$$

A partir de 3.18, o valor da intensidade sonora média no domínio da frequência, $I(w)$, pode ser obtido por:

$$I(w) = \frac{-2}{\rho_0 * d} \text{Re}[S_{pz}(w)] \quad 3.19$$

Sendo Re a parte real da função de densidade espectral cruzada S_{pz} . A equação 3.19 pode ser reescrita substituindo a igualdade $-2 * \text{Re}(S_{pz}(w)) = \text{Im}(G_{12}(w))/w$, sendo $\text{Im}(G_{12}(w))$ a parte imaginária da função de densidade espectral cruzada dos sinais dos microfones de pressão 1 e 2.

$$I(w) = \frac{1}{\rho_0 * w * d} \text{Im}[G_{12}(w)] \quad 3.20$$

Sendo $G_{12} = 2 * S_{12}$. A expressão 3.20 pode ser implementada a partir da parte imaginária obtida por dois microfones de pressão.

3.2 DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA SONORA ATRAVÉS DA INTENSIMETRIA

Sendo a potência sonora de uma fonte a variação de sua energia no tempo, pode-se escrever a equação da conservação de energia em um campo sonoro estacionário no espaço com na equação 3.21:

$$\nabla I(t) = \frac{\partial e}{\partial t} \quad 3.21$$

O gradiente do vetor intensidade médio é igual à razão da variação da densidade de energia no tempo, $\partial e / \partial t$, que é a potência sonora. Para obter-se a potência sonora deve-se integrar a equação 3.21 em um volume fechado. Pelo cálculo vetorial esta integração pode ser feita sob a superfície de fechamento multiplicado pelo vetor normal à superfície, equação 3.22.

$$\int_V \nabla I(t) dV \Rightarrow \int_A I(t) * \vec{n} dA = W_s \quad 3.22$$

Onde W_s é a potência sonora média gerada pelos mecanismos envolvidos, $I(t)$ é o vetor intensidade sonora na direção $\vec{n}$ atravessando a superfície A . Vetores de intensidade externos a superfície A podem contribuir nesta integral em algumas condições. Caso este vetor entre na superfície e saia na mesma magnitude sua contribuição será zero. Caso haja algum tipo de dissipação de energia, absorção ou reflexão sonora por exemplo, haverá alteração na integração do vetor intensidade. Este efeito é particularmente sensível em fontes de ruído que possuam superfícies absorvedoras ou fontes de grandes dimensões em relação à superfície de medição, que alteram a distribuição do vetor intensidade devido a reflexão sonora. Em casos em que fontes sonoras próximas sejam coerentes, com ondas acústicas em fase e frequências iguais, haverá também uma alteração na integral de superfície e na distribuição dos vetores. No caso de duas fontes incoerentes haverá uma modificação na distribuição dos vetores, mas não na sua integração final. Na figura 3.1 está representada uma fonte sonora monopolo (a), duas fontes sonoras monopolo harmônicas de diferentes frequências, incoerentes (b), e duas

fontes harmônicas monopolos de iguais frequências, coerentes (c). As reflexões de ondas sonoras causadas por grandes superfícies planas como pisos e paredes devem ser evitadas pois são altamente coerentes (JACOBSEN, 1991a). Este efeito diminui rapidamente com o afastamento da superfície de medição da fonte em análise devido a diminuição da intensidade sonora pelo quadrado da distância (FAHY, 1995)

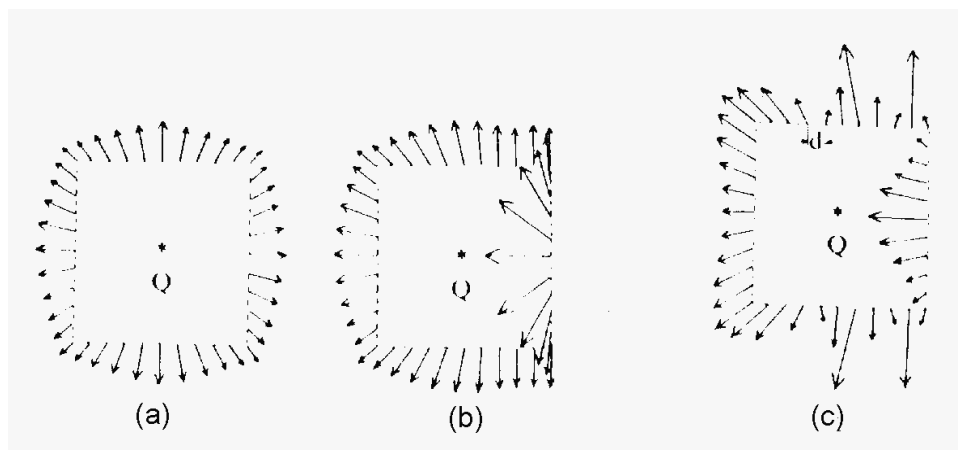


Figura 3.1 Distribuição dos vetores devido à interferência de fontes externas, Fahy (1995).

O sistema de medição de intensimetria não se apresenta como um dispositivo mágico capaz de desconsiderar todas as interferências sonoras presentes em unidades industriais (FAHY, 1995). As medições só poderão ser efetivadas caso o ruído da fonte e de fundo sejam estacionários no tempo e incoerentes e se a absorção sonora dentro do volume de medição for insignificante (HÜBNER e WITTSTOCK, 2004). A implementação do método só poderá ser executada com a certeza que a equação 3.22 possa ser efetivada na prática. A partir daí, através da componente normal da velocidade pode-se determinar a potência sonora de uma fonte através da superfície de contorno, como representado na figura 3.2, em vários pontos e calculado seu resultado médio (FAHY, 1995).

Como é fisicamente impossível implementar a equação 3.22, utiliza-se o valor médio da área da superfície. Esta aproximação, baseada em dados discretos ou contínuos, produz variáveis estatísticas como médias, variâncias e desvio padrão, que diferem do valor real, que obviamente é desconhecido (FAHY, 1995). Duas técnicas são correntemente utilizadas: método dos pontos discretos, ISO 9614-1 (1993), *Acoustics determination of*

sound power levels of noise sources by sound intensity measurement – measurements in discrete points, e método por varredura, ISO 9614-2 (1995), *acoustics determination of sound power levels of noise sources by sound intensity measurement – measurements for scanning* e ISO 9614-3 (2002), *Acoustics determination of sound power levels of noise sources using sound intensity – precision method by scanning*.

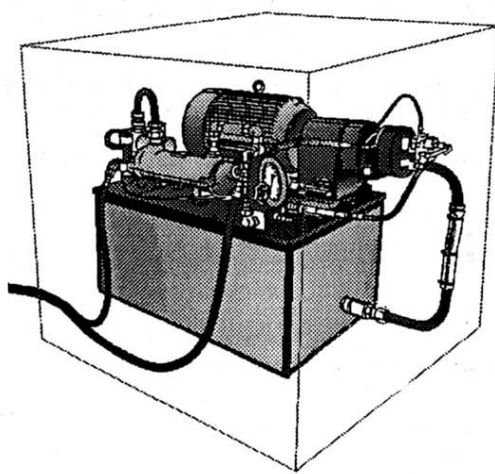


Figura 3.2 Superfície de contorno de uma fonte sonora, Bruel Kjaer, (1997)

No método dos pontos discretos a sonda de intensimetria é posicionada nos pontos centrais de áreas pré-determinadas por um tempo que seja suficiente para que o erro devido a amostragem seja aceitável. Este período, segundo a ISO 9614-1 (1993), é dado pela relação $BT \geq 400$ sendo B a largura da banda de oitava em questão e T o tempo necessário para implementar a medição. No caso de medição na oitava de 63Hz é necessário pelo menos 6,5 segundos para implementar uma média confiável em cerca de 95% das medições com uma distribuição Gaussiana. O tempo mínimo de integração determina a velocidade de movimentação da sonda. O erro associado ao método dos pontos discretos está relacionado ao posicionamento do vetor normal à superfície de medição e ao tamanho da malha utilizada. Assumindo que as medições são estatisticamente independentes, a potência sonora pode ser obtida pela reorientação aleatória da malha através da média das medições. A norma ISO 9614-1 (1993) utiliza estas considerações para determinar o número de pontos de medição necessários para que o erro seja aceitável.

No método da varredura a sonda é movimentada por um caminho pré-determinado pela superfície de medição onde é implementada uma média temporal e espacial ao invés de apenas a média espacial do método anterior. Devem ser procedidas duas varreduras ortogonais em cada superfície, a uma velocidade que varie entre 0,1 e 0,5 m/s, no tempo mínimo de 20 segundos. Portanto todas estas variáveis devem ser coerentes. A distância entre as linhas de varredura deve ser da mesma ordem da distância da superfície de medição e a fonte. O operador da sonda não deve alterar o fluxo de vetores da intensidade sonora, portanto deve ficar posicionado ao lado da fonte de ruído. Caso seja utilizado algum equipamento mecânico para suporte da sonda durante a varredura este deve possuir um nível de potência sonora 20 dB inferior a fonte sonora analisada. Como a componente normal da intensidade varia com a posição onde se está medindo, a incerteza da medição pode ser considerável caso a superfície de varredura seja pequena principalmente em campos de bandas estreitas. Em casos de fontes altamente direcionadas e concentradas em pequenas regiões o erro será elevado. Obviamente este problema também acontece no método dos pontos discretos. Os sinais processados por dois microfones em movimento não são estacionários no tempo mas na prática não trazem problemas em velocidades abaixo de 1m/s (FAHY, 1995).

3.3 ERROS DE MEDIÇÃO DE INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA

Medidas de intensidade sonora são objetos de erros associados com as aproximações feitas nas relações assumidas entre as grandezas medidas e a intensidade (erros sistemáticos); nas imperfeições dos transdutores da sonda e no processador de sinal, na função de converter sinais coletados e nas grandezas necessárias para computar a intensidade; erros de calibração, variação da sensibilidade dos transdutores na calibração devido às condições ambientais, ruídos produzidos por interferências não acústicas e erros associados pela integração média no tempo (erros aleatórios).

3.3.1 Erros sistemáticos inerentes a intensimetria

Os erros sistemáticos inerentes são ocasionados diretamente pela metodologia e não pelos equipamentos utilizados para implementá-la. São funções do tipo de campo sonoro sob investigação e a orientação da sonda em relação a este, (FAHY, 1995).

O erro devido à aproximação por diferença finita, que é inerente ao método que utiliza dois microfones, determina o limite máximo de freqüências que podem ser analisados (JACOBSEN, 1993), e está diretamente relacionado com a distância de separação entre os microfones da sonda de medição. Esta aproximação, dada pela equação 3.4 e ilustrada na Figura 3.3, induz um erro na determinação da pressão média entre os dois microfones, e indiretamente, na determinação da velocidade da partícula. Para quantificar tal erro pode-se substituir esta aproximação por uma Série de Taylor, como na equação 3.23:

$$p(x + ht) = p(x, t) + hp'(x, t) + \frac{h^2}{2} p''(x, t) + \dots + \frac{h^n}{n!} p^n(x, t) \quad 3.23$$

Considerando um par de microfones cujos centros estão separados por uma distância $d=2h$ as equações 3.4 e 3.5 podem ser escritas como em 3.24 e 3.25:

$$P_e(t) = p(t) + \frac{h^2}{2} p''(x, t) + \frac{h^4}{24} p''''(t) + \dots \quad 3.24$$

$$U_e(t) = \frac{1}{\rho_0} \int_{-\infty}^t p'(t) + \frac{h^2}{6} p'''(t) + \frac{h^4}{24} p'''''(x, t) + \dots \quad 3.25$$

O erro normalizado do valor da pressão sonora $e(p)$, da velocidade da partícula, $e(u)$, podem ser escritos conforme as equações 3.26a e 3.26b:

$$e(p) = \frac{p_e - p}{p} = \frac{\frac{h^2}{2} p''(x, t) + \frac{h^4}{24} p''''(t)}{p(t)} \quad 3.26a$$

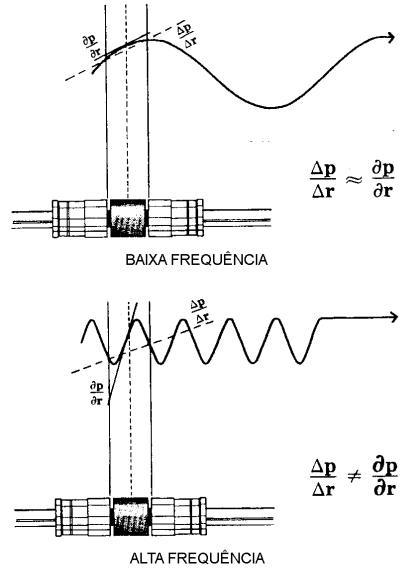


Figura 3.3 Erro causado pela aproximação de diferença finita na intensimetria, Bruel & Kjaer, (1997)

$$e(u) = \frac{u_e - u}{u} = \frac{\int_{-\infty}^t \left(\frac{h^2}{6} p'''(t) + \frac{h^4}{120} p''''(x, t) \right) d\tau}{\int_{-\infty}^t p'(\tau) d\tau} \quad 3.26b$$

A dificuldade de desenvolvimento das equações 3.26a e 3.26b está na impossibilidade de escrevê-las em função do tempo para se efetivar as derivações e integrações. Este erro está relacionado também ao prévio conhecimento do campo sonoro. Alguns exemplos de campos sonoros podem ser estudados e seu comportamento em relação ao posicionamento da sonda analisado. Fahy (1977a) e Pavic (1977) obtiveram os valores dos erros aproximados aplicando o valor da pressão sonora de uma onda plana, equação 3.27, nas equações 3.26a e 3.26b que resultam nos erros na estimativa da pressão sonora e da velocidade da partícula respectivamente, equações 3.28a e 3.28b, onde A_0 é a amplitude da onda.

$$\begin{aligned} P &= A_0 e^{(-ikx)} \\ P' &= -ikP \\ P'' &= -k^2 P \\ P''' &= ik^3 P \end{aligned} \quad 3.27$$

$$e(p) = -\frac{(k * h)^2}{2} + \frac{(k * h)^4}{24} - \frac{(k * h)^6}{720} \quad 3.28a$$

$$e(u) = -\frac{(k * h)^2}{6} + \frac{(k * h)^4}{120} - \frac{(k * h)^6}{5049} \quad 3.28b$$

Pode-se observar que o erro estimado da pressão é bem maior que o da velocidade, não ocorrendo erro de fase, somente erro de amplitude da pressão sonora. O erro normalizado da intensidade sonora é dado pela equação 3.29, assumindo $k \ll 1$.

$$e(I) = \frac{I_e - I}{I} \cong -\frac{2}{3}(k * h)^2 + \frac{2}{15}(k * h)^4 \quad 3.29$$

A forma logarítmica, $10\log(1+e)$, de $e(p)$, equação 3.28a, $e(u)$, equação 3.28b, e $e(I)$, equação 3.29, são mostrados na Figura 3.4 para uma separação de microfones $d=2h$ de 5, 8,5, 12, 20 e 50mm.

Para outro tipo de onda gerada por uma fonte monopolo, a partir das equações 3.26a e 3.26b, com o mesmo procedimento, chega-se à conclusão que a aproximação por diferença finita gera um erro de magnitude e fase para a aproximação da pressão e apenas de magnitude para a velocidade da partícula (FAHY, 1995). O erro da velocidade será relevante apenas se a fonte estiver a uma distância menor que $4x$ a distância de separação dos microfones (FAHY, 1995), ou $k*r \ll 1$, sendo r a distância entre a fonte de ruído e a superfície de medição. Em campos distantes o comportamento de uma fonte monopolo torna-se semelhante ao da onda plana. A distância de separação dos microfones deve ser determinada a partir da gama de freqüências com que se quer medir. Em casos de medições em baixas freqüências a distância entre eles deve ser maior, então a sonda deve ser posicionada a uma distância maior também. O erro de uma fonte monopolo pode ser escrito conforme a equação 3.30:

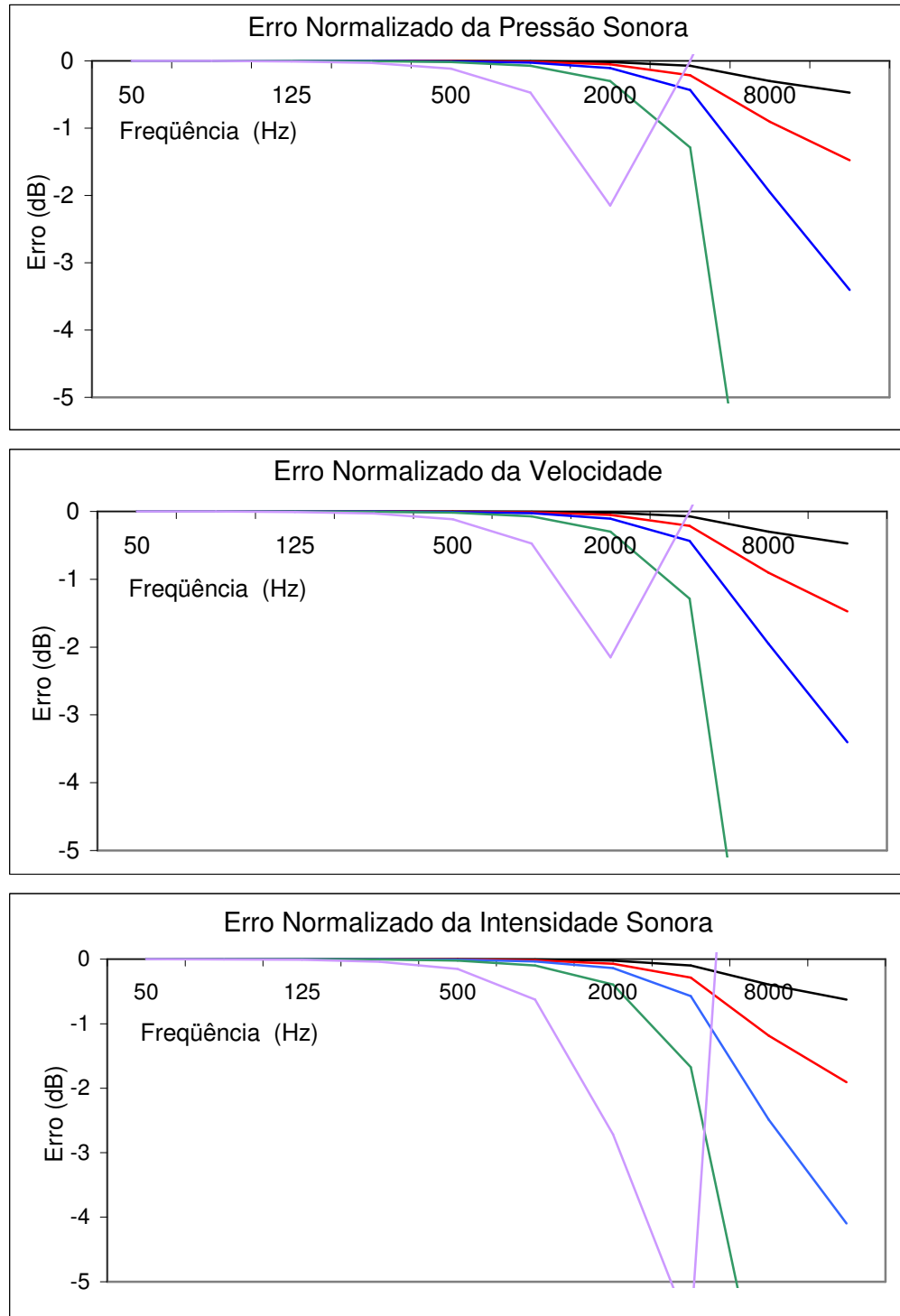
$$e(I) = -\frac{2(k * h)^2}{3} + \left(\frac{h}{r}\right)^2 \quad 3.30$$

Sendo $\frac{d}{r} < 0,22$ a contribuição do segundo termo será de apenas 2,5%, o que pode ser um indicativo de uma relação adequada entre a distância de separação dos microfones e a distância entre a fonte e sonda de medição. Para fontes dipolo o erro é dado pela equação 3.31:

$$e(I) = -\frac{2(k * h)^2}{3} + \frac{7}{3} \left(\frac{h^2}{r} \right) \quad 3.31$$

A equação 3.28 fornece um erro maior que o da fonte monopolo dado pela equação 3.27. Para campos distantes o erro torna-se igual ao da onda plana, onde $k * r \ll 1$ não pode ser considerado. Em ondas de flexão em campos próximos o erro estimado da pressão é aproximadamente 3x maior que o da velocidade. Estes erros são ocasionados pelo número de onda da placa geradora das ondas de flexão e não pelo número de onda acústico do fluido, (FAHY, 1995). Este é normalizado pelas características da placa, sendo substancialmente maior que o erro de uma onda plana. Medições em um mesmo ponto com diferentes separações de microfones podem indicar um valor do erro estimado. Esta tarefa dispense muito tempo o que certamente não pode ser considerado como uma regra geral. Em casos de campos distantes pode-se considerar o erro dado pela equação 3.30, igual ao da onda plana. Pelas equações 3.28a e 3.28b e 3.29 nota-se que diminuindo a distância de separação entre os microfones, Δr , também ocorre uma diminuição no erro de diferenças finitas. O mesmo ocorre com a frequência analisada. Quanto menor for a faixa de frequência analisada menor serão os erros. A frequência é considerada nas equações através do número de onda $k=2\pi f/c$, sendo c a velocidade do som no ar, 343 m/s e f a frequência em Hz. Thompson e Tree (1981) em acordo com Fahy (1977b) e Chung (1978) propuseram a equação 3.32 para determinação do erro de diferenças finitas.

$$Le(I) = 10 * \log \left[\frac{\sin(k * \Delta r)}{k * \Delta r} * \frac{r^2}{r_1 * r_2} \right] \quad 3.32$$



Espaçamentos dos microfones: (5mm); (8,5mm); (12mm), (20mm); (50mm);

Figura 3.4 Erro devido à aproximação de diferenças finitas para diferentes separações de microfones segundo as equações 3.28a, 3.28b e 3.29; para ondas planas

Sendo $Le(l)$ o erro em dB na medição da intensidade sonora, r a distância entre o ponto médio entre os dois microfones da sonda e a fonte de ruído, r_1 a distância entre o microfone 1 e a fonte de ruído e r_2 a distância do microfone 2. Desta maneira o parâmetro $\Delta r/r$ também deve ser considerado assim como o $k*\Delta r$. O valor de r determina a dimensão do volume de medição que envolve a fonte de ruído. Para a seleção de r , o campo acústico gerado pela fonte deve ser conhecido, mas em geral nos casos práticos, esta informação não é muito exata devido sua complexidade. Assim, foi sugerido a relação $0,10 \leq k*\Delta r \leq 1,30$ e $0 \leq \Delta r/r \leq 0,50$ para uma precisão de 1,5 dB independente do tipo do campo acústico até o limite máximo de 5 KHz. A distância Δr entre os microfones também deve considerar o efeito de difração das ondas, não podendo ser reduzida arbitrariamente, a fim de se aumentar o limite máximo de frequências analisadas (JACOBSEN, 1993). Jacobsen também sugere que para a diminuição da difração das ondas sonoras o posicionamento face a face com os microfones separados por um cilindro sólido com um Δr mínimo equivalente ao seu diâmetro. Jacobsen (1997) sugere que a distância mínima de medição entre a sonda e a fonte emissora deve ser entre 30 e 50 cm. Isto é justificado devido a complexidade do campo acústico próximo. A distância deve ser diminuída somente no caso de campos acústicos altamente reativos com campos reverberantes significativos. Alfredson e Phelan (1988) desaconselharam medições de intensidade sonora no campo próximo, pois este possui diferenças consideráveis de valores, tanto na pressão sonora quanto na velocidade da partícula, que a aproximação por diferenças finitas não é capaz de solucionar. Como determinar a dimensão do campo acústico próximo não é trivial, recomenda-se a que a distância r entre a sonda e a fonte seja maior que Δr . Alerta também para reflexões que a sonda pode causar introduzindo sinais indesejáveis no sistema de medição.

Wattkinson e Fahy (1984), apontaram a possibilidade da ressonância da cavidade dos microfones da sonda incrementar o valor da pressão e assim compensar o erro de diferença finita. O erro introduzido na leitura da pressão sonora devido a essa ressonância leva a um erro proporcional na intensidade sonora. Este erro é da ordem de +2dB abaixo de 12 KHz.

Jacobsen Jacobsen Cutanda e Juhl (1996), através do método de elementos de contorno, analisaram microfones de pressão e confirmaram este incremento. Assim o erro resultante é o efeito combinado do erro de aproximação de diferença finita, que é negativo, com o erro de ressonância da cavidade dos microfones, que é positivo, resultando um valor combinado conforme mostra a figura 3.5. Nesta pode-se notar que a configuração com microfones posicionados face a face, com $\frac{1}{2}$ " de diâmetro e 12 mm de separação entre os microfones praticamente elimina o erro de diferenças finitas devido a ressonância da cavidade dos microfones permitindo medições até o limite de 10 KHz (JACOBSEN, CUTANDA E JUHL, 1996). A série ISO 9614 permite medições até o limite de 6,3KHz. A figura 3.6 mostra o erro de incidência não axial para as distâncias de separações entre microfones de 8,5 e 12 mm. Neste trabalho também foi mostrado que o diâmetro dos microfones deve ser a distância mínima de separação entre eles. Sugeriram também a necessidade de correção dos resultados obtidos em medições com microfones do tipo "campo livre" nas altas freqüências através da curva de calibração sugerida pelo fabricante. Experimentos práticos mostraram que a aproximação dos microfones além do diâmetro dos mesmos não resulta em uma melhoria na diminuição dos erros nas altas freqüências.

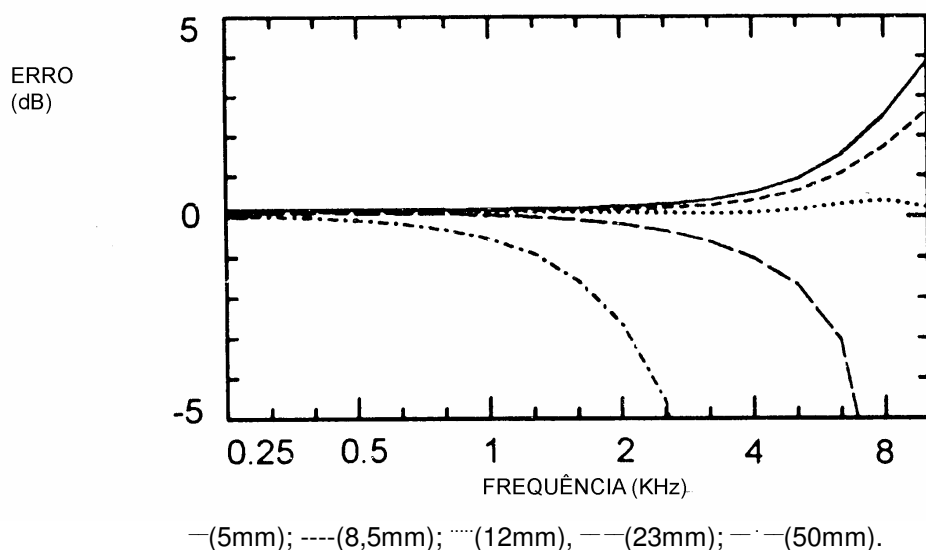
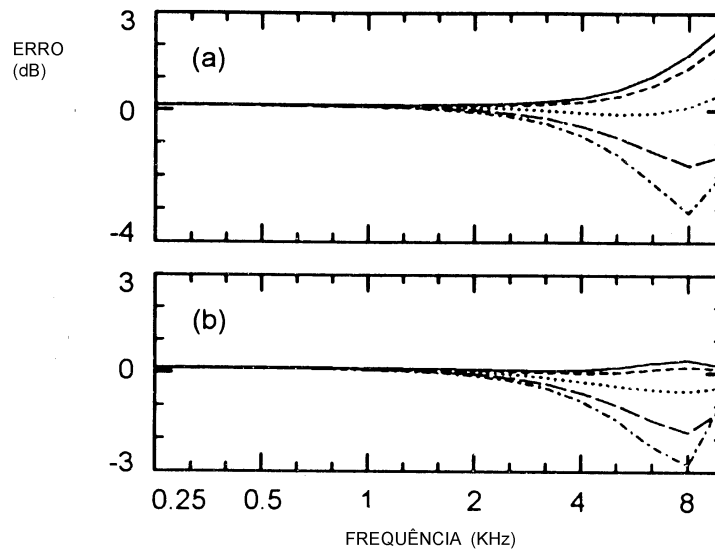


Figura 3.5 Erro do nível de intensidade sonora devido à aproximação de diferenças finitas e ressonância da cavidade dos microfones de $\frac{1}{2}$ ", para uma onda plana de incidência axial com diferentes separações de microfones, Jacobsen, Cutanda e Juhl (1996)

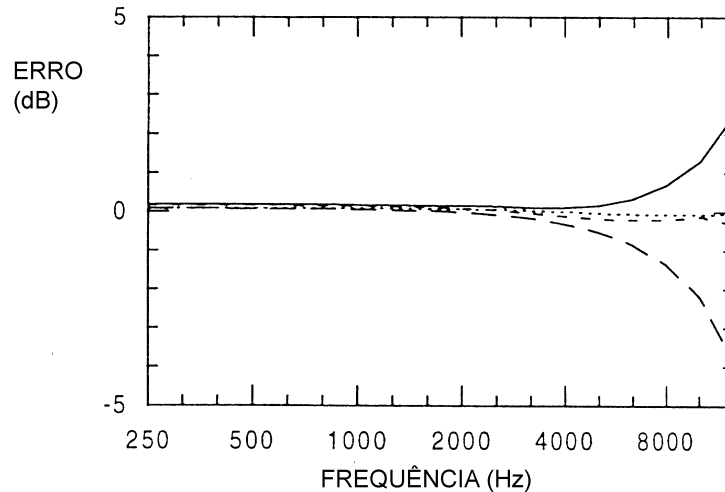


(a) 8,5 mm de espaçamento; (b) 12 mm de espaçamento.
 —(0°); ----(23°);(40°); ———(60°); — · —(80°).

Figura 3.6 Erro do nível de intensidade sonora devido à aproximação de diferenças finitas e ressonância da cavidade dos microfones de $\frac{1}{2}$ ", para uma onda plana devido a variação do ângulo de incidência do vetor intensidade, Jacobsen, Cutanda e Juhl (1996):

Jacobsen, Cutanda e Juhl (1998) apresentaram novamente um estudo da extensão das medidas até altas frequências analisando agora os erros devido a aproximação por diferenças finitas na potência sonora. Os erros em uma condição de campo livre sem ruído de fundo, Figura 3.7, estão de acordo com os obtidos em Jacobsen, Cutanda e Juhl (1996), para a intensidade, Figura 3.5. Foram realizadas também medições na presença de outra fonte sonora, sendo a segunda fonte 10 dB acima da fonte em análise posicionada paralelamente a 2 metros da superfície de medição, Figura 3.8a, segunda fonte 20 dB acima da fonte em análise posicionada paralelamente a 2 metros da superfície de medição, Figura 3.8b, segunda fonte 20 dB acima da fonte em análise posicionada diagonalmente a 2 metros da superfície de medição, Figura 3.8c. Na Figura 3.8a nota-se o bom desempenho da sonda com microfones de $\frac{1}{2}$ " e 12 mm de separação sendo que na Figura 3.8b o mesmo não ocorre devido ao ruído de fundo ser mais elevado. Em 3.8c vê-se que o posicionamento da segunda fonte na direção dos vértices da superfície de medição melhora o desempenho do sistema sendo similar aos resultados representados nas Figuras 3.7 e 3.8a. A configuração de microfone de $\frac{1}{2}$ " e separação de 8,5 mm

mostrou-se mais suscetível a variação do ângulo de incidência de uma onda plana em relação a configuração de microfone de 1/2" e separação de 12 mm.

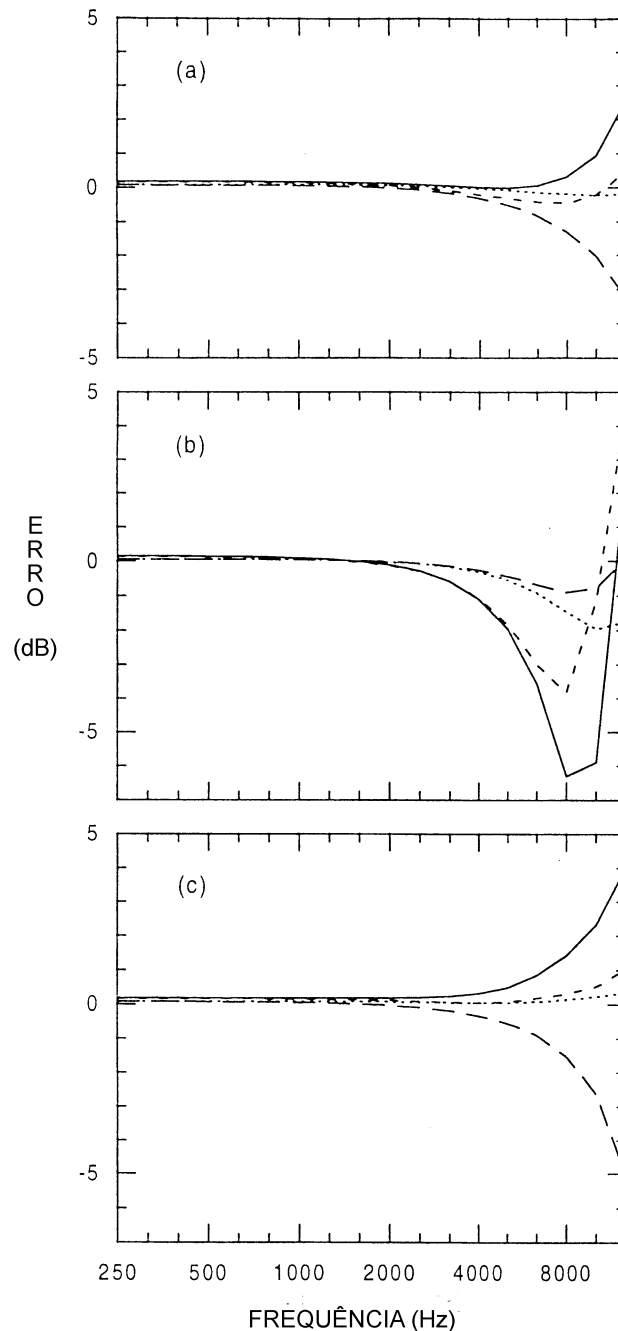


— (microfones de 1/2" e separadores de 8,5 mm); ---- (microfones de 1/2" e separadores de 12 mm); (microfones de 1/4" e separadores de 6 mm); — (microfones de 1/4" e separadores de 12 mm)

Figura 3.7 Erro do nível de potência sonora devido à aproximação de diferenças finitas e ressonância da cavidade dos microfones de 1/2", para uma onda plana de incidência axial com diferentes separações de microfones, sem ruído de fundo na condição de campo livre, Jacobsen, Cutanda e Juhl (1998)

Jacobsen e Jhul (2004) sugeriram a substituição da aproximação por diferenças finitas pela equação 3.33. Esta elimina o erro por diferenças finitas em vários tipos de campos acústicos diminuindo também o efeito da difração. Com isso os valores da pressão sonora deixam de ser subestimados nas altas frequências. Possibilita também uma melhor precisão na obtenção dos índices de campo. Sendo p_1 e p_2 os valores de pressão sonora nos microfones 1 e 2 e w um fator de peso. O valor sugerido para w é de 0,775. Durante um período, vários autores utilizaram várias distâncias de separação entre os microfones para estender o limite máximo de frequências analisadas. Esta prática foi deixada de lado devido à pelo menos dobrar o tempo das medições.

$$\Delta p = wp_1 + (1 - w)p_2 \quad 3.33$$



(a) segunda fonte 10 dB acima da fonte em análise posicionada paralelamente a 2 metros da superfície de medição; (b) segunda fonte 20 dB acima da fonte em análise posicionada paralelamente a 2 metros da superfície de medição; (c) segunda fonte 20 dB acima da fonte em análise posicionada diagonalmente a 2 metros da superfície de medição
 — (microfones de $\frac{1}{2}$ " e separadores de 8,5 mm); --- (microfones de $\frac{1}{2}$ " e separadores de 12 mm); (microfones de $\frac{1}{4}$ " e separadores de 6 mm); —·— (microfones de $\frac{1}{4}$ " e separadores de 12 mm)

Figura 3.8 Erro do nível de potência sonora devido à aproximação de diferenças finitas e ressonância da cavidade dos microfones de $\frac{1}{2}$ ", para uma onda plana de incidência axial com diferentes separações de microfones, na condição de campo livre, Jacobsen, Cutanda e Juhl (1998)

3.3.2 Erros aleatórios associados ao processamento de sinais

Mesmo que um erro sistemático da intensidade estimada possa ser quantificado ainda restará a incerteza sobre a diferença entre um valor estimado indicado pelos dispositivos de medição e seu valor real. Esta diferença é chamada de erro aleatório. O erro aleatório acontece quando, por diferenças ou limitações da instrumentação, como geração interna de sinais e desarranjo de fases nos transdutores, que não pertençam ao processo, como ruídos induzidos por vibrações, sinais externos como velocidade do fluxo de ar gerado pela fonte de ruído ou excesso de reverberação no ambiente, e erro na quantidade de amostras, tempo de medição não se obtém o valor verdadeiro da grandeza.

Pela própria natureza do erro aleatório este só pode ser quantificado em uma análise estatística. A incerteza do espectro estimado, derivado dos sinais gerados pelos transdutores, é comumente assumida como uma distribuição normal. Esta consideração é baseada no fato que uma estimativa da quantidade espectral é obtido pela média de um número de medições individuais, idealmente, consideradas estatisticamente independentes. Neste caso, o teorema do limite central de Gauss diz que a estimativa média estará distribuída normalmente e sua variância será inversamente proporcional ao número de estimativas. Assim, a repetição dos procedimentos de medição tendem a diminuir os erros aleatórios já que convergem para um valor médio (JACOBSEN 1989c). A tabela 3.1 indica os valores do desvio padrão de uma série de medições em função da frequência e para a condição de engenharia e análise, segundo a ISO 9614-2 (1995). Nesta, o valor em dB(A) deve ser obtido através da soma das frequências. A Tabela 3.2 indica os valores de desvio padrão segundo a ISO 9614-3 (2002). Para a classe de precisão de Engenharia o erro na escala “A” pode ser de até 3 dB(A) para 95% de incerteza.

Tabela 3.1 Desvio padrão sugerido pela norma ISO 9614-2 (1995)

Frequências Hz		Desvio Padrão	
Bandas de Oitava	1/3 de Bandas de Oitava	Engenharia dB	Análise dB
63 - 125	50 - 160	3	
250 - 500	200 - 630	2	
1000 - 4000	800 - 5000	1,5	
	6300	2,5	
Escala “A”		1,5 dB(A)	4 dB(A)

Tabela 3.2 Desvio padrão sugerido pela norma ISO 9614-3 (2002)

Frequências Hz		Desvio Padrão
Bandas de Oitava	1/3 de Bandas de Oitava	Precisão (dB)
63 - 125	50 - 160	2
250 - 500	200 - 630	1,5
1000 - 4000	800 - 5000	1
	6300	2
Escala "A"		1 dB(A)

Jacobsen (1989c) analisando os erros aleatórios na intensimetria concluiu que estes seriam elevados se a intensidade média for pequena devido às mudanças de sinal dos valores parciais da intensidade no espectro de frequência e se a diferença de fase entre a pressão e a velocidade for ortogonal, comum de acontecer no campo próximo da fonte e na presença de ruídos estranhos.

Jacobsen (1989a) analisando os erros aleatórios na determinação da potência sonora concluiu que os mesmos dependiam do campo acústico, da diretividade da fonte e do tempo médio de integração do vetor intensidade, mas não do processo de medição, pontos discretos ou varredura. Alertou também que caso as condições ambientais deteriorassem, como o aumento do ruído de fundo, estes erros aumentariam, mesmo com uma pequena velocidade de varredura ou um tempo elevado de integração do vetor velocidade.

Jacobsen (1992) apresentou suas observações sobre alguns tipos de erros na presença de elevado ruído de fundo. Concluiu que o ruído de fundo agrava os erros da quantidade de amostra, os erros relacionados com o tempo de medição e o erro causado pela diferença de fase.

Jacobsen (1993) analisou o erro causado pelo ruído elétrico no sistema de medição. Concluiu que não causam erros sistemáticos na medição de intensidade sonora mas aumenta os erros aleatórios, principalmente nas baixas frequências. O problema torna-se mais evidente nas baixas frequências, em medições de fontes de baixo nível de potência sonora (menores que 40 dB), ou na determinação do δ_{PI0} , Índice Pressão Intensidade Residual, cujos valores também são pequenos.

Fahy (1995) alerta que a inversão de sinal do vetor intensidade em diferentes posições na superfície de medição aumenta o erro aleatório. A presença de ruídos de fundo elevado aumenta este efeito o que torna o erro devido ao desarranjo de fase dos canais mais significativo. Sugere para a correção deste efeito o aumento do tempo de integração da varredura da sonda.

Hongisto e Saine (1996) alertam para que o ruído de fundo seja pelo menos 7 dB inferior ao da fonte analisada, pois caso contrário, inverteria a direção do vetor intensidade causando valores negativos. A mesma conclusão chegaram Pettersen e Olsen (1997) concluindo que na presença de elevado ruído de fundo os erros de medição podem ser elevados, mesmo com índices de campo favoráveis.

3.3.2.1 Erro devido ao desarranjo de fase do sistema de medição

É muito importante que os dois canais dos microfones do sistema de medição tenham respostas aos impulsos recebidos (amplitude e fase) bem coordenados. O efeito do desarranjo de fase destes canais sob a precisão de qualquer instrumento de medição depende da magnitude da diferença da pressão sonora na sensibilidade interna dos microfones. Este último depende da natureza do campo sonoro e da orientação e localização da sonda (FAHY, 1995). A Figura 3.9 ilustra o significado do desarranjo de fase dos transdutores e a diferença de fase da pressão sonora, sendo ϕ_s o desarranjo de fase entre os canais dos microfones e ϕ_f a diferença de fase entre os sinais.

Chung (1978), analisando a equação 3.20 concluiu que a mesma é muito sensível a desarranjos de fase e que em laboratório, sob condições controladas, as medições poderiam ser executadas sem problemas. Nestes locais pode-se calibrar as fases com precisão e mantê-las sob monitoramento, o que não acontece em medições de campo, tornando-se, na época, um problema para a metodologia ainda em desenvolvimento. Para corrigir esta limitação, Chung propôs a realização de duas medições com os canais trocados, o que garantiria o cancelamento do desarranjo de fase. Esta interposição de

canais deveria incluir os microfones passando pelos filtros, amplificadores e demais componentes. Apesar dos bons resultados obtidos por Chung este método implica em se dobrar o tempo de medição.

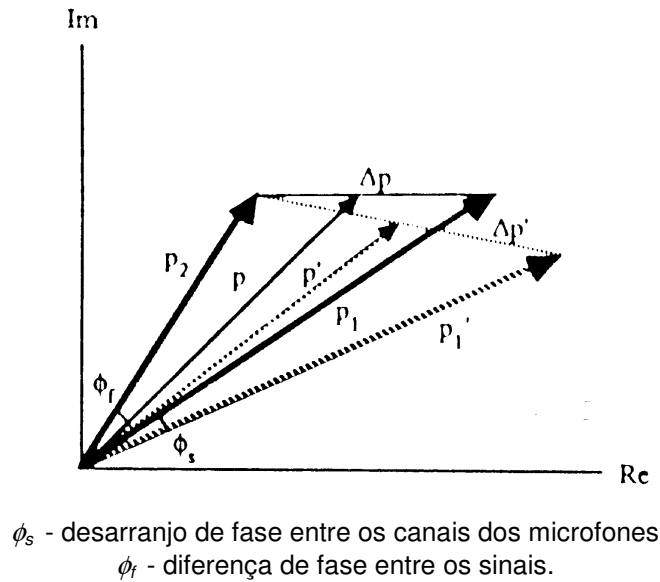


Figura 3.9 Desarranjo e diferença de fase entre dois vetores, Fahy (1995).

Krishnappa (1981) propôs um sistema de calibração dos canais do sistema medição evitando a necessidade de interposição dos canais. O procedimento proposto consiste em se submeter os dois microfones à mesma pressão sonora possibilitando corrigir a densidade de espectro cruzado através da utilização das funções de transferência.

Hübner (1984) levantou a necessidade de se criar condições para que a determinação da potência sonora através da intensimetria fosse realizada em campo, já que sua grande contribuição está na realização das medições no local de funcionamento do equipamento. Nestes locais, existem muitas vezes condições adversas, como campos acústicos desconhecidos e complexos, com ruído de fundo elevado, fatos que agravam o erro causado pelo desarranjo de fase dos canais de medição. Assim Hübner sugeriu que se criasse uma metodologia para se avaliar em que condições as medições são realizadas. Estes “*indicadores de campo acústico*”, como este autor os chamou indicaria a faixa de frequência onde as medições seriam confiáveis, dimensão do volume de medição, características do campo acústico e condições do campo estacionário. A evolução do

estudo destes índices por diversos autores convergiu para os índices de campo utilizados pela série de normas ISO 9614.

Jacobsen (1991a) desenvolveu um método para a correção do desarranjo de fase dos canais de medição. Os índices de campo, que estavam em desenvolvimento, permitiam medições com uma certa precisão, apesar do erro de desarranjo de fase. Autores como Gade (1985), Hübner (1987) e Fahy (1989) não aconselhavam este tipo de procedimento. Gade alegou que este método só teria interesse acadêmico. Fahy e Hübner alegaram que a correção seria inválida caso o Índice Pressão Intensidade, δ_{PI} , exceder a capacidade dinâmica L_D . Apesar destas discordâncias Jacobsen mostrou experimentalmente, em várias condições adversas, a validade de sua proposta. Neste trabalho utilizou microfones calibrados de 1/2" de diâmetro com distanciador sólido de 12 mm como referência. Estes possuíam Índice de Pressão Intensidade Residual, δ_{PI0} , de 18 dB entre 250 Hz e 5 KHz e 15 dB para 125 Hz. Pela equação 3.34 pode-se concluir que a determinação da razão $\left(\frac{I_0}{p_0^2} \right)$ eliminará o erro de desarranjo de fase. Para a obtenção desta razão deve-se posicionar a sonda no campo próximo de uma grande caixa acústica com seu eixo alinhado paralelamente ao do cone do auto falante, Figura 3.10. A caixa deve irradiar um ruído branco. Após a primeira medição os microfones devem ser trocados de posição. Os resultados das duas medições devem ser aplicados na equação 3.35 e com isso corrigir o erro.

$$I_r = \hat{I}_r - I_0 * \left(\frac{p^2}{< p_0^2 >} \right) \quad 3.34$$

Onde I_r é a componente real da intensidade sonora, $\hat{I}_r$ é o valor da componente estimada da intensidade sonora sujeita ao erro de fase, I_0 componente da intensidade residual, $<p^2>$ a pressão média quadrática e $<p_0^2>$ a pressão sonora obtida através da intensidade residual.

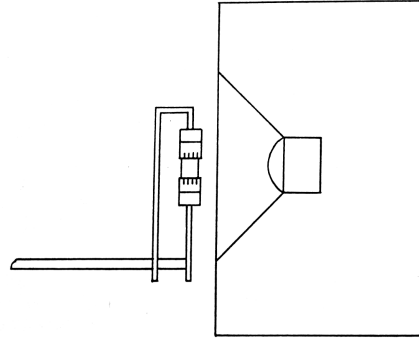


Figura 3.10 Esquema de posicionamento da sonda para correção do erro de fase, Jacobsen (1991)

$$\left(\frac{I_0}{p_0^2} \right) = \left[\left(\frac{I_1}{p_1^2} \right) + \left(\frac{I_2}{p_2^2} \right) \right] * \frac{1}{2} \quad 3.35$$

Caso apenas os microfones sejam invertidos a diferença das duas medições representará somente o erro dos mesmos. Caso seja invertido todo o sistema de medição o erro devido ao desarranjo de fase poderá ser corrigido.

A diferença de fase em uma onda plana progressiva varia entre $k*d$ e 0 conforme a rotação da sonda em torno do próprio eixo de referência. Esta, $k*d=\phi_0$, pode ser aceita como referência de valor em desarranjo de fase em outros campos sonoros (FAHY, 1995), sendo k o número de onda e d a distância de separação entre os microfones. Uma medida

aproximada da razão $\frac{\phi_0}{\phi_f - \phi_s}$ pode ser obtida da equação 3.14. Sendo ϕ_1 e ϕ_2 os ângulos

de fase nos microfones 1 e 2, para $(\phi_1 - \phi_2) = \phi \ll 1$, que é o caso da gama de frequências de abrangência da sonda de intensimetria, a diferença de fase é $\phi = \phi_0 = \pm kd$ e $c=\omega/k$, portanto a equação 3.14 torna-se a equação 3.36a e 3.36b:

$$I_0 = \frac{P_1 P_2}{2 * \rho_0 * c} \quad 3.36a$$

$$I_0 = \frac{p^2}{\rho_0 * c} \quad 3.36b$$

Sendo I_0 o valor de referência do vetor intensidade sonora para uma onda plana progressiva, I_i o valor médio do vetor intensidade no eixo da sonda, pode-se escrever o seu valor absoluto, $|I_i|$ em relação a intensidade de referência I_0 como na equação 3.37:

$$\left| \frac{I_i}{I_0} \right| = \left| \frac{\phi_f - \phi_s}{\phi_0} \right| \quad 3.37$$

O lado direito da equação 3.37 pode ser reescrito em função da pressão sonora e do vetor intensidade sonora, equação 3.36b, como na 3.38:

$$\left| \frac{I_i}{I_0} \right| = \left| \frac{I_i}{\left(\frac{p^2}{\rho_0 * c} \right)} \right| \quad 3.38$$

Aplicando os logaritmos e introduzindo o valor de referência do nível de pressão sonora , p_{ref}^2 na equação 3.38:

$$\begin{aligned} 10 \log \left| \frac{I_i}{I_0} \right| &= 10 \log |I_i| - 10 \log \left| \frac{p^2}{\rho_0 * c} \right| \\ 10 \log \left| \frac{I_i}{I_0} \right| &= 10 \log |I_i| - 10 \log \left| \frac{p^2}{p_{ref}^2} \right| - 10 \log \left| \frac{p_{ref}^2}{\rho_0 * c} \right| \end{aligned} \quad 3.39 \text{ (a, b)}$$

Como o valor de referência do nível de intensidade sonora é $I_{ref} = \frac{p_{ref}^2}{\rho_0 * c}$:

$$\begin{aligned}
10\log\left|\frac{I_1}{I_0}\right| &= 10\log|I_1| - 10\log\left|\frac{p^2}{p_{ref}^2}\right| - 10\log|I_{ref}| \\
10\log\left|\frac{I_1}{I_0}\right| &= 10\log\left|\frac{I_1}{I_{ref}}\right| - 10\log\left|\frac{p^2}{p_{ref}^2}\right| \\
10\log\left|\frac{I_0}{I_1}\right| &= 10\log\left|\frac{p^2}{p_{ref}^2}\right| - 10\log\left|\frac{I_1}{I_{ref}}\right|
\end{aligned}
\tag{3.40 (a, b, c)}$$

Aplicando a equação 3.40c na equação 3.41 obtém-se um indicador do desarranjo de fase dos canais do sistema de medição em função da diferença entre o nível de pressão sonora, L_p , e o nível de intensidade sonora, L_I , como indicado na equação 3.41. Jacobsen (1989b e 1990) foi quem desenvolveu este índice e mostrou a utilidade desta verificação.

$$10\log\left|\frac{\phi_0}{\phi_f \pm \phi_s}\right| = L_p - L_I \tag{3.41}$$

O sinal da componente linear da intensidade sonora indica o sinal de $\phi_f \pm \phi_s$. A diferença entre o nível de pressão sonora e o nível de intensidade sonora da componente acústica é conhecida como Índice Pressão Intensidade, denominado, δ_{PI} , e serve para quantificar o desarranjo de fase do sistema. O termo componente é utilizado, pois a sonda indica o valor da intensidade sonora somente na componente normal ao seu eixo. As normas ISO 9614-2 (1995) e ISO 9614-3 (2002) consideram o δ_{PI} como um índice de campo denominando-o de F_{PI} . A ISO 9614-1 (1993) o denomina de F_3 . Caso seja considerada apenas a parte escalar da intensidade, sem sinal caracterizando o sentido vetorial, o índice de campo será denominado de F_2 .

$$\delta_{PI} = L_p - L_I \quad (\text{dB}) \tag{3.42}$$

O Índice Pressão Intensidade é influenciado pelo campo acústico, posição e orientação do campo sonoro e desarranjo de fase dos transdutores (FAHY, 1995). A distância de separação dos microfones pouco influencia a diferença de fase da pressão sonora entre dos microfones, ϕ_f , e o desarranjo de fase dos transdutores ϕ_s a não ser que sejam similares, o que é inaceitável (FAHY, 1995). Como o desarranjo de fase indica um valor de

δ_{PI} , que é diferente do verdadeiro valor do campo pela introdução de um erro de leitura da intensidade, δ_{PI} não pode ser estritamente um indicador de erro, mas pode ser um parâmetro das dificuldades de se conseguir um resultado satisfatório do valor da intensidade. O erro normalizado do desarranjo de fase, $e_\phi(I)$, pode ser escrito como na equação 3.43:

$$e_\phi(I) = \frac{\phi_s}{\phi_f}. \quad 3.43$$

Caso a sonda esteja em um campo sonoro especialmente controlado, como proposto por Krishnappa (1981), com pressão uniforme tal que a equação 3.5 seja igual a zero e que resulte em $\phi_f = 0$ e $I_i = 0$; a razão $\frac{\phi_0}{\phi_f - \phi_s}$ torna-se apenas $\frac{\phi_0}{\phi_s}$ alterando a equação 3.41 para:

$$10 \log \left| \frac{\phi_0}{\phi_s} \right| = L_p - L_{I0} \quad 3.44$$

O valor correspondente do Índice Pressão Intensidade torna-se conhecido como Índice Pressão Intensidade Residual, δ_{PI0} , que é uma medida de desarranjo de fase do sistema de medição, sendo agora um indicador de qualidade. A diferença entre δ_{PI0} e δ_{PI} , medido em um campo sonoro é a medida do erro normalizado, $e_\phi(I)$ mostrando que ϕ_s é independente do campo acústico (FAHY, 1995). Combinando as equações de 3.31 e 3.44 pode-se relacionar o Índice Pressão Intensidade e o Índice Pressão Intensidade Residual, como em 3.45 (a, b, c, d).

O valor de $\delta_{PI0} - \delta_{PI}$ é denominado de L_ϕ , Índice de Erro de Fase, onde o erro aumenta enquanto o índice diminui. Para um erro normalizado de $\pm 0,25$ ou um erro estimado de $e_\phi(I) = \pm 1 \text{ dB}$ [$10 \cdot \log(1 + 0,25) \approx 1 \text{ dB}$], $L_\phi \approx 7 \text{ dB}$ [$10 \cdot \log(1 + 1 / 0,25) = 7$]. Na Figura 3.11 está representado um valor típico de δ_{PI0} . A Figura 3.12 mostra o valor de $e_\phi(I)$ e seu correspondente valor de $10 \cdot \log[1 + e_\phi(I)]$, em função de L_ϕ .

$$\begin{aligned}
\delta_{PI0} - \delta_{PI} &= 10 \log \left| \frac{\phi_0}{\phi_s} \right| - 10 \log \left| \frac{\phi_0}{\phi_f \pm \phi_s} \right| \\
\delta_{PI0} - \delta_{PI} &= 10 \log \left| \frac{\phi_0}{\phi_s} * \frac{\phi_f \pm \phi_s}{\phi_0} \right| \\
\delta_{PI0} - \delta_{PI} &= 10 \log \left| 1 \pm \frac{\phi_f}{\phi_s} \right| \\
\delta_{PI0} - \delta_{PI} &= 10 \log \left| 1 \pm \frac{1}{e_\phi(I)} \right|
\end{aligned}
\tag{3.45 (a, b, c, d)}$$

Além do desarranjo de fase entre os canais dos microfones do sistema de medição pode haver também o desarranjo de sensibilidade entre os microfones, alterando as medições de pressão sonora e da velocidade da partícula indiretamente. O desarranjo de fase associado ao desarranjo de sensibilidade dos transdutores provoca um acoplamento bastante complexo e o erro resultante depende das características do campo sonoro sob investigação (FAHY, 1995). A partir da equação 3.45 pode-se determinar diretamente o erro normalizado devido ao desarranjo de fase, $e_\phi(I)$, como na equação 3.46:

$$e_\phi(I) = \left(\left| 10^{\left(\frac{L_\phi}{10} \right)} \pm 1 \right| \right)^{-1}
\tag{3.46}$$

Se for admitido um erro máximo aceitável, um critério de performance da instrumentação, este deve ser colocado em função do Índice de Erro de Fase, L_ϕ . Um erro normalizado de $\pm 0,25$ corresponde a aproximadamente a um valor de $L_\phi = 7 \text{ dB}$ e a um $e(I) = 1 \text{ dB}$. A diferença entre o L_ϕ da instrumentação e o $L_\phi \text{ mim}$, aceitável para o caso estudado é denominado de Capacidade Dinâmica, L_D , equação 3.47a.

As incertezas do erro aleatório ligado ao processo de medição são limitadas pela seleção do Fator de Erro de Fase, K , de acordo com a exatidão desejada. O fator K não leva em conta as tolerâncias de instrumentação, que são específicas da IEC 61043 (1993), tão pouco a variação das condições de funcionamento da fonte (FAHY, 1995).

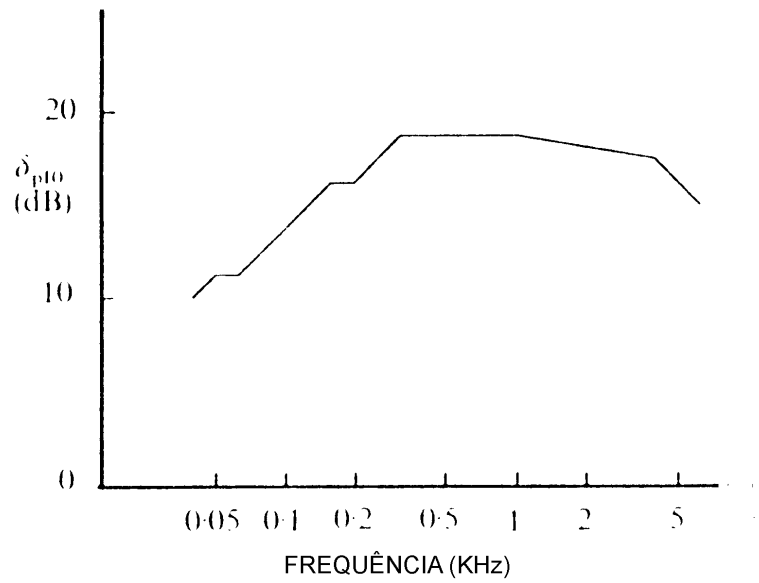


Figura 3.11 Valor típico do Índice Pressão Intensidade Residual, δ_{P10} , Fahy (1995).

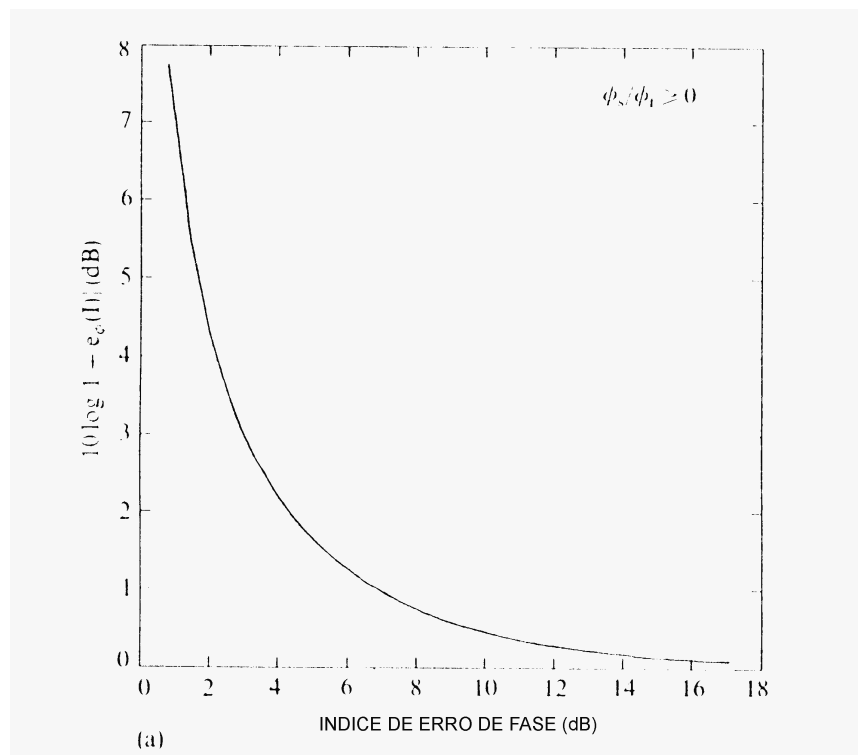


Figura 3.12 Valor do $e_\phi(l)$ e seu correspondente valor de $10 \log(1 + e_\phi(l))$, em função do Índice de Erro de Fase, L_ϕ , Fahy (1995).

A norma ISO 9614-1 (1993) especifica o valor de K segundo várias classes de precisão: classe 1 (precisão) e classe 2 (engenharia) com valor de K igual a 10 e classe 3 (medições aproximadas) com K igual a 7. A norma ISO 9614-2 (1995), determina que o valor de K deva ser 10 para classe 2 e 7 para classe 3. A ISO 9614-3 (2002) permite apenas valores de K igual a 10 para classe 1. Toda a série ISO 9614 estabelece como critério para validação dos resultados a inequação 3.47b que verifica a capacidade da instrumentação devido ao erro de desarranjo de fase. A presença de ruídos estranhos à fonte sonora analisada pode agravar este erro dificultando que a inequação 3.47b seja satisfeita (JACOBSEN, 1997). Neste caso deve-se aproximar a superfície de medição da fonte em análise. Caso não seja possível a aproximação por condições ambientais, como temperatura elevada, ou físicas, pode-se diminuir o campo reverberante através de adição de material de absorção sonora no local de medição. A correção dos erros através da equação 3.44 também pode ser implementada nessas situações.

$$\begin{aligned} L_D &= \delta_{PI0} - K \\ L_D &\geq \delta_{PI} \end{aligned} \quad 3.47 \text{ (a, b)}$$

Além das condições impostas pelas equações 3.47a e 3.47b vários autores sugerem para δ_{PI} um valor máximo de 10 dB a fim de se evitar que campos acústicos complexos aumentem o erro de desarranjo de fase. O desarranjo de fase ϕ_s entre os canais dos transdutores pode ser determinado pelo Índice Pressão Intensidade Residual, δ_{PI0} , combinando as equações 3.40 e 3.44, obtendo-se assim a equação 3.48:

$$\begin{aligned} 10 \log \left| \frac{\phi_0}{\phi_f \pm \phi_s} \right| &= \delta_{PI} \\ 10 \log \left| \frac{k * d}{\pm \phi_s} \right| &= \delta_{PI0} \\ \frac{k * d}{\pm \phi_s} &= 10^{\frac{\delta_{PI0}}{10}} \\ \phi_s &= \pm (k * d) * 10^{\frac{-\delta_{PI0}}{10}} \end{aligned} \quad 3.48 \text{ (a, b, c, d)}$$

O erro de desarranjo de fase pode ser grande, principalmente se a diferença entre as intensidades for pequena e não é exclusivo das baixas frequências (JACOBSEN, 1991). Os erros positivos são menos relevantes que os negativos pois causam um aumento na estimativa da intensidade aproximando o valor medido do real. Ruídos elétricos e vibrações mecânicas podem também afetar aleatoriamente os resultados.

A maioria das medições de potência sonora é efetivada em ambientes reverberantes e na presença de fontes desconhecidas que geram campos estacionários. Estas fontes possuem nível de intensidade sonora cujas características harmônicas e vibratórias são semelhantes, e portanto, bastante coerentes entre si. Em casos de fontes não periódicas ou próximas, as fases de contribuição serão distribuídas por 2π radianos e devem ser consideradas aleatórias e o campo idealmente difuso. Se a pressão média quadrática do campo difuso não for menor que a da fonte sonora medida na área de integração, o erro de desarranjo de fase do instrumento será aumentado. Portanto, como a pressão do campo sonoro diminui quando se afasta da fonte o aumento da dimensão da superfície de medição é proporcional ao erro de desarranjo de fase.

3.3.2.2 Erro devido à absorção da fonte

A intensimetria permite sua execução na presença de outras fontes sonoras. Isto ocorre porque toda energia sonora gerada fora do volume que envolve a fonte é captada pela sonda com sinal negativo quando passa pela superfície de medição. Quando sai do volume esta energia é considerada positiva. Caso a fonte em análise possua capacidade de absorção sonora entrará mais energia do que sairá, ou seja, a potência sonora será subestimada. A norma ISO 9614-2 (1995) estabelece um índice de campo para a verificação do efeito da variação do fluxo de vetores de intensidade sonora na presença de ruído de fundo, o que pode ser um indicativo da quantidade de absorção da fonte em análise. Este é calculado pela diferença do nível de potência sonora, considerando apenas sua parte escalar, ou seja em módulo, subtraído pelo nível de potência sonora considerando também sua parte vetorial. Este índice de campo é denominado $F_{+/-}$ e pode

ser obtido através da equação 3.49. O limite máximo para este índice é de 3 dB. Na norma ISO 9614-1 (1993) o índice $F_{+/-}$ se equivale à diferença entre os índices ($F_2 - F_3$).

$$F_{+/-} = 10 * \text{Log} \left[\frac{\sum |W_i|}{\sum W_i} \right] \quad \text{dB} \quad 3.49$$

A dimensão da face lateral da superfície de medição também influi no erro devido a absorção. Caso seja similar a dimensão da fonte sonora, o fluxo de energia sonora gerado fora do volume de medição terá dificuldade em transpassá-lo. Sendo a superfície lateral do volume de medição algumas vezes maior que a fonte, a média temporal e espacial proporcionada pelo método de varredura eliminará este efeito. Para se determinar um indicador deste erro deve-se utilizar o Fator de Relação entre a Área da Fonte e da Superfície de Medição, $F_{rel.}$.

Astrup (1997) alerta para os erros causados pelo excesso de absorção dentro da superfície de medição, principalmente na presença de elevado ruído de fundo. Hübner e Wittstock (2001) sugerem que na presença de ruídos estranhos pode-se determinar e corrigir o erro devido a absorção sonora da fonte. Este é obtido desligando a fonte em análise e procedendo o “zero teste”, como denominado pelos autores. O “zero teste” consiste em proceder as medições com a fonte analisada desligada, portanto será captada apenas a energia sonora gerada fora do volume de medição. A potência sonora obtida durante o “zero teste” é equivalente a energia absorvida pela fonte. O valor da potência sonora real pode ser dado pela equação 3.50

$$W_{real} = W_{medida} + |W_{absorvida}| \quad 3.50$$

Sendo W_{real} a potência sonora verdadeira da fonte, W_{medida} a potência sonora obtida através da intensimetria e W_{abs} a potência sonora absorvida pela fonte. O erro na potência sonora, $e_{abs}(W)$, devido a absorção pode ser obtido pela equação 3.51:

$$e_{abs}(W) = \frac{W_{medida}}{W_{real}} \quad 3.51$$

Aplicando a equação 3.50 em 3.51:

$$e_{abs}(W) = \left(\frac{W_{real} - |W_{absorvida}|}{W_{real}} \right) = \left(1 - \frac{|W_{absorvida}|}{W_{real}} \right) \quad 3.52$$

Novamente aplicando a equação 3.51 em 3.52:

$$\begin{aligned} e_{abs}(W) &= \left(1 - \frac{|W_{absorvida}|}{W_{medida} + |W_{absorvida}|} \right) = \\ e_{abs}(W) &= \left(\frac{W_{medida} + |W_{absorvida}| - |W_{absorvida}|}{W_{medida} + |W_{absorvida}|} \right) = \\ e_{abs}(W) &= \left(\frac{W_{medida}}{W_{medida} + |W_{absorvida}|} \right) = \\ e_{abs}(W) &= \left(1 + \frac{|W_{absorvida}|}{W_{medida}} \right)^{-1} \end{aligned} \quad 3.53 \text{ (a, b, c, d)}$$

A razão entre a potência sonora absorvida pela fonte e a potência sonora obtida durante as medições pode ser escrita como em 3.54:

$$\left(\frac{|W_{absorvida}|}{W_{medida}} \right) = \left(\frac{|I_{n,zero}| * A}{I_{n,medida} * A} \right) = \left(\frac{|I_{n,zero}|}{I_{n,medida}} \right) \quad 3.54$$

Sendo $I_{n,zero}$ o valor da intensidade sonora na direção n obtido durante o “zero teste”, $I_{n,medido}$ o valor da intensidade sonora na direção do vetor n obtido durante as medições e A a área da superfície do volume de medição. Como se está procurando obter um índice de correção para a potência sonora absorvida pela fonte, é de uma característica prática e desejável que o mesmo derive dos índices de campo que validam as medições conforme a série de normas ISO 9614. No caso da ISO 9614-2 (1995) e ISO 9614-3 (2002) pode-se utilizar o índice F_{P1} ou F_3 como é denominado pela ISO 9614-1 (1993), que pode ser obtido através da equação 3.42. Reescrevendo a equação 3.42 com o auxílio da equação 3.36b na forma logarítmica:

$$\delta_{PI_n} = 10 * \text{Log} \left[\frac{1}{\rho_0 * c} \frac{p_{medido}^2}{I_{n,medido}} \right] \quad 3.55$$

A partir da equação 3.55 pode-se obter $I_{n,medido}$:

$$I_{n,medido} = \frac{p_{medido}^2}{\rho_0 * c} * 10^{\left(-\frac{\delta_{PI}}{10}\right)} \quad 3.56$$

$I_{n,zero}$ pode ser obtido de maneira análoga com a ressalva de inverter o sinal da equação 3.42 já que o erro devido à absorção sonora é negativo e se procura um índice de correção. O índice $\delta_{PI, zero}$ é o Índice Pressão Intensidade obtido durante o “zero teste” com o sinal invertido ($\delta_{PI,ZERO} = -\delta_{PI_n}$).

$$I_{n,zero} = \frac{p_{medido}^2}{\rho_0 * c} * 10^{\left(\frac{\delta_{PIzero}}{10}\right)} \quad 3.57$$

Combinando as equações 3.54, 3.55 e 3.57:

$$\left(\frac{|I_{n,zero}|}{I_{n,medida}} \right) = \frac{\left(\frac{p_{medido}^2}{\rho_0 * c} * 10^{\left(\frac{\delta_{PIzero}}{10}\right)} \right)}{\left(\frac{p_{medido}^2}{\rho_0 * c} * 10^{\left(-\frac{\delta_{PI}}{10}\right)} \right)} = 10^{(\delta_{PI,zero} + \delta_{PI})/10} \quad 3.58$$

Aplicando a equação 3.58 em 3.53 pode-se obter o erro devido à absorção da fonte na forma logarítmica, $Le_{abs}(W)$

$$Le_{abs}(W) = -10 * \text{Log} \left[1 + 10^{(\delta_{PI} + \delta_{PI,zero})/10} \right] \quad 3.59$$

O sinal negativo da equação 3.59 comprova que a absorção sonora causada pela fonte ou superfície de medição subestima a potência sonora obtida através da intensimetria. Caso $\delta_{PI, zero} \rightarrow -\infty$, $Le_{(abs)}$ será zero. Isto significa que a superfície de medição está próxima a um campo reverberante elevado e que a absorção da fonte se acopla à absorção do local

(HÜBNER e WITTSTOCK, 2001). Um outro índice de campo pode ser calculado em relação à absorção, δ_{abs} , que em sua forma logarítmica pode ser escrito pela relação da potência sonora absorvida, $W_{absorvida}$ e a potência sonora obtida durante as medições, W_{medida} . Para um erro devido à absorção da ordem de 0,41 dB δ_{abs} deve ser menor que – 10 dB. Assim, quando o valor de δ_{abs} for menor que –10 dB o erro devido a absorção pode ser desprezado, pois de aproxima de zero. Quando o valor de δ_{abs} for positivo o erro não poderá ser determinado pois o Índice Pressão Intensidade obtido durante o “zero teste” não atendeu a ISO 9614-2 (1995). Desta forma deve-se calcular o erro devido a absorção da fonte apenas quando δ_{abs} variar entre 0 e –10 dB.

$$\delta_{abs} = 10 * \text{Log} \left(\frac{|W_{absorvida}|}{|W_{medida}|} \right) = \delta_{PI} - \delta_{PI,zero} \quad \text{dB} \quad 3.60$$

3.3.2.3 Erro devido às condições ambientais

O desempenho dos microfones é afetado pela temperatura, umidade, campos magnéticos e tempo de uso. Somente microfones muito precisos são úteis à técnica da intensimetria e estes são os mais sensíveis a estas variações. As altas temperaturas de motores a combustão, por exemplo, podem aumentar o desarranjo de fase dos transdutores. Impactos mecânicos e a vibração induzida nos cabos e aparelhos podem gerar ruídos elétricos no sistema e leituras errôneas nos microfones. O desempenho da sonda varia segundo a temperatura e pressão e deve ser corrigido segundo estas características (HÜBNER e WITTSTOCK, 2004). A ISO 9614-1 (1993) e ISO 9614-2 (1995) determinam a distância mínima de 20 cm para que o efeito da temperatura não cause danos aos microfones. Alertam também para o gradiente de temperatura entre a fonte e o ambiente principalmente se a temperatura ambiental for elevada. A ISO 9614-3 (2002) estabelece com condições ambientais básicas a temperatura de 23°C e a pressão barométrica de 101,325 KPa e apresenta uma formulação para correções

3.3.2.4 Erro devido ao campo acústico da fonte

O campo acústico da intensidade sonora pode ser dividido em uma componente ativa e outra reativa (JACOBSEN, 1990). A parte ativa da intensidade sonora está relacionada ao transporte de energia, o que determina a potência sonora da fonte. A parte reativa está relacionada à energia que não é irradiada pela fonte, apenas se movimenta em sentidos alternados. Segundo Gade (1985) a intensidade sonora ativa possui as componentes de pressão e velocidade em fase, sendo que na intensidade sonora reativa estas são ortogonais. Pode-se também acrescentar ao campo acústico total o campo difuso gerado por ondas refletidas por uma superfície lisa próxima a fonte de medição. O campo acústico irradiado por uma onda plana unidirecional possui apenas a parte ativa da intensidade sonora pois a velocidade da partícula e a pressão acústica estão sempre em fase (NORTON, 1996). No caso de campos acústicos gerados por fontes monopolos e dipolos, isto ocorre somente no chamado campo distante. No campo próximo, a velocidade da partícula e a pressão acústica estarão fora de fase, ou seja é um campo onde a intensidade sonora possui componentes ativas e reativas (NORTON, 1996).

As medições implementadas pelo método indireto, através dos espectros cruzados no domínio da frequência, possuem uma parte real e outra imaginária. A parte real está relacionada com a componente ativa da intensidade sonora, ao passo que a parte imaginária se relaciona com a componente reativa.

Em geral a intensimetria recomenda a aproximação da sonda de medição da fonte sonora, a não ser em casos de altas temperaturas ou fluxos de ar com velocidades acima de 4 m/s (ISO 9614-2, 1995). As medições de intensimetria são procedidas *in loco*, onde existem campos acústicos bastante confusos, com reflexões sonoras e campos reverberantes de alta intensidade. As componentes ativas e reativas da intensidade sonora e o campo reverberante contribuem com a pressão média quadrática, sendo que o modo com que se correlacionam determina qual o grau de importância no campo acústico total (FAHY, 1995).

O campo acústico irradiado diretamente pela fonte em análise pode ser dividido em outros três tipos de campos: o campo acústico próximo a superfícies vibratórias ou não, o campo acústico distante e os campos acústicos gerados pelo ruído de fundo.

O campo acústico próximo a superfícies vibratórias ou não que geram um δ_{PI} elevado e agravam o erro devido à aproximação de diferenças finitas. É um campo predominantemente reativo (JACOBSEN, 1989b) onde a fase da velocidade da partícula é ortogonal em relação à pressão acústica (GERGES, 1992). Medições realizadas no campo próximo possuem a vantagem de não ser influenciada por ruídos externos à superfície do volume de medição (HÜBNER, 1983). Em situações de medição de superfícies vibratórias, a sonda deve ser afastada a uma distância onde não haja inversão de sinal do vetor intensidade, o que varia de acordo com as frequências analisadas (FAHY, 1995). A distribuição da intensidade sonora ativa no campo próximo é bem mais complicada que a distribuição da pressão sonora, indicando que medições próximas à fonte não são triviais (JACOBSEN, 2001).

No campo acústico distante o comportamento do δ_{PI} não pode ser generalizado mas possui uma tendência de ser positivo. Com o aumento da distância de medição o δ_{PI} diminuirá de valor, a não ser na presença de ruídos estranhos ou refletidos (FAHY, 1995), o que pode ajudar a determinar uma distância ótima de medição (LAVILLE, 1983). O campo acústico de ondas sonoras irradiadas pela própria fonte e refletidas é gerado por superfícies planas, como o chão e paredes, sendo que este é mais importante que as ondas refletidas por parte do equipamento em medição. O δ_{PI} varia fortemente com a movimentação da sonda e a distância ótima deve ser determinada a partir da análise da distância que minimizará o seu valor. Os campos próximo e reverberante também influem na sua magnitude. Lay (1991) alerta para a dificuldade em se implementar a intensimetria próxima a superfícies refletoras devido à coerência entre as ondas sonoras irradiadas pela fonte e as refletidas. Keith, Krishinappa e Chiu (2000) verificaram que a aproximação da fonte de medição de uma parede aumenta o erro na potência sonora, sendo que este efeito torna-se maior quando a fonte é aproximada do vértice do local de medição.

Os campos gerados por um elevado ruído de fundo causarão um valor subestimado da potência sonora, principalmente se houver alguma absorção de energia dentro do volume de medição. Jacobsen (1992), Tachibana, Yano e Yamaguchi (1993), Jacobsen, Cutanda e Juhl (1998), Keith, Krishinappa e Chiu (2000), Hübner e Wittstock (2001), Souza e Gerges (2002) e Souza (2003) foram alguns autores, entre outros, que fizeram medições na presença de elevado ruído de fundo. Keith, Krishinappa e Chiu (2000) sugerem que o nível de pressão sonora gerada pelo ruído de fundo seja menor que o da fonte em pelo menos 6 dB para manter a precisão dos resultados. Souza (2003) concluiu que há um excessivo rigor da ISO 9614-2 (1995) para ensaios na presença de elevado ruído de fundo para obter uma precisão da classe de engenharia. Este efeito será tratado posteriormente.

3.3.2.5 Erro devido à equalização da pressão estática dos microfones

Os microfones de pressão possuem uma cavidade posterior ao diafragma que possibilita a equalização da pressão atmosférica. Caso contrário, qualquer diferença entre a pressão atmosférica e a pressão interna desta cavidade causaria uma deflexão no diafragma do microfone ocasionando uma perda na sua sensibilidade (BERANEK, 1988). Portanto, caso a pressão atmosférica não seja distribuída de maneira uniforme sobre o diafragma serão gerados erros de coleta de dados.

Jacobsen (1994a) ensaiou uma série de tipos de microfones a fim de verificar os erros devido à dificuldades de equalização da pressão da cavidade dos microfones. Concluiu que:

- ✓ A diferença na equalização da pressão dos microfones não interfere na estimativa da intensidade reativa em campos acústicos fortemente reativos gerados por fontes monopolo.
- ✓ Na presença de fontes dipolo os erros tornam-se significativos abaixo de 160 Hz.

✓ A equalização da pressão dos microfones origina um erro proporcional a intensidade reativa sendo equivalente ao desarranjo de fase entre a pressão e a velocidade.

✓ Erros elevados podem ocorrer no campo próximo a fonte sonora, principalmente nas baixas frequências. Este é mais freqüente nas fontes de pequeno porte, mas diminui rapidamente com o aumento da distância da superfície do volume de medição da fonte.

A norma IEC 61043 (1993) define dois tipos de microfones em relação a sua capacidade de equalização da pressão estática de sua cavidade. O microfone de orifício duplo é considerado um microfone convencional suscetível a este tipo de erro e o microfone de orifício simples considerado um microfone livre do erro de equalização da pressão da cavidade.

3.3.2.6 Erro devido ao desarranjo de fase na presença de elevado ruído de fundo

Jacobsen (1992) combinou o campo acústico gerado diretamente pela fonte em análise, o campo acústico gerado pelo ruído de fundo e a energia sonora do campo reverberante no estudo do erro normalizado de desarranjo de fase dos transdutores, $e_\phi(W)$, propondo a equação 3.61.

$$e_\phi(W) \cong \left(\frac{I_0 * \rho_0 * c}{p_0^2} \right) * \left(\frac{S_0 * c * T_{60}}{V * (6 * \ln 10)} \right) * \left(\frac{W_{tot}}{W} \right) \quad 3.61$$

Sendo I_0 a intensidade sonora de referência, $\langle p_0^2 \rangle$ a pressão média quadrática de referência, c a velocidade do som no ar, S_0 a área da superfície do volume de medição, T_{60} o tempo de decaimento sonoro medido em 60 segundos, V o volume do local de medição, W_{tot} a potência sonora total do ambiente e W a potência sonora da fonte. Reescrevendo a equação 3.42 em função do Índice Pressão Intensidade Residual, δ_{PI0} , na sua forma logarítmica, em analogia a equação 3.55, pode-se deduzir a equação 3.62a e 3.62b:

$$10 * \text{Log} \left(\frac{I_0 * \rho_0 * c}{p_0^2} \right) = -\delta_{PI0}$$

$$\left(\frac{I_0 * \rho_0 * c}{p_0^2} \right) = 10^{-\left(\frac{\delta_{PI0}}{10}\right)}$$
3.62 (a, b)

Combinando a equação 3.61 com 3.62b se obtém o erro devido ao desarranjo de fase na presença de ruído de fundo elevado, equação 3.63, agora em função do um índice de campo, δ_{PI0} . A relação W_{tot} / W não pode ser determinada com exatidão, mas uma ordem de grandeza é possível conseguir.

$$e_{\phi}(W) \cong 10^{-\left(\frac{\delta_{PI0}}{10}\right)} * \left(\frac{S_0 * c * T_{60}}{V * (6 * Ln10)} \right) * \left(\frac{W_{tot}}{W} \right)$$
3.63

3.3.2.7 Erro de amostra espacial na presença de elevado ruído de fundo

A idéia de se aproximar a superfície do volume de medição da fonte em análise para minimizar os erros devido à presença de ruído de fundo, devido ao campo reverberante e devido as ondas refletidas, comuns no processo de intensimetria, esbarra na dificuldade de trabalhar no campo acústico próximo à fonte. Provoca também o inconveniente da diminuição da superfície de integração do vetor intensidade para se obter a potência sonora da fonte, o que pode causar um erro na quantidade de amostras em análise. Portanto é conveniente saber qual a influência do erro na determinação da potência sonora devido ao campo próximo e qual o erro devido à diminuição das amostras com a diminuição da superfície de medição.

Jacobsen (1991b) analisando os erros devido à quantidade de amostras concluiu sobre a eficiência do método de varredura e que este não causa um erro de amostragem superior ao método dos pontos discretos. As principais fontes de erro na quantidade de amostras são a aproximação da integral de superfície por uma integral de linha; a dificuldade de manter a sonda em velocidade constante e alinhada com a superfície de medição e a necessidade de se modificar a velocidade da sonda em pontos onde a fonte sonora emite

ruídos aleatórios; e o erro associado ao tempo de amostragem que está relacionado a velocidade de varredura. A substituição da integral de superfície por uma integral de linha no método de varredura produz uma aproximação melhor que a substituição de uma integral de superfície pela somatória dos resultados individuais das medições em pontos discretos, portanto não seria a principal causadora dos erros, principalmente em situações em que a distância entre as linhas de varredura se equivalem à distância dos pontos discretos. Citando os trabalhos de Borckhoff (1984) e Pope (1985), Jacobsen concluiu que a variação da velocidade de varredura da sonda também não é uma fonte significativa de erro. Portanto a terceira fonte de erro na determinação da potência sonora é a mais significativa. Este é dependente da velocidade de varredura e da dimensão da superfície de medição sendo independente do processo de obtenção, varredura ou pontos discretos (JACOBSEN, 1989a).

Pettersen (1997) chegou as mesmas conclusões de Jacobsen (1989a) quando afirmou que “a precisão da medição está ligada ao tempo de integração”. Concluiu também que a densidade de linhas, o ponto de partida para a varredura, a inclusão ou não dos cantos na varredura do volume de medição, varredura vertical ou horizontal pouco influem no valor da intensidade média final.

Souza (2003) cita um novo procedimento no processo de varredura o qual difere na sua forma do sugerido pela ISO 9614-2 (1995), mas seguindo suas especificações gerais. Segundo o autor este procedimento fornece uma melhor amostragem ao longo do tempo, facilitando o critério da série ISO 9614 do campo ser estacionário. Conclui que este processo não altera a precisão das medições em um campo estacionário, mas pode trazer alguns benefícios para os campos não estacionários. Jacobsen (1992) associou o erro causado pelo número de variáveis estatísticas independentes, N_{eq} , com o erro gerado por ruídos estranhos sugerindo a equação 3.64

$$e_{am}(W) \cong \left(\frac{1}{(\sqrt{N_{eq}}) * \left(\sqrt{6 * \left(1 + \frac{B * T_{60}}{3 * Ln10} \right)} \right)} \right) * \left(\frac{S_0 * c * T_{60}}{V * (6 * Ln10)} \right) * \left(\frac{W_{tot}}{W} \right) \quad 3.64$$

Sendo $e_{am}(W)$ o erro normalizado na determinação da potência sonora devido à quantidade de amostra, B a largura da banda de frequência utilizada. Para a determinação de N_{eq} deve-se levar em conta a frequência em análise, já que o comprimento de onda gerado pode correlacionar dois pontos de medição, seja por varredura ou por pontos discretos. Nas altas e médias frequências, onde os comprimentos de onda são menores, haverá correlação dos pontos em análise somente a uma distância gerada por um círculo de raio equivalente a meio comprimento de onda. Acima desta distância não haverá correlação. Nas baixas frequências ocorrerá o inverso. Para a determinação de N_{eq} , Jacobsen utilizou o método proposto por Lubman, Waterhouse e Chien (1973, APUD Fahy 1995). Este processo é bastante trabalhoso e envolveu integração numérica mas seu resultado é extremamente simples. O N_{eq} para as baixas frequências é dado pela equação 3.65a, para as médias e altas frequências pela equação 3.65b, sendo l o comprimento total da linha de varredura

$$N_{eq} \cong \frac{\left(\frac{2 * l}{\lambda}\right)}{\left[1 + \frac{\left(\frac{\pi}{2}\right) * l * \lambda}{S_0}\right]} \quad 3.65 \text{ (a, b)}$$

$$N_{eq} \cong \frac{l}{\lambda/2}$$

3.3.2.8 Erro devido ao tempo de integração na presença de elevado ruído de fundo

O tempo de integração do vetor intensidade está relacionado com velocidade de varredura da sonda e com a dimensão da superfície do volume de medição. Não é possível determinar o tempo médio de medição que elimine estes erros, mas pode-se assumir que eles sejam insignificantes, mesmo na presença de elevado ruído de fundo. Este erro não depende de como a aproximação da equação 3.22 foi obtida, por varredura ou pontos discretos (JACOBSEN, 1989c). A equação 3.66 apresentada por Jacobsen (1992) leva em

conta o tempo de integração, o ruído de fundo e as condições ambientais do local, sendo $e_t(W)$ o erro normalizado devido ao tempo de amostragem e T_0 o tempo total de medição.

$$e_t(W) \cong \left(\frac{1}{\sqrt{6 * B * T_0}} \right) * \left(\frac{S_0 * c * T_{60}}{V * (6 * Ln10)} \right) * \left(\frac{W_{tot}}{W} \right) \quad 3.66$$

Jacobsen (1989) concluiu que o erro normalizado da estimativa de potência sonora baseada no processo de varredura é diretamente proporcional ao inverso da raiz quadrada da integração total no tempo da varredura completa, da mesma maneira que depende da média temporal para cada ponto discreto chegando na equação 3.67, onde v é a velocidade de varredura, c é a velocidade do som, B é a largura da banda de oitava com a frequência central f_0 .

$$\frac{v}{c} \ll \frac{B}{f_0} \quad 3.67$$

Jacobsen (1993) cita também o cuidado durante a realização de medições de fontes que geram nível de potência sonora abaixo de 40 dB devido aos ruídos elétricos gerados pela aparelhagem. Sugere que a única maneira de se eliminar este erro seria o aumento do tempo de integração que pode chegar até a 25 minutos no caso do ruído elétrico ser da ordem de 50 dB, ou a substituição da aparelhagem com ruídos elétricos menores que 20 dB.

Pettersen e Newman (1989) alertaram que uma velocidade de varredura acima de 0,30 m/s pode causar erros elevados devido à diminuição do tempo de integração das amostras.

Olsen, Pettersen e Viagran (1992), em um estudo da influência do ruído de fundo sobre a intensidade sonora emitida por placas finas, concluíram que a densidade de linhas de varredura não é significativa, e que caso a distância entre a fonte e a sonda de medição seja inferior a 20 cm ou o ruído de fundo seja elevado, o δ_{PI} excederá a 10 dB. Nestes casos sugere que a velocidade de varredura seja pequena.

Tachibana, Yano e Yamaguchi (1993) investigaram a sensibilidade da sonda, a densidade de linhas de medição e a distância entre fonte e a superfície de medição e concluíram que uma velocidade de 0,50m/s, com uma densidade de linhas menor que a distância entre sonda e a fonte sonora são satisfatórias, a não ser quando exista um fluxo de potência sonora entrando na superfície de medição, o que subestima o resultado real.

Jacobsen (1997) sugere que a superfície de medição seja dividida em áreas de 1m^2 , a fim de que o tempo de integração de cada segmento seja em torno de 20 segundos, o mesmo sugerido como valor mínimo pela série de normas ISO 9614-2 (1995).

Pettersen e Olsen (1997) consideraram o tempo de integração e a precisão do equipamento utilizado durante as medições como as maiores causas de erro na intensimetria. Sugere que a velocidade de varredura seja determinada em função da diferença entre o Índice Pressão Intensidade e a Capacidade Dinâmica da instrumentação.

3.3.2.9 Erro gerado pelo fluxo de ar, turbulência e protetores de vento no desempenho da sonda.

O princípio de medição de intensimetria é inválido na presença de fluxo de ar, mesmo que pequeno, pois é baseado na equação de *momentum* do fluido com fluxo zero (FAHY, 1995). Em casos práticos sempre haverá instabilidade no fluido, desde turbulências externas até as causadas pela movimentação da sonda. Os microfones não distinguem entre pressão acústica associada à compressão do fluido e a propagação de energia a velocidade do som, da flutuação de pressão causada pela instabilidade dinâmica do fluido, o que pode causar uma sobrecarga no sistema de medição. Jacobsen (1991b) recomenda que a velocidade de varredura da sonda de medição seja alterada quando exposta a fluxos de elevada velocidade a fim de se diminuir seu efeito na integração final da potência sonora. Jacobsen (1994b) apresentou um estudo com a comparação da influência de fluxos de ar de baixa intensidade. Sua principal conclusão é que esta instabilidade produz uma falsa velocidade de partícula e pressão sonora, ocasionando um erro de leitura na intensidade, sendo bastante considerável em frequências abaixo de 200 Hz. O protetor de

vento apresenta uma resistência ao fluxo acústico, causado pela variação da pressão sonora, e ao fluxo de instabilidade, causado pela movimentação do ar, alterando seu valor real. Na prática esse erro só é significativo em baixas frequências e em campos sonoros bastante reativos, como ondas estacionárias fortes em recintos fechados, caixas acústicas ineficientes em baixas frequências e placas vibrantes finas. Este erro pode chegar a valores próximos da unidade e alterar o sinal da intensidade, mudando a direção do vetor normal.

Jacobsen (1997) não recomenda medições de intensidade sonora caso haja um fluxo de ar acima de 5 m/s devido à turbulência, mesmo que o fluxo seja perfeitamente laminar. Recomenda o uso de protetor de vento na sonda em qualquer situação devido a instabilidade causada pela movimentação da sonda o que gera um falso sinal de intensidade, que pode ser negativo ou positivo.

A norma ISO 9614-1 (1993) estabelece o limite máximo de velocidade do fluxo de ar em 2 m/s a ISO 9614-2 (1995) em 4 m/s e a ISO 9614-3 (2002) em 1 m/s. Recomenda sempre a utilização do protetor de vento que atenda os requisitos da IEC 61043 (1993).

3.4 INFLUÊNCIA DA DIMENSÃO DA SUPERFÍCIE DE MEDIÇÃO NA DETERMINAÇÃO DO NÍVEL DE POTÊNCIA SONORA

A dimensão da superfície de medição esta relacionada com quase todos os erros associados à técnica da intensimetria como mostrado no item 3.3. Desta maneira é razoável que exista um fator que indique a sua dimensão aproximada.

Thompson e Tree (1981) propuseram a relação ($0 \leq \Delta r/r \leq 0,5$) para medições até 5 KHz para microfones de 1/2" de diâmetro com 12 mm de separação, sendo r a distância entre a fonte e a superfície de medição e Δr a distância de separação entre os microfones. Desta maneira esta relação poderia ser uma forma para sistematizar a seleção de suas dimensões. Infelizmente não é muito útil, pois este procedimento limita apenas a distância mínima, que para uma separação de 12 mm é de 24 mm, ou seja, sob influência do campo

próximo. Gerges (1983) conclui que para uma fonte tipo pistão deve-se levar em conta também o tamanho da fonte. Sugere a relação $a/r > 2$ para um erro de 1,5 dB, sendo r a distância entre a superfície de medição e a fonte e a o raio da esfera fictícia que envolve a fonte. Jacobsen (1997) sugere que à distância r seja entre 30 e 50 cm, devendo ser aumentada na presença de campos acústicos complexos e diminuída na presença de elevado ruído de fundo ou campo reverberante. Vale ressaltar, que em ambientes de trabalho, são comuns campos acústicos complexos devido à interação das ondas acústicas de várias fontes coerentes, bem como elevado ruído de fundo e campo reverberante. Fahy (1997) aconselha uma distância nunca inferior a 20 cm, pois o método de varredura pode compensar as inversões de sinal do vetor intensidade. Jacobsen (2001) alerta para a maior complexidade do campo próximo na distribuição da intensidade sonora em relação à distribuição da pressão sonora, desaconselhando medições próximas à fonte.

Uma característica de motores elétricos, é a grande velocidade do fluxo de ar causado pela ventoinha de refrigeração. Esta causa uma sobrecarga no sistema de medição que deve ser ajustado manualmente como alerta Souza (2003). Mas infelizmente esse aumento no limite superior de medição da pressão sonora aumenta o erro no limite inferior, não podendo ser utilizado indiscriminadamente. A velocidade do fluxo de ar da ventoinha de motor elétrico é de cerca de 13 m/s medidos a 10 cm de distância e 3,0 m/s medidos a 40 cm, o que sugere que o afastamento da superfície de medição seria uma boa alternativa para solução deste problema. Jacobsen (1994b) e Fahy (1997) sugerem a velocidade máxima para o fluxo de ar em 5 m/s e a ISO 9614-2 (1995) em 4 m/s.

A presença de elevado ruído de fundo durante o procedimento de medição agrava os erros devido à quantidade de amostras e tempo de integração (JACOBSEN, 1992; PETTERSEN e OLSEN, 1997). Estes estão diretamente ligados às dimensões da superfície de medição, pois para aumentar o tempo de integração e a quantidade de amostras, a superfície de medição também deve ser aumentada o que afasta a sonda de medição da fonte, possibilitando uma maior influência do ruído de fundo.

Jacobsen e Olsen (1994) alertam que o erro devido à equalização estática dos microfones pode ser tão elevado quanto aos erros gerados pela diferença de fase entre a pressão e a

velocidade da partícula, mas decai rapidamente com o afastamento da superfície de medição da fonte, mesmo na presença de fontes externas.

Assim, nota-se que a dimensão da superfície de medição é de extrema importância na qualidade dos resultados das medições, pois está relacionada com quase todos os erros possíveis na determinação da potência sonora através da intensimetria. O elevado ruído de fundo e alto campo reverberante são fatores que levam a uma superfície de medição menor com uma aproximação da sonda da fonte. A velocidade do fluxo de ar da ventoinha de refrigeração, a complexidade do campo próximo, a quantidade de amostras, o tempo de integração das medições, o erro devido a equalização da pressão estática dos microfones e a energia sonora absorvida pela fonte levam a uma maior dimensão do volume de medição, ocasionando o afastamento da sonda da fonte sonora em análise. A ISO 9614-2 (1995) apenas sugere uma distância mínima e na literatura encontram-se procedimentos dispersos em vários trabalhos, sem que haja uma sistematização.

As equações 3.63, 3.64 e 3.66 indicam um procedimento para a sistematização da determinação da distância da superfície de medição, já que duas parcelas são comuns nas três equações, equações 3.68 e 3.69, sendo S_0 a dimensão da superfície de medição, c a velocidade do som no ar, T_{60} o tempo de reverberação com um decaimento de 60 dB, V o volume do ambiente onde as medições estão sendo realizadas, W a potência sonora da fonte em análise e W_{tot} a potência sonora total do local onde o experimento está sendo realizado.

$$\left(\frac{S_0 * c * T_{60}}{V * 13,8} \right) \quad 3.68$$

$$\left(\frac{W_{tot}}{W} \right) \quad 3.69$$

A equação 3.68 relaciona o campo reverberante (T_{60} e V) com a dimensão da superfície de medição (S_0). A equação 3.69 relaciona a potência sonora total do local (W_{tot}) com a potência sonora da fonte analisada (W), ou seja quantifica o ruído de fundo. Nas equações 3.63, 3.64 e 3.66 as parcelas representadas pelas equações 3.68 e 3.69 são um produto,

equação 3.70 que origina a um fator que será denominado neste trabalho de Fator de Superfície, F_{sup} .

$$\left(\frac{S_0 * c * T_{60}}{V * 13,8} \right) * \left(\frac{W_{tot}}{W} \right) = F_{sup} \quad 3.70$$

No caso da equação 3.70 resultar em um F_{sup} suficientemente pequeno para que torne desprezível o efeito das demais parcelas das equações 3.63, 3.64 e 3.66, pode-se assim, conseguir uma maneira de se determinar a dimensão da superfície de medição, equação 3.71. O efeito do campo próximo e velocidade do fluxo de ar não estão contemplados diretamente na equação 3.71. Após a determinação da superfície de medição pode-se fazer uma verificação da velocidade do fluxo de ar através de um anemômetro, que deve estar abaixo de 4,0 m/s como preconiza a ISO 9614-2 (1995).

$$S_0 = F_{sup} * \left(\frac{V * 13,8}{c * T_{60}} \right) * \left(\frac{W}{W_{Tot}} \right) \quad 3.71$$

A determinação das variáveis da equação 3.71 são simples e de fácil obtenção. A determinação do tempo de reverberação pode ser obtida através de uma estimativa ou por comparação com outros locais. Pode também ser calculado através da conhecida Equação de Sabine, já que canteiros de obras ou ambientes industriais possuem poucos utensílios e são altamente reverberantes e seus coeficientes de absorção estão disponíveis em normas e na literatura. Já a relação entre a potência sonora total e a potência sonora da fonte também pode ser estimada através de uma simples medição do nível de pressão sonora, já que a grandeza necessária é a relação entre as potências e não seu valor absoluto. Assim, caso o nível de pressão sonora das fontes de ruído externas a superfície de medição seja similar ao da fonte em análise, a relação P_{Tot}/P será igual a 2.

A energia sonora absorvida e refletida pela fonte sonora também influi na dimensão a superfície de medição. Em superfícies muito próximas à fonte, e portanto pequenas, a energia sonora absorvida e refletida pela fonte altera o sinal dos vetores de intensidade sonora, causando erros negativos. Os microfones da sonda captam a mudança de direção dos vetores da intensidade sonora, com sinal negativo, o que ocorre apenas na direção

perpendicular à fonte. Portanto, o aumento da área da superfície de medição dilui este efeito, pois o método de varredura possibilita uma maior média espacial e temporal. Um índice que relacione a área da face da fonte sonora e da face da superfície de medição auxiliará na quantificação da energia sonora absorvida. O Fator de Relação entre a Área da Fonte e da Superfície de Medição, F_{rel} , relaciona estas duas grandezas. Assim, quanto mais F_{rel} se aproxima da unidade, maior será a energia sonora absorvida, e portanto, maiores desvios negativos.

3.5 INCERTEZAS DE MEDIÇÃO DO NÍVEL DE POTÊNCIA SONORA OBTIDO POR OUTROS MÉTODOS

A obtenção da potência sonora por outras metodologias, como pela série de normas ISO 3740 (1995), também possui suas incertezas de medição. Alguns autores levantaram esta questão sugerindo que a série ISO 9614 apresenta resultados inferiores aos obtidos pela série ISO 3740 (1995). Jacobsen (2001) citando Jonasson (1999) sugere esta possibilidade. Hübner e Wittstock (2001) justificam este fato devido à absorção de energia sonora dentro do volume de medição.

Hongisto e Saine (1996) compararam medições do nível de potência sonora em várias condições obtidas pela norma ISO 9614-2 (1995) e ISO 3746 (1995), *Acoustics determination of sound power level of noise sources using sound pressure – survey method using an enveloping measurement over a reflecting plane*. Em ensaio realizado em uma sala com baixo ruído de fundo o nível de potência sonora obtido através da intensimetria foi cerca de 2,6 dB inferior ao obtido pela ISO 3746 (1995). Aumentando o ruído de fundo da sala através da introdução de um equipamento similar ao utilizado no ensaio, o nível de potência sonora obtido pela técnica da intensimetria não apresentou alterações significativas, 0,3 dB, sendo que o obtido pela ISO 3746 (1995) apresentou uma diferença de -2 dB. Concluíram ainda no melhor desempenho da norma ISO 9614-2 (1995) na determinação do nível de potência sonora.

Andersen e Jonasson (1996) compararam a técnica da intensimetria para determinação do nível de pressão sonora de fontes com o recomendado pela série ISO 11200 (1995), *Acoustics, noise emitted by machinery and equipment*. Concluíram que esta série superestima os valores encontrados e que possui uma aplicação mais limitada do que a intensimetria, principalmente em locais de forte campo reverberante.

Keith, Krishinappa e Chiu (2004) compararam os níveis de potência sonora obtidos pelas normas ISO 9614-1 (1993) e ISO 3744 (2003), *Acoustics determination of sound power level of noise sources using sound pressure, precision methods using anechoic and hemi anechoic rooms* e concluiu que as medições realizadas através da intensimetria necessitam de um número de amostras mais elevados, mas que para uma dada quantidade de amostras não há diferenças de precisão nos resultados, não importando as condições ambientais

Hübner e Wittstock (2004) sugerem que, além da padronização de alguns procedimentos e nomenclatura de índices nas três partes da série ISO 9614, há também a necessidade de se fazê-lo em relação à série ISO 3740 (2000), *Acoustics determination of sound power level of noise sources*. Propôs a uniformização dos indicadores de campo que seriam utilizados conforme a classe de precisão adotada, que as condições atmosféricas sejam consideradas obrigatoriamente nas classes de precisão 1 e 2, e que os anexos sobre a absorção sonora da fonte e fluxos de ar sejam uniformizados.

Santos (2004) realizou medições de potência sonora em uma furadeira por três procedimentos: a metodologia direta segundo a ISO 3741 (1999), *Acoustics determination of sound power level of noise sources using sound pressure, precision methods for reverberations rooms*, a metodologia por comparação segundo a ISO 3743-1 (1994), *Acoustics determination of sound power level of noise sources using sound pressure, comparison method for hard walled test rooms* e a metodologia direta segundo a ISO 3743-2 (1994), *Acoustics determination of sound power level of noise sources using sound pressure, method for special reverberation test rooms*. Os testes foram realizados em condições laboratoriais controladas. O desvio padrão entre os três métodos foi da ordem de 1,1dB, sendo que na frequência de 125 Hz chegou a 1,8dB.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

O objetivo deste trabalho deve permitir a estimativa dos erros na determinação do nível de potência sonora em equipamentos de pequeno porte através da técnica da intensimetria.

Assim, deve-se selecionar uma norma que possua reconhecimento internacional, um sistema de medição que satisfaça os requisitos dessa norma quanto à precisão de resultados e que possibilite que seja implementada uma calibração adequada.

Através dos resultados obtidos, serão determinados os erros aleatórios e sistemáticos da técnica, o que possibilitará a determinação de qual parâmetro exerce maior influência no resultado final. Esta informação será a base do estudo de procedimentos que minimizem estes erros. Estes serão utilizados para a correção do nível de potência sonora e sua comparação com as medições realizadas através de outras metodologias a fim de verificar sua eficácia.

4.1 SELEÇÃO DA NORMA UTILIZADA

A série de normas ISO 9614, *Acoustics determination of sound power levels of noise sources using sound intensity* possibilita medições do nível de potência sonora por pontos discretos e por varredura. Segundo Astrup (1997), Fahy (1997) e Jacobsen (2001). Ambos procedimentos apresentam resultados bastante realistas sendo o método de varredura mais prático e rápido. Esta é uma característica importante em um procedimento de medição, pois este processo, em campo, deve ocupar o menor espaço de tempo possível (ASTRUP, 1997). As partes 2 e 3 da série ISO 9614 utilizam o método de varredura para as medições, mas a parte 3 só permite medições na classe de precisão, impondo critérios complexos e dificultando o trabalho em condições adversas. Portanto, nesta pesquisa será utilizado o procedimento da ISO 9614-2 (1995).

4.2 SELEÇÃO DO EQUIPAMENTO E SISTEMA DE CALIBRAÇÃO

O sistema de medição utilizado para a obtenção do nível de potência sonora através da intensimetria deve atender os requisitos da ISO 9614-2 (1995). Esta remete para a IEC 61043 (1993) que determina as características mínimas dos equipamentos a fim de que não gerem erros internos no processamento dos sinais. O conjunto de medição é composto por um analisador de frequência em tempo real, que recebe as medições de pressão sonora, e de uma sonda composta por dois microfones de campo livre. A intensidade sonora é determinada pelo software interno do analisador de frequência segundo a equação 3.20 e o nível de potência sonora segundo a equação 3.22. Os microfones utilizados devem ser selecionados a fim de se evitar erros sistemáticos nas medições. Seu posicionamento na sonda de medição também exerce importante papel na determinação da faixa de frequência analisada.

4.2.1 Seleção do analisador de frequência.

Segundo a ISO 9614-2 (1995) os analisadores de frequência utilizados em medições de precisão de engenharia, devem ser do Tipo 1, e o aparelho deve ser ajustado segundo as condições ambientais de temperatura e pressão. Jacobsen (1993) recomenda que o ruído elétrico gerado pelo analisador de frequência seja 20 dB menor que o nível de potência sonora medido para que não haja interferência nas medições.

4.2.2 Seleção dos microfones e seu posicionamento na sonda de medição.

O diâmetro dos microfones e a distância de separação entre eles na sonda é de extrema importância, pois determina o erro de aproximação por diferenças finitas, restringindo o limite superior das frequências analisadas. A utilização de microfones de 1/4" de diâmetro com 6 mm de separação poderia estender este limite até 10 KHz, equação 3.32, mas ao mesmo tempo aumentaria o erro de desarranjo de fase entre os canais dos transdutores (PAVIC, 1977). Jacobsen, Cutanda e Juhl (1996), Jacobsen, Cutanda e Juhl (1998), Souza (2003), Cvetkovic, Prascevic e Mihajlov (2004) e Jacobsen e Jhul (2004)

estenderam as medições até altas frequências com bons resultados utilizando a configuração de microfones de $\frac{1}{2}$ " de diâmetro com 12 mm de separação e espaçador sólido, corrigindo as medições executadas, pois os microfones são do tipo campo livre, através da curva de calibração fornecida pelo fabricante (ver item 3.3.1). Jacobsen (1994a e 1994b) recomenda a utilização do protetor de vento nos microfones, mesmo em locais fechados, devido à movimentação da sonda durante o processo de varredura, que gera um fluxo de ar sobre o diafragma dos microfones além de possibilitar a proteção contra impactos mecânicos na sonda. Neste trabalho são utilizados microfones de $\frac{1}{2}$ " com espaçador de 12 mm e protetor de vento, para que se possa estender as medições até a banda de frequência central de 8000 Hz.

4.2.3 Sistema de calibração

A calibração das fases do analisador de frequência e da sonda de medição visa quantificar o erro devido ao desarranjo de fase (equação 3.46) através da determinação do Índice Pressão Intensidade Residual, δ_{PI0} , e possibilitar uma correção interna na aquisição de dados dos canais de medição, conforme proposto por Krishnappa (1981). O valor do δ_{PI0} possibilita, junto com a equação 3.42 a determinação e verificação da Capacidade Dinâmica do sistema de medição através das equações 3.47a e 3.47b. Um procedimento para executar esta calibração é submeter os dois microfones simultaneamente a mesma pressão sonora o que anularia a intensidade sonora. Portanto, a intensidade sonora residual seria a gerada pelo desarranjo de fase. A Figura 4.1, apresenta alguns posicionamentos de microfones no calibrador. Este processo é influenciado por erros aleatórios, mas caso os microfones estejam posicionados em pequenas cavidades livres de ruído de fundo e serem submetidos a um espectro uniforme, este erro diminuirá (FAHY, 1995). Mesmo assim, deve-se procurar eliminar o ruído de fundo durante o processo de calibração.

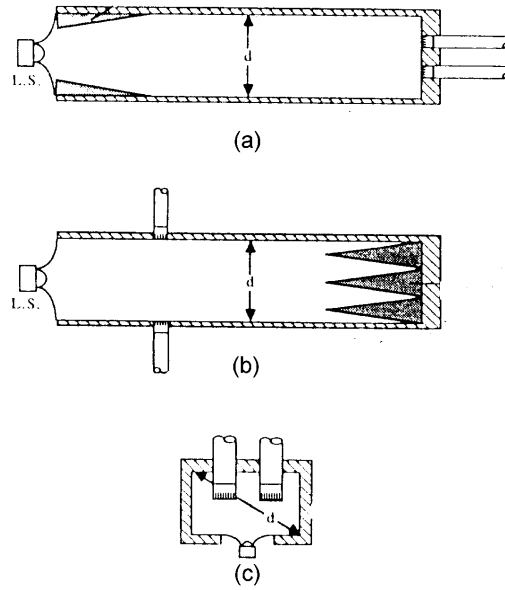


Figura 4.1 Posicionamento de microfones para calibração, Fahy (1995).

O posicionamento mostrado em “a” é mais eficiente que em “b” porque os microfones estão posicionados no ponto de pressão máxima em todas as frequências, minimizando o erro na função de transferência por sinais fracos. Devido à dificuldade de geração de campos sonoros uniformes é sempre aconselhável repetir o teste em condições ambientais diferentes (FAHY, 1995). Neste caso as irregularidades do campo sonoro poderão ser detectadas e seus efeitos eliminados pela média dos resultados. Assim, os microfones devem ser posicionados nas cavidades da câmara de calibração e após a leitura, um deles deve ser posicionado em uma terceira cavidade para nova leitura.

Fazendo uso da equação 3.41 pode-se determinar o desarranjo de fase, ϕ_s , entre os canais do sistema de medição, equação 4.1, e o ângulo de diferença de fase, ϕ_f , das ondas sonoras, equação 4.2, sendo k o número de onda, d a distância de separação entre os microfones, e δ_{PI} o índice pressão intensidade das medições nas posições 1 e 2

$$\phi_s = \pm \left(\frac{k * d}{2} \right) \left[10^{-\left(\frac{\delta_{PI1}}{10} \right)} - 10^{-\left(\frac{\delta_{PI2}}{10} \right)} \right] \quad 4.1$$

$$\phi_f = \pm \left(\frac{k * d}{2} \right) \left[10^{-\left(\frac{\delta_{PI1}}{10} \right)} + 10^{-\left(\frac{\delta_{PI2}}{10} \right)} \right] \quad 4.2$$

Substituindo a equação 4.1 na equação 3.44 pode-se determinar o valor do Índice Pressão Intensidade Residual, δ_{PI0} , dado pela equação 4.3.

$$\delta_{PI0} = 3 - 10 \log \left[10^{\frac{-\delta_{pi1}}{10}} - 10^{\frac{-\delta_{pi2}}{10}} \right] \quad 4.3$$

Deve-se também proceder a calibração de sensibilidade de pressão dos microfones a fim que ambos tenham medições equivalentes.

4.2.4 Equipamento selecionado

Nesta pesquisa utilizou-se a sonda de intensimetria Bruel & Kjaer 3595; microfones Bruel & Kjaer 4181 de 1/2" de diâmetro, com espaçador sólido de 12 mm e protetor de vento; o calibrador B&K 4231. O analisador de frequência em tempo real utilizado foi o Bruel & Kjaer 2260 Investigator com dois canais de entrada; e o software de apoio BZ 7205 para determinação do nível de potência sonora, cedidos pela empresa Furnas Centrais Elétricas, Figura 4.2.

Utilizou-se também o analisador de frequência em tempo real Larson Davis 3200, Tipo 1 com o software padrão de Intensimetria, a sonda de intensimetria Bruel & Kjaer 3595; microfones Bruel & Kjaer 4181 de 1/2" de diâmetro com espaçador sólido de 12 mm e protetor de vento; calibrador B&K 4231 e B&K 3541, cedidos pelo Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) do Centro Técnico Aeroespacial (CTA), Figura 4.3.

A Figura 4.4 mostra o ruído elétrico interno do analisador de frequência B&K 2260, Tipo 1 com dois canais de entrada que deve ser 20 dB inferior ao valor medido (JACOBSEN 1992). Portanto, para medições em banda de frequência de 1/1 de oitava a aparelhagem está habilitada a medições a partir de 40 dB, sem que haja interferências do ruído elétrico e para medições em banda de frequência de 1/3 de oitava a partir de 35 dB. O analisador de frequência Larson Davis 3200 permite medições a partir de 20 dB conforme mostra a Figura 4.5. Este equipamento é considerado Tipo 0 para os filtros de oitava e Tipo 1 para o analisador de FFT.



Figura 4.2 Analisador de Freqüência B&K 2260, Sonda de Intensimetria B&K 3595, Microfones B&K 4181, e protetor de vento.



Figura 4.3 Analisador de Freqüência Larson Davis 3200.

Os microfones Brüel & Kjær 4181 de $\frac{1}{2}$ " de diâmetro com espaçador sólido de 12 mm possibilitam medições até 10 KHz, apesar da ISO 9614-2 (1995) estender o limite máximo de freqüência analisadas até 6,3 KHz apenas. Justifica-se esta limitação devido a norma datar de 1995 e ter havido uma grande evolução no processo de intensimetria durante os anos 1990. Estes microfones são do tipo orifício simples, considerados pela IEC 61043 (1993) como livres do erro devido à diferença da equalização a pressão estática da cavidade do diafragma. Jacobsen e Olsen (1994) utilizaram este tipo de microfone como padrão para análise do erro da equalização de outros tipos de microfones. Os microfones

Bruel & Kjaer 4181 são do tipo campo livre, portanto devem ser corrigidos através dos valores da Tabela 4.1.

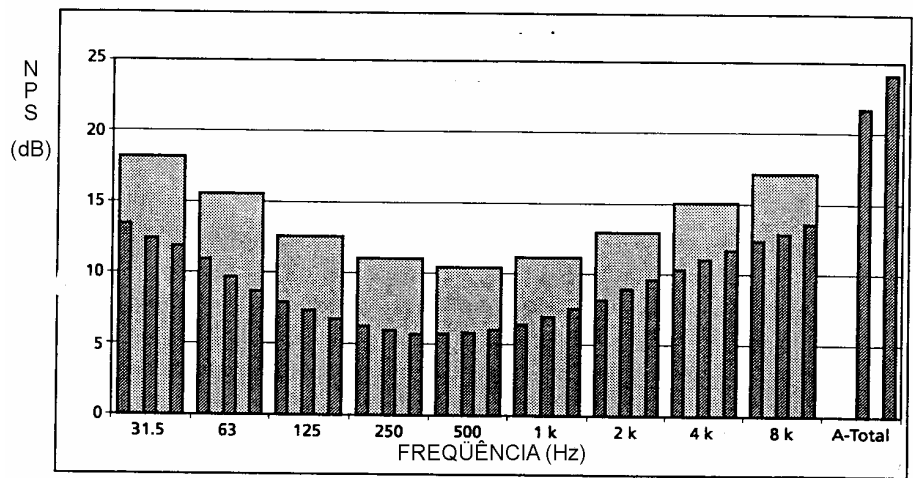


Figura 4.4 Valor típico do ruído elétrico do analisador de freqüência B&K 2260, Bruel & Kjaer (1997)

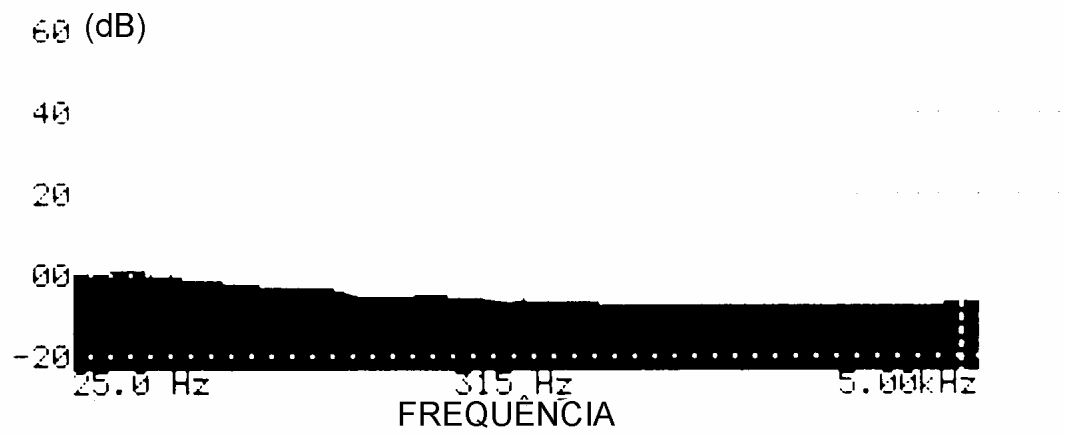


Figura 4.5 Valor típico do ruído elétrico do analisador de freqüência Larson Davis 3200.

Tabela 4.1 Índices de correção dos microfones de campo livre B&K4181 fornecidos pelo fabricante

Frequência (Hz)	1000	2000	4000	8000
Correção (dB) - Microfones cedidos por FURNAS	0,1	0,3	1,0	3,3
Correção (dB) - Microfones cedidos pelo IAE	0,1	0,0	0,0	0,5

Segundo Astrup (1997), a calibração do equipamento de medição deve ser realizada em local de baixo ruído de fundo, o que não é comum em instalações industriais e nos canteiros de obras. O analisador B&K 2260 possui um sistema de calibração interna dos filtros digitais que visa equalizar o desempenho dos canais dos transdutores. Este sistema interno possibilita ao equipamento atender os requisitos mínimos de precisão para um aparelho Tipo 1, segundo a IEC 61043 (1993), como mostra a Figura 4.6.

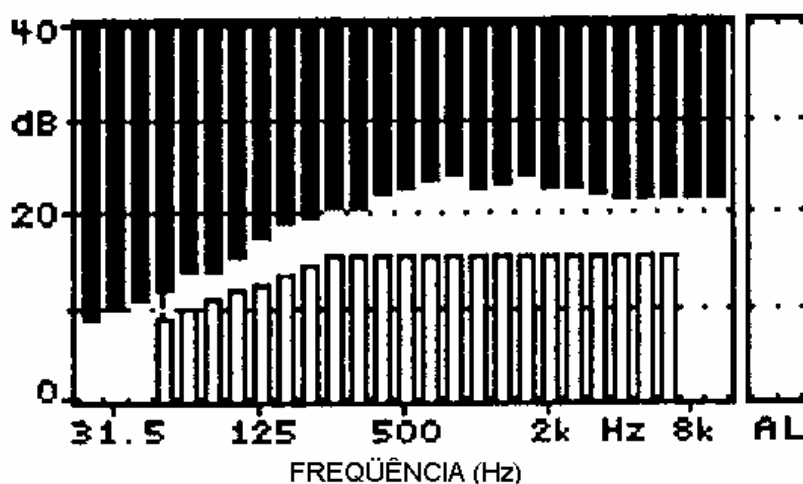


Figura 4.6 Valor do Índice Pressão Intensidade Residual, δ_{PI0} , obtido através da calibração interna do analisador de frequência B&K 2260, Bruel Kjaer (1997)

Neste trabalho não será realizada a calibração de fase dos transdutores do analisador B&K 2260 a fim de que se possa testar a eficiência de sua calibração interna, e também verificar a possibilidade de uma simplificação no procedimento de medição. Será executada a calibração de sensibilidade dos microfones através do calibrador B&K 4231, segundo manual do fabricante, Figura 4.7. O analisador de frequência Larson Davis não possui sistema de calibração interna de fase, sendo portanto, necessário que se utilize o calibrador B&K 3145, Figura 4.8, para calibrar as fases dos canais dos transdutores e o B&K 4231 para calibrar a sensibilidade dos microfones.

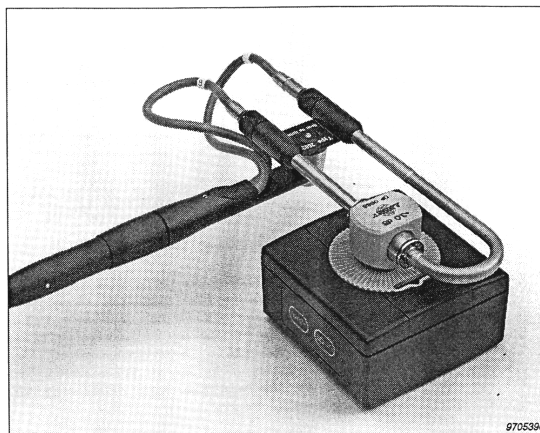


Figura 4.7 Ilustração da clibração de sensibilidade dos microfones com calibrador B&K 4231, Bruel Kjaer (1997)

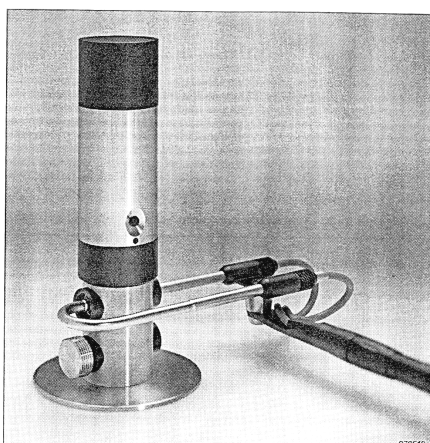


Figura 4.8 Ilustração da calibração das fases dos transdutores com calibrador B&K 3541, Bruel Kjaer (1997)

4.3 PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO

A fonte de ruído selecionada para ser ensaiada neste trabalho deve ter características semelhantes, para que seja representativa de uma série de equipamentos de pequeno porte presentes em instalações industriais e nos canteiros de obras da construção civil, como serras circulares de corte e abrasão, lixadeiras circulares de corte e abrasão, esmerilhadeiras, serras tico-tico e furadeiras. Estes equipamentos, segundo Maia (2001) geram um nível de pressão sonora da ordem de 100 dB(A), dependendo do tipo de trabalho realizado, sendo portanto fontes de ruído que contribuem com o aumento da poluição sonora no meio ambiente.

A ventoinha de refrigeração do motor elétrico destes equipamentos gera altas velocidades do fluxo de ar, cerca de 13 m/s a 10 cm de distância, o que pode ser uma fonte de erro de alta magnitude, pois o protetor de vento dos microfones pode não ser eficiente nestas condições. A velocidade de rotação do mandril, do disco de corte ou abrasão induz uma vibração na estrutura do equipamento. Esta gera um campo sonoro que pode causar erros nas oitavas próximas à frequência de vibração e seus harmônicos. Estes, somados aos erros já discutidos no Capítulo 3, podem ocasionar desvios significativos na determinação do nível de potência sonora de um equipamento através da intensimetria. Outra característica importante destes equipamentos é que a potência sonora gerada deve ser medida em plena carga, e não a vazio. Desta maneira a Intensimetria torna-se uma técnica apropriada para a determinação do nível de potência sonora destes equipamentos em seu local de trabalho. Assim a fonte de ruído utilizada nesta pesquisa foi uma furadeira de impacto de $\frac{3}{4}$ ". Esta é um equipamento de pequeno porte, de fácil manuseio e que possui as características descritas, sendo portanto representativa de uma gama de várias fontes de ruído presente em instalações industriais e na construção civil.

O nível de potência sonora da furadeira ensaiada foi determinado em condições ambientais diferentes baixo tempo de reverberação e baixo ruído de fundo com volume do ambiente de 487 m^3 (condição A), baixo tempo de reverberação e alto ruído de fundo com volume do ambiente de 487 m^3 (condição B), alto tempo de reverberação e alto ruído de fundo com volume do ambiente de 5100 m^3 (condição C) e baixo tempo de reverberação e alto ruído de fundo com volume do ambiente de 78 m^3 (condição D). A condição A foi simulada em um auditório situado no Laboratório de Ensaios Construtivos da empresa FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS localizado na cidade de Aparecida de Goiânia, GO. A condição B foi obtida no mesmo local, mas com uma furadeira da mesma marca e modelo do equipamento analisado (fonte coerente) posicionada a 2 metros de um dos vértices da superfície de medição. Jacobsen (1998) mostrou que os erros oriundos do ruído gerado por fontes sonoras posicionadas fora do volume de medição diminuem, caso estas fontes não estejam posicionadas paralelamente as faces da superfície de medição e sim na direção de seus vértices. A condição C foi obtida em um galpão do Laboratório de Ensaios Construtivos, o que proporcionou uma elevada reverberação. A condição de elevado ruído de fundo também foi conseguida através de uma segunda furadeira

posicionada em diagonal a 2 metros de distância do vértice além dos equipamentos em funcionamento no local. A condição D foi simulada em uma sala do Laboratório de Medições Acústicas do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) do Centro Técnico Aeroespacial (CTA) de São José dos Campos – SP. A particularidade desta sala consiste no seu pequeno volume, 78 m^3 , já que nem sempre se tem disponível grandes locais para se executar a medição e a proximidade entre as paredes e a superfície de medição pode elevar o valor de alguns tipos de erros devido, à elevada densidade de energia e à proximidade das faces da superfície de medição com as paredes da sala.

Este procedimento visa o estudo da evolução dos erros frente à alteração do ruído de fundo, do campo reverberante e densidade de energia sonora presente no local de medição.

Para a determinação do nível de potência sonora o analisador de frequência foi ajustado conforme manual do fabricante. A calibração de fase (interna ou externa) e de sensibilidade dos microfones foram executadas conforme descrito no item 4.2.4. Foram realizadas três medições do nível de potência sonora do equipamento selecionado e duas medições do “zero teste” (mesmo procedimento com o equipamento dentro do volume de medição desligado). Para a determinação do nível de potência sonora da fonte é necessário que se proceda a varredura nas cinco superfícies do volume de medição que envolve a fonte sonora. Cada superfície deve ser percorrida pela sonda duas vezes, uma no sentido horizontal e outra em seguida no vertical, conforme descrito no item 4.3.3.

Em seguida, os microfones foram interpostos na sonda de medição, e novamente foi feita a calibração de fase (interna ou externa) do analisador de frequência e de sensibilidade dos microfones. A interposição dos microfones visa verificar o comprimento do critério de repetibilidade mínimo proposto pela ISO 9614-2 (1995), Tabela 3.1, e diminuir o efeito do desarranjo de fase, sendo este um procedimento já consagrado na literatura. Novamente foram realizadas três medições do nível de potência sonora, e agora, apenas uma medição do “zero teste”.

O valor do nível de potência sonora (NWS) considerado é a média logarítmica das seis medições com as devidas correções, pois os microfones utilizados são de campo livre e não de pressão, Tabela 4.1. As medições que apresentaram resultados em desacordo

com os índices de campo, item 4.3.2, foram desconsiderados, sendo que a média foi calculada apenas com os valores restantes. Este procedimento de medição foi executado para cada uma das condições ambientais estudadas.

A norma ISO 9614-2 (1995) explicita uma seqüência de procedimentos para que as medições sejam implementadas. A primeira etapa é a seleção da dimensão da superfície de medição, com o auxílio dos índices de campo.

4.3.1 Determinação da dimensão da superfície de medição

A superfície de medição deve possuir a forma mais simples possível, permitindo assim, uma varredura de toda sua extensão de maneira uniforme. A distância mínima entre a fonte e a sonda de medição deve ser de 20cm. Para se determinar a dimensão da superfície de medição deve-se realizar medições ortogonais preliminares na superfície selecionada, a fim de se calcular os índices de campo, F_{PI} e $F_{+/-}$, item 4.3.2, que devem atender a critérios pré-estabelecidos. A obtenção ou não destes critérios define pelo afastamento ou aproximação da superfície da fonte em análise.

As superfícies de medição que foram utilizadas neste trabalho foram, 40x40x60cm (denominada 40), 60x60x60cm (denominada 60), 80x80x80cm (denominada 80), 110x110x110cm (denominada 110) e 130x130x130cm (denominada 130). As medições foram executadas nas cinco superfícies em todas as condições ambientais (A, B, C e D), e em cada uma delas, o F_{rel} , Fator de Relação entre a área da fonte e da superfície de medição, o F_{sup} , Fator de Superfície e o δ_{abs} , Fator de Absorção, foram determinados, conforme mostrado nos itens 3.3.2.2 e 4.3.2. Assim, foi possível o estudo da influência da dimensão da superfície de medição na precisão dos resultados, e através destes novos índices de campo, sistematizar sua determinação. Na tabela 4.2 é apresentado os valores de F_{rel} e na tabela 4.3 um resumo da seqüência de medições para cada condição ambiental.

Tabela 4.2 Comparação das áreas das superfícies utilizadas em relação a área da fonte e do suporte de medição

Superfície	Fonte	40	60	80	110	130
Área da face lateral (m^2)	0,06	0,24	0,36	0,64	1,21	1,69
F_{rel}	1	4	6	11	20	28

Tabela 4.3 Resumo das medições realizadas em cada condição ambiental

SUPERFÍCIE	Baixo tempo de reverberação, baixo ruído de fundo, volume de 487 m ³ (condição A)		Baixo tempo de reverberação, baixo ruído de fundo, volume de 487 m ³ (condição B)		Alto tempo de reverberação, alto ruído de fundo, volume de 5100 m ³ (condição C)		Baixo tempo de reverberação, baixo ruído de fundo, volume de 78 m ³ (condição D)	
	Medição de NWS	Medição do $\delta_{PI,zero}$ durante o “zero teste”	Medição de NWS	Medição do $\delta_{PI,zero}$ durante o “zero teste”	Medição de NWS	Medição do $\delta_{PI,zero}$ durante o “zero teste”	Medição de NWS	Medição do $\delta_{PI,zero}$ durante o “zero teste”
40	M1 a M6	M31 a M33	M46 a M51	M76 a M78	M91 a M96	M121 a M123	M136 a M141	M167 a M169
60	M7 a M12	M34 a M36	M52 a M57	M79 a M81	M97 a M102	M124 a M126	M142 a M147	M170 a M172
80	M13 a M18	M37 a M39	M58 a M63	M82 a M84	M103 a M108	M127 a M129	M148 a M153	M173 a M175
110	M19 a M24	M40 a M42	M64 a M69	M85 a M87	M109 a M114	M130 a M132	M154 a M159	M176 a M178
130	M25 a M30	M43 a M45	M70 a M75	M88 a M90	M115 a M120	M133 a M135	M160 a M166	M179 a M181

O volume de medição não deve ser posicionado próximo de superfícies refletoras (FAHY 1995). As ondas sonoras refletidas são coerentes com as ondas sonoras emitidas pela fonte em análise, portanto interferindo nos resultados finais (JACOBSEN 1989a). Lay (1991) alerta para a dificuldade em se implementar a intensimetria próxima a superfícies refletoras. Keith, Krishinappa e Chiu (2000) sugerem que as medições sejam realizadas a

pelo menos 1,5 metros das superfícies refletoras. Nesta pesquisa a fonte em análise foi posicionada a pelo menos 1,5 metros de distância de superfícies refletoras. Na sala de 78 m³ a superfície de medição foi posicionada a 1,2 metros de distância das paredes na pior situação, e 1,65 metros na melhor. Para amenizar as reflexões sonoras as faces do volume de medição não ficaram paralelas com as paredes. Este procedimento visa verificar a evolução deste erro.

4.3.2 Critérios para se atingir a precisão na medição

A ISO 9614-2 (1995) utiliza os índices de campo como ferramenta para verificar se a precisão da medição foi atingida.

O primeiro critério de verificação é a Capacidade Dinâmica, L_D , que deve ser maior que o Índice Pressão-Intensidade, δ_{PI} , ou F_{PI} como indica a norma ISO 9614-2 (1995), equação 3.47a e 3.47b. Jacobsen (1994b) considera como condições de medição com dificuldade moderada um valor de δ_{PI} variando entre 4 a 5 dB nas baixas frequências e 8 a 9 dB nas altas, mas alerta que uma sonda com correção no desarranjo de fase pode realizar medidas em campos complexos com δ_{PI} de até 15 dB. Em geral vários autores, entre eles Jacobsen et al (1996) e Fahy (1997), recomendam que o δ_{PI} seja menor que 10 dB.

O segundo critério é o Índice de Potência Parcial, $F_{+/-}$, que é determinado com uma medição de intensidade sonora no ponto onde aparentemente ela é mais significativa, seguido de um giro de 180° na sonda e nova medição. Assim, consegue-se avaliar se fluxo vetorial pela superfície de medição em um sentido é equivalente no sentido oposto. A máxima variação permitida pela ISO 9614-2 (1995) é de 3 dB. Este índice pode ser obtido através da equação 3.49.

O terceiro critério diz respeito à repetibilidade dos resultados, a fim de se verificar se a energia sonora irradiada pela fonte se mantém estacionária, o que é uma das condições básicas da intensimetria (FAHY, 1995). No método de varredura deve-se fazer pelo menos duas medições em cada superfície e que elas sejam ortogonais. A diferença entre as duas medições deve estar de acordo com o desvio padrão determinado pela Tabela 3.1.

Neste trabalho são propostos três novos índices de campo para se avaliar a precisão dos resultados obtidos, o F_{sup} , Fator de Superfície, F_{rel} , Fator de Relação entre a área da fonte e da superfície de medição e o δ_{abs} , Fator de Absorção.

O Fator de Superfície, F_{sup} , influi diretamente nos erros de desarranjo de fase, quantidade de amostra e tempo de integração, todos na presença de elevado ruído de fundo. Conforme mostra a equação 3.70, o F_{sup} sofre influência de vários fatores, entre eles a dimensão da superfície de medição, o volume do local onde se realiza o trabalho, o campo reverberante e o ruído de fundo. Portanto deve-se conhecer a influência destes parâmetros no F_{sup} e na precisão dos resultados obtidos.

O Fator de Relação entre a área da fonte e da superfície, F_{rel} , influi no erro devido à absorção sonora da fonte em análise, gerando desvios negativos no nível de potência sonora, item 3.5. Assim, quanto mais F_{rel} se aproxima da unidade maior será este erro. Os valores do F_{rel} utilizados estão na tabela 4.2

O Fator de Absorção, δ_{abs} , indica o montante de energia sonora absorvida pela fonte, gerando desvios negativos no nível de potência sonora e é determinado pela equação 3.60, item 3.3.2.2. Segundo Hubner e Wittstock (2004) este índice possibilita o cálculo do erro devido à absorção somente quando estiver entre 0 e -10 dB.

4.3.3 Procedimento de Varredura

O tempo de varredura de uma superfície deve ser no mínimo 20 segundos com uma velocidade de deslocamento da sonda entre 0,1 e 0,5 m/s (ISO 9614-2, 1995). Este parâmetro deve ser respeitado a fim de se limitar os erros de leitura na sonda devido a elevada velocidade do ar e proporcionar uma integração no tempo adequado ao grau de precisão utilizado. O processo de varredura recomendado pela ISO 9614-2 (1995) está representado pela Figura 4.9:

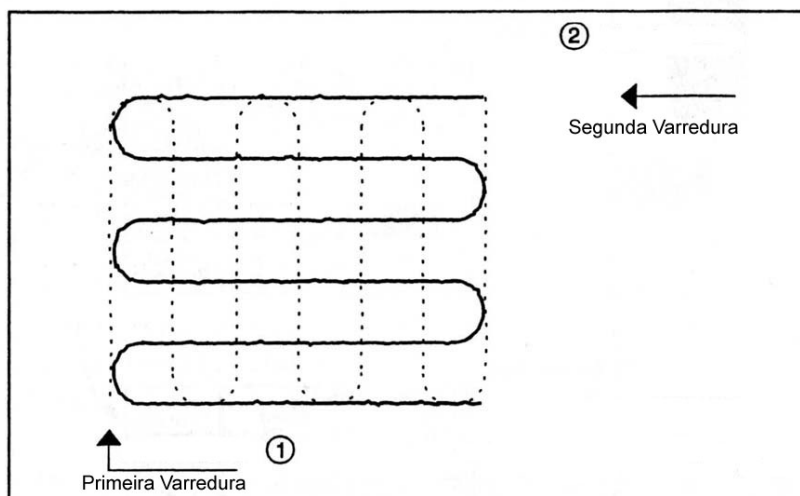


Figura 4.9 Ilustração das varreduras ortogonais da sonda em uma superfície de medição, Bruel Kjaer (1997)

4.4. DETERMINAÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÃO

Os resultados do nível de potência sonora obtidos através da técnica de intensimetria podem ser corrigidos devidos os seus erros sistemáticos ou aleatórios, como recomenda Jacobsen (1991). O erro devido à aproximação por diferenças finitas, equação 3.29, não deve ser corrigido, pois é compensado pela ressonância da cavidade dos microfones (JACOBSEN, CUTANDA E JUHL, 1996 e 1998).

O erro devido ao desarranjo de fase dos canais de medição pode ser determinado através da equação 3.46. Mas como este erro é influenciado pelo ruído de fundo, sendo incrementado nestas situações, deve-se utilizar a equação 3.63 onde este parâmetro e o campo reverberante já estão contemplados.

O erro devido à absorção dentro da superfície de medição será corrigido de acordo com o método proposto por Hübner (2001), denominado de “zero teste”, através da equação 3.59. O Índice Pressão Intensidade Sonora durante o “zero teste”, $\delta_{PI,zero}$, é determinado através da equação 3.57. O $\delta_{PI,zero}$ foi medido em todas as condições ambientais estudadas mas as correções foram implementadas conforme descrito no item 4.3.2. As correções devido à absorção foram executadas de duas maneiras: a primeira aplicando os parâmetros $\delta_{PI,zero}$ e δ_{PI} obtidos durante as medições de cada condição ambiental na equação 3.59 para determinação do erro; a segunda aplicando na equação 3.59 o $\delta_{PI,zero}$

obtido apenas da condição A, baixo tempo de reverberação e baixo ruído de fundo ($\delta_{PI,zero}$ único) e o δ_{PI} obtido em cada condição ambiental. Desta maneira pode-se verificar a influência do ruído de fundo e do campo reverberante durante o “zero teste”. O $\delta_{PI,zero}$ utilizado é uma média aritmética das três medições realizadas. Os erros devido à quantidade de amostra e ao tempo de integração serão corrigidos através das equações 3.64 e 3.66. Deve-se ater que os erros calculados pelas equações 3.63, 3.64 e 3.66 são normalizados. O erro do nível de potência sonora, $Le(W)$, deve ser determinado pela equação 4.8:

$$Le(W) = 10 * \text{Log}(1 + e) \quad 4.8$$

4.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A furadeira estudada teve seu nível de potência sonora determinado por Santos (2004) através de três metodologias diferentes: a metodologia direta segundo a ISO 3741 (1999), *Acoustics determination of sound power level of noise sources using sound pressure, precision methods for reverberations rooms*, a metodologia por comparação segundo a ISO 3743-1 (1994), *Acoustics determination of sound power level of noise sources using sound pressure, comparison method for hard walled test rooms* e a metodologia direta segundo a ISO 3743-2 (1994), *Acoustics determination of sound power level of noise sources using sound pressure, method for special reverberation test rooms*.

Os valores do nível de potência sonora obtidos através da norma ISO 3741 (1999) foram considerados como referência para cálculo dos desvios de medição por possuir o procedimento mais restritivo e ser um método de precisão. Os valores do nível de potência sonora obtidos através das normas ISO 3743-1 (1994) e ISO 3743-2 (1994) serão utilizados para comparação entre os desvios de resultados apresentados pelo método da pressão e pelo método da intensidade sonora, com e sem correção dos erros estudados. Este estudo foi executado para as bandas de frequências de 1/1 de oitava entre 125 a 8000 Hz e para o valor global na escala de compensação “A”.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E ANÁLISE

Os resultados obtidos serão apresentados separados por cada condição ambiental: baixo tempo de reverberação e baixo ruído de fundo com volume do ambiente de 487 m³ (condição A), baixo tempo de reverberação e alto ruído de fundo com volume do ambiente de 487 m³ (condição B), alto tempo de reverberação e alto ruído de fundo com volume do ambiente de 5100 m³ (condição C) e baixo tempo de reverberação e alto ruído de fundo com volume do ambiente de 78 m³ (condição D). As características de cada condição ambiental (tempo de reverberação, área da superfície de medição, tempo de integração, comprimento da linha de varredura, nível de pressão sonora do ruído de fundo) estão apresentados no Apêndice A.

A primeira etapa consistiu em analisar os índices de campo propostos pela ISO 9614-2 (1995), F_{PI} , $F_{+/-}$, e o índice de repetibilidade para cada superfície analisada (40, 60, 80, 110, 130). As tabelas com todos os valores obtidos estão no Apêndice C. Após o nível de potência sonora obtido em banda de frequência de 1/1 de oitava, apenas com a correção de microfones de campo livre, foram comparados com a ISO 3741 (1999) e determinados seus desvios e analisados de acordo com o proposto pela ISO 9614-2 (1995). Nesta etapa, também foram utilizados os desvios das normas ISO 3743-1 (1994) e ISO 3743-2 (1994), método de pressão em relação a ISO 3741(1999). Em seguida os índices de campo propostos neste trabalho, Fator de Superfície, F_{sup} , Fator de Relação entre a área da lateral da fonte e da superfície de medição, F_{rel} e o Índice Pressão Intensidade de Absorção, δ_{abs} foram analisados. As correções devido aos erros de desarranjo de fase na presença de elevado ruído de fundo, quantidade de amostra na presença de elevado ruído de fundo, tempo de integração na presença de levado ruído de fundo e absorção sonora da fonte foram aplicadas no nível de potência sonora com o $\delta_{PI,zero}$ obtido em cada condição ambiental e com o $\delta_{PI,zero}$ obtido apenas na condição A. O valor do erro devido ao desarranjo de fase na presença do elevado ruído de fundo, quantidade de amostra e tempo de integração utilizados para as correções do nível de potência sonora, estão no

Apêndice D, para cada condição ambiental e todas as dimensões de superfícies. A comparação com as normas ISO 3741 (1999), ISO 3743-1 (1994) e ISO 3743-2 (1994) foi repetida. Os desvios dos valores globais na escala de compensação “A” também foram analisados em relação às normas ISO 3741 (1999), ISO 3743-1 (1994) e ISO 3743-2 (1994) de acordo com os desvios propostos pela ISO 9614-2 (1995).

5.1 CONDIÇÃO AMBIENTAL DE ALTO RUÍDO DE FUNDO, BAIXO TEMPO DE REVERBERAÇÃO E VOLUME DA SALA DE 487 m³

Os Índices Pressão Intensidade, F_{PI} , em comparação com a Capacidade Dinâmica, L_D , das medições de M1 a M30 são apresentadas nas Figura 5.1 a 5.5. O F_{PI} ficou abaixo do L_D em todas as medições nas superfícies 60 e 80. Nas demais superfícies, na frequência de 125 Hz, este índice ultrapassou a L_D da instrumentação. Na superfície 130 o F_{PI} ficou acima do L_D até a frequência de 250 Hz nas medições M26 e M27.

Nas demais frequências o F_{PI} ficou abaixo dos 10 dB. O Índice de Potência Parcial, $F_{+/-}$, foi satisfeito em todas as medições ficando bem abaixo do limite máximo de 3 dB. O critério de repetibilidade ficou acima do limite da norma na superfície 110 na frequência de 125 Hz nas medições M20 e M23 e na superfície 130 na frequência de 125 Hz nas medições M26 e M27. Praticamente em todas as medições o L_D ficou abaixo do F_{PI} na frequência de 125 Hz. Desta maneira, estas não foram desconsideradas na média logarítmicas do nível de potência sonora, para que se pudesse dar continuidade à análise dos resultados.

Os desvios em relação a norma ISO 3741 (1999) das médias logarítmicas das medições consideradas são mostradas na Figura 5.6. O desvio padrão é o proposto pela ISO 9614-2 (1995). As medições realizadas com as superfícies de 40, 110 e 130 ficaram dentro do intervalo de erro. A superfície 80 ficou abaixo do desvio padrão proposto, exceto nas frequências de 250 e 500 Hz e a superfície 60 ficou fora do intervalo proposto pela norma em todas as frequências. Os desvios das normas ISO 3743-1 (1994) e ISO 3743-2 (1994) ficaram dentro do intervalo, excedendo o valor apenas na frequência de 250 e 2000 Hz.

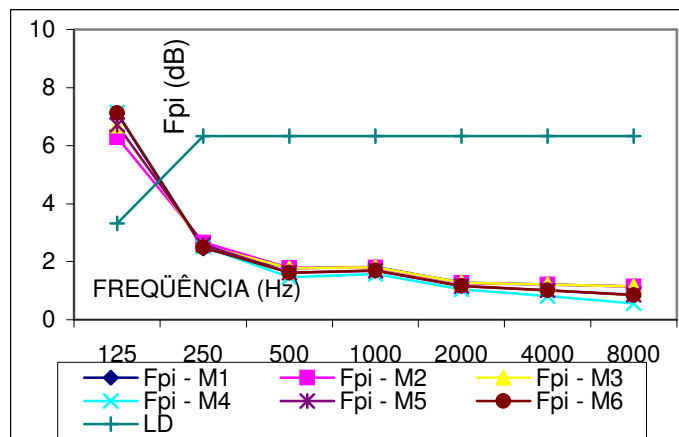


Figura 5.1 Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M1 a M6, superfície 40

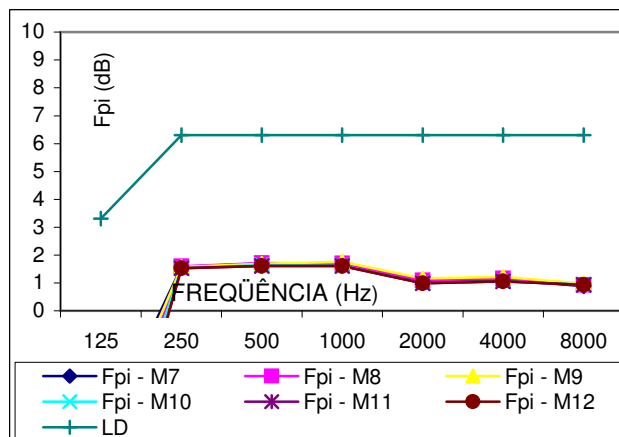


Figura 5.2 Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M7 a M12, superfície 60

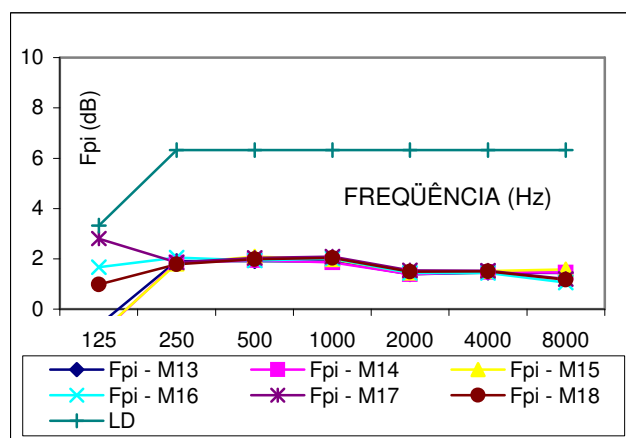


Figura 5.3 Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M13 a M18, superfície 80

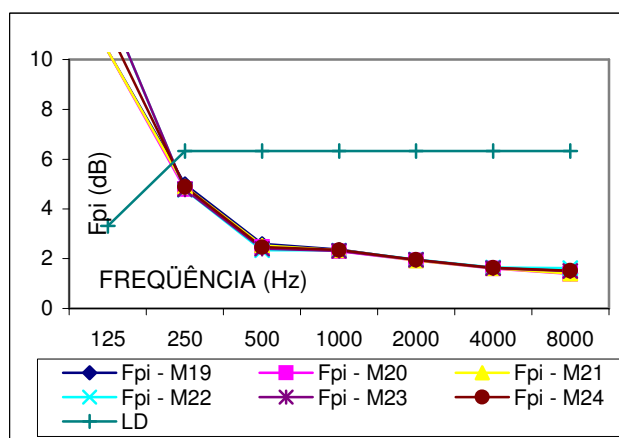


Figura 5.4 Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M19 a M24, superfície 110

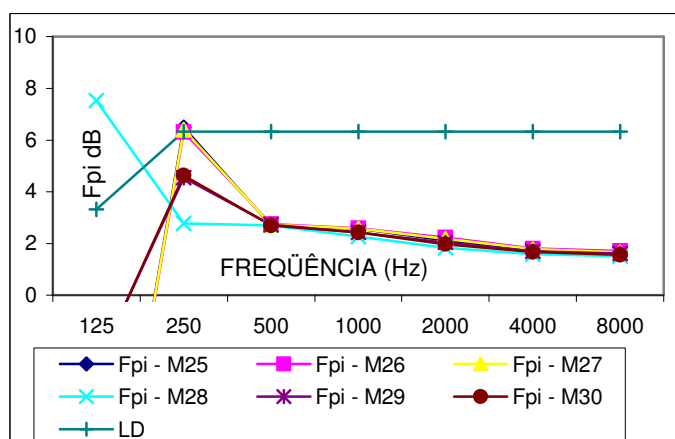


Figura 5.5 Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M25 a M30, superfície 130

Na frequência de 125 Hz houve uma grande variação nos resultados, mesmo nas medições executadas pelo método de pressão, fato que já havia sido sinalizado pelo Índice Pressão Intensidade.

O Fator de Superfície, F_{sup} , das medições de M1 a M30 são mostrados da Figura 5.7. Este parâmetro foi obtido na mesma condição ambiental para todas as superfícies, apresentando portanto, uma ordem crescente com o aumento da área da superfície. Apenas a superfície 130 ultrapassou a unidade em seu valor.

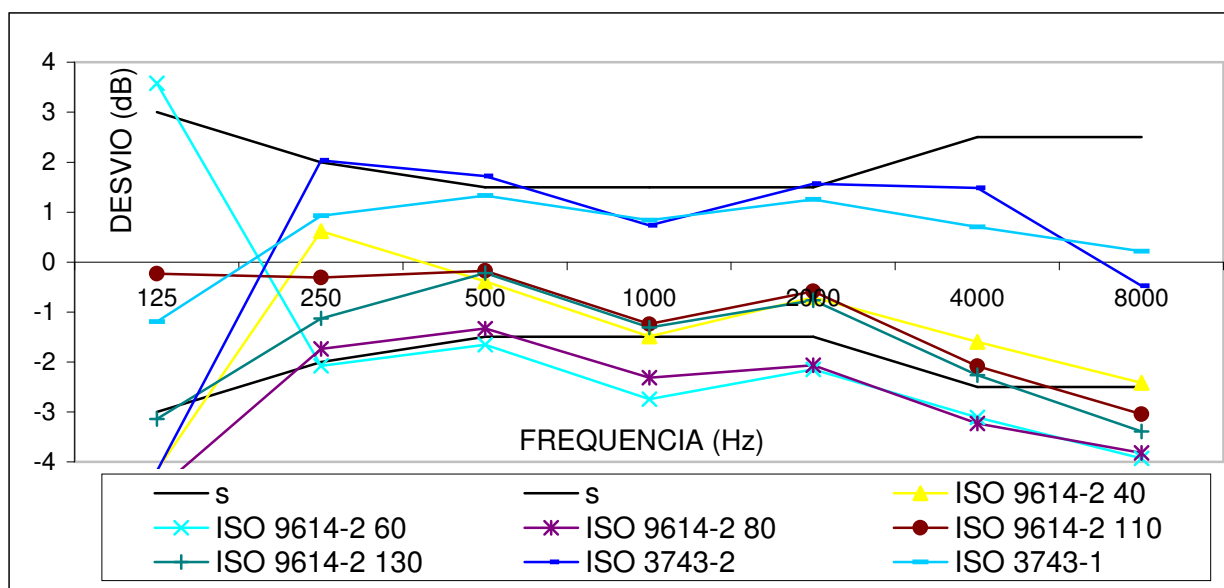


Figura 5.6 Desvios da média logarítmica das superfícies 40 (M1 a M6), 60 (M7 a M12), 80 (M13 a M18), 110 (M19 a M24), e 130 (M25 a M30) obtidas através da ISO 9614-2 (1995), sem correção, em relação a ISO 3741 (1999)

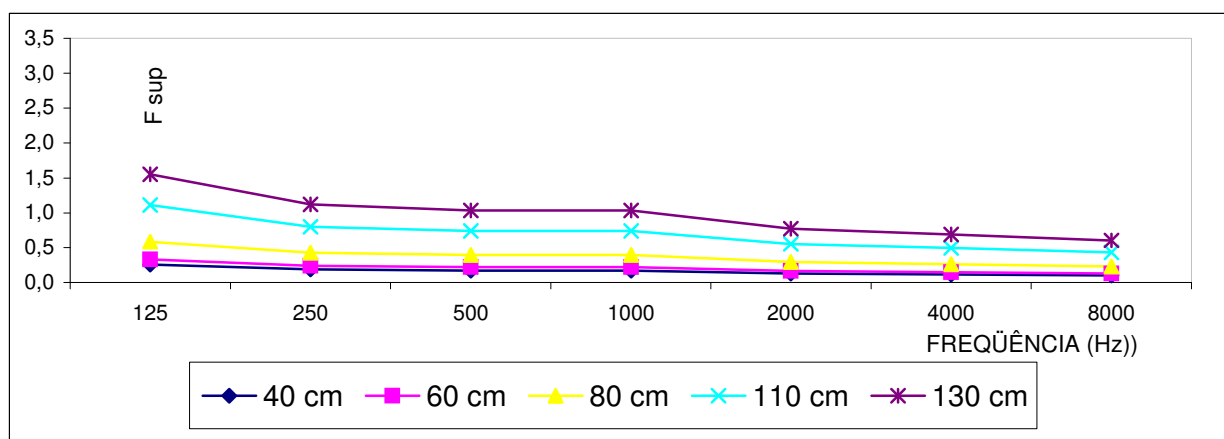


Figura 5.7 Fator de superfície (F_{sup}) das superfícies 40 (M1 a M6), 60 (M7 a M12), 80 (M13 a M18), 110 (M19 a M24), e 130 (M25 a M30)

A somatória das médias logarítmicas dos erros devido à diferença de fase na presença de elevado ruído de fundo, tempo de amostra e tempo de integração é mostrada na Figura 5.8. Esta figura representa apenas a tendência de cada erro, já que para correção dos resultados cada medição foi corrigida individualmente, e não pela média. A tendência da somatória destes erros é ser muito próxima de zero a partir de 500 Hz. O crescimento dos erros é proporcional a F_{sup} , Figura 5.7.

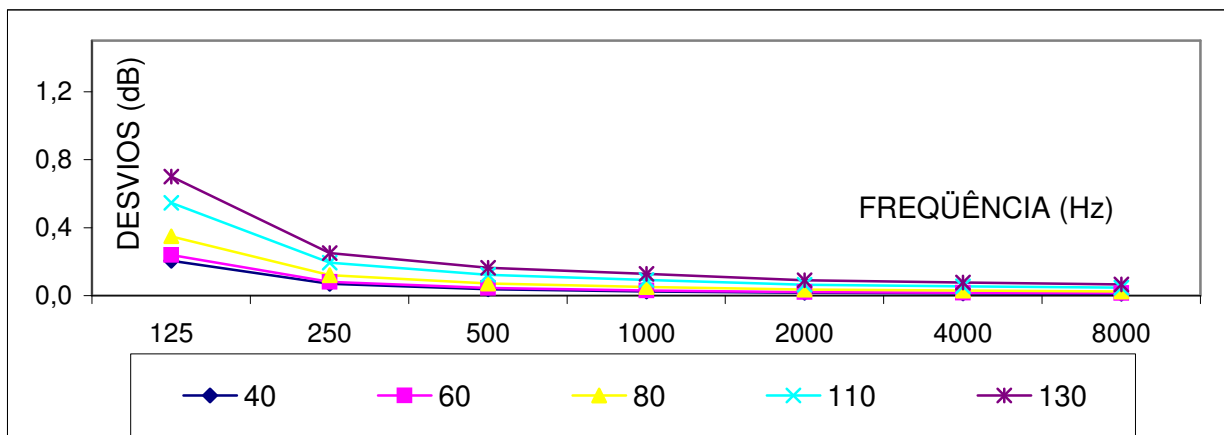


Figura 5.8 Somatória das médias logarítmicas dos erros das superfícies 40 (M1 a M6), 60 (M7 a M12), 80 (M13 a M18), 110 (M19 a M24), e 130 (M25 a M30) devido a diferença de fase na presença de elevado ruído de fundo, tempo de amostra e tempo de integração

O Índice Pressão Intensidade obtido durante o “zero teste” através das medições de M31 a M45, $\delta_{PI,zero}$, e o Índice Pressão Intensidade, F_{PI} , obtidos nas medições de M1 a M30, conforme tabela 4.2, deram origem ao Índice Pressão Intensidade de Absorção, δ_{abs} , mostradas na Figura 5.9. Apenas a superfície 80 obteve condições de correção devido a absorção da fonte em todas as frequências e na 60 apenas a frequência de 250 Hz se encaixou no intervalo de 0 a -10 dB. Estas duas superfícies, 60 e 80, foram as que apresentam maiores erros negativos, sendo portanto as que mais necessitavam de correções para se aproximar do valor de referência. Na superfície de 40, devido ao campo reativo e aos erros gerados pela elevada velocidade do ar provocada pela ventoinha do motor elétrico, só foi possível efetivar a correção devido à absorção da fonte na frequência de 8000 Hz. Na superfície 110 a correção de absorção foi possível apenas em 4000 Hz e na 130, que apresentou um comportamento aleatório não sendo possível correção devido a absorção nas frequências de 250 e 8000 Hz. Na Figura 5.10 estão apresentados os erros devido à absorção da fonte.

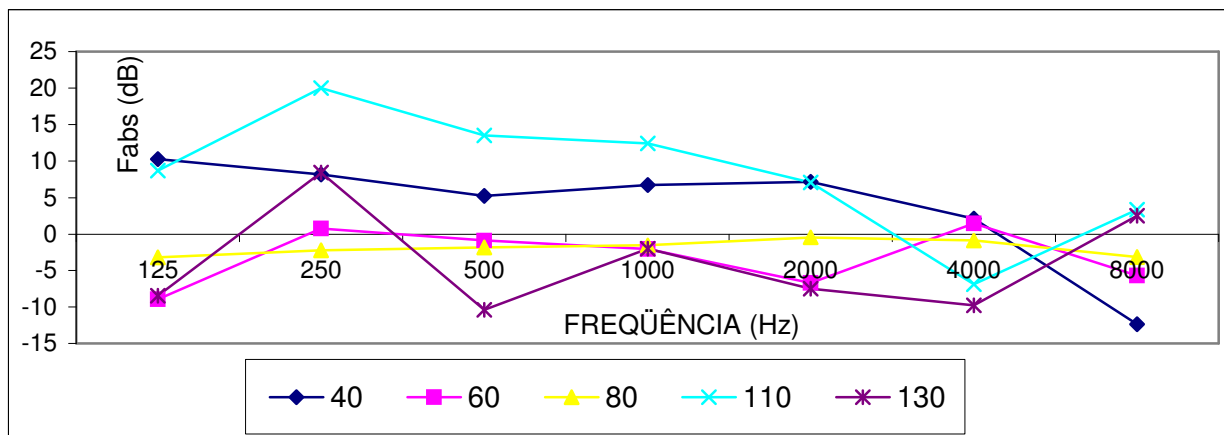


Figura 5.9 Índice de Pressão Intensidade de Absorção, δ_{abs} , das superfícies 40 (M31 a M33), 60 (M34 a M36), 80 (M37 a M39), 110 (M40 a M42), e 130 (M435 a M45)

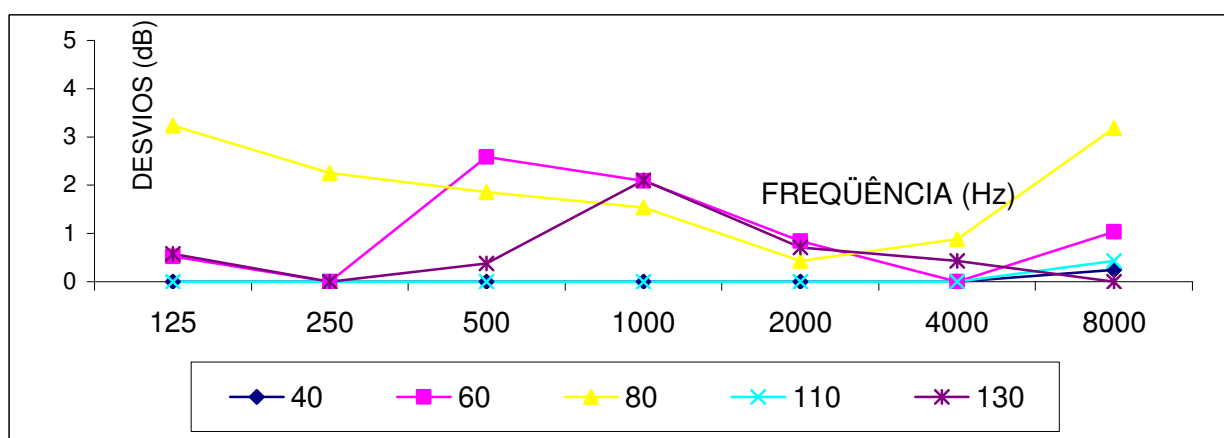


Figura 5.10 Média logarítmica dos erros das superfícies 40 (M1 a M6), 60 (M7 a M12), 80 (M13 a M18), 110 (M19 a M24), e 130 (M25 a M30)

Foram aplicadas nos desvios apresentados na Figura 5.6 as correções devido à absorção da fonte, Figura 5.10, e devido à quantidade de amostra, ao tempo de integração e desarranjo de fase na presença de elevado ruído de fundo, Figura 5.8. Os desvios corrigidos estão na Figura 5.11. Após as correções, apenas as superfícies 40 e 60 não ficaram dentro do intervalo na frequência de 125 Hz, apesar desta frequência não satisfazer os índices de campo nos critérios de repetibilidade e o Índice Pressão Intensidade, F_{PI} . Importante notar que o resultado obtido através da ISO 3743-2 (1994) também ficou de fora do intervalo nesta frequência. A superfície de 60 em 4000 e 8000Hz e a superfície 130 em 8000Hz ficaram fora do intervalo, mas se aproximaram da margem de erro, ficando praticamente no limite.

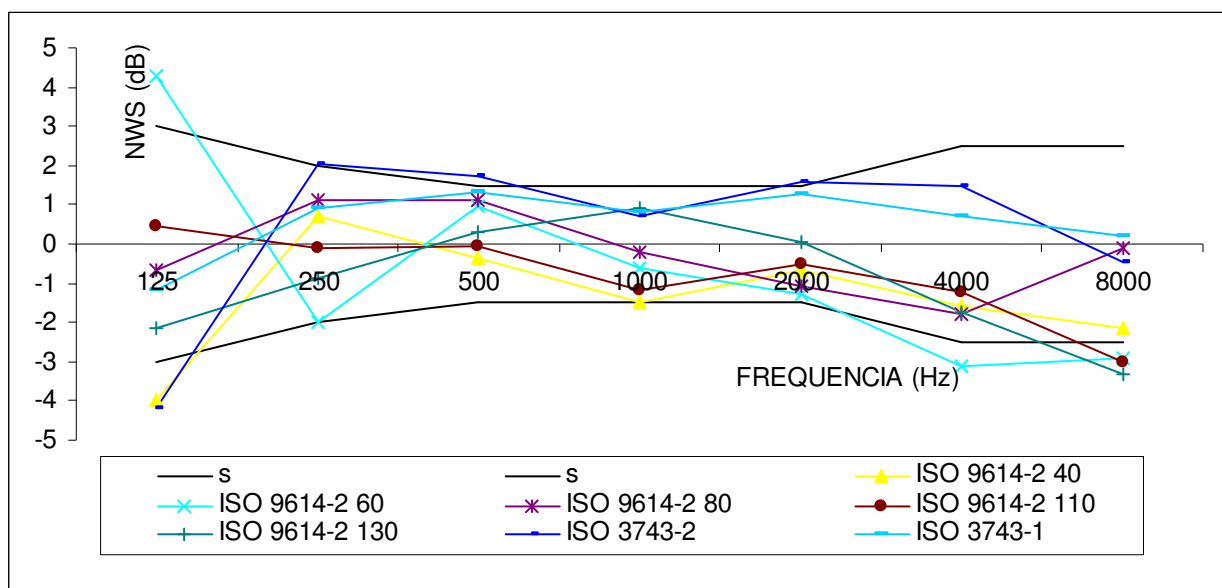


Figura 5.11 Desvios da média logarítmica das medições das superfícies 40 (M1 a M6), 60 (M7 a M12), 80 (M13 a M18), 110 (M19 a M24), e 130 (M25 a M30), com correções, obtidas através da ISO 9614-2 (1995), em relação a ISO 3741 (1999)

Os resultados do nível de potência sonora obtidos através da técnica da intensimetria podem originar um valor global na escala de compensação “A”, obtida através da somatória das frequências que atenderam os índices de campo propostos pela ISO 9614-2 (1995). O desvio proposto é de 3 dB (A), conforme a tabela 3.1. Os desvios em relação à ISO 3741 (1999) das medições realizadas são apresentadas sem correções na Figura 5.12 e com as correções aplicadas na Figura 5.13. Sem as correções, apenas as superfícies 60 e 80 ficaram fora da margem de erro, mas por apenas 0,1 dB(A). Aplicadas às correções todas as medições ficaram dentro da margem de erro. O desvio da ISO 3743-2 (1994), método de pressão, é maior que os desvios obtidos pela ISO 9614-2 (1995), através da técnica da intensimetria, quando aplicadas às correções.

A norma ISO 9614-3 (2002) estabelece um desvio padrão mais restritivo do que a ISO 9614-2 (1995), pois segue uma metodologia de precisão. Nenhum dos resultados analisados atendeu o desvio mínimo em todas as frequências, mesmo os resultados obtidos pelo método de pressão. O desvio mínimo do valor global na escala “A” permitido por esta norma é de 1 dB(A), portanto apenas as superfícies 80 e 130 ficaram dentro do intervalo.

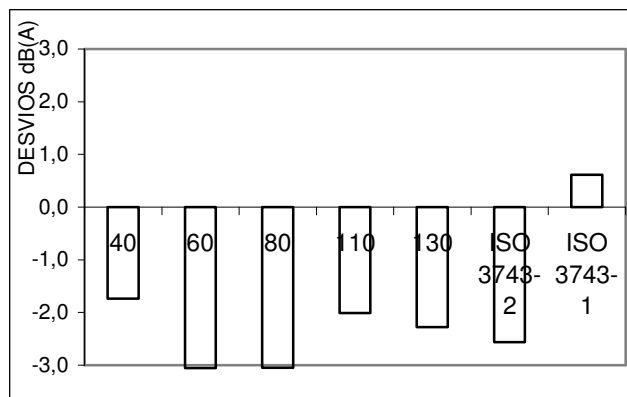


Figura 5.12 Desvios dos valores globais em dB(A) da média logarítmica das medições M1 a M30 em relação a ISO 3741 (1999) sem correções

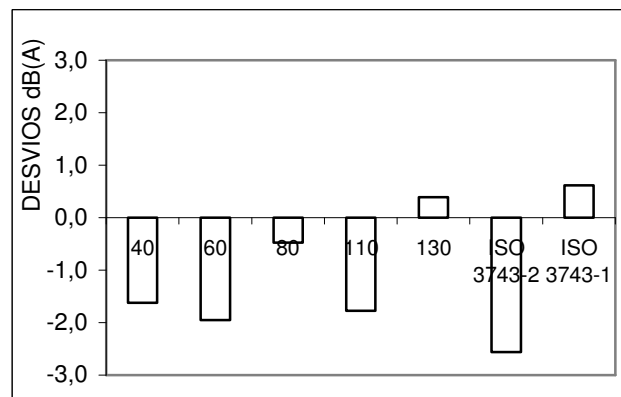


Figura 5.13 Desvios dos valores globais em dB(A) da média logarítmica das medições M1 a M30 em relação a ISO 3741 (1999) com correções

5.2 CONDIÇÃO AMBIENTAL DE BAIXO RUÍDO DE FUNDO, BAIXO TEMPO DE REVERBERAÇÃO E VOLUME DA SALA DE 487 m³

Os Índices Pressão Intensidade, F_{PI} , em comparação com a Capacidade Dinâmica, L_D , das medições de M46 a M75 são apresentadas nas Figura 5.14 a 5.18. O F_{PI} ficou abaixo do L_D em todas as medições na superfície 60. Nas demais superfícies, na frequência de 125 Hz, este índice ultrapassou a L_D da instrumentação. Na superfície 110 praticamente todas as medições ficaram no limite da capacidade em 250 Hz. Na superfície 130 o F_{PI} ficou acima do L_D também a frequência de 250 Hz, excetuando a medição M73.

O Índice de Potência Parcial, $F_{+/-}$, foi satisfeito em todas as medições ficando bem abaixo do limite máximo de 3 dB. O critério de repetibilidade ficou acima do limite da norma na superfície 130 na frequência de 125 Hz na medição M81, sendo portanto desconsiderada para o cálculo da média logarítmica do nível de potência sonora e do valor global na escala de compensação “A”.

Os desvios em relação a norma ISO 3741 (1999) das médias logarítmicas das medições consideradas são mostradas na Figura 5.19. O desvio padrão é o proposto pela ISO 9614-2 (1995).

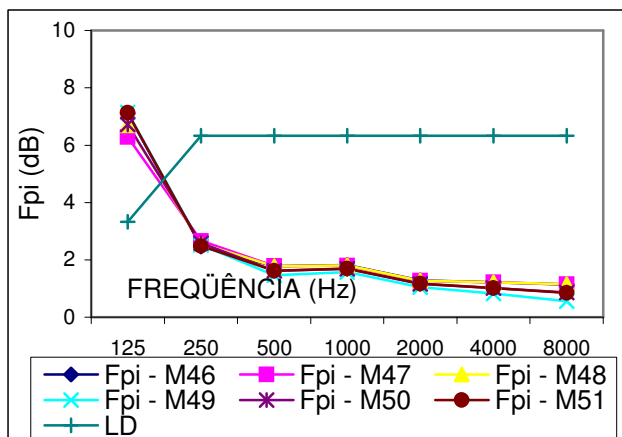


Figura 5.14 Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M46 a M51, superfície 40

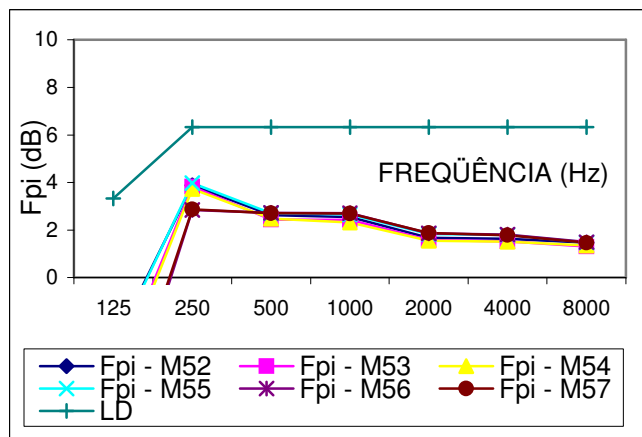


Figura 5.15 Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M42 a M57, superfície 60

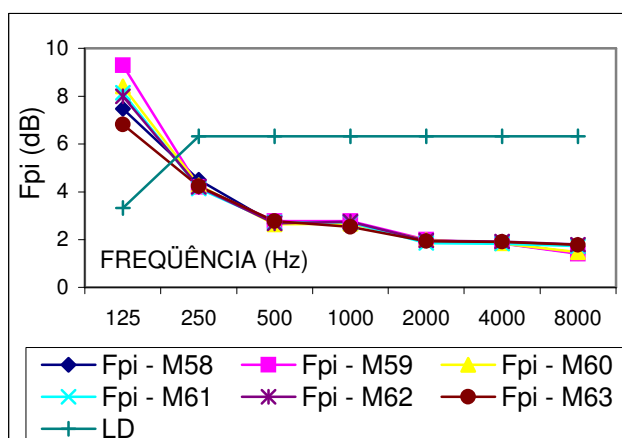


Figura 5.16 Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M58 a M63, superfície 80

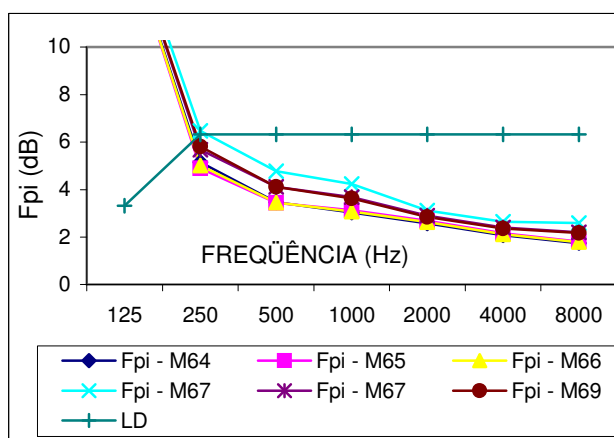


Figura 5.17 Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M64 a M69, superfície 110

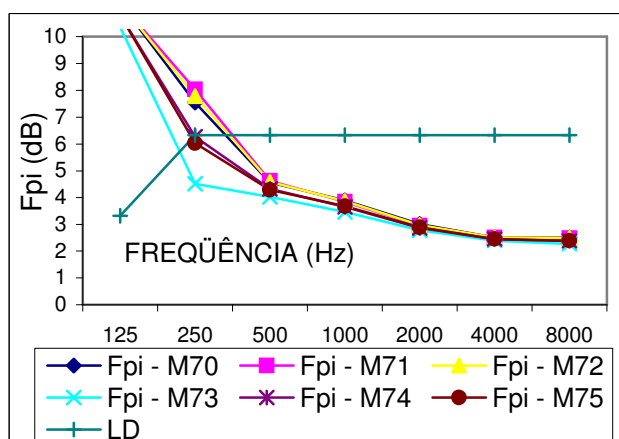


Figura 5.18 Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M70 a M75, superfície 130

As medições realizadas com as superfícies 40, 110 e 130 ficaram dentro do intervalo de erro, sendo que as superfícies 40 e 130 falharam nas frequências de 125 e 8000 Hz. As superfícies 60 e 80 ficaram abaixo do desvio padrão proposto, exceto nas frequências de 250 e 500 Hz. Na frequência de 125 Hz houve desta vez uma pequena variação nos resultados, apesar do erro ser elevado, sendo exceção a superfície 110 que apresentou um pequeno desvio e a superfície 60 que apresentou um erro da ordem de 6 dB. O desvio padrão das medições M52 a M57 foi de 0,8 dB, o que confirma que se trata de um erro sistemático que pode ser causado pelos harmônicos gerados pelo mandril do equipamento ou pela vibração de sua carcaça. As superfícies 110 e 130 não atenderam o F_{PI} mas apresentaram uma pequena variação com o resultado tido como referência.

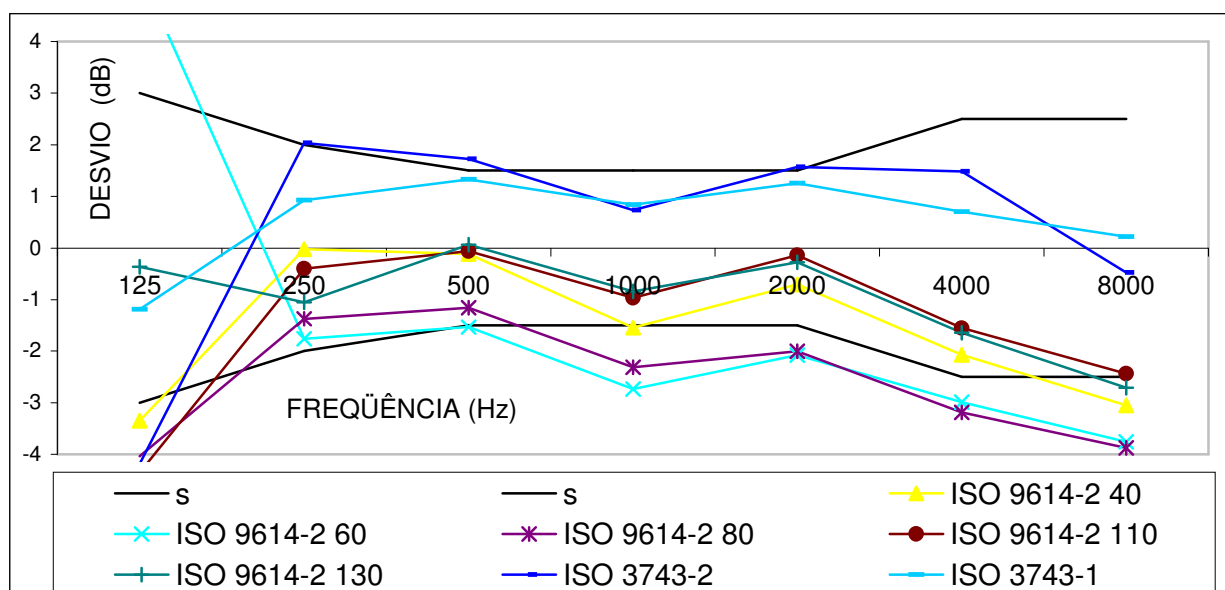


Figura 5.19 Desvios da média logarítmica das superfícies 40 (M46 a M51), 60 (M52 a M57), 80 (M58 a M63), 110 (M64 a M69), e 130 (M70 a M75), obtidas através da ISO 9614-2 (1995), sem correção, em relação a ISO 3741 (1999)

O Fator de Superfície, F_{sup} , das medições de M46 a M75 são mostrados da Figura 5.20. A única variação na determinação deste fator em relação a condição ambiental de baixo tempo de reverberação e baixo ruído de fundo é a presença do ruído gerado por um outro equipamento semelhante ao analisado, emitindo portanto um espectro sonoro coerente ao do equipamento analisado. Desta maneira, o F_{sup} só fica abaixo da unidade nas superfícies 40, 60 e 80.

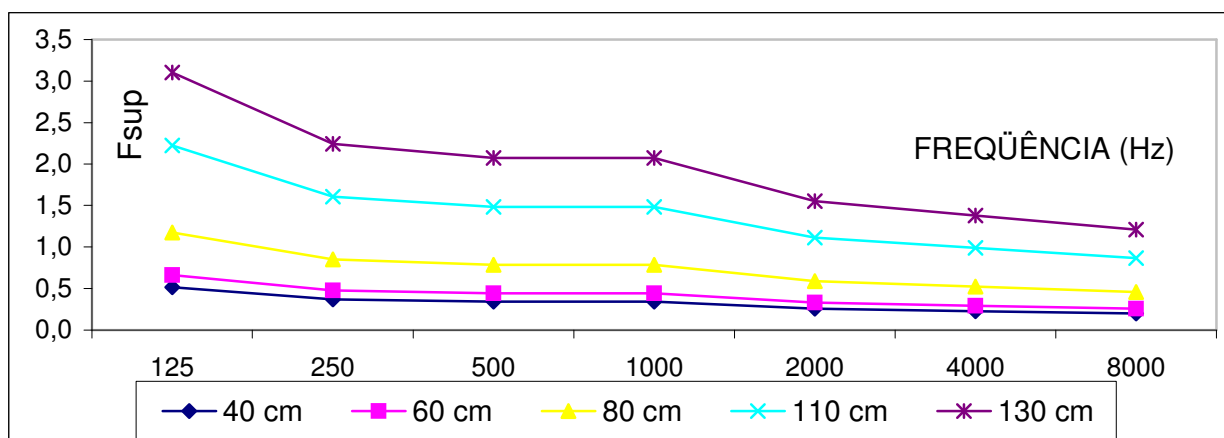


Figura 5.20 Fator de superfície (F_{sup}) das superfícies 40 (M46 a M51), 60 (M52 a M57), 80 (M58 a M63), 110 (M64 a M69), e 130 (M70 a M75),

A somatória das médias logarítmicas dos erros devido à diferença de fase na presença de elevado ruído de fundo, tempo de amostra e tempo de integração é mostrada na Figura 5.21. A tendência da somatória destes erros é ser muito próxima de zero a partir de 500 Hz, mesmo nas superfícies 110 e 130 onde o F_{sup} é superior a 1,5. O crescimento dos erros é proporcional a F_{sup} , Figura 5.20.

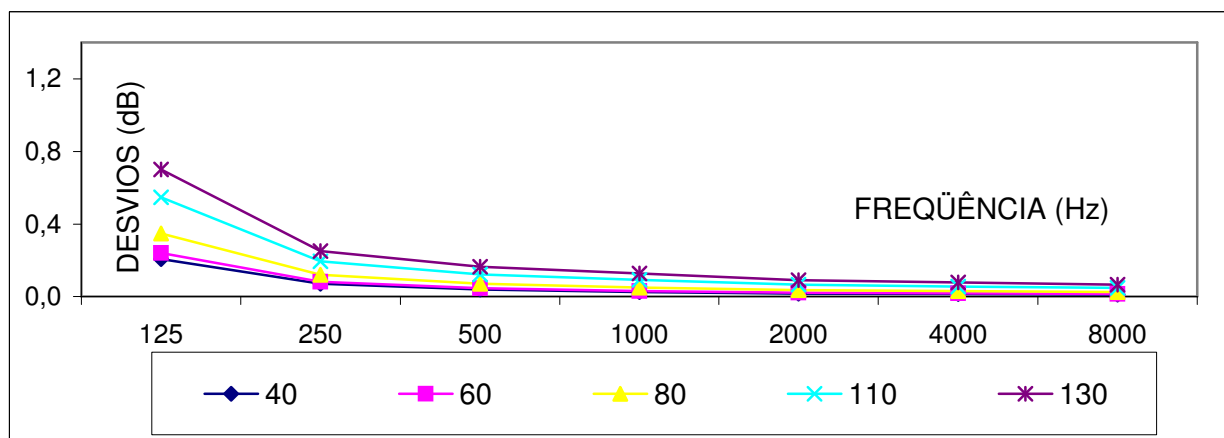


Figura 5.21 Somatória das médias logarítmicas das superfícies 40 (M46 a M51), 60 (M52 a M57), 80 (M58 a M63), 110 (M64 a M69), e 130 (M70 a M75), dos erros de diferença de fase na presença de elevado ruído de fundo, tempo de amostra e tempo de integração

O Índice Pressão Intensidade obtido durante o “zero teste” através das medições de M76 a M90, $\delta_{PI,zero}$, e o Índice Pressão Intensidade, F_{PI} , obtidos nas medições de M46 a M75 deram origem ao Índice Pressão Intensidade de Absorção, δ_{abs} , mostradas na Figura 5.22. Apenas em 125 Hz as superfícies 40 e 80 atenderam o parâmetro necessário para que se

possa efetivar a correção devido a absorção da fonte. O aumento do ruído de fundo, e o fato da fonte ser coerente, degradaram a condição ambiental das medições durante o “zero teste” inviabilizando este procedimento, mesmo com um campo reverberante fraco. Na Figura 5.23 estão apresentados os erros devido a absorção da fonte.

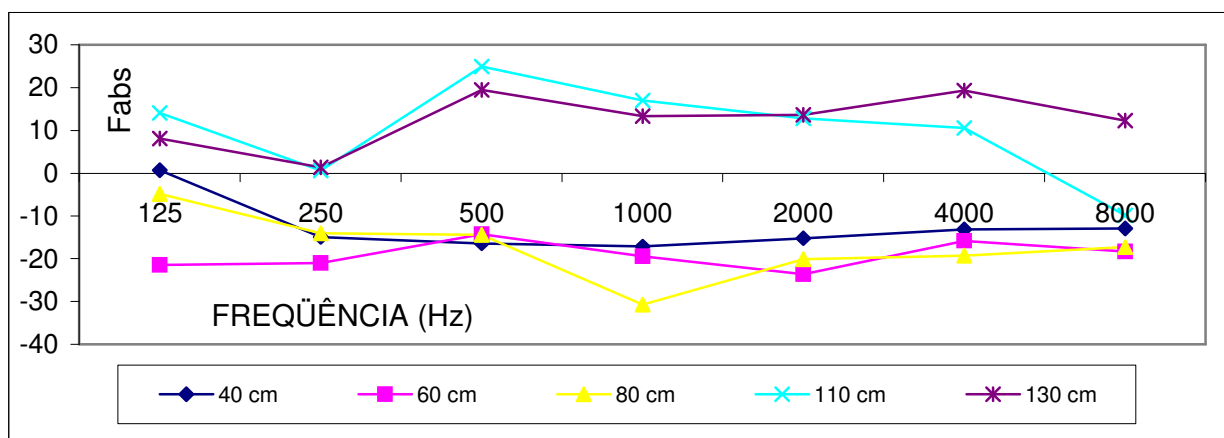


Figura 5.22 Índice de Pressão Intensity de Absorção das superfícies de 40 (M76 a M78), 60 (M79 a M81), 80 (M82 a M84), 110 (M85 a M87), e 130 (M88 a M90)

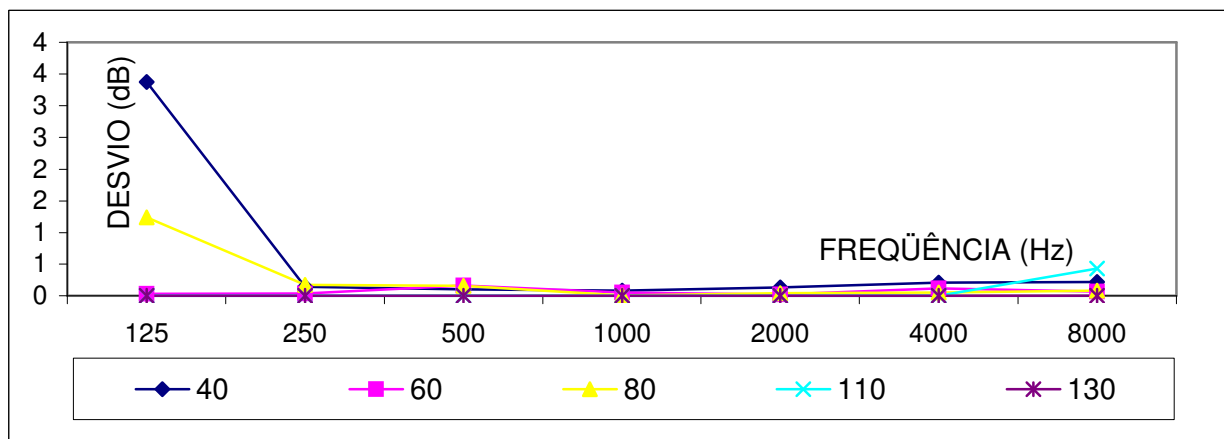


Figura 5.23 Média logarítmica dos erros das superfícies 40 (M76 a M78), 60 (M79 a M81), 80 (M82 a M84), 110 (M85 a M87), e 130 (M88 a M90), devido a absorção da fonte

Na Figura 5.24 as correções aplicadas foram devido ao tempo de integração, quantidade de amostras e desarranjo de fase devido à presença de elevado ruído de fundo, Figura 5.21. A correção devido à absorção da fonte foi aplicada apenas na frequência de 125 Hz nas superfícies 40 e 80, Figura 5.23. A superfície 60 mesmo com as correções ficou praticamente em todas as frequências fora do intervalo e a superfície 80 ficou no limite permitido, exceto em 250 e 500 Hz.

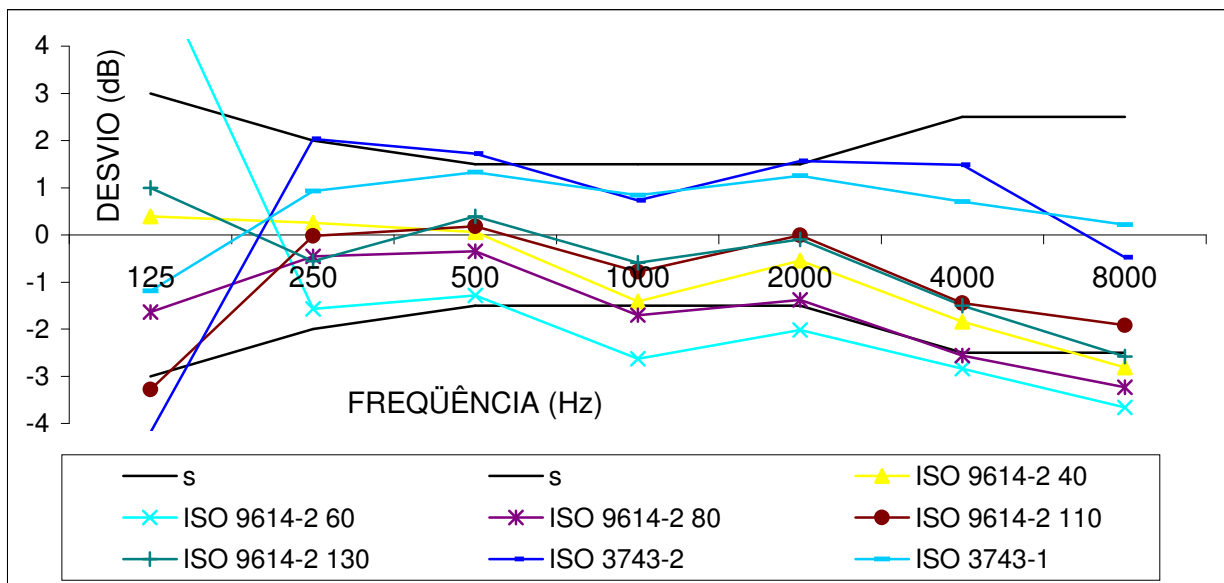


Figura 5.24 Desvios da média logarítmica das medições das superfícies 40 (M46 a M51), 60 (M52 a M57), 80 (M58 a M63), 110 (M64 a M69), e 130 (M70 a M75), com correções, obtidas através da ISO 9614-2 (1995), em relação a ISO 3741 (1999)

As Figuras 5.25 e 5.26 apresentam os valores globais em dB(A) das médias logarítmicas das medições M46 a M75 sem e com as correções aplicadas respectivamente. Sem as correções apenas a superfície 80 ficou fora do intervalo e a de 60 ficou no limite. Aplicando as correções todas as superfícies atenderam os limites da ISO 9614-2 (1995).

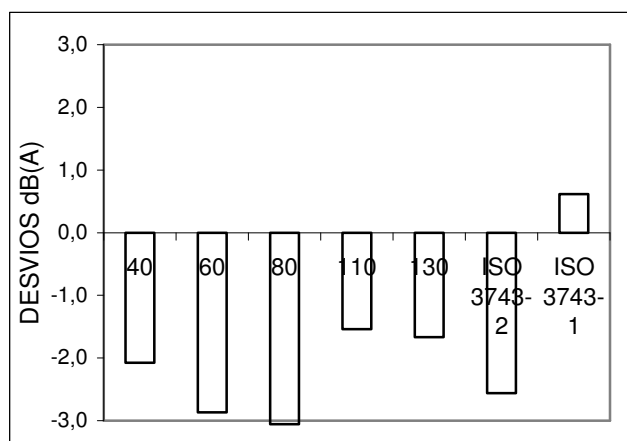


Figura 5.25 Desvios dos valores globais em dB(A) da média logarítmica das medições M46 a M75 em relação a ISO 3741 (1999) sem correções

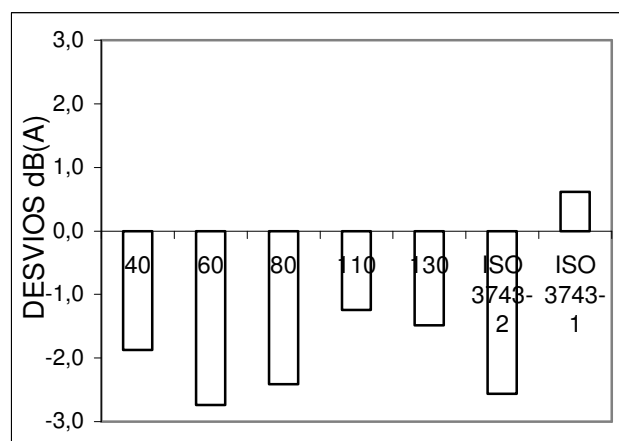


Figura 5.26 Desvios dos valores globais em dB(A) da média logarítmica das medições M46 a M75 em relação a ISO 3741 (1999) com correções

Analisando as correções aplicadas através dos desvios propostos pela ISO 9614-3 (2002), apenas as superfícies 110 e 130 ficaram dentro do intervalo, apesar de possuir o F_{sup} mais

elevado das superfícies analisadas. Por apresentarem as maiores dimensões, F_{rel} maior que 20, estão mais sujeitos a influência do ruído de fundo e campo reverberante diminuindo o erro devido a absorção de energia sonora da fonte. Na superfície 40, F_{rel} igual a 4, o erro primordial é gerado pelo campo reativo próximo a fonte, pela vibração da estrutura da furadeira e pela velocidade do ar gerado pela ventoinha do motor elétrico, que compensam o erro devido a absorção sonora. As superfícies 60, F_{rel} 6, e 80, F_{rel} 11, não são influenciadas por nenhum destes erros, mas o ruído de fundo prejudicou a execução do “zero teste” impossibilitando a correção devido a absorção da fonte. Na Figura 5.27 estão apresentados os erros devido à absorção da fonte obtidos com o $\delta_{pi, zero}$ utilizado nas medições M31 a M45, na condição de baixo ruído de fundo e baixo tempo de reverberação, equação 3.59, conforme resultados do δ_{abs} , Figura 5.8.

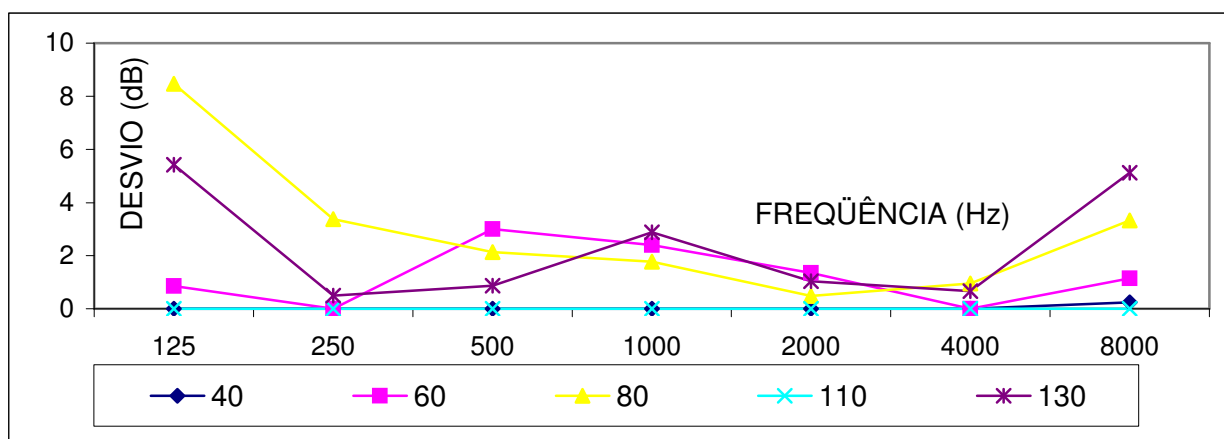


Figura 5.27 Média logarítmica dos erros das superfícies 40 (M46 a M51), 60 (M52 a M57), 80 (M58 a M63), 110 (M64 a M69), e 130 (M70 a M75), devido a absorção da fonte utilizando o $\delta_{pi, zero}$ obtido nas superfícies 40 (M31 a M33), 60 (M34 a M36), 80 (M37 a M39), 110 (M40 a M42), e 130 (M435 a M45)

Na Figura 5.28 estão os desvios do nível de potência sonora das medições M46 a M75 com as correções apresentadas nas Figuras 5.21 e 5.27. A superfície 60 se encaixou no intervalo exigido pela norma o mesmo ocorreu com a superfície 40 e 80 que atenderam praticamente todos os desvios, apenas excedendo em 125 Hz. As superfícies 110 e 130 se mantiveram dentro do intervalo do desvio padrão. Esta técnica contorna a dificuldade de se executar o “zero teste” na condição de elevado ruído de fundo e diminuiu os desvios das medições.

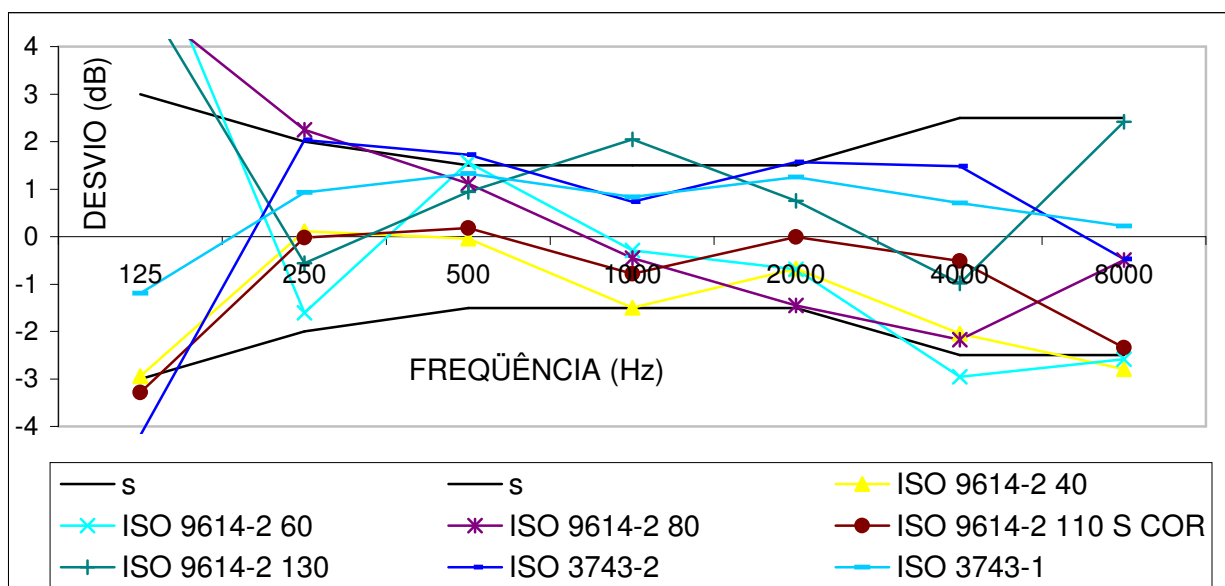


Figura 5.28 Desvios da média logarítmica das superfícies 40 (M46 a M51), 60 (M52 a M57), 80 (M58 a M63), 110 (M64 a M69), e 130 (M70 a M75), com correções devido ao efeito da absorção utilizando o $\delta_{pi, ZERO}$ obtido nas superfícies 40 (M31 a M33), 60 (M34 a M36), 80 (M37 a M39), 110 (M40 a M42), e 130 (M43 a M45)) em relação a ISO 3741 (1999)

Na Figura 5.29 está apresentado o valor global em dB(A) da médias logarítmicas das medições M46 a M75. apresentadas na Figura 5.27. Todas as superfícies ficam dentro da margem de erro determinada pela ISO 9614-2 (1995).

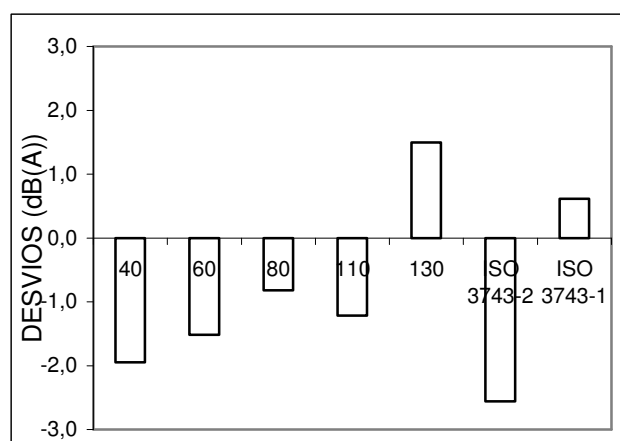


Figura 5.29 Desvios dos valores globais em dB(A) da média logarítmica das medições M46 a M75 devido ao efeito da absorção, utilizando o $\delta_{pi, ZERO}$ apenas na condição de baixo tempo de reverberação e baixo ruído de fundo, em relação a ISO 3741 (1999) com correções

Utilizando os resultados da Figuras 5.28 e 5.29 e comparando com os desvios propostos pela ISO 9614-3 (2002). apenas a superfície 110 se encaixa em todo o intervalo. As demais se alternam, o mesmo ocorrendo com os desvios das medições realizadas pelo

método de pressão através da ISO 3743-1 e 2 (1994). No valor global nenhuma das superfícies atende o desvio máximo de 1 dB(A).

5.3 CONDIÇÃO AMBIENTAL DE ALTO RUÍDO DE FUNDO, ALTO TEMPO DE REVERBERAÇÃO E VOLUME DA SALA DE 5100 m³

O Índice Pressão Intensidade, F_{PI} , em comparação com a Capacidade Dinâmica, L_D , das medições de M91 a M120 são apresentadas nas Figura 5.30 a 5.34. O F_{PI} ficou abaixo do L_D em quase todas as medições nas superfícies 60, excetuando a M99 e M102 que ultrapassaram o limite em 125 Hz. Na superfície 40 o F_{PI} ficou no limite do L_D . Nas demais superfícies, na frequência de 125 Hz, este índice ultrapassou o L_D da instrumentação. Na superfície 80 a M104 ficou fora do limite em 250 Hz, sendo desconsiderada na média logarítmica do nível de potência sonora e no valor global na escala de compensação “A”.

O Índice de Potência Parcial, $F_{+/-}$, novamente foi satisfeito em todas as medições ficando bem abaixo do limite máximo de 3 dB. O critério de repetibilidade ficou acima do limite da norma apenas na superfície 80 na frequência de 125 Hz nas medições M107 e M108, sendo portanto também desconsideradas para o cálculo da média logarítmica do nível de potência sonora. Os desvios em relação a norma ISO 3741 (1999) das médias logarítmicas das medições M91 a M120 são mostradas na Figura 5.35. O desvio padrão é o proposto pela ISO 9614-2 (1995). As medições realizadas com as superfícies 110 e 130 ficaram dentro do intervalo de erro, sendo que a superfície 40 falhou nas frequências de 1000 e 8000 Hz. As superfícies de 60 e 80 ficaram abaixo do desvio padrão proposto a partir da frequência de 500 Hz. Na frequência de 125 Hz houve uma grande variação nos resultados, mas dentro da margem de erro. As superfícies 60, 110 e 130 o erro foi praticamente zero, apesar do F_{PI} estar acima da L_D . Na superfície 40, F_{rel} 4, o campo reativo eleva o valor das medias principalmente nas frequências mais baixas, compensando o erro devido a absorção da fonte. Na superfície 60, F_{rel} 6, este efeito não é tão sensível e a absorção da fonte causa erros negativos.

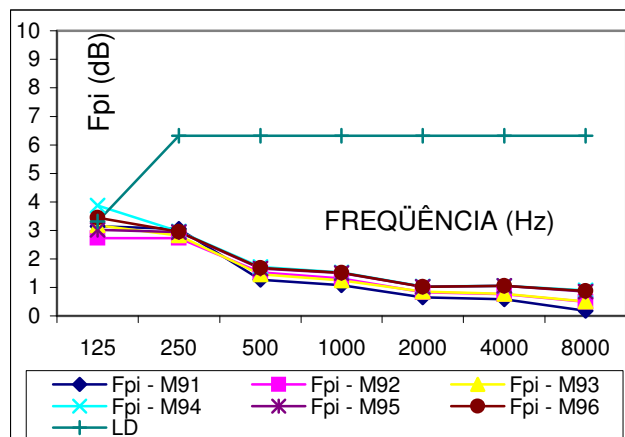


Figura 5.30 Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M91 a M96, superfície 40

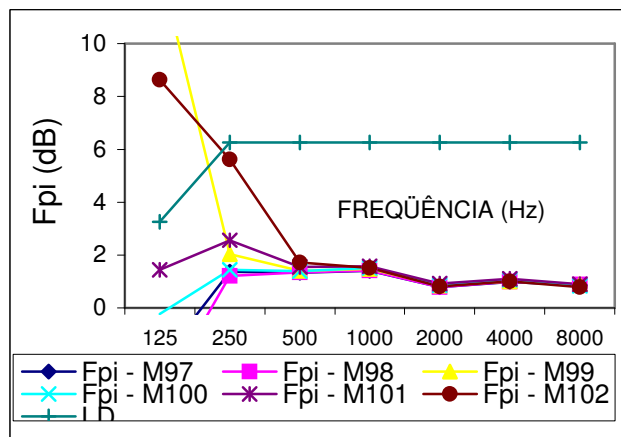


Figura 5.31 Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M97 a M102, superfície 60

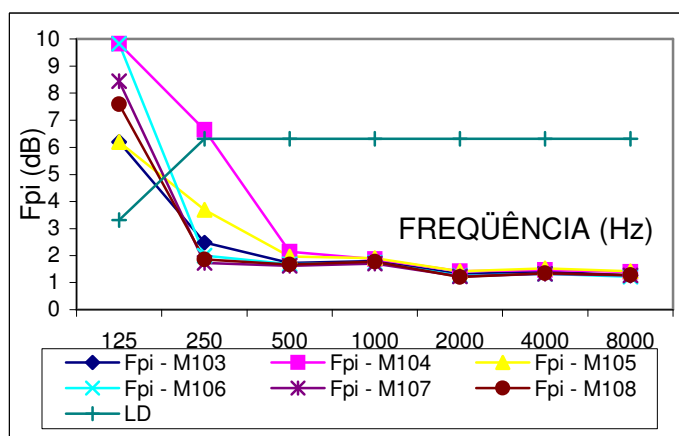


Figura 5.32 Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M103 a M108, superfície 80

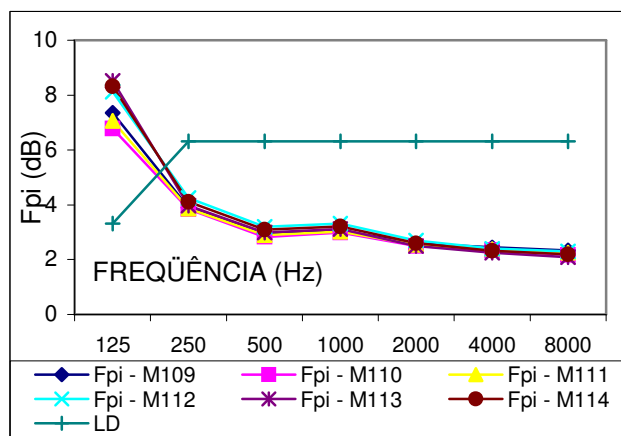


Figura 5.33 Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M109 a M114, superfície 110

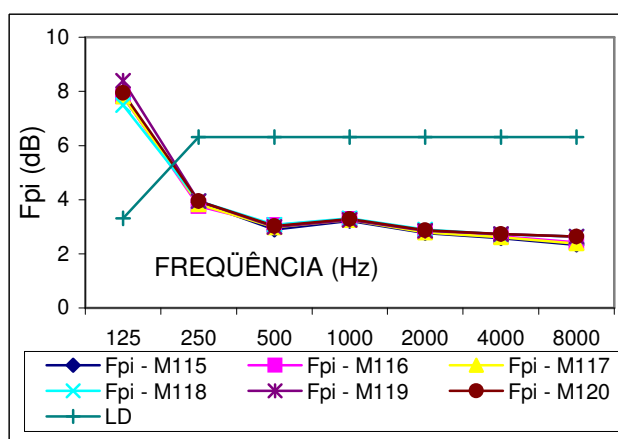


Figura 5.34 Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M115 a M120, superfície 130

Com o aumento das dimensões da superfície de medição, e do F_{rel} , 80, 110 e 130, o efeito do campo reativo e da velocidade do fluxo de ar da ventoinha de refrigeração diminuem, mas a influência do campo reverberante e do ruído de fundo crescem facilitando o efeito de absorção da fonte nas altas freqüências, gerando um erro negativo. A superfície 40, por estar muito próxima a fonte se mantém sob influência do campo reativo, mesmo nas altas freqüências, sendo pouco influenciada pelo aumento do campo reverberante e ruído de fundo.

O Fator de Superfície, F_{sup} , das medições de M91 a M120 são mostrados da Figura 5.36. O F_{sup} , em todas as superfícies analisadas, se manteve abaixo de 0,5, mesmo com o campo reverberante e ruído de fundo elevado, devido ao grande volume do local onde foram executadas as medições.

A somatória das médias logarítmicas dos erros devido à diferença de fase na presença de elevado ruído de fundo, tempo de amostra e tempo de integração é mostrada na Figura 5.37. A tendência da somatória destes erros é ser muito próxima de zero em todas as freqüências. O crescimento dos erros é proporcional a F_{sup} , Figura 5.36.

O Índice Pressão Intensidade obtido durante o “zero teste” através das medições de M121 a M135, $\delta_{PI,zero}$, e o Índice Pressão Intensidade, F_{PI} , obtidos nas medições de M91 a M120 deram origem ao Índice Pressão Intensidade de Absorção, δ_{abs} , mostradas na Figura 5.38. Apenas a superfície 40 atendeu o parâmetro necessário para que se possa efetivar a determinar o erro devido a absorção da fonte. As demais superfícies alternaram valores dentro o foram do intervalo de 0 e -10 dB. Isto confirma a dificuldade de se realizar o “zero teste” com elevado ruído de fundo e campo reverberante, mesmo que sejam realizadas três medições e se obtenha uma média final. Os erros devido à absorção da fonte são mostrados na Figura 5.39 sendo coerentes com os resultados da Figura 5.38

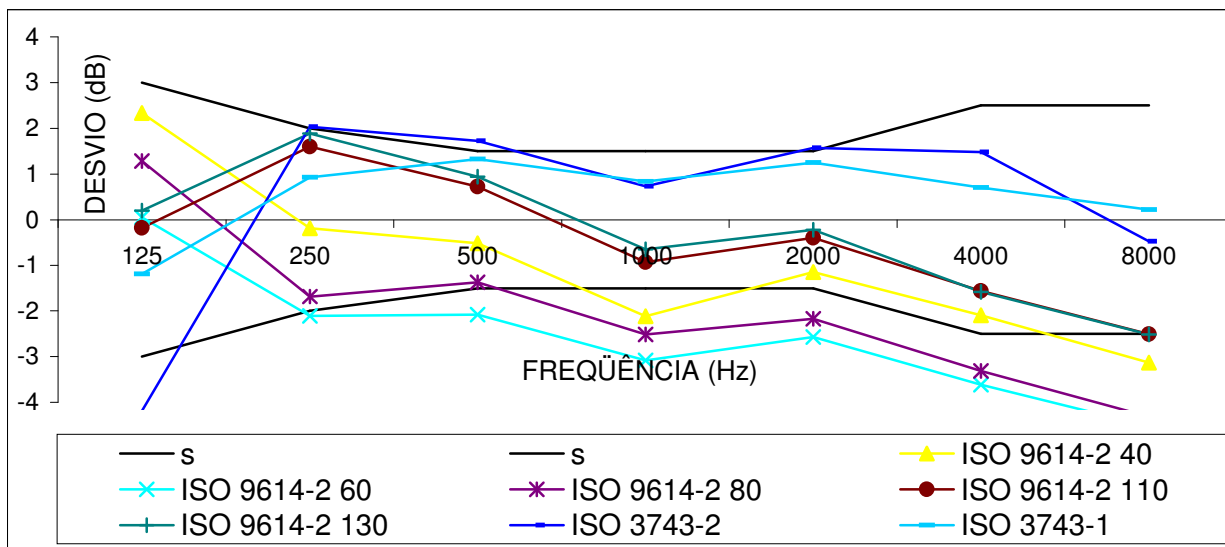


Figura 5.35 Desvios da média logarítmica superfícies 40 (M916 a M96), 60 (M97 a M102), 80 (M103 a M108), 110 (M109 a M114), e 130 (M115 a M120), obtidas através da ISO 9614-2 (1995), sem correção, em relação a ISO 3741 (1999)

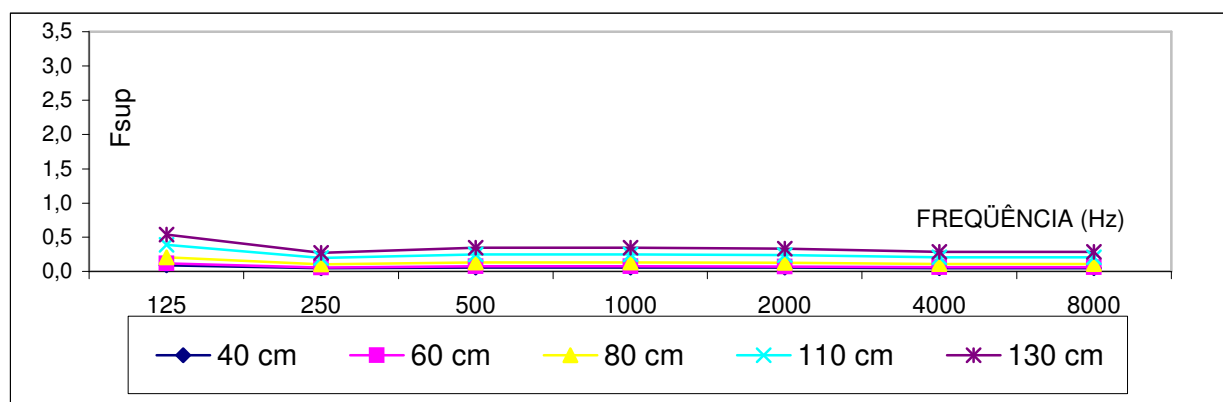


Figura 5.36 Fator de superfície (F_{sup}) superfícies 40 (M91 a M96), 60 (M97 a M102), 80 (M103 a M108), 110 (M109 a M114), e 130 (M115 a M120)

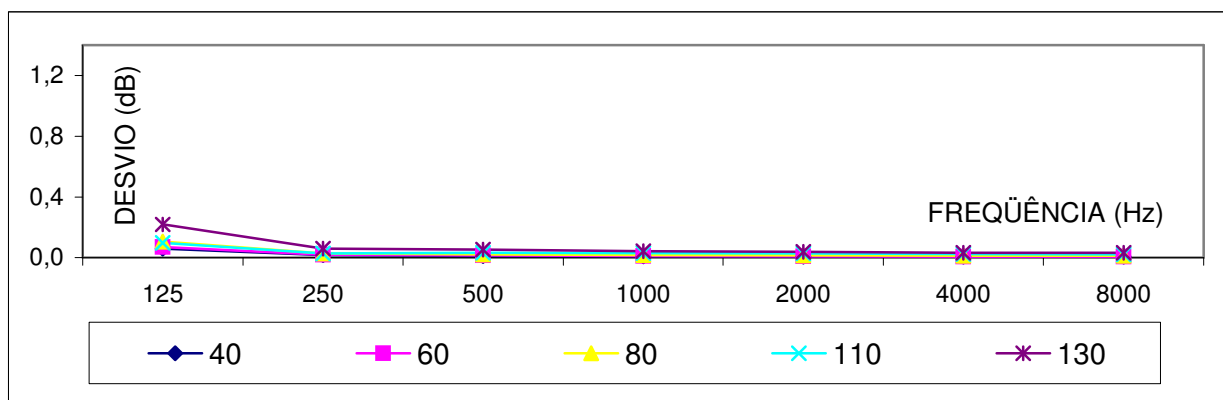


Figura 5.37 Somatória das médias logarítmicas superfícies 40 (M916 a M96), 60 (M97 a M102), 80 (M103 a M108), 110 (M109 a M114), e 130 (M115 a M120) devido as erros devido a diferença de fase na presença de elevado ruído de fundo, tempo de amostra e tempo de integração

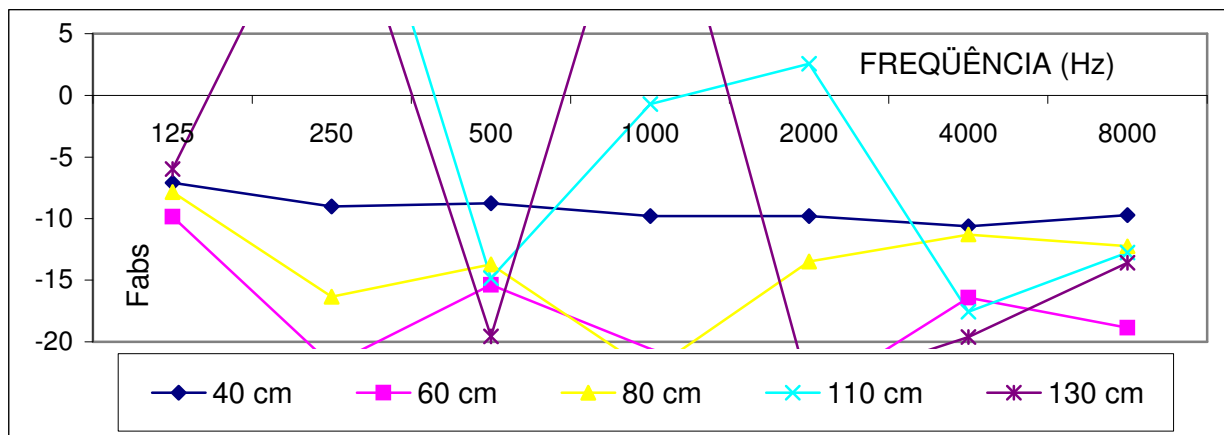


Figura 5.38 Índice de Pressão Intensity de Absorção das superfícies de 40 (M121 a M123), 60 (M124 a M126), 80 (M127 a M129), 110 (M130 a M132), e 130 (M133 a M135)

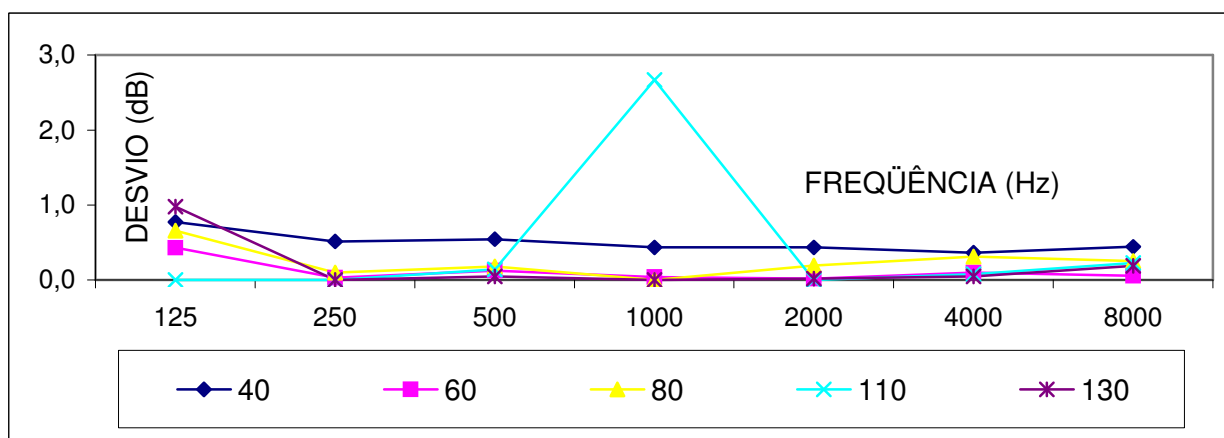


Figura 5.39 Média logarítmica dos erros devido a absorção da fonte das superfícies de 40 (M91 a M96), 60 (M97 a M102), 80 (M103 a M108), 110 (M109 a M114), e 130 (M115 a M120)

Aplicando as correções nos desvios da Figura 5.34 baseadas nos erros apresentados nas Figuras 5.37 e 5.39 obtém-se a Figura 5.40. A superfície 60 mesmo com as correções ficou praticamente em todas as frequências abaixo do intervalo e a superfície 80 ficou no limite permitido, exceto em 1000 e 8000 Hz. A superfície 40 se manteve no intervalo apresentando um pequeno erro em 1000 e 8000 Hz. As superfícies 110 e 130 ficaram no intervalo, exceto a superfície 110 em 1000Hz que apresentou um erro positivo. Considerado o desvio proposto pela ISO 9614-3 (2002) todas as superfícies ficaram fora do intervalo.

As Figuras 5.41 e 5.42 apresentam os valores globais em dB(A) das médias logarítmicas das medições M91 a M120 sem e com as correções aplicadas. As frequências que não atenderam os índices de campo não foram consideradas. Sem as correções apenas a

superfícies 60 e 80 ficaram abaixo do erro máximo de 3 dB. Aplicando as correções a superfície 60 se manteve fora do intervalo. da ISO 9614-2 (1995).

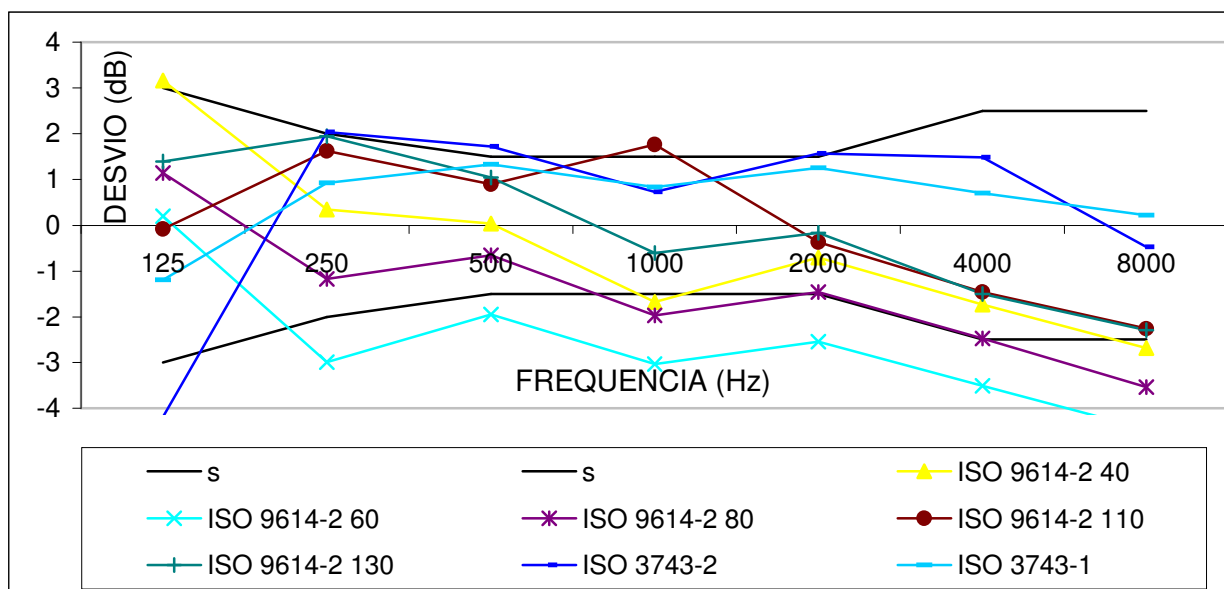


Figura 5.40 Desvios da média logarítmica superfícies 40 (M916 a M96), 60 (M97 a M102), 80 (M103 a M108), 110 (M109 a M114), e 130 (M115 a M120), com correções, obtidas através da ISO 9614-2 (1995), em relação a ISO 3741 (1999)

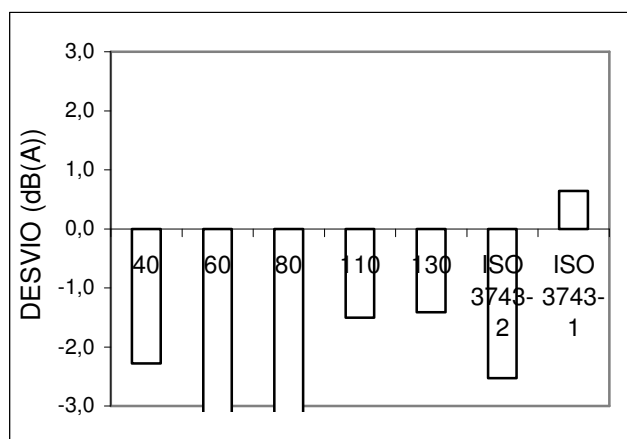


Figura 5.41 Desvios dos valores globais em dB(A) da média logarítmica das medições M91 a M120 em relação a ISO 3741 (1999) sem correções

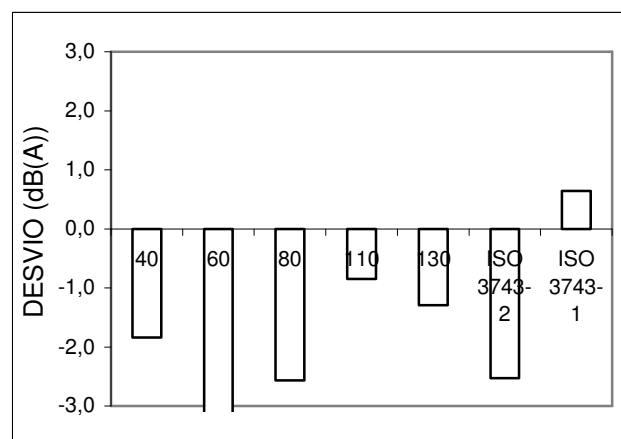


Figura 5.42 Desvios dos valores globais em dB(A) da média logarítmica das medições M91 a M120 em relação a ISO 3741 (1999) com correções

Na figura 5.43 estão apresentados os erros devido a absorção da fonte obtidos com o $\delta_{p_i, zero}$ utilizado nas medições M31 a M45, na condição de baixo ruído de fundo e baixo

tempo de reverberação, conforme resultados do δ_{abs} , Figura 5.8. Aplicando as correções baseada nos erros apresentados nas Figuras 5.37 e 5.43 nos desvios apresentados na Figura 5.35 obtém-se a Figura 5.44.

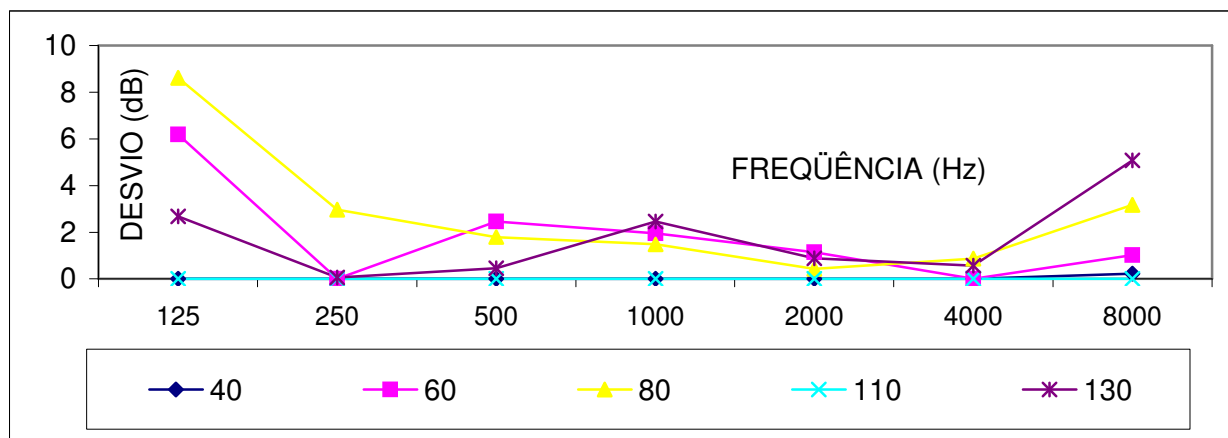


Figura 5.43 Média logarítmica dos erros superfícies 40 (M91 a M96), 60 (M97 a M102), 80 (M103 a M108), 110 (M109 a M114), e 130 (M115 a M120) devido a absorção da fonte utilizando o $\delta_{pi, ZERO}$ obtido nas superfícies 40 (M31 a M33), 60 (M34 a M36), 80 (M37 a M39), 110 (M40 a M42), e 130 (M435 a M45)

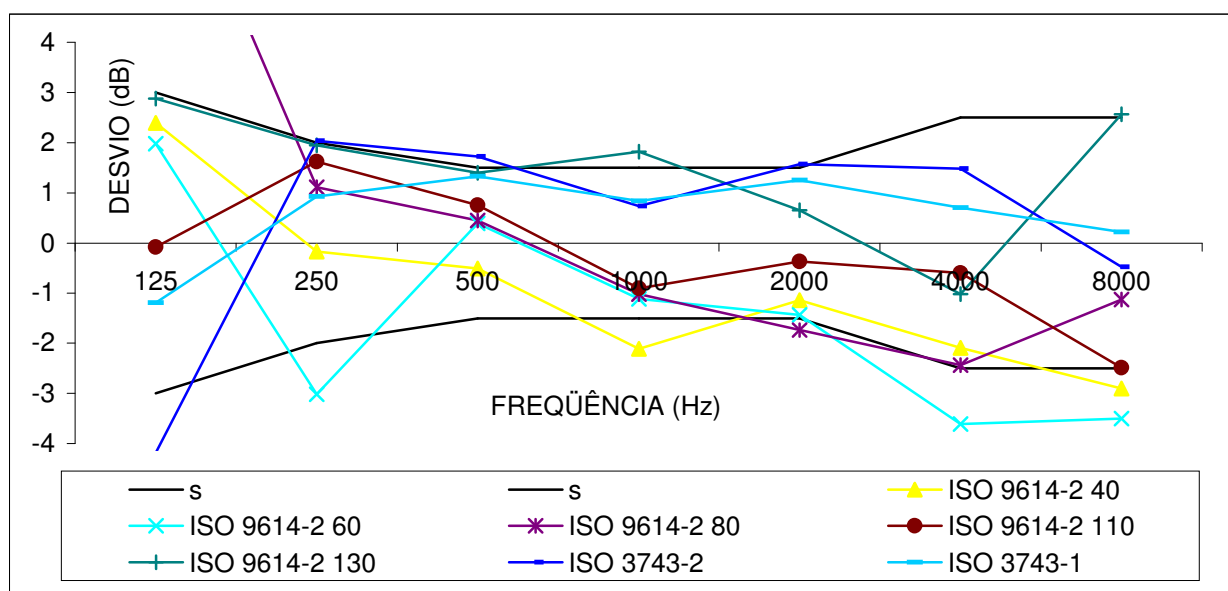


Figura 5.44 Desvios da média logarítmica superfícies 40 (M91 a M96), 60 (M97 a M102), 80 (M103 a M108), 110 (M109 a M114), e 130 (M115 a M120), devido a absorção da fonte utilizando o $\delta_{pi, ZERO}$ obtido nas superfícies 40 (M31 a M33), 60 (M34 a M36), 80 (M37 a M39), 110 (M40 a M42), e 130 (M435 a M45), obtidas através da ISO 9614-2 (1995) em relação a ISO 3741 (1999)

A superfície 60 se encaixou no intervalo exigido pela norma exceto nas frequências de 250, 4000 e 8000 Hz. O mesmo ocorreu com a superfície 40 e 80 atenderam

praticamente todos os desvios, sendo apenas a superfície 40 em 1000 e 8000Hz, mas por uma margem pequena. A superfície 80 apresentou um erro elevado depois de aplicada a correção na frequência de 125 Hz. Este fato pode ser explicado devido ao elevado valor de F_{PI} nesta frequência. As superfícies 110 e 130 se mantiveram dentro do intervalo do desvio padrão. Novamente esta técnica contornou a dificuldade de se executar o “zero teste” diminuindo os desvios das medições. Na Figura 5.45 está apresentado o valor global em dB(A) das médias logarítmica das mediadas M91 a M120. corrigidas conforme mostra a Figura 5.44. Todas as superfícies atendem o intervalo da ISO 9614-2 (1995). Analisando os desvios da Figura 5.43 com os desvios propostos pela ISO 9614-3 (2002) apenas a superfície 110 se encaixa em todo o intervalo, excedendo o limite apenas em 8000Hz. As demais se alternam, o mesmo ocorrendo com os desvios das medição realizadas pelo método de pressão através da ISO 3743-1 e 2 (1994).

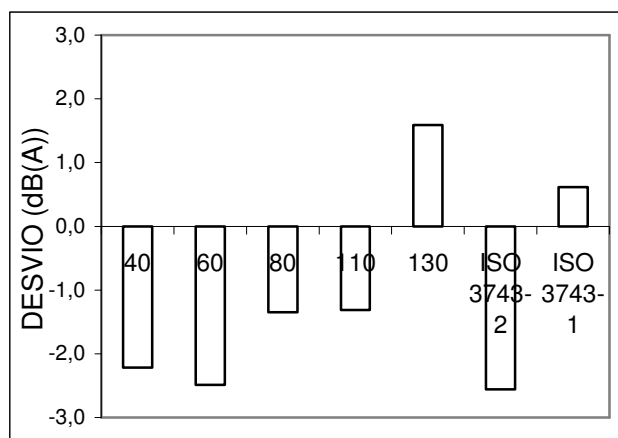


Figura 5.45 Desvios dos valores globais em dB(A) da média logarítmica das medições M46 a M75 devido ao efeito da absorção, utilizando o $\delta_{pi, ZERO}$ apenas na condição de baixo tempo de reverberação e baixo ruído de fundo, em relação a ISO 3741 (1999) com correções

5.4 CONDIÇÃO AMBIENTAL DE ALTO RUÍDO DE FUNDO, BAIXO TEMPO DE REVERBERAÇÃO E VOLUME DA SALA DE 78 m³

Os Índices Pressão Intensidade, F_{PI} , em comparação com a Capacidade Dinâmica, L_D , das medições de M136 a M166 são apresentadas nas Figura 5.46 a 5.50. O F_{PI} ficou abaixo do L_D em todas as medições na superfície 40 e na superfície 130, excetuando a M160, M161 e M162 que ultrapassaram o limite em 125 Hz. Nas demais superfícies o F_{PI} ficou abaixo do limite do L_D , exceto na frequência de 125 Hz.

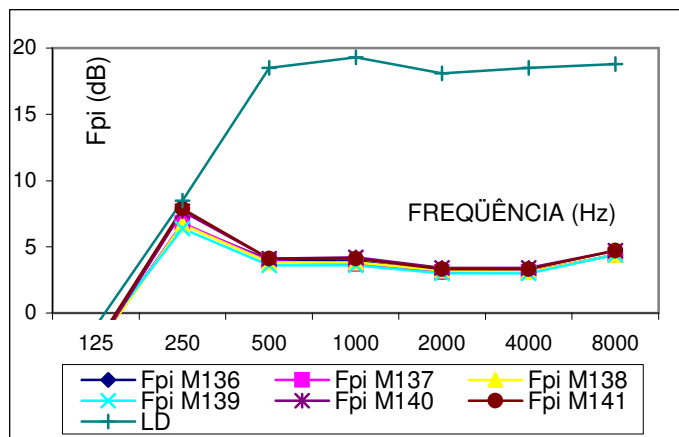


Figura 5.46 Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M135 a M141, superfície 40

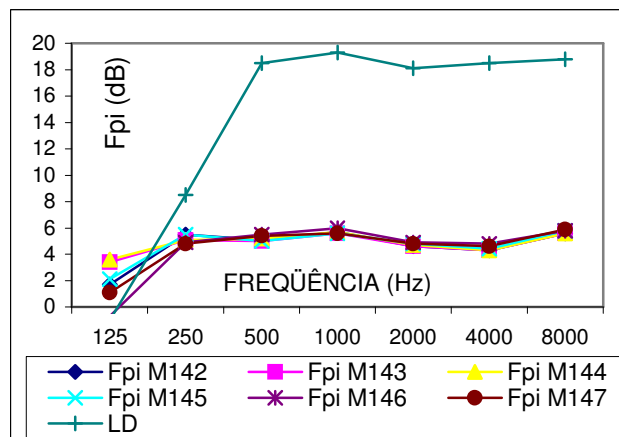


Figura 5.47 Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M142 a M147, superfície 60

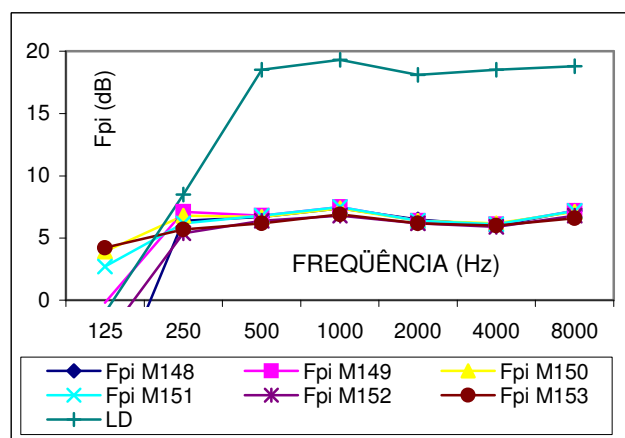


Figura 5.48 Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M148 a M153, superfície 80

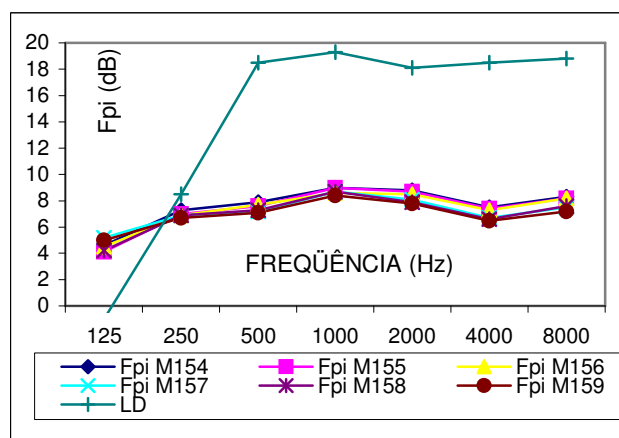


Figura 5.49 Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M154 a M159, superfície 110

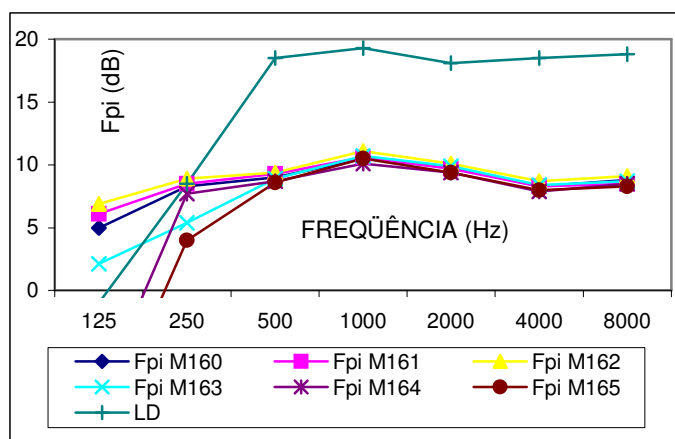


Figura 5.50 Capacidade dinâmica do equipamento comparada com o índice pressão Intensidade, em M160 a M166, superfície 130

O Índice de Potência Parcial, $F_{+/-}$, novamente foi satisfeito em todas as medições ficando bem abaixo do limite máximo de 3 dB. O critério de repetibilidade ficou acima do limite da norma apenas na superfície 80 na frequência de 125 Hz, nas medições M148 e M152, e na superfície 130 na M163, sendo portanto desconsideradas para o cálculo da média logarítmica do nível de potência sonora.

Os desvios em relação à norma ISO 3741 (1999) das médias logarítmicas das medições M136 a M166 são mostradas na Figura 5.50. O desvio padrão é o proposto pela ISO 9614-2 (1995). As medições realizadas com as superfícies 40, 60, 80, 110 e 130 se aproximaram do intervalo de erro apenas a partir da frequência de 1000 Hz, sendo que a superfície 40 se enquadrou a partir de 500 Hz e as superfícies 60 e 80 ficaram no limite do erro em 250 Hz. As superfícies 110 e 130 apresentaram elevados desvios, o que já era esperado devido ao valor do F_{PI} estar próximo de 10 dB, mas abaixo da L_D . O pequeno volume da sala onde as medições foram executadas propiciou uma densidade de energia elevada, fato agravado pela condição de elevado ruído de fundo com uma fonte coerente. Estas por serem as superfícies maiores foram mais influenciadas pelas reflexões sonoras das paredes. Na superfície 40 novamente o campo reativo elevou os desvios, principalmente nas baixas frequências. As superfícies 60 e 80 foram as que apresentaram melhores resultados, pois ficaram fora da influência do campo reativo e da alta densidade de energia refletida pelas superfícies.

O Fator de Superfície, F_{sup} , das medições de M136 a M166 são mostrados da Figura 5.52. O F_{sup} , das superfícies 40 e 60 ficaram abaixo da unidade e a superfície 80 ficou abaixo de 2. As superfícies 110 e 130 tiveram valores elevados acima de 3,5. A superfície 40, mesmo com um F_{sup} reduzido teve o resultado prejudicado pelo campo reativo, conforme já relatado.

A somatória das médias logarítmicas dos erros devido à diferença de fase na presença de elevado ruído de fundo, tempo de amostra e tempo de integração é mostrada na Figura 5.53. A tendência da somatória destes erros é ser muito próxima de zero em todas as frequências Hz. O crescimento dos erros é proporcional a F_{sup} , Figura 5.52.

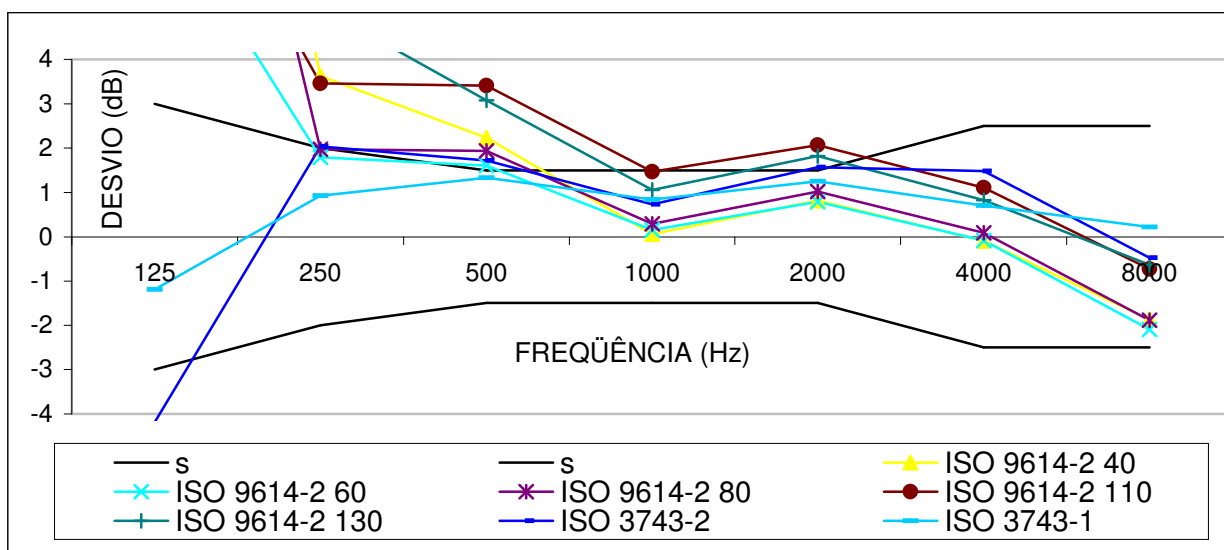


Figura 5.51 Desvios da média logarítmica para as superfícies 40 (M136 a M141), 60 (M142 a 147), 80 (M148 a M153), 110 (M154 a M159), e 130 (M160 a M166) obtidas através da ISO 9614-2 (1995), sem correção, em relação a ISO 3741 (1999)

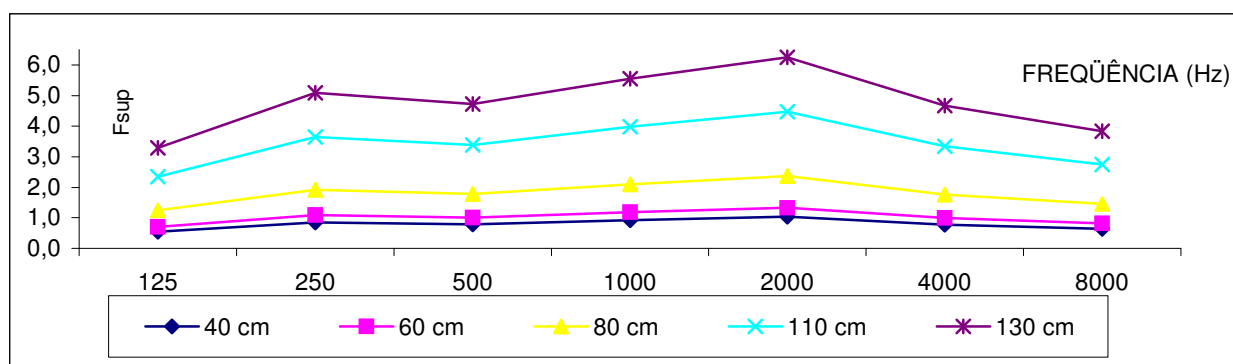


Figura 5.52 Fator de superfície (F_{sup}) para as superfícies 40 (M136 a M141), 60 (M142 a 147), 80 (M148 a M153), 110 (M154 a M159), e 130 (M160 a M166)

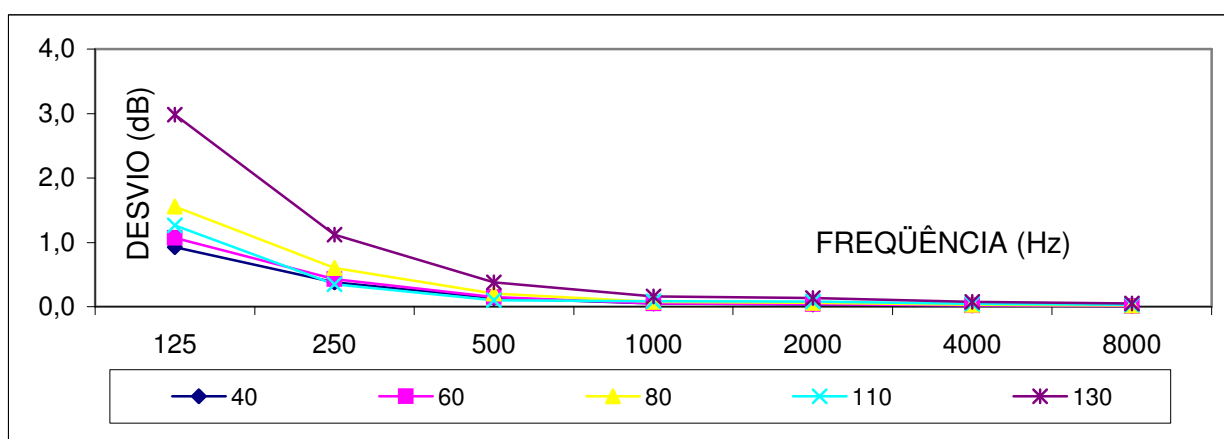


Figura 5.53 Somatória das médias logarítmicas dos erros devido a diferença de fase na presença de elevado ruído de fundo, tempo de amostra e tempo de integração para as superfícies 40 (M136 a M141), 60 (M142 a 147), 80 (M148 a M153), 110 (M154 a M159), e 130 (M160 a M166)

O Índice Pressão Intensidade obtido durante o “zero teste” através das medições de M167 a M181, $\delta_{PI,zero}$, e o Índice Pressão Intensidade, F_{PI} , obtidos nas medições de M136 a M166 deram origem ao Índice Pressão Intensidade de Absorção, δ_{abs} , mostradas na Figura 5.54. Apenas em 125 Hz na superfície 40 atendeu o parâmetro necessário para que se possa efetivar a correção devido a absorção da fonte confirmando novamente que a elevada densidade de energia da sala deteriorou as condições de medição, inviabilizando este procedimento.

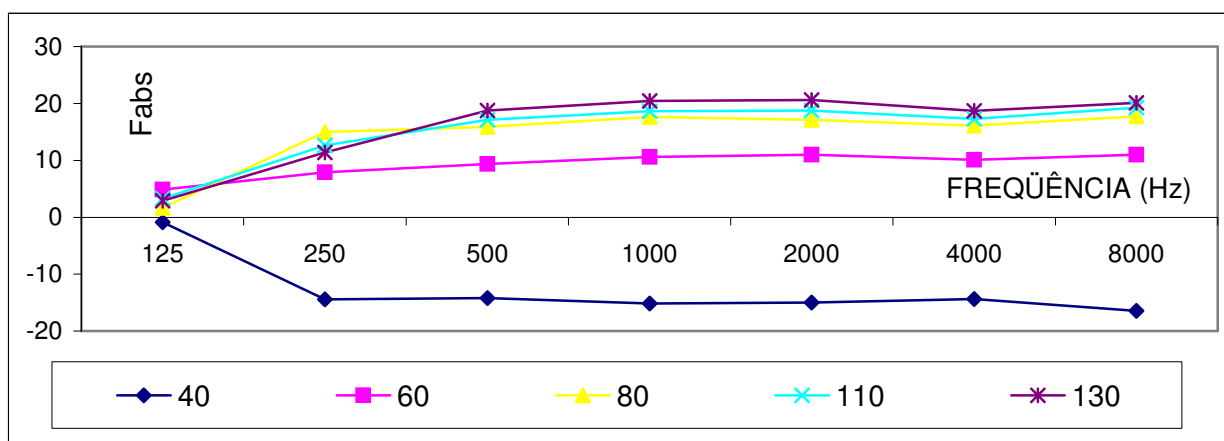


Figura 5.54 Índice de Pressão Intensidade de Absorção das superfícies 40 (M136 a M141), 60 (M142 a 147), 80 (M148 a M153), 110 (M154 a M159), e 130 (M160 a M166)

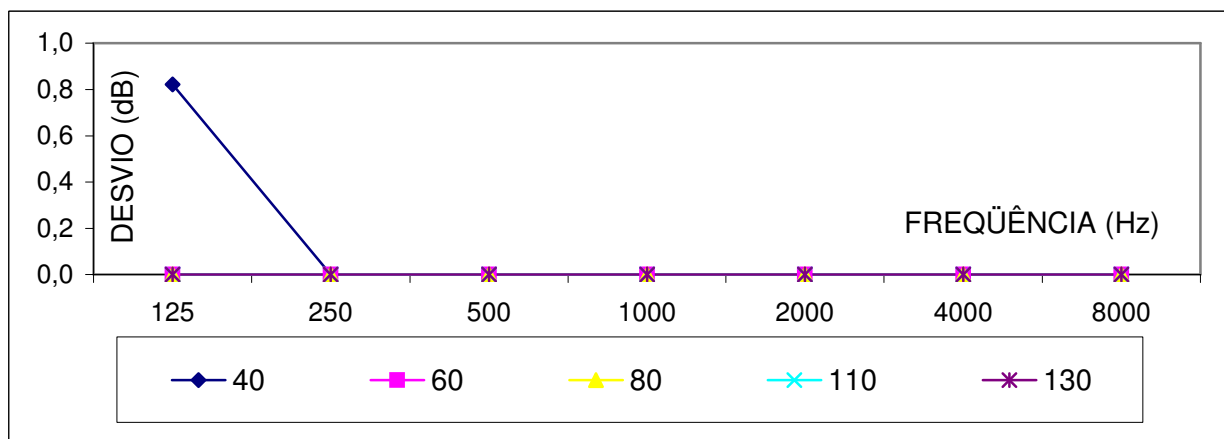


Figura 5.55 Média logarítmica dos erros devido a absorção da fonte das superfícies 40 (M136 a M141), 60 (M142 a 147), 80 (M148 a M153), 110 (M154 a M159), e 130 (M160 a M166)

Na Figura 5.56 as correções aplicadas foram devido ao tempo de integração, quantidade de amostras e desarranjo de fase devido a presença de elevado ruído de fundo, Figura 5.53 e devido a absorção da fonte, Figura 5.55. As correções aumentaram os desvios, pois os mesmos já eram positivos e com as correções foram incrementados.

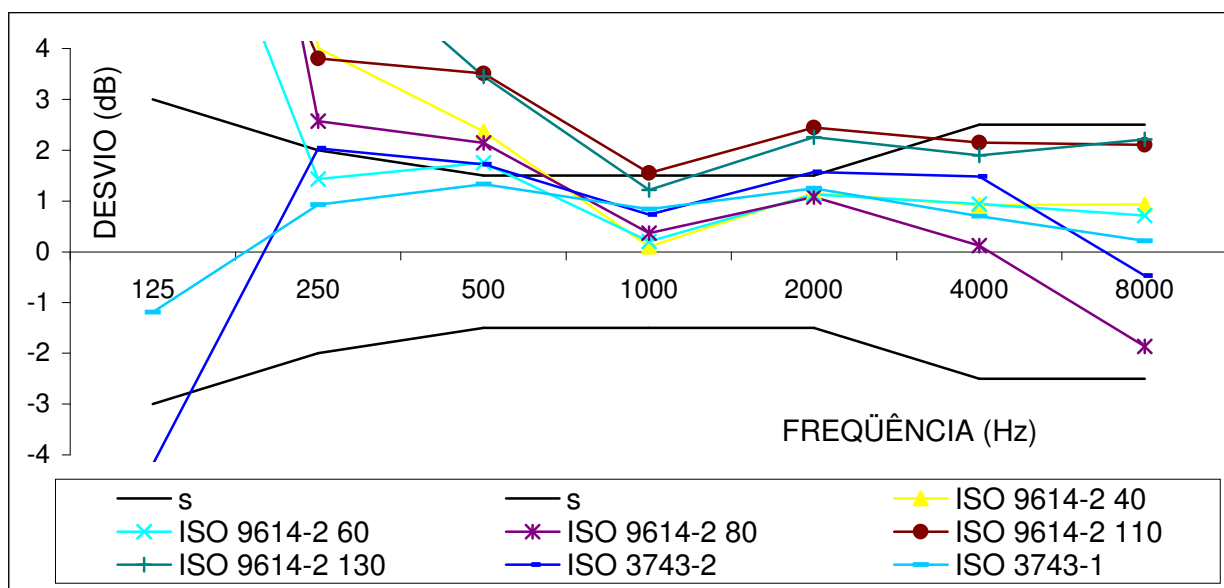


Figura 5.56 Desvios da média logarítmica das superfícies 40 (M136 a M141), 60 (M142 a M147), 80 (M148 a M153), 110 (M154 a M159), e 130 (M160 a M166), com correções, obtidas através da ISO 9614-2 (1995), em relação a ISO 3741 (1999)

As Figuras 5.57 e 5.58 apresentam os valores globais em dB(A) das médias logarítmicas das medições M136 a M166 sem e com as correções aplicadas. Novamente, sem as correções os desvios foram menores, mas em ambas as condições todas as superfícies se colocaram dentro do intervalo da ISO 9614-2 (1995)

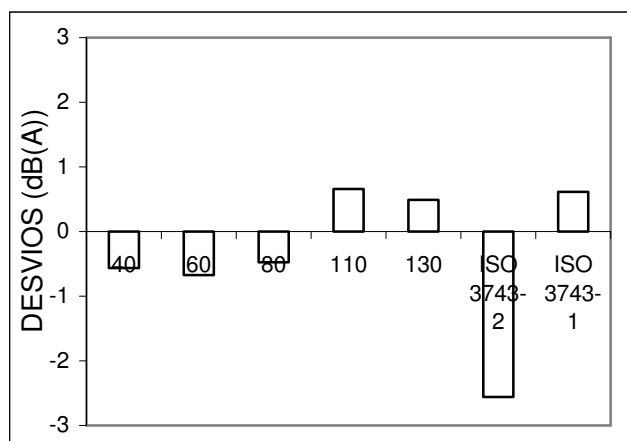


Figura 5.57 Desvios dos valores globais em dB(A) da média logarítmica das medições M46 a M75 em relação a ISO 3741 (1999) sem correções

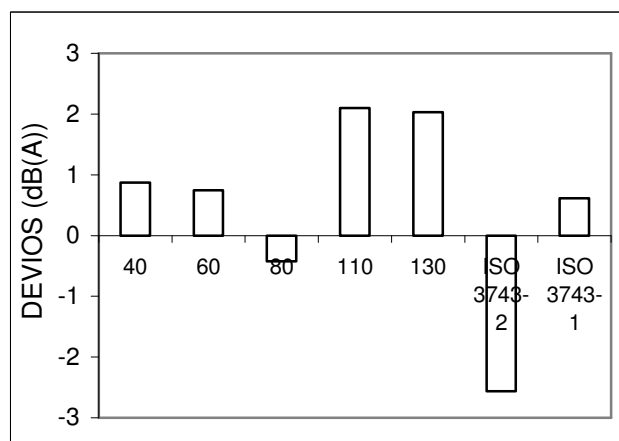


Figura 5.58 Desvios dos valores globais em dB(A) da média logarítmica das medições M46 a M75 em relação a ISO 3741 (1999) com correções

Os desvios apresentados na figura 5.56, quando analisados através dos erros propostos pela ISO 9614-3 (2002), apenas as superfícies 40, 60 e 80 se colocaram dentro do intervalo a partir de 1000 Hz.

5.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Observando as Figuras 5.6, 5.19, 5.35 e 5.51 pode-se notar que há uma ordem crescente de erros padrão em todas as medições e que se mantém constante em praticamente todas as frequências. A superfície 60 é a que apresenta maiores desvios negativos, seguida pela superfície 80, 40, 110 e 130, não importando a condição ambiental analisada.

A superfície 40 é a que menos sofreu influência das alterações das condições ambientais, salvo na condição ambiental D. Observando as Figuras 5.6 e 5.19 os desvios são praticamente os mesmos, sendo que apenas o ruído de fundo foi alterado. Com o aumento do campo reverberante na condição ambiental C a mesma apresentou um incremento no desvio negativo devido à absorção sonora da fonte, Figura 5.35, principalmente nas altas frequências, mas de menor intensidade se comparada com as demais superfícies. Isto ocorre devido à ação do campo acústico reativo próximo da fonte, que eleva o nível de potência sonora medido, compensando o erro negativo da absorção sonora, mesmo com F_{rel} 4. A elevada velocidade do fluxo de ar gerada pela ventoinha de refrigeração da furadeira também gera um erro positivo.

As superfícies 60 e 80 não estão sujeitas à ação do campo reativo, levando portanto a maiores desvios negativos. O Fator de Relação entre a área da fonte e da superfície, F_{rel} , é 6 e 11 respectivamente, o que permite que a energia absorvida seja considerável, já que não pode ser compensada por uma maior área de varredura. A elevação do campo reverberante tende a aumentar os desvios negativos, que podem ser corrigidos através dos erros de desarranjo de fase, quantidade de amostra, tempo de integração e absorção sonora. O zero teste deve ser realizado, se possível em uma condição ambiental favorável de baixo ruído de fundo e tempo de reverberação. A energia sonora absorvida, que gerou

os desvios negativos nas condições ambientais A, B, e C, foi compensada na condição D devido à alta densidade de energia sonora.

Na superfície 110 e 130 o aumento do campo reverberante e ruído de fundo tiveram um efeito diferenciado nas altas e baixas frequências conforme mostram as Figuras 5.6, 5.19, 5.35, e 5.51. Na faixa de frequência entre 125 a 1000 Hz houve um incremento considerável nos desvios com uma tendência de torná-los positivos devido à perda de eficiência do sistema de medição, verificado pela elevação do valor do F_{PI} . Nas frequências de 2000 a 8000 Hz houve o incremento dos desvios negativos, devido o efeito da absorção sonora da fonte que cresce nestas situações. Nas condições ambientais A, B e C estas superfícies se mantiveram dentro do intervalo proposto pela ISO 9614-2 (1995). O maior F_{rel} destas superfícies, 20 e 28, possibilita que o erro devido à absorção sonora da fonte seja compensado na média temporal e espacial que o processo de varredura possibilita. Na condição ambiental D estas superfícies mantiveram a característica de um maior incremento nas frequências de 125 a 1000 Hz em relação às frequências de 2000 a 8000 Hz. A maior densidade de energia sonora presente na sala devido ao seu pequeno volume contribuiu para alterar os resultados de maneira mais significativa devido às suas maiores dimensões, bem como sua maior proximidade com as paredes da sala.

Outra constatação é que o formato da variação das curvas dos desvios nas oitavas é sempre a mesmo, inclusive nos desvios obtidos através da ISO 3743-1 e 2 (1994). Esta característica indica que a exclusão das medições com desvio padrão acima do proposto pela ISO 9614-2 (1995) da média logarítmica final fornece um resultado livre de erros aleatórios e bastante confiável.

O erro devido a desarranjo de fase na presença de elevado ruído de fundo pode ser considerado desprezível nas frequências acima de 500 Hz, pois é menor que 0,2 dB. Nas frequências de 125 e 250 Hz o erro máximo para a superfície 130 é de 0,30 e 0,15 dB respectivamente, na condição A, 0,60 e 0,20 dB para condição B, 0,15 e 0,05 dB para condição C e 0,4 e 0,1 dB para a condição D, conforme tabelas do APÊNDICE E. Comparando os resultados das condições A e B o aumento do ruído de fundo gerou um incremento no erro devido ao desarranjo de fase. Em relação à condição C o aumento do campo reverberante não manteve a mesma tendência de incremento. Deve-se considerar

que na condição C, além da segunda furadeira em funcionamento, havia também outros equipamentos em regime de trabalho elevando ainda mais o ruído de fundo. O aumento do volume do ambiente diminuiu a densidade de energia sonora, diminuindo também a influência do campo reverberante e elevado ruído de fundo no desarranjo de fase do analisador de frequência. Na condição D, com uma maior densidade de energia sonora, o valor do erro ficou equivalente ao da condição A, pois o equipamento utilizado nesta situação teve suas fases calibradas, o que elevou sua capacidade dinâmica de medição. O Fator de Superfície, F_{sup} , das condições A, B e D são elevados nestas frequências, sempre acima de 1,5 e o F_{sup} da condição C é da ordem de 0,5 dB. Assim, mantendo-se F_{sup} na ordem de 0,5 dB se consegue superar o aumento do campo reverberante, ruído de fundo, além de não ser necessário a calibração de fase, caso o equipamento possua calibração interna. A evolução deste erro está em consonância com os resultados do Índice Pressão Intensidade apresentado nas Figuras 5.1 a 5.5, 5.14 a 5.18, 5.30 a 5.34 e 5.46 a 5.50. A técnica de se alternar os microfones na sonda de medição se mostrou confiável, pois o Índice de Repetibilidade sempre esteve abaixo do requerido pela ISO 9614-2 (1995).

O erro devido à quantidade de amostra na presença de elevado ruído de fundo também pode ser considerado desprezível nas frequências acima de 500 Hz sendo menor que 0,1 dB. Nas frequências de 125 e 250 Hz o erro máximo, para a superfície 130, é de 0,35 e 0,20 dB respectivamente, na condição A, 0,60 e 0,20 dB para condição B e 0,40 e 0,20 dB para a condição D. Na condição C os erros são praticamente zero, conforme tabelas do APÊNDICE E. As condições A, B e D apresentaram o F_{sup} , acima da unidade para a superfície 130. Na condição C, o F_{sup} tem um valor da ordem de 0,5 dB. Assim, através do F_{sup} , pode-se eliminar o erro devido a quantidade de amostra na presença de elevado ruído de fundo.

O erro devido ao tempo de integração na presença de elevado ruído de fundo não apresenta resultados significativos em nenhuma das condições ambientais analisadas, sendo sempre menor que 0,1 dB, conforme tabelas do APÊNDICE E, podendo portanto ser desconsiderado, desde que se obedeça ao tempo de integração mínimo de 20 segundos e velocidade de varredura entre 0,1 e 0,5 m/s conforme determina a ISO 9614-2 (1995)

O erro devido à absorção sonora da fonte se mostrou bastante influenciável pelo ruído de fundo e campo reverberante e densidade de energia sonora. Isto se refletiu na dificuldade de se obter bons resultados durante o “zero teste”. Na condição A, as superfícies 60 e 80 foram as que apresentaram melhores resultados do δ_{abs} o que possibilitou aplicar correções em quase todas as frequências. A superfície 40 não apresentou valores de δ_{abs} aceitáveis em nenhuma das condições ambientais, impossibilitando o cálculo do erro. O mesmo aconteceu com as superfícies 110 e 130 que sofreram grande influência do campo reverberante e do ruído de fundo, apresentando valores aceitáveis de δ_{abs} apenas na condição ambiental A. A técnica de se utilizar o $\delta_{PI, ZERO}$ obtido na condição A, para a correção dos resultados das condições B e C se mostrou eficiente, pois possibilita o cálculo da energia sonora absorvida, e por conseguinte, a correção dos resultados em uma maior quantidade de frequências diminuindo os desvios de resultados. Outro fator a ser analisado é a relação entre a área da face lateral da fonte e do suporte de fixação em análise e a área da superfície de medição. Na tabela 5.1 é discutida esta relação

A superfície de 40 possui F_{rel} 4. Esta relação entre as áreas deveria proporcionar um erro elevado devido à absorção sonora, mas como já observado, é compensado pelo campo reativo e pela elevada velocidade do fluxo de ar da ventoinha de ventilação do motor elétrico. A superfície 60 possui F_{rel} 6, portanto semelhante à superfície 40, mas fora da influência do campo reativo e da ventoinha do motor, sendo portanto a superfície mais prejudicada pela absorção sonora da fonte. Na superfície 80, F_{rel} 11, o efeito da absorção diminui. Nas superfícies 110 e 130, o F_{rel} 20 e 28 respectivamente, possibilitou praticamente a eliminação deste erro conforme pode-se observar nas Figuras 5.10, 5.23, 5.39 e 5.55. Ou seja, a maior relação entre a área da face da superfície de medição e a área da fonte sonora possibilita uma maior integração espacial e temporal, o que na média dos dados coletados, diminui a quantidade de energia sonora absorvida. As superfícies 110 e 130 ficaram dentro do intervalo proposto nas condições ambientais A, B e C.

A ressonância da cavidade dos microfones, que gera um erro positivo, deveria compensar o erro devido à aproximação de diferenças finitas, que gera um erro negativo, pode não ter acontecido como o esperado, já que a partir de 2000 Hz houve um aumento nos desvios negativos dos resultados, conforme mostra as Figuras 5.6, 5.19, 5.34, 5.55.

Na frequência de 125 Hz os erros foram aleatórios, alternando resultados negativos e positivos. Isto se deve a uma característica da fonte utilizada de possuir um mandril giratório com uma frequência de trabalho definida. Esta característica é comum em equipamentos utilizados nas indústrias e construção civil. No caso desta furadeira a mesma possui uma rotação de 3500 rpm, 58 Hz. Esta frequência de trabalho induz uma vibração na carcaça do equipamento, aumentando a energia sonora do campo reativo em 58 Hz e em menor intensidade nos seus harmônicos. A frequência de 125 Hz está bastante próxima do primeiro harmônico, 116 Hz, ficando portanto suscetível a erros. O mesmo ocorre com as metodologias obtidas através da pressão sonora pela ISO 3743-1 e 2 (1994).

Na tabela 5.1 é apresentado um resumo da análise dos resultados e dos procedimentos de para medição do nível de potência sonora de uma fonte de ruído.

Tabela 5.1 Resumo da análise dos resultados

Condição Ambiental	F_{sup}	F_{rel}	Correção devido a absorção	Demais erros
Sem ruído de fundo, baixo tempo de reverberação e baixa densidade de energia (grande volume)	< 1,5	> 20	δ_{abs} entre 0 e -10 dB	Corrigir
Com ruído de fundo, baixo tempo de reverberação e baixa densidade de energia (grande volume)	< 2,5	> 20	δ_{abs} entre 0 e -10	Corrigir
Com ruído de fundo, alto tempo de reverberação e baixa densidade de energia (grande volume)	< 0,5	> 20	δ_{abs} entre 0 e -10	Corrigir
Com ruído de fundo, baixo tempo de reverberação e grande densidade de energia (pequeno volume)	< 1	Entre 6 > e <12	δ_{abs} entre 0 e -10	Não Corrigir

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

A determinação do nível de potência sonora de um equipamento de pequeno porte pela técnica da intensimetria fornece resultados confiáveis, desde que observados alguns pontos.

Os valores medidos do nível de potência sonora apresentaram um desvio padrão, em geral menor que 0,5 dB, portanto não é necessário que se repita várias vezes a medição (seis) como feita neste trabalho. Podem ser realizadas duas medições, a inversão dos microfones nos canais da sonda e realizada mais uma medição. Os desvios estando em consonância com o proposto pela ISO 9614-2 (1995) não há necessidade de se repetir às medições novamente. Deve-se entretanto, realizar medições do nível de potência sonora com mais de uma superfície de medição, pelo menos duas, e novamente verificar o desvio padrão.

O “zero teste” apresentou grande variação nos resultados, não sendo possível a determinação dos erros devido a absorção sonora da fonte, principalmente nas condições de alto tempo de reverberação e ruído de fundo. Desta maneira, deve-se executar um maior número de medições para que através da média aritmética dos resultados se obtenha valores que se encaixem no intervalo de δ_{abs} entre 0 e -10 dB, ou manter F_{rel} entre 6 e 11. A utilização do $\delta_{PI,zero}$ obtido em uma condição de baixo ruído de fundo e pequeno tempo de reverberação também é uma alternativa, quando for possível realizar medições nesta condição. Este procedimento pode ser implementado, mesmo quando for necessária a medição de uma fonte sonora no seu ambiente de trabalho a plena carga. Deve-se executar o “zero teste” em uma condição ambiental controlada, determinar o $\delta_{PI,ZERO}$, que é uma característica da fonte e da superfície de medição e posteriormente se efetuar a medição em outro ambiente. O $\delta_{PI,ZERO}$, determinado na condição ambiental controlada, pode ser utilizado, junto com o δ_{PI} , obtido nas condições de trabalho da fonte, para calcular o erro devido à absorção sonora da fonte e ser utilizado para corrigir o nível

de potência sonora. O índice $F_{+/-}$ não foi capaz de quantificar a energia sonora absorvida pela fonte devendo ser utilizado apenas para verificar a variação do fluxo de vetores conforme determina a ISO 9614-2 (1995).

A dimensão da superfície de medição influenciou os resultados de maneira significativa. A utilização do Fator de Superfície, F_{sup} , para sistematizar sua determinação se mostrou um procedimento confiável, devendo ser da ordem de 0,5, e neste caso, pode-se dispensar a calibração externa das fases do equipamento se este possui um sistema de calibração interna. O parâmetro mais influente na determinação do F_{sup} é o volume do ambiente, que por exemplo, pode ser aumentado em até 100 vezes (de 50 m³ até 5000 m³). A execução de medição em ambientes de grande volume possibilita uma baixa densidade de energia sonora minimizando os vários tipos de erros envolvidos na técnica da intensimetria. O Fator de Relação entre as Áreas da Fonte em Análise e da Superfície de Medição, F_{rel} , se mostrou capaz de indicar a evolução do erro devido à absorção sonora da fonte. O efeito da absorção só pode ser desprezado, $\delta_{abs} < -10\text{dB}$, quando F_{rel} ficou acima de 20. As superfícies pequenas, com F_{rel} de 4 a 6, que propiciam a distância mínima determinada pela ISO 9614-2 (1995) de 20 cm, estão sujeitas aos erros devido ao campo reativo próximo a fonte e de absorção sonora e densidade de energia. Estas devem ser utilizadas apenas em ambientes de grande volume ou F_{sup} da ordem de 0,5.

As superfícies de maior dimensão, com F_{rel} superior a 11 não devem ser utilizadas em ambientes de alta densidade de energia sonora devido ao aumento da influência do campo reverberante e do ruído de fundo. Nestes locais F_{rel} deve ser entre 6 e 11 possibilitado diminuir o efeito do campo reativo, do ruído de fundo e do campo reverberante.

Medidas do nível de potência sonora através da técnica da intensimetria não devem ser implementadas em locais onde as faces da superfície de medição não estejam a pelo menos a 1,5 metros de distância de superfícies reflexivas, qualquer que seja a dimensão da superfície de medição.

As medições do nível de potência sonora devem ser corrigidas pelos erros de absorção da fonte, desarranjo de fase, quantidade de amostras e tempo de integração, obtendo-se assim o valor muito próximo do real, tanto nas freqüências 1/1 de oitava, quanto no valor

global em dB(A). Esta correção não deve ser aplicada em locais de pequeno volume que possibilitem alta densidade de energia.

O Fator de Absorção, δ_{abs} , o Fator de Superfície, F_{sup} e Fator de Relação entre as Áreas da Fonte em Análise e da Superfície de Medição, F_{rel} propostos neste trabalho, podem também ser utilizados como índice de campo que indica a qualidade do resultado obtido, além dos já propostos pela ISO 9614-2 (1995), além de auxiliar na determinação da dimensão da superfície de medição de modo que os erros sejam minimizados.

O conteúdo do Capítulo 3 fornece uma boa base de conhecimento para as pessoas que pretendem implementar a técnica da intensimetria. Toda base matemática e física dos trabalhos listados na referência bibliográfica estão resumidos e agrupados, e quando possível, as equações foram simplificadas ao máximo. Nas referências bibliográficas estão selecionados os trabalhos mais relevantes sobre o assunto. O procedimento de medição do Apêndice A é um guia atualizado do conhecimento disponível sobre o assunto.

Como continuidade deste estudo recomenda-se que os índices de campo propostos neste trabalho, δ_{abs} , F_{sup} e F_{rel} , sejam analisados em outros equipamentos de pequeno porte e em condições reais de trabalho, diretamente nas indústrias e canteiros de obras. Estes índices também devem ser estudados para equipamentos de grande porte, pois podem ter seus resultados alterados. Por exemplo, será difícil se conseguir valores de F_{rel} próximos a 20 de equipamentos como compressores, motores e bate-estacas. Deve-se também analisar o comportamento destes índices na presença de outras fontes de ruído que não sejam coerentes com a fonte análise.

A utilização das recomendações deste trabalho possibilitará a determinação do nível de potência sonora de equipamentos de pequeno porte através da técnica da intensimetria em condições reais de trabalho, devendo ser formado um banco de dados afim que se possa utilizá-lo em estudos para diminuir a poluição sonora no espaço urbano.

A seguir estão resumidas, nas Tabelas 6.1, 6.2 e 6.3, as análises deste trabalho e as determinações da ISO 9614-2 (1995) resultando em recomendações que visam minimizar os erros envolvidos com a intensimetria ou corrigi-los.

Tabela 6.1 Comparação entre a metodologia utilizada neste trabalho e a ISO 9614-2 (1995) para seleção do equipamento de medição

ISO 9614-2 (1995)	ESTE TRABALHO
TIPO 1 Microfones com equalização da pressão estática Utilização de espaçador sólido para os microfones Selecionar espaçamento dos microfones conforme faixa de frequência analisada	Possua ruído elétrico pelo menos 20 dB menor que o a potência sonora estimada da fonte em análise Cabos e sistema de medição não pode ficar sobre superfícies vibratórias Microfones de 1/2" posicionados face-face separados com separador sólido de 12 mm são capacitados para medir até 10 KHz
Calibração de fase e sensibilidade dos microfones Selecionar a grade de precisão de engenharia, K = 10 Ajustar o equipamento segundo as condições ambientais de temperatura e pressão	A calibração de fase dos microfones se mostrou desnecessária devido ao baixo erro de desarranjo de fase em todas as condições ambientais. Caso o equipamento selecionado possua um sistema de calibração interna, a calibração externa pode ser dispensada. A calibração de sensibilidade dos microfones deve ser executada

Tabela 6.2 Comparação entre a metodologia utilizada neste trabalho e a ISO 9614-2 (1995) para procedimento de medição

ISO 9614-2 (1995)	ESTE TRABALHO
Retirar todo material de absorção da parte interna do volume de medição	Caso seja necessário suporte para sustentação da fonte sonora em análise o mesmo não deve receber vibração oriundas de seu funcionamento
O nível de ruído de fundo deve ser de pelo menos 10 dB abaixo do nível de potência sonora da fonte em análise	O local onde se realizará a medição deve ser de grande volume de modo que as faces da superfície de medição estejam a pelo menos 1,5 metros das paredes Dar preferência a locais de volume acima de 400 m³, independentemente do campo reverberante do local.

Definir a superfície de medição de maneira que seja possível a varredura de maneira contínua e constante. A distância mínima entre a fonte e face da superfície é de 20 mm salvo fonte pequena quando a distância pode ser reduzida para 100 mm O operador da sonda não deve se posicionar frente ao fluxo de vetores da face da superfície em medição	Determinar as condições ambientais (tempo de reverberação, volume e ruído de fundo) A superfície de medição deve ser calculada de modo que o $F_{sup} < 0,5$ e o $F_{rel} > 20$. Desta maneira não será necessário correções devido à absorção da fonte, apenas pelo desarranjo de fase, tempo de integração e quantidade de amostra Caso $F_{sup} > 0,5$ e o $6 < F_{rel} < 12$ a correção devido à absorção da fonte deve de feita desde que $0 > \delta_{abs} > -10$ dB. Posicionar a superfície de medição de modo que as fontes de ruído de fundo não fiquem paralelas com suas faces
Fazer duas medições ortogonais em uma face da superfície de medição e verificar o comprimento dos índices de campo, F_{PI}, $F_{+/-}$, e Índice de Potência Parcial Reativa Comparar os resultados dos índices com os propostos pela norma. ($F_{PI} < L_D$; $F_{+/-} < 3$ dB; $L_{W1} - L_{W2} > s$) Caso não atendam redimensionar a superfície de medição, diminuir ruído de fundo, verificar a variação temporal da fonte em análise (Tabela B.1, ISO 9614-2 (1995))	Fazer duas medições ortogonais em uma face da superfície de medição e verificar o comprimento dos índices de campo, F_{PI}, $F_{+/-}$, e Índice de Potência Parcial Reativa Comparar os resultados dos índices com os propostos pela norma. ($F_{PI} < L_D$; $F_{+/-} < 3$ dB; $L_{W1} - L_{W2} > s$) Caso não atendam redimensionar a superfície de medição, diminuir ruído de fundo, verificar a variação temporal da fonte em análise (Tabela B.1, ISO 9614-2 (1995)) Obs.: Em geral quando os parâmetros F_{sup} e F_{rel} estão no intervalo indicado os índices de campo da ISO 9614-2 (1995) são cumpridos
Manter a velocidade de varredura entre 0,1 e 0,5 m/s Tempo mínimo de varredura de 20 s Manter a velocidade da sonda constante Realizar duas varreduras ortogonais em cada face da superfície de	Caso a face da superfície de medição possua mais de 1m² subdividi-la em segmentos menores para facilitar a processo de varredura Aumentar a velocidade de varredura quando próximo à sonda houver fluxos de ar de elevada velocidade, acima de 5 m/s, para diminuir o erro gerado por

medição.	este fator
	Realizar duas medições e interpor os microfones nos canais de medição da sonda. Realizar nova medição e verificar o desvio padrão da Tabela 3.1, ISO 9614-2 (1995) Realizar o “zero” teste” de modo ser possível implementar as correções dividido a absorção ($6 < F_{rel} < 12$). O $\delta_{PI, ZERO}$ deve ser uma média de pelo menos 5 medições, sendo que a interposição dos microfones também deve ser feita

Tabela 6.3 Comparação entre a metodologia utilizada neste trabalho e a ISO 9614-2 (1995) para correção dos resultados

ISO 9614-2 (1995)	ESTE TRABALHO
	Caso os microfones sejam do tipo campo livre e não de pressão é necessário a correção dos resultados segundo carta de calibração do fabricante
	$F_{sup} < 0,5$ e o $F_{rel} > 20$. Não será necessário correções devido a absorção da fonte, apenas pelo desarranjo de fase, tempo de integração e quantidade de amostra, que nesta situação serão da ordem de 0,1 dB(A) $F_{sup} > 0,5$ e $6 < F_{rel} < 12$ a correção devido a absorção da fonte deve de feita desde que $0 > \delta_{abs} > -10$ dB

REFERÊNCIAS

- ABDOU, A., GUY, R. W., Directional accuracy of transient sound employing an intensity probe, **Applied Acoustics**, 1997, vol 50, pp 65 – 77.
- ALFREDSON, R. J., A new technique for a noise source identification on a multi-cylinder automotive engine, In NOISE-CON 77, Proceedings, Noise Control Foundation, New York, 1977, apud FAHY, F. J., **Sound Intensity**, London, E&FN SPON, 1995, 2^o Ed, 294pp.
- ALFREDSON, R. J, PHELAN, I., J., The prediction and measurement of acoustic intensity in the near field of vibrating surface, **Applied Acoustics**, 1988, vol 23, pp 281 – 296.
- ANDERSEN, G., JONASSON, H. G., Determination of emission sound pressure levels: Comparisons between a new intensity method and traditional ISO standards, In INTERNOISE 96, Proceedings ..., Liverpool, 1996, pp 2667 - 2673.
- ASTRUP, T., Measurement of sound power using an acoustic intensity method, a consultant's point of view, **Applied Acoustics**, 1997, vol 50 (2) , pp 111 – 123.
- BAKER, S., An acoustic intensity meter, **Journal of Acoustical Society of America**, vol 28, pp 269 - 273, 1955, apud FAHY, F. J., **Sound Intensity**, London, E&FN SPON, 1995, 2^o Ed, 294pp.
- BERANEK, L. L., **Acoustical Measurements**, 1988, American Institute of Physics, Cambridge, Edição revisada, Capítulo 5.
- BIES, D. A., HANSEN, C. H., **Engineering Noise Control**, 1998, E&FN SPON, Londres, 2^a edição, Capítulo 3 e 6.
- BROCKHOFF, M., Some remarks on the continuous sweeping method for determination of sound power determination, In INTERNOISE 84, 1984, Honolulu, Proceedings..., pp 1173 – 1176, apud, JACOBSEN, F., Spatial sampling errors in sound power estimation based upon intensity, **Journal of Sound and Vibration**, 1991, vol 145 (1), pp 129 – 149.
- BOLT, R. H., PETRAUSKAS, A., An acoustic impedance meter for rapid field measurements, **Journal of Acoustical Society of America**, vol 15, pp79, 1943, apud FAHY, F. J., **Sound Intensity**, London, E&FN SPON, 1995, 2^o Ed, 294pp.
- BOJR, O. H., KRYSTAL, H. J., A velocity microphone for sound intensity measurement, In AUTUMN CONFERENCE, Proceedings, Institute of Acoustics, Edinburgh 1982, B7.1 a B7.5, apud FAHY, F. J., **Sound Intensity**, London, E&FN SPON, 1995, 2^o Ed, 294pp.
- BRITO, L. A., BERTOLI, S. R., SANTOS, C., NETO, M. F. F., Determinação da Potência Sonora de uma Furadeira Através da Intensimetria, Apresentação da Técnica, In ENCONTRO NACIONAL DA TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Anais..., São Paulo, 2004, Associação Nacional da Tecnologia do Ambiente Construído, 2004, trabalho 860.
- BRITO, L. A, BERTOLI, S. R., Corrections in Sound Power Level Determination Using Intensity Measurements, In INTERNOISE 2005, Proceedings ..., Rio de Janeiro 2005

_____, Utilização da Técnica da Intensimetria no Suporte do Estudo da Propagação do Ruído Ambiental, In ENCONTRO NACIONAL DO CONFORTO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Anais..., Maceió, 2005, Associação Nacional da Tecnologia do Ambiente Construído, 2005, trabalho 75.

BRUEL & KJAER, Technical Documentation, Sound Intensity Software BZ7205, Naerum, 1997.

BURGER, J. F., ZYL, B. G., ANDERSEN G. F., Measurement of sound intensity applied to the determination of radiated sound power, **Journal of Acoustical Society of America**, vol 53, pp 1167 a 1168, 1973, apud FAHY, F. J., **Sound Intensity**, London, E&FN SPON, 1995, 2^o Ed, 294pp.

CASTANHA, R. P. J., KURKA, P. R. G., Estudo da técnica de intensidade sonora: procedimentos, erros e aplicações, **Revista Acústica e Vibrações**, 1999, n^o 24, pp 12 - 17.

CVETKOVIC, D., PRASCEVIC, M. MIHAJLOV, D., Extending frequency range of intensity measurement reliability in the procedure of emission sound pressure level determination, In INTERNOISE 2004, Proceedings..., Praga, 2004.

CHUNG, J. Y., Cross-spectral method of measuring acoustic intensity, **Research Publication of General Motors**, Michigan, 1977, apud FAHY, F. J., **Sound Intensity**, London, E&FN SPON, 1995, 2^o Ed, 294pp.

_____, Cross-spectral method of measuring acoustic intensity without error caused by instrument mismatch, **Journal of Acoustical Society of America**, 1978, vol 64, pp 1613 – 1616.

CHUNG, J. Y., POPE, J., Practical measurement of acoustic intensity – two microphones cross spectral method, In **INTERNOISE 78**, Proceedings..., pp 893 a 900, 1978, apud THOMPSON, J. K., TREE, D. R., Finite difference approximation errors in acoustic intensity measurements, **Journal of Sound and Vibration**, 1981, vol 75(2), pp 299 – 238.

DALAN, G. A., COHENT, R. L., Acoustic intensity techniques for airplane cabin applications, **Journal of Aircraft**, 1982, vol 22 (10), pp 910 – 914.

DOCKUMACE, E., On calculation of acoustic power, **Journal of Sound and Vibration**, 2000, vol 238 (5), pp 869 - 876.

DUARTE, M. A. V., COSTA FILHO, M. A., Identificação de ruído em dutos via medição de intensidade sonora, In XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECANICA, Anais..., 1997, Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 1997, COB 1384.

FAHY, F. J., A technique for measurement sound intensity with a sound level meter, **Noise Control Engineer**, vol 9, pp155 - 162, 1977, apud FAHY, F. J., **Sound Intensity**, London, E&FN SPON, 1995 a, 2^o Ed, 294pp.

_____, Measurement of acoustic intensity using the cross spectral density of two microphones signal, **Journal of Acoustical Society of America**, 1977 b, vol 62, pp1057 – 1059.

_____, A technique for measurement sound intensity with a sound level meter, In 9th INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS, Proceedings, Spanish Acoustical Society, 1977 c, Madrid, pp 824, apud FAHY, F. J., **Sound Intensity**, London, E&FN SPON, 1995, 2^o Ed, 294pp.

_____, Measurement with an intensity meter of the acoustic power of a small machine in a room, **Journal of Sound and Vibration**, 1978, vol 57(3), pp 311 - 322.

FAHY, F. J., **Sound Intensity**, London, 1989, Elsevier Applied Science, 1989, Seção 6.3.1, 6.9.2, 6.9.4, e 8.2, apud, JACOBSEN, F., A simple and effective correction for phase mismatch in intensity probes, **Applied Acoustics**, 1991, vol 33, pp 165 – 150.

_____, **Sound Intensity**, London, 1995, E&FN SPON, 2^o Ed, 1995, 294pp.

_____, International standards of determination of sound power levels of sources using intensity measurement: An exposition, **Applied Acoustics**, 1997, vol 50, pp 97 – 109.

GADE, S., Validity of intensity measurements in partially diffuse sound field, Bruel & Kjaer Technical Review, 1985, vol 4, pp 3 – 31, apud, JACOBSEN, F., A simple and effective correction for phase mismatch in intensity probes, **Applied Acoustics**, 1991, vol 33, pp 165 – 150.

GERGES, S. N. Y., Inherent error in acoustic intensity measurement for piston type source, In INTERNOISE 83, Proceedings..., Edingurgo, 1983, pp1055 - 1058, apud GERGES, S. N. Y., **Ruídos Fundamentos e Controle**, 1992, Florianópolis, 1^o ed, CBSSI , 1992, 600pp.

_____, **Ruídos Fundamentos e Controle**, 1992, Florianópolis, 1^o ed, CBSSI , 1992, 600pp.

_____, Identificação das fontes de ruído veicular por medição de intensidade sonora, **Revista Acústica e Vibrações**, 1994, n^o 14, pp 9 - 19.

_____, Aplicação da técnica de intensimetria sonora em edificações, In III ENCONTRO NACIONAL DA TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Anais..., Gramado, 1995, Associação Nacional do Ambiente Construído, São Paulo, 1995, pp 75 – 98.

GINN, B., OLSEN, E., CUTANDA, V., GRAMTORP, J., ERIKSEN, A., Sound intensity probe calibrator for field use, calculating the sound field in the calibrator using boundary element modeling, In FORUM ACUSTICAN SEVILLA, Proceedings..., Sevilla, 2002, pp 4 – 16.

GILJOHANN, D., ZOPP, A., measurement of sound intensity with simulations using finite and semi infinite Helmholtz elements, **Transaction of the ASME**, 1998, vol 120, pp 658 – 662.

GUY, R. W., LUCHIAN, H., Probe reversal and pressure based bias error correction procedures applied to intensity measurements in planning standing waves, **Journal of Vibration and Acoustics**, 1995, vol 117, pp 56 – 61.

HALÉN, M., **El Ruido en La Construcción Y Las Obras Publicas**, Estocolmo, 71pp, 1973.

HICKLING, R., LEE, P., WEI, W., Investigation of integration accuracy of sound power measurements using an automated sound intensity system, **Applied Acoustics**, 1997, vol 50 (2), pp 112 – 140.

HICKLING, R., LEE, P., Determining sound power in reverberation room and indoor workspaces using sound intensity measurements. In NOISE COM 97, Proceedings..., Pennsylvania, 1997, pp 483 – 489.

HONGISTO, V., SAINÉ, K., Sound power measurement of a diesel engine by ISO 9614-2 and ISO 3746 in different acoustical conditions, In INTERNOISE 96, Proceedings ..., Liverpool, 1996, pp 2697 – 2706.

HÜBNER, G., Determination of sound power sources of in situ conditions using intensity method – field application, suppression of parasitic noise, reflection effect, In INTERNOISE 83, Proceedings... , Edinburgo, 1983, pp 1043 – 1046, apud FAHY, F. J., **Sound Intensity**, London, E&FN SPON, 1995, 2^o Ed, 294pp.

_____, Development of requirements for an intensity measurements code determining sound power level of machines, In INTERNOISE 84, Proceedings..., Honolulu, 1984, pp 1093 – 1098.

_____, Sound intensity measurements method – Errors in determining the sound power levels of machines and its correlations with sound field indicators, In INTERNOISE 87, Proceedings..., 1987, pp 1227 – 1230, apud, JACOBSEN, F., A simple and effective correction for phase mismatch in intensity probes, **Applied Acoustics**, 1991, vol 33, pp 165 – 150.

HÜBNER, G., WITTSTOCK, V., Further investigations to check the adequacy of sound field indicators to be used for sound intensity technique determining the sound power level, In INTERNOISE 99, Proceedings..., Fort Lauderdale, 1999, pp 1523 – 1528.

_____, Investigations into correlation between field indicators and sound absorption, In 17th INTERNATIONAL CONGRESS OF ACOUSTICS, Proceedings..., Roma, 2001, vol II.

_____, Revision of measurement procedures determining the sound power by using sound intensity technique, In INTERNOISE 2004, Proceedings..., Praga, 2004.

HÜBNER, G., KANDELAKI, D., KRAUS, M., A near field errors in determination the sound power – A survey of present state of knowledge together with the latest finds, In INTERNOISE 2004, Proceedings..., Praga, 2004.

INTERNATIONAL ELECTRICAL CONGRESS, IEC 61043, Electroacoustics - Instruments for the measurement of sound intensity - Measurements with pairs of pressure sensing microphones, London, 1993.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION ISO 9614-1, Acoustics determination of sound power levels of noise sources using sound intensity – Measurements in discrete points, Geneva, 1993.

_____, ISO 3743-1 Acoustics determination of sound power level of noise sources using sound pressure, comparison method for hard walled test rooms, Geneva, 1994.

_____, ISO 3743-2 Acoustics determination of sound power level of noise sources using sound pressure, method for special reverberation test rooms, Geneva, 1994.

_____, ISO 9614-2, Acoustics determination of sound power levels of noise sources using sound intensity – Measurements for scanning, Geneva, 1995.

_____, ISO 11200, Acoustics, noise emitted by machinery and equipment, Geneva 1995.

_____, ISO 3746, Acoustics determination of sound power level of noise sources using sound pressure – Survey method using an enveloping measurement over a reflecting plane, Geneva, 1995.

_____, ISO 3741, Acoustics determination of sound power level of noise sources using sound pressure, precision methods for reverberations rooms, Geneva, 1999.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, ISO 3740, Acoustics determination of sound power level of noise sources, Geneva, 2000.

_____, ISO 9614-3, Acoustics determination of sound power levels of noise sources using sound intensity – Precision method by scanning, Geneva, 2002.

_____, ISO 3744, Acoustics determination of sound power level of noise sources using sound pressure, precision methods using anechoic and hemi anechoic rooms, Geneva, 2003.

JACOBSEN, F.; Random errors in sound power determination based upon intensity measurement, **Journal of Sound and Vibration**, 1989 a, vol 128 (2), pp 247 - 257.

_____, Active and reactive, coherent and incoherent sound fields, **Journal of Sound and Vibration**, 1989 b, vol 130 (3), pp 493 – 507.

_____, Random errors in sound intensity estimation, **Journal of Sound and Vibration**, 1989 c, vol 131 (3), pp 475 – 487.

_____, Active and reactive sound intensity in a reverberant sound field, **Journal of Sound and Vibration**, 1990, vol 143 (2), pp 231 - 240.

_____, A simple and effective correction for phase mismatch in intensity probes, **Applied Acoustics**, 1991 a, vol 33, pp 165 – 150.

_____, Spatial sampling errors in sound power estimation based upon intensity, **Journal of Sound and Vibration**, 1991 b, vol 145 (1), pp 129 – 149.

_____, Sound power determination using the intensity technique in presence of diffuse background noise, **Journal of Sound and Vibration**, 1992, vol 159 (2), pp 353- 371.

_____, Sound intensity measurements at low levels, **Journal of Sound and Vibration**, 1993, vol 166 (2), pp 195 – 207.

JACOBSEN, F., OLSEN, E. S., The influence of microphone vents on the performance of sound intensity probes, **Applied Acoustics**, 1994, vol 41, pp –25 – 45.

JACOBSEN, F., A note on the measurement of sound intensity with wind screened probes, **Applied Acoustics**, 1994 a, vol 42, pp 41 – 53.

_____, A note of accuracy of phase compensates intensity measurements, **Journal of Sound and Vibration**, 1994 b, vol 174 (2), pp 140 – 144.

JACOBSEN, F., CUTANDA, V., JHUL, P. M., A sound intensity probe for measuring from 50 Hz to 10 KHz, In INTERNOISE 96, Proceedings, 1996, Liverpool, pp 3356 – 3361.

JACOBSEN, F., DING, H., Observation on the systematic deviation between the results of the conventional method of measuring transmission loss, In INTERNOISE 96, Proceedings, 1996, Liverpool

JACOBSEN, F., Overview of sources of error in sound power determination using the intensity technique, **Applied Acoustics**, 1997, vol 50 (2), pp 155 - 166.

JACOBSEN, F., CUTANDA, V., JUHL, P. M., A numerical and experimental investigation of the performance of sound intensity probe at high frequencies, **Journal of Acoustical Society of America**, 1998, vol 103 (2), pp 953 - 961.

JACOBSEN, F., The coherence of reverberant sound fields, **Journal of Acoustical Society of America**, 2000, vol 108 (1), pp 204 – 210.

_____, State of art of sound intensity and its measurements and applications, In 17th INTERNATIONAL CONGRESS OF ACOUSTICS, Proceedings..., Roma, 2001, vol II.

JACOBSEN, F., JUHL, P.M., Sound power measurement using intensity at high frequencies, In INTERNOISE 2004, Proceedings..., Praga, 2004.

KEITH, S., E., KRISHNAPPA, G., CHIU, V., Determination of sound pressure levels in situ using sound intensity measurements, In NOISE COM 2000, Proceedings..., Newport, 2000.

_____, A comparison of procedures in ISO pressure and intensity standards for measurement of sound power, In INTERNOISE 2004, Proceedings..., Praga, 2004.

JONASSON, H. G., Noise emission measurements – Systematic errors, In INTERNOISE 1999, Proceedings..., Fort Lauderdale, 1999, pp 1461 – 1466.

KIM, H. J., CHO, Y. M., Noise sound identification on a rotary compressor: A multidisciplinary synergetic approach, **Journal of Acoustical Society of America**, 2001, vol 110 (2), pp 887 - 893.

KRISHNAPPA, G., Cross-spectral method of measuring acoustic intensity by correction phase and gain mismatch by microphone calibration, **Journal of Acoustical Society of America**, 1981, vol 69, pp 307 – 310.

LAVILLE, F., The optimal measurement distances for intensity determination of sound power, In INTERNOISE 83, Proceedings..., Edinburgh, 1983, pp 1075 – 1078, apud FAHY, F. J., **Sound Intensity**, London, E&FN SPON, 1995, 2^o Ed, 294pp.

LAMBERT, J. M., BADIE-CASSAGNET, A., La mesure directe de l'intensité acoustique, CETINS INFORMATIONS, vol 53, pp78 a 97, 1977, apud FAHY, F. J., **Sound Intensity**, London, E&FN SPON, 1995, 2^o Ed, 294pp.

LAMBRICH, H., STAHEL W., A sound intensity meter and it's applications in car acoustics, In INTERNOISE 77, Proceedings..., NOISE CONTROL FOUNDATION, Ziruch, Switzerland, 1977, apud FAHY, F. J., **Sound Intensity**, London, E&FN SPON, 1995, 2^o Ed, 294pp.

LANG, W. W., Sound power standards update on status and problems, In NOISE-COM 96, Proceedings ..., Seattle, 1996, pp 943 – 950.

LARSEN, P., MANWEL, D., Demystifying sound power measurements with sound intensity, In 135TH MEETING OF ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA, Proceedings..., Seattle, 1998, vol1 , pp 775 – 777.

LAY, J. C. S., Application of sound intensity technique to noise source identification: A case of study, **Applied Acoustics**, 1991, vol 34, pp 89 – 100.

LAY, J. C. S., BURGESS, M., Application of sound intensity technique to measurement of field transmission loss, **Applied Acoustics**, 1991, vol 34, pp 77 - 88.

LI, W. L., QIU, Y., Measurement of sound in intensity the presence of mean flow, In NOISE-COM 96, Proceedings ..., Seattle, 1996, pp 717 – 722.

LIMA, J., PACHECO, E., GERGES, S., identificação das fontes de ruído de um motor ciclo Otto usando a intensidade sonora, resultados preliminares, In XV ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACUSTICA, Anais..., 2002, Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Acústica, Florianópolis 2002.

LUBMAN, D., WATERHOUSE, C., CHIEN, S., Effectiveness of continuous spatial averaging in a diffuse sound field, **Journal of Acoustical Society of America**, 1973, vol 53, pp 650 – 659, apud, JACOBSEN, F., Spatial sampling errors in sound power estimation based upon intensity, **Journal of Sound and Vibration**, 1991, vol 145 (1), pp 129 – 149.

MASSACESI, A., PAONE, N., ROSSI, G. L., TOMASSINI, E. P., Uncertainty and compatibility analysis of acoustic power determination bu intensity and pressure techniques, In XV ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA, Anais..., 2002, Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Acústica, Florianópolis, 2002.

MAIA, P. A., **O ruído nas Obras da Construção Civil, e o Risco de Surdez Ocupacional**, 2001, 145pp, Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

MILLER, A. S., **An investigation of the measurement of acoustic intensity using digital signal processing**, 1975, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, University of Southampton, apud FAHY, F. J., **Sound Intensity**, London, E&FN SPON, 1995, 2^o Ed, 294pp.

MORAES, E, LARA, N, Mapa Acustico de Belem, In ENCONTRO NACIONAL DO CONFORTO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Anais..., Maceió, 2005, Associação Nacional da Tecnologia do Ambiente Construído, 2005

NIEMEYER, M. L., SANTOS, M. J, A Qualidade Acústica no Espaço Urbano, In ENCONTRO NACIONAL DO CONFORTO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Anais..., São Pedro, 2001, Associação Nacional da Tecnologia do Ambiente Construído, 2001.

NIGHTINGALE, T., Acoustic intensity as a tool for assisting sound insulation and flanking transmission in light weight building, In INTERNOISE 96, Proceedings ..., Liverpool, 1996, pp 871 – 875.

NORDBY, S. A., BJOR, O. H., Measurement of sound intensity by use of a dual channel real time analyzer and special sound intensity microphone, In INTERNOISE 84, Proceedings, Noise Control Foundation, New York, 1984, pp1107 - 1110, apud FAHY, F. J., **Sound Intensity**, London, E&FN SPON, 1995, 2^o Ed, 294pp.

NORTON, M. P., **Fundamental Noise and Vibration Analysis for Engineers**, 1996, Cambridge, Cambridge University Press, 1996, 610pp.

OLSEN, H., PETTERSEN, O., VIAGRAN, T., Measurement strategies using the scanning intensity technique, In 1992 NORDIC ACOUSTIC MEETING, 1992, Proceedings..., Trondheim, pp 22 – 24, apud FAHY, F. J., **Sound Intensity**, London, E&FN SPON, 1995, 2^o Ed, 294pp.

OLSON, H. F., Field type acoustic wattmeter, **Journal Audio Engineering Society**, vol 22, pp321 a 328, 1932, apud FAHY, F. J., **Sound Intensity**, London, E&FN SPON, 1995, 2^o Ed, 294pp.

PASCAL, J. C., CHARLES, C., Systematic measurement errors with the microphone sound intensity meters, **Journal of Sound Vibration**, 1982, vol 83 (1), pp 53 – 65.

PARK, J., SIEGMUND, T., MOGEAU, L., Sound transmission through elastomeric bulb seals, **Journal of Sound and Vibration**, 2003, vol 259 (2), pp 299 – 322.

PAVIC, G., Measurement of sound intensity, **Journal of Sound Vibration**, 1977, vol 51, pp 533 – 546.

_____, Systematic intensity measurement errors, **Journal of Sound Vibration**, 1982, vol 83, pp 53 – 65.

PEREIRA, M., SLAMA, J. O Ambiente Sonoro Urbano: Representações e Indicadores na Cidade do Rio de Janeiro, In ENCONTRO NACIONAL DO CONFORTO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Anais..., São Pedro, 2001, Associação Nacional da Tecnologia do Ambiente Construído, 2001

PETTERSEN, O., Sound intensity measurements for describing acoustic power flow, **Applied Acoustics**, 1981, vol 14, pp 387 – 397.

PETTERSEN, O., NEWMAN, M., Is our confidence in scanned intensity measurement justified? In INTERNOISE 89, 1989, Proceedings..., New York, 979 – 984pp, apud FAHY, F. J., **Sound Intensity**, London, E&FN SPON, 1995, 2^o Ed, 294pp.

PETTERSEN, O., OLSEN, H., On spatial sampling using scanning intensity technique, **Applied Acoustics**, 1997, vol 50 (2), pp 125 – 140.

POPE, J., Validity of sound power determination using sound intensity measurements, In 2nd INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS INTENSITY, 1985, Proceedings..., pp 365 – 360, apud, JACOBSEN, F., Spatial sampling errors in sound power estimation based upon intensity, **Journal of Sound and Vibration**, 1991, vol 145 (1), pp 129 – 149.

RASMESSEN, G., Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity points versus scanning, In INTERNOISE 96, Proceedings ..., Liverpool, 1996, pp 2657 - 2660.

ROLLA, S., Ruído na construção civil, In XVII ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA, 1996, Petrópolis, Anais, Florianópolis, SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACUSTICA, pp 352 – 359.

ROTT, J. A., **Mapa simplificado de ruídos para a cidade de Porto Alegre, 1995**, Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, apud -SATTler, M. A., ROTT, A. A., CORADINI, R. A., Avaliação do Ruído Ambiental em Porto Alegre, In: ENCONTRO NACIONAL DA TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1995, Rio de Janeiro, Anais, Rio de Janeiro, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, pp 647 – 652.

SANTOS, C., **Investigação sobre métodos de determinação da potência sonora visando o programa de etiquetagem de ferramentas elétricas de uso doméstico**, 2004, 128pp, Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SATO, T., ISHIKAWA, M., WADA, S., KOYASU, M., Measurement of sound absorption coefficient in an office using sound intensity, In INTERNOISE 81, 1991, Proceedings ..., New York, 1981, pp 1221 – 1225.

SATTler, M. A., ROTT, A. A., CORADINI, R. A., Avaliação do Ruído Ambiental em Porto Alegre, In: VI ENCONTRO NACIONAL DA TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1995, Rio de Janeiro, Anais, Rio de Janeiro, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, pp 647 - 652.

SCHIMITT, I. N., PUMO, M. L., MUHLE, L. A; COELHO, D; MOURA, V. P; OLIVEIRA, R. S; Gestão ambiental no controle da poluição sonora: A experiência de Porto Alegre, In: XIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACUSTICA, 2000, Belo Horizonte, Anais, Florianópolis: SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACUSTICA, 2000, pp 398 - 415.

SCHULTS, T. J., Acoustic wattmeter, **Journal of Acoustical Society of America**, vol 28, pp 693 - 699, 1956, apud FAHY, F. J., **Sound Intensity**, London, E&FN SPON, 1995, 2^o Ed, 294pp.

SHERNDT, G. A., Remarks in true value of the sound power levels, In INTERNOISE 96, 1996, Proceedings , Liverpool, 1996, pp 2703 – 2706.

SMITH, B. J., PETERS, R. J.; OWEN, S., **Acoustics and Noise Control**, 1996, New York, Longman, 2^o Ed, 1996, 210pp.

SOUZA, M. R., GERGES, S. N. Y., Determinação da potência sonora em ambiente com elevado nível de ruído de fundo através da medição de intensidade sonora por varredura, In XX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACUSTICA, 2002, Rio de Janeiro, Anais..., Florianópolis, Sociedade Brasileira de Acústica, 2002.

SOUZA, M. R., **Determinação da potência sonora em ambiente industriais por intensimetria acústica**, 2003, 101pp, Tese (Doutorado), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

STANZIAL, D., BONSI, D., An indicator based on modal intensity for testing the influence of the environment on the sound power, In 17th INTERNATIONAL CONGRESS OF ACOUSTICS, Proceedings..., Roma, 2001, vol II.

SULLIVAN, R. D., GIBBS, B. M., In situ measurement of sound transmission loss of masonry construction by acoustic intensity, In INTERNOISE 96, 1996, Proceedings ..., Liverpool, 1996, pp 1821 – 1824.

TACHIBANA, H, YANO, H, YAMAGUCHI, K, The accuracy of scanning sound intensity method in sound power determination, In INTERNOISE 93, Proceedings The Belgium Acoustical Association, Belgium, Leuven, 1993, pp357 a 362, apud FAHY, F. J., **Sound Intensity**, London, E&FN SPON, 1995, 2^o Ed, 294pp.

TANDON, N., NAKRA, B. C., UBHE, D. R., Noise control of engine driven portable generator set, **Applied Acoustics**, 1998, vol 50 (4), pp 307 – 328.

THOMPSON, J. K., TREE, D. R., Finite difference approximation errors in acoustic intensity measurements, **Journal of Sound and Vibration**, 1981, vol 75(2), pp 299 – 238.

VILLOT, M., ROLAND, R., Application of sound intensity and structural intensity to study acoustical transmission through windows, In INTERNOISE 96, Proceedings ..., Liverpool, 1996, pp 871 – 875.

WANG, Y. S., CROCKER, M. J., Direct measurement of transmission loss of aircraft structures using the acoustic intensity approach, **Noise Control Engineer Journal**, 1982, pp 80 – 89.

WATTKINSON, P. S., Intensity Measurement of Sound Absorption, In INSTITUTE OF ACOUSTICS, Proceedings ..., 1978 a, pp 41 – 44.

_____, Measurement of Sound Absorption Using Sound Intensity Techniques, In PROCEEDINGS OF THE AUTUMN CONFERENCE, 1978, Southampton, Anais do INSTITUTE OF ACOUSTICS, 1978 b, pp 45 – 49.

WATTKINSON, P. S., FAHY, F. J, Characteristics of microphone arrangements for sound intensity measurement, **Journal of Sound and Vibration**, 1984, vol 94, pp 299 – 306.

WATTKINSON , P. S, The practical assessment of error in sound intensity measurement, **Journal of Sound and Vibration**, 1986, vol 105(2), pp 255 – 263

WEYNA, S., The application of sound intensity technique in research on noise abatement in ships, **Applied Acoustics**, 1995, vol 44, pp 341 – 351.

WING, R. S., PAN, J., NORTON, M., The sound field characterization of a power transformer, **Applied Acoustics**, 1999, vol 56, pp 257 – 272.

YANO, H., TACHIBANA, H., SUZUKI, H., Experimental study on the accuracy of sound power determination by intensity scanning method, In 135TH MEETING OF ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA, Proceedings..., Seattle, 1998, vol1 , pp 1461 – 1462.

_____, Experimental study on the accuracy of sound power determination by sound intensity using artificial complex sound sources, In 17th INTERNATIONAL CONGRESS OF ACOUSTICS, Proceedings..., Roma , 2001 vol II.

ZYL, B. G, BURGER, J. F., ANDERSEN G. F., Evaluation of intensity method of sound power determination, **Journal of Acoustical Society of America**, vol 57, pp 662 - 668, 1975, apud FAHY, F. J., **Sound Intensity**, London, E&FN SPON, 1995, 2^o Ed, 294

APÊNDICE A

CONDIÇÕES AMBIENTAIS

Neste Apêndice estão listadas as condições ambientais durante as medições do nível de potência sonora através da intensimetria. Estes dados foram utilizados para o cálculo dos erros, correções e índices de campo.

Tabela A.1 Características gerais das superfícies de medição e do processo de varredura

Superfície	40	60	80	110	130
Área da Superfície de Medição - S_0 (m ²)	1,4	1,8	3,2	6,05	8,45
Comprimento de varredura total - L (m)	5,9	15	20	44	52
Tempo de varredura parcial por face - T (s)	20	25	40	40	40
Tempo de varredura total - T_0 (s)	100	125	200	200	200
Volume da superfície de medição (m ³)	0,07	0,22	0,51	1,33	2,20
Velocidade de varredura - V (m/s)	0,06	0,12	0,10	0,22	0,26

Tabela A.2 Tempo de reverberação, nível de pressão sonora de fundo e nível de pressão sonora durante as medições na condição ambiental A

Frequências (Hz)	Tempo de Reverberação (s)	Nível de pressão sonora de fundo (dB)	Nível de pressão sonora durante as medições (dB)
125	3,6	38,2	45,3
250	2,6	21,0	52,6
500	2,4	19,6	60,9
1000	2,4	13,0	69,3
2000	1,8	16,3	68,3
4000	1,6	--	65,9
8000	1,4	--	63,8

Tabela A.3 Tempo de reverberação, nível de pressão sonora de fundo e nível de pressão sonora durante as medições na condição ambiental B

Frequências (Hz)	Tempo de Reverberação (s)	Nível de pressão sonora de fundo (dB)	Nível de pressão sonora durante as medições (dB)
125	3,6	45,3	48,2
250	2,6	52,6	55,8
500	2,4	60,9	64,5
1000	2,4	69,3	71,5
2000	1,8	68,3	73,5
4000	1,6	65,9	72,5
8000	1,4	63,8	73,0

Tabela A.4 Tempo de reverberação, nível de pressão sonora de fundo e nível de pressão sonora durante as medições na condição ambiental C

Frequências (Hz)	Tempo de Reverberação (s)	Nível de pressão sonora de fundo (dB)	Nível de pressão sonora durante as medições (dB)
125	6,5	45,7	47,2
250	3,3	53,6	54,1
500	4,2	61,9	63,3
1000	4,2	70,9	72,1
2000	4,0	71,7	72,0
4000	3,5	69,4	71,1
8000	3,5	66,7	69,7

Tabela A.5 Tempo de reverberação, nível de pressão sonora de fundo e nível de pressão sonora durante as medições na condição ambiental D

Frequências (Hz)	Tempo de Reverberação (s)	Nível de pressão sonora de fundo (dB)	Nível de pressão sonora durante as medições (dB)
125	0,7	61,2	66,1
250	1,1	63,5	66,5
500	1,0	77,1	79,2
1000	1,2	84,0	86,3
2000	1,3	86,1	88,3
4000	1,0	82,1	87,9
8000	0,8	85,5	88,1

APÊNDICE B

ÍNDICES DE CAMPO

Neste Apêndice estão listadas os índices de campo necessários para o comprimento das determinações do ISO 9614-2 (1995) para cada condição ambiental

Tabela B.1 Índice Pressão Intensidade da superfície 40 na condição ambiental A

Frequência (Hz)	Fpi - M1	Fpi - M2	Fpi - M3	Fpi - M4	Fpi - M5	Fpi - M6
125	8,78	5,16	7,54	7,68	7,68	5,16
250	2,57	2,45	2,15	2,64	2,52	2,53
500	1,68	1,55	1,68	2,02	1,77	1,78
1000	1,68	1,59	1,49	1,84	1,96	1,95
2000	1,05	1,07	0,97	1,68	1,73	1,75
4000	1,1	1,14	0,75	1,48	1,52	1,53
8000	1,05	1,09	0,5	1,2	1,22	1,26

Tabela B.2 Índice Pressão Intensidade da superfície 60 na condição ambiental A

Frequência (Hz)	Fpi - M7	Fpi - M8	Fpi - M9	Fpi - M10	Fpi - M11	Fpi - M12
125	-4,51	-6,22	-5,19	-7,03	-8,60	-8,60
250	1,57	1,59	1,57	1,53	1,53	1,53
500	1,70	1,71	1,69	1,64	1,60	1,60
1000	1,63	1,70	1,75	1,62	1,60	1,60
2000	1,06	1,09	1,16	0,99	0,99	0,99
4000	1,11	1,16	1,22	1,05	1,06	1,06
8000	0,88	0,93	0,98	0,94	0,93	0,93

Tabela B.3 Índice Pressão Intensidade da superfície 80 na condição ambiental A

Frequências (Hz)	Fpi - M13	Fpi - M14	Fpi - M15	Fpi - M16	Fpi - M17	Fpi - M18
125	-0,63	-1,03	-0,99	1,67	2,81	0,98
250	1,90	1,84	1,81	2,05	1,86	1,78
500	1,91	1,95	2,09	1,93	2,03	1,98
1000	1,89	1,86	1,98	2,01	2,09	2,03
2000	1,39	1,39	1,45	1,44	1,54	1,49
4000	1,45	1,47	1,51	1,43	1,52	1,5
8000	1,44	1,45	1,57	1,06	1,19	1,17

Tabela B.4 Índice Pressão Intensidade da superfície 110 na condição ambiental A

Frequências (Hz)	Fpi - M19	Fpi - M20	Fpi - M21	Fpi - M22	Fpi - M23	Fpi - M24
125	10,34	10,34	10,34	12,17	12,17	11,26
250	5,00	4,80	4,90	4,78	4,79	4,89
500	2,59	2,48	2,53	2,33	2,41	2,46
1000	2,36	2,30	2,33	2,33	2,32	2,35
2000	1,94	1,92	1,93	1,97	1,95	1,96
4000	1,63	1,60	1,62	1,64	1,62	1,64
8000	1,41	1,38	1,40	1,62	1,50	1,52

Tabela B.5 Índice Pressão Intensidade da superfície 130 na condição ambiental A

Freqüências (Hz)	Fpi - M25	Fpi - M26	Fpi - M27	Fpi - M28	Fpi - M29	Fpi - M30
125	-13,1	-13,1	-13,10	7,53	-2,79	-2,79
250	6,49	6,32	6,41	2,78	4,55	4,64
500	2,71	2,76	2,74	2,71	2,74	2,71
1000	2,58	2,59	2,58	2,28	2,43	2,43
2000	2,13	2,24	2,19	1,83	2,04	1,98
4000	1,75	1,8	1,78	1,58	1,69	1,67
8000	1,61	1,71	1,66	1,51	1,61	1,56

Tabela B.6 Índice Pressão Intensidade da superfície 40 na condição ambiental B

Freqüências (Hz)	Fpi - M46	Fpi - M47	Fpi - M48	Fpi - M49	Fpi - M50	Fpi - M51
125	7,11	6,29	6,70	7,15	6,72	7,13
250	2,46	2,66	2,56	2,52	2,59	2,49
500	1,77	1,78	1,78	1,46	1,62	1,61
1000	1,82	1,79	1,81	1,57	1,68	1,69
2000	1,28	1,27	1,28	1,05	1,16	1,16
4000	1,21	1,21	1,21	0,82	1,02	1,01
8000	1,14	1,15	1,15	0,56	0,86	0,85

Tabela B.7 Índice Pressão Intensidade da superfície 60 na condição ambiental B

Freqüências (Hz)	Fpi - M52	Fpi - M53	Fpi - M54	Fpi - M55	Fpi - M56	Fpi - M57
125	-2,83	-4,34	-4,61	-3,02	-7,59	-7,05
250	3,88	3,83	3,74	3,98	2,85	2,87
500	2,64	2,44	2,48	2,72	2,73	2,72
1000	2,55	2,43	2,32	2,66	2,72	2,7
2000	1,68	1,58	1,54	1,84	1,87	1,88
4000	1,64	1,52	1,50	1,80	1,82	1,79
8000	1,47	1,30	1,35	1,48	1,49	1,47

Tabela B.8 Índice Pressão Intensidade da superfície 80 na condição ambiental B

Freqüências (Hz)	Fpi - M58	Fpi - M59	Fpi - M60	Fpi - M61	Fpi - M62	Fpi - M63
125	7,47	9,29	8,41	8,14	7,99	6,82
250	4,50	4,21	4,28	4,14	4,21	4,24
500	2,68	2,78	2,65	2,73	2,69	2,78
1000	2,72	2,78	2,68	2,73	2,76	2,54
2000	1,96	2,01	1,99	1,86	1,96	1,94
4000	1,86	1,85	1,84	1,83	1,92	1,91
8000	1,43	1,40	1,47	1,73	1,79	1,78

Tabela B.9 Índice Pressão Intensidade da superfície 110 na condição ambiental B

Freqüências (Hz)	Fpi - M64	Fpi - M65	Fpi - M66	Fpi - M67	Fpi - M68	Fpi - M69
125	14,84	14,84	14,84	15,61	15,23	15,23
250	5,15	4,90	5,03	6,47	5,69	5,81
500	3,47	3,45	3,46	4,78	4,12	4,13
1000	3,04	3,13	3,09	4,24	3,69	3,64
2000	2,58	2,69	2,64	3,12	2,91	2,85
4000	2,08	2,17	2,13	2,65	2,41	2,37
8000	1,75	1,82	1,79	2,60	2,21	2,18

Tabela B.10 Índice Pressão Intensidade da superfície 130 na condição ambiental B

Frequências (Hz)	Fpi - M70	Fpi - M81	Fpi - M82	Fpi - M83	Fpi - M84	Fpi - M85
125	11,25	11,25	11,25	10,35	10,80	10,80
250	7,54	8,03	7,79	4,52	6,28	6,03
500	4,56	4,62	4,59	4,03	4,33	4,30
1000	3,9	3,85	3,87	3,47	3,66	3,69
2000	3,01	2,95	2,98	2,79	2,87	2,90
4000	2,52	2,52	2,52	2,4	2,46	2,46
8000	2,52	2,49	2,51	2,28	2,39	2,40

Tabela B.11 Índice Pressão Intensidade da superfície 40 na condição ambiental C

Frequências (Hz)	Fpi - M91	Fpi - M92	Fpi - M93	Fpi - M94	Fpi - M95	Fpi - M96
125	3,15	2,74	3,18	3,88	3,03	3,46
250	3,06	2,74	2,83	2,97	2,95	2,96
500	1,27	1,53	1,46	1,71	1,66	1,69
1000	1,08	1,31	1,25	1,53	1,50	1,52
2000	0,65	0,83	0,85	1,03	1,02	1,03
4000	0,58	0,76	0,77	1,05	1,05	1,05
8000	0,18	0,49	0,50	0,90	0,85	0,87

Tabela B.12 Índice Pressão Intensidade da superfície 60 na condição ambiental C

Frequências (Hz)	Fpi - M97	Fpi - M98	Fpi - M99	Fpi - M100	Fpi - M101	Fpi - M102
125	-2,05	-3,39	12,95	-0,23	1,44	8,63
250	1,37	1,21	2,03	1,44	2,56	5,62
500	1,33	1,34	1,40	1,39	1,55	1,72
1000	1,40	1,42	1,47	1,51	1,57	1,51
2000	0,79	0,79	0,85	0,86	0,92	0,81
4000	0,98	0,99	1,00	1,06	1,10	1,00
8000	0,86	0,88	0,89	0,84	0,90	0,79

Tabela B.13 Índice Pressão Intensidade da superfície 80 na condição ambiental C

Frequências (Hz)	Fpi - M103	Fpi - M104	Fpi - M105	Fpi - M106	Fpi - M107	Fpi - M108
125	6,2	9,82	6,20	9,82	8,44	7,59
250	2,48	6,65	3,69	1,99	1,72	1,85
500	1,72	2,14	1,96	1,68	1,62	1,66
1000	1,79	1,87	1,90	1,74	1,70	1,77
2000	1,31	1,42	1,42	1,25	1,23	1,21
4000	1,4	1,46	1,52	1,32	1,32	1,35
8000	1,26	1,39	1,42	1,22	1,26	1,28

Tabela B.14 Índice Pressão Intensidade da superfície 110 na condição ambiental C

Frequências (Hz)	Fpi - M109	Fpi - M110	Fpi - M111	Fpi - M112	Fpi - M113	Fpi - M114
125	7,35	6,78	7,07	8,12	8,52	8,32
250	3,90	3,85	3,88	4,25	3,97	4,11
500	2,97	2,83	2,90	3,20	2,99	3,10
1000	3,06	2,99	3,03	3,32	3,12	3,22
2000	2,59	2,49	2,54	2,70	2,50	2,60
4000	2,45	2,34	2,40	2,40	2,25	2,33
8000	2,33	2,17	2,25	2,30	2,09	2,20

Tabela B.15 Índice Pressão Intensidade da superfície 130 na condição ambiental C

Frequências (Hz)	Fpi - M115	Fpi - M116	Fpi - M117	Fpi - M118	Fpi - M119	Fpi - M120
125	7,81	7,81	7,81	7,5	8,39	7,95
250	3,91	3,77	3,84	3,95	3,95	3,95
500	2,9	3,07	2,99	3,08	3,00	3,04
1000	3,22	3,29	3,26	3,32	3,26	3,29
2000	2,78	2,82	2,80	2,9	2,86	2,88
4000	2,58	2,66	2,62	2,73	2,74	2,74
8000	2,34	2,43	2,39	2,64	2,65	2,64

Tabela B.16 Índice Pressão Intensidade da superfície 40 na condição ambiental D

Frequências (Hz)	Fpi M136	Fpi M137	Fpi M138	Fpi M139	Fpi M140	Fpi M141
125	-2,50	-2,60	-2,60	-2,10	-2,70	-2,40
250	6,70	6,80	6,70	6,40	7,70	7,90
500	4,00	3,90	3,80	3,60	4,10	4,10
1000	3,90	3,70	3,80	3,60	4,20	4,10
2000	3,10	3,10	3,20	3,00	3,40	3,30
4000	3,10	3,10	3,10	3,00	3,40	3,30
8000	4,40	4,40	4,40	4,40	4,70	4,70

Tabela B.17 Índice Pressão Intensidade da superfície 60 na condição ambiental D

Frequências (Hz)	Fpi M142	Fpi M143	Fpi M144	Fpi M145	Fpi M146	Fpi M147
125	1,70	3,40	3,60	2,10	-0,70	1,10
250	5,50	5,10	5,10	5,50	4,90	4,80
500	5,10	5,00	5,20	5,00	5,50	5,40
1000	5,70	5,60	5,70	5,60	6,00	5,60
2000	4,60	4,60	4,70	4,80	4,90	4,80
4000	4,30	4,30	4,30	4,40	4,80	4,60
8000	5,60	5,60	5,60	5,80	5,80	5,90

Tabela B.18 Índice Pressão Intensidade da superfície 80 na condição ambiental D

Frequências (Hz)	Fpi M148	Fpi M149	Fpi M150	Fpi M151	Fpi M152	Fpi M153
125	-8,80	-0,20	3,90	2,70	-3,10	4,20
250	6,40	7,10	6,80	6,20	5,40	5,70
500	6,70	6,80	6,70	6,80	6,40	6,20
1000	7,40	7,50	7,40	7,50	6,80	6,90
2000	6,50	6,40	6,40	6,40	6,20	6,20
4000	6,00	6,10	6,20	6,10	5,90	6,00
8000	7,20	7,20	7,10	7,20	6,80	6,60

Tabela B.19 Índice Pressão Intensidade da superfície 110 na condição ambiental D

Frequências (Hz)	Fpi M154	Fpi M155	Fpi M156	Fpi M157	Fpi M158	Fpi M159
125	4,60	4,10	4,50	5,20	4,20	5,00
250	7,30	7,00	6,90	6,90	6,90	6,70
500	7,90	7,60	7,70	7,20	7,30	7,10
1000	9,00	9,00	8,60	8,70	8,70	8,40
2000	8,80	8,70	8,50	8,10	7,90	7,80
4000	7,50	7,40	7,30	6,70	6,60	6,50
8000	8,30	8,20	8,20	7,50	7,60	7,20

Tabela B.20 Índice Pressão Intensidade da superfície 130 na condição ambiental D

Frequências (Hz)	Fpi M160	Fpi M161	Fpi M162	Fpi M163	Fpi M164	Fpi M165
125	5,00	6,10	6,90	2,10	-8,50	-11,90
250	8,30	8,50	8,90	5,40	7,70	4,00
500	9,00	9,30	9,40	8,90	8,70	8,60
1000	10,50	10,60	11,10	10,70	10,10	10,50
2000	9,80	9,70	10,10	9,90	9,40	9,40
4000	8,30	8,30	8,70	8,40	7,90	8,00
8000	8,80	8,50	9,10	8,70	8,50	8,30

Tabela B.21 Critério de repetibilidade (desvio padrão) na condição ambiental A

Frequências (Hz)	40	60	80	110	130
125	1,3	1,2	0,9	1,0	2,0
250	0,9	0,1	0,1	0,1	0,3
500	1,0	0,1	0,2	0,1	0,3
1000	0,7	0,1	0,1	0,1	0,2
2000	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1
4000	0,7	0,1	0,1	0,0	0,3
8000	0,6	0,2	0,2	0,1	0,3

Tabela B.22 Critério de repetibilidade (desvio padrão) na condição ambiental B

Frequências (Hz)	40	60	80	110	130
125	1,0	0,8	4,1	0,3	3,6
250	0,4	0,2	0,4	0,3	0,3
500	0,5	0,2	0,1	0,2	0,1
1000	0,3	0,2	0,1	0,3	0,1
2000	0,1	0,1	0,1	0,2	0,0
4000	0,1	0,2	0,0	0,2	0,2
8000	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2

Tabela B.23 Critério de repetibilidade (desvio padrão) na condição ambiental C

Frequências (Hz)	40	60	80	110	130
125	0,7	2,5	4,1	0,6	0,6
250	0,2	0,1	0,4	0,1	0,3
500	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1
1000	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
2000	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2
4000	0,2	0,1	0,0	0,1	0,3
8000	0,2	0,1	0,1	0,2	0,3

Tabela B.21 Critério de repetibilidade (desvio padrão) na condição ambiental D

Frequências (Hz)	40	60	80	110	130
125	0,8	2,7	6,1	0,4	8,8
250	0,3	0,3	0,4	0,3	2,0
500	0,2	0,2	0,2	0,4	0,3
1000	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5
2000	0,2	0,3	0,2	0,4	0,3
4000	0,2	0,2	0,3	0,5	0,3
8000	0,3	0,1	0,3	0,6	0,4

APÊNDICE C

RESULTADOS OBTIDOS

Neste Apêndice estão listados os níveis de potência sonora (NWS) obtidos através da do ISO 9614-2 (1995) para cada condição ambiental e os Índice Pressão Intensidade obtido durante o “zero teste”

Tabela C.1 Nível de potência sonora (dB) da superfície 40 na condição ambiental A

Frequências (Hz)	M1	M2	M3	M4	M5	M6
125	49,9	53,1	50,8	50,8	52,2	49,7
250	64,2	63,9	62,5	62,5	64,4	64,6
500	76,5	76,7	74,5	74,5	75,1	75,2
1000	83,2	83,7	81,8	81,8	82,6	82,7
2000	85,4	85,6	84,3	84,3	85,0	85,1
4000	84,4	84,4	83,4	83,4	84,8	84,9
8000	82,8	83,0	82,2	82,2	83,4	83,4

Tabela C.2 Nível de potência sonora (dB) da superfície 60 na condição ambiental A

Frequências (Hz)	M7	M8	M9	M10	M11	M12
125	58,1	58,7	57,4	58,6	60,5	59,9
250	61,1	61,0	60,9	61,1	61,2	61,1
500	74,2	74,2	74,1	74,3	74,3	74,3
1000	81,4	81,4	81,3	81,4	81,5	81,5
2000	83,5	83,4	83,4	83,5	83,6	83,6
4000	82,8	82,7	82,5	82,8	82,8	82,8
8000	81,4	81,2	81,1	81,5	81,4	81,5

Tabela C.3 Nível de potência sonora (dB) da superfície 80 na condição ambiental A

Frequências (Hz)	M13	M14	M15	M16	M17	M18
125	51,5	52,0	51,6	49,6	49,2	50,5
250	61,4	61,4	61,4	61,4	61,4	61,4
500	74,7	74,5	74,4	74,6	74,5	74,5
1000	82,0	81,9	81,7	81,7	81,8	81,9
2000	83,6	83,5	83,4	83,6	83,7	83,7
4000	82,6	82,5	82,5	82,7	82,7	82,7
8000	81,4	81,3	81,2	81,6	81,6	81,6

Tabela C.4 Nível de potência sonora (dB) da superfície 110 na condição ambiental A

Frequências (Hz)	M19	M20	M21	M22	M23	M24
125	56,1	56,1	56,1	54,1	54,1	55,1
250	62,7	62,7	62,7	63,0	62,9	62,9
500	75,6	75,8	75,7	75,7	75,8	75,6
1000	82,8	83,0	82,9	82,9	83,0	82,9
2000	85,0	85,0	85,0	85,2	85,1	85,1
4000	83,7	83,8	83,8	83,8	83,8	83,7
8000	82,2	82,3	82,3	82,2	82,2	82,2

Tabela C.5 Nível de potência sonora (dB) da superfície 130 na condição ambiental A

Frequências (Hz)	M25	M26	M27	M28	M29	M30
125	53,6	53,6	53,6	48,7	51,1	51,1
250	61,7	61,8	61,8	62,5	62,1	62,1
500	75,4	75,4	75,4	76,2	75,8	75,8
1000	82,7	82,8	82,7	83,1	82,9	82,9
2000	84,8	84,8	84,8	85,1	84,9	84,9
4000	83,3	83,4	83,3	84,1	83,7	83,7
8000	81,6	81,7	81,6	82,3	82,0	82,0

Tabela C.6 Nível de potência sonora (dB) da superfície 40 na condição ambiental B

Frequências (Hz)	M46	M47	M48	M49	M50	M51
125	51,7	53,6	52,6	50,6	52,1	51,2
250	63,3	63,5	63,4	62,5	63,0	62,9
500	76,2	76,1	76,1	75,0	75,5	75,6
1000	82,7	82,9	82,8	82,2	82,5	82,4
2000	85,0	85,1	85,0	84,8	84,9	84,9
4000	83,8	83,9	83,8	83,7	83,8	83,7
8000	82,1	82,3	82,2	82,3	82,3	82,2

Tabela C.7 Nível de potência sonora (dB) da superfície 60 na condição ambiental B

Frequências (Hz)	M52	M53	M54	M55	M56	M57
125	59,6	61,3	61,4	59,8	61,4	60,8
250	61,4	61,5	61,6	61,1	61,3	61,3
500	74,4	74,5	74,6	74,1	74,2	74,2
1000	81,4	81,5	81,8	81,2	81,3	81,3
2000	83,6	83,7	83,8	83,4	83,5	83,5
4000	82,9	83,0	83,1	82,6	82,8	82,8
8000	81,6	81,7	81,7	81,1	81,5	81,4

Tabela C.8 Nível de potência sonora (dB) da superfície 80 na condição ambiental B

Frequências (Hz)	M58	M59	M60	M61	M62	M63
125	51,7	50,1	51,1	50,9	51,1	52,8
250	61,8	62,0	61,8	61,8	61,6	61,7
500	74,9	74,9	74,8	74,6	74,6	74,6
1000	81,9	81,9	82,0	81,8	81,7	81,8
2000	83,7	83,7	83,8	83,6	83,5	83,5
4000	82,7	82,8	82,8	82,6	82,5	82,6
8000	81,5	81,6	81,6	81,2	81,2	81,3

Tabela C.9 Nível de potência sonora (dB) da superfície 110 na condição ambiental B

Frequências (Hz)	M64	M65	M66	M67	M68	M69
125	51,3	51,3	51,3	50,6	51,0	51,0
250	62,9	63,0	62,9	62,3	62,6	62,6
500	76,0	75,9	76,0	75,5	75,7	75,7
1000	83,5	83,4	83,4	82,6	83,0	83,1
2000	85,8	85,5	85,6	85,2	85,4	85,5
4000	84,6	84,3	84,4	84,1	84,2	84,3
8000	83,0	82,8	82,9	82,7	82,7	82,9

Tabela C.10 Nível de potência sonora (dB) da superfície 130 na condição ambiental B

Frequências (Hz)	M70	M81	M82	M83	M84	M85
125	57,0	57,0	57,0	48,1	52,5	52,5
250	62,0	61,6	61,8	62,5	62,1	62,3
500	75,9	75,9	75,9	76,1	76,0	76,0
1000	83,3	83,2	83,2	83,4	83,3	83,4
2000	85,4	85,3	85,4	85,4	85,4	85,4
4000	84,1	83,9	84,0	84,6	84,2	84,3
8000	82,4	82,4	82,4	82,9	82,6	82,6

Tabela C.11 Nível de potência sonora (dB) da superfície 40 na condição ambiental C

Frequências (Hz)	M91	M92	M93	M94	M95	M96
125	57,5	58,8	58,1	56,8	57,8	57,3
250	63,2	62,9	63,1	63,0	62,7	62,8
500	75,4	75,3	75,7	75,2	75,2	75,2
1000	82,0	82,1	82,3	82,0	81,9	82,0
2000	84,7	84,7	84,8	84,3	84,3	84,3
4000	83,9	83,8	84,0	83,7	83,6	83,6
8000	82,3	82,2	82,3	82,0	82,0	82,0

Tabela C.12 Nível de potência sonora (dB) da superfície 60 na condição ambiental C

Frequências (Hz)	M97	M98	M99	M100	M101	M102
125	54,6	56,6	60,5	54,0	56,2	58,9
250	61,0	61,0	61,0	60,8	61,1	61,2
500	73,7	73,8	73,8	73,7	74,0	73,8
1000	81,0	81,1	81,1	81,0	81,1	81,1
2000	82,9	83,1	83,0	83,0	83,2	83,3
4000	82,2	82,3	82,2	82,1	82,3	82,3
8000	80,7	80,7	80,7	80,7	80,8	80,9

Tabela C.13 Nível de potência sonora (dB) da superfície 80 na condição ambiental C

Frequências (Hz)	M103	M104	M105	M106	M107	M108
125	56,9	56,5	56,9	56,5	48,2	49,5
250	61,6	60,6	61,2	61,5	61,5	61,4
500	74,4	74,4	74,6	74,4	74,6	74,6
1000	81,6	81,7	81,7	81,5	81,7	81,6
2000	83,6	83,5	83,5	83,4	83,5	83,5
4000	82,5	82,5	82,6	82,5	82,6	82,6
8000	81,0	80,9	81,0	80,9	80,9	80,9

Tabela C.14 Nível de potência sonora (dB) da superfície 110 na condição ambiental C

Frequências (Hz)	M109	M110	M111	M112	M113	M114
125	55,3	56,1	55,7	54,8	54,6	54,7
250	64,8	64,9	64,8	64,5	64,8	64,6
500	76,6	76,9	76,7	76,3	76,6	76,4
1000	83,2	83,3	83,3	83,1	83,3	83,2
2000	85,2	85,4	85,3	85,1	85,3	85,2
4000	84,1	84,3	84,2	84,3	84,5	84,4
8000	82,7	83,0	82,8	82,5	82,8	82,7

Tabela C.15 Nível de potência sonora (dB) da superfície 130 na condição ambiental C

Freqüências (Hz)	M115	M116	M117	M118	M119	M120
125	56,0	56,0	56,0	55,6	54,7	55,2
250	65,3	65,3	65,3	64,8	64,7	64,7
500	76,9	76,9	76,9	76,8	76,7	76,8
1000	83,8	83,6	83,7	83,3	83,3	83,3
2000	85,7	85,6	85,6	85,2	85,2	85,2
4000	84,7	84,4	84,5	84,1	83,9	84,0
8000	83,2	82,9	83,0	82,6	82,4	82,5

Tabela C.16 Nível de potência sonora (dB) da superfície 40 na condição ambiental D

Freqüências (Hz)	M136	M137	M138	M139	M140	M141
125	55,9	42,2	55,6	51,1	52,9	52,8
250	76,0	77,3	77,3	76,9	75,4	76,5
500	66,7	66,8	66,9	67,1	66,8	66,2
1000	77,9	78,2	78,2	78,4	77,8	78,1
2000	84,0	84,4	84,2	84,6	83,9	84,1
4000	86,9	86,9	86,9	86,9	86,5	86,5
8000	86,9	86,9	86,8	87,0	86,4	86,5

Tabela C.17 Nível de potência sonora (dB) da superfície 60 na condição ambiental D

Freqüências (Hz)	M142	M143	M144	M145	M146	M147
125	65,6	62,0	60,4	66,0	59,9	60,5
250	64,8	65,4	65,1	64,7	64,7	64,8
500	77,6	77,7	77,4	77,7	77,1	77,3
1000	84,5	84,5	84,4	84,4	83,8	84,2
2000	86,9	87,0	87,0	86,8	86,2	86,5
4000	86,9	86,9	86,9	86,8	86,5	86,6
8000	86,1	85,9	86,1	85,8	86,0	85,9

Tabela C.18 Nível de potência sonora (dB) da superfície 80 na condição ambiental D

Freqüências (Hz)	M148	M149	M150	M151	M152	M153
125	79,4	63,2	65,7	66,8	72,7	65,5
250	64,6	64,8	64,7	65,3	65,6	65,5
500	77,7	77,7	77,7	77,6	77,9	78,2
1000	84,2	84,3	84,3	84,2	84,8	84,8
2000	86,8	86,8	86,9	86,8	87,2	87,3
4000	86,9	86,7	86,6	86,8	87,3	87,3
8000	86,0	85,9	86,1	85,9	86,4	86,7

Tabela C.19 Nível de potência sonora (dB) da superfície 110 na condição ambiental D

Freqüências (Hz)	M154	M155	M156	M157	M158	M159
125	65,2	66,0	65,5	65,1	66,0	65,3
250	66,1	66,5	66,5	66,7	66,7	67,0
500	78,8	79,3	78,9	79,6	79,3	79,7
1000	85,2	85,2	85,4	85,6	86,0	86,2
2000	87,5	87,6	87,8	88,2	88,4	88,5
4000	87,4	87,6	87,6	88,2	88,3	88,5
8000	86,6	86,9	86,8	87,7	87,6	88,2

Tabela C.20 Nível de potência sonora (dB) da superfície 130 na condição ambiental D

Frequências (Hz)	M160	M161	M162	M163	M164	M165
125	65,8	64,8	64,9	75,0	80,0	85,3
250	66,6	66,5	66,2	69,1	67,3	71,4
500	78,9	78,8	78,4	79,0	79,1	79,4
1000	85,4	85,3	84,6	84,6	85,7	85,5
2000	87,8	87,8	87,4	87,5	88,0	88,1
4000	87,7	87,7	87,2	87,5	88,0	87,9
8000	87,4	87,6	86,8	87,3	87,5	87,9

Tabela C.21 Índice pressão intensidade obtido durante o “zero teste” na superfície 40 na condição ambiental A

Frequências (Hz)	F0 M-31	F0 M32	F0 M33	F0 MÉDIA
125	6,0	7,5	-4,2	-3,1
250	11,0	-7,9	13,9	-5,7
500	-9,7	7,6	12,6	-3,5
1000	9,7	5,1	0,1	-5,0
2000	10,2	7,9	-0,7	-5,8
4000	-3,7	-4,2	10,5	-0,9
8000	-13,0	-16,7	-10,6	13,4

Tabela C.22 Índice pressão intensidade obtido durante o “zero teste” na superfície 60 na condição ambiental A

Frequências (Hz)	F0 M34	F0 M35	F0 M36	F0 MÉDIA
125	-3,1	-2,0	-1,1	2,5
250	-0,4	-1,1	1,4	0,8
500	-3,0	-2,1	-2,8	2,6
1000	-4,2	-3,3	-4,2	3,7
2000	-14,6	-0,9	-2,8	7,8
4000	0,3	0,4	0,1	-0,3
8000	-6,3	-6,9	-6,7	6,6

Tabela C.23 Índice pressão intensidade obtido durante o “zero teste” na superfície 80 na condição ambiental A

Frequências (Hz)	F0 M37	F0 M38	F0 M39	F0 MÉDIA
125	2,6	-3,18	-0,3	0,3
250	-4,0	-3,07	-3,6	3,6
500	-6,9	-2,47	-4,7	4,7
1000	-5,8	-5,55	-5,7	5,7
2000	-14,6	-7,86	-11,2	11,2
4000	-14,4	-1,53	-8,0	8,0
8000	-16,2	14,2	-1,0	1,0

Tabela C.24 Índice pressão intensidade obtido durante o “zero teste” na superfície 110 na condição ambiental A

Frequências (Hz)	F0 M40	F0 M41	F0 M42	P0 MÉDIA
125	7,5	-12,5	-2,5	2,5
250	16,7	13,5	15,1	-15,1
500	3,1	19,1	11,1	-11,1
1000	14,7	5,4	10,1	-10,1
2000	13,2	-2,9	5,1	-5,1
4000	-7,6	-9,4	-8,5	8,5
8000	-5,1	8,9	1,9	-1,9

Tabela C.25 Índice pressão intensidade obtido durante o “zero teste” na superfície 130 na condição ambiental A

Frequências (Hz)	F0 M43	F0 M44	F0 M45	P0 MÉDIA
125	-8,6	-9,5	-9,1	9,1
250	20,9	-14,9	3,0	-3,0
500	-6,8	-19,5	-13,1	13,1
1000	-12,9	3,8	-4,5	4,5
2000	-5,9	-13,2	-9,6	9,6
4000	-16,0	-7,1	-11,5	11,5
8000	13,6	-11,8	0,9	-0,9

Tabela C.26 Índice pressão intensidade obtido durante o “zero teste” na superfície 40 na condição ambiental B

Frequências (Hz)	F0- M76	F0 M77	F0 M78	F0 MÉDIA
125	4,1	-11,3	-11,3	6,2
250	-18,0	-17,1	-17,1	17,4
500	-16,0	-19,1	-19,1	18,1
1000	-16,3	-20,2	-20,2	18,9
2000	-15,6	-16,8	-16,8	16,4
4000	-13,3	-14,7	-14,7	14,2
8000	-13,4	-14,1	-14,1	13,8

Tabela C.27 Índice pressão intensidade obtido durante o “zero teste” na superfície 60 na condição ambiental B

Frequências (Hz)	F0 M79	F0 M80	F0 M81	F0 MÉDIA
125	-21,0	-12,8	-19,4	16,9
250	-25,5	-23,5	-11,2	24,5
500	-18,9	-14,8	-16,7	16,8
1000	-25,1	-18,9	-15,0	22,0
2000	-30,4	-20,4	-14,6	25,4
4000	-17,0	-17,9	-12,0	17,4
8000	-18,0	-21,4	-13,1	19,7

Tabela C.28 Índice pressão intensidade obtido durante o “zero teste” na superfície 80 na condição ambiental B

Frequências (Hz)	F0 M82	F0 M83	F0 M84	F0 MÉDIA
125	-14,2	-11,6	-12,9	12,9
250	-17,7	-18,8	-18,2	18,2
500	-18,3	-15,9	-17,1	17,1
1000	-31,0	-35,8	-33,4	33,4
2000	-18,2	-25,9	-22,1	22,1
4000	-16,8	-25,5	-21,1	21,1
8000	-17,1	-20,7	-18,9	18,9

Tabela C.29 Índice pressão intensidade obtido durante o “zero teste” na superfície 110 na condição ambiental B

Frequências (Hz)	F0 M85	F0 M86	F0 M87	P0 MÉDIA
125	10,45	-12,5	-1,0	1,0
250	-23,3	13,5	-4,9	4,9
500	22,84	19,1	21,0	-21,0
1000	21,57	5,4	13,5	-13,5
2000	22,91	-2,9	10,0	-10,0
4000	25,99	-9,4	8,3	-8,3
8000	-32,7	8,9	-11,9	11,9

Tabela C.30 Índice pressão intensidade obtido durante o “zero teste” na superfície 130 na condição ambiental B

Frequências (Hz)	F0 M88	F0 M99	F0 M90	P0 MÉDIA
125	-16,0	10,4	-2,8	2,8
250	-15,4	4,5	-5,5	5,5
500	26,1	4,0	15,1	-15,1
1000	15,7	3,5	9,6	-9,6
2000	18,7	2,8	10,7	-10,7
4000	31,3	2,4	16,9	-16,9
8000	17,4	2,3	9,9	-9,9

Tabela C.31 Índice pressão intensidade obtido durante o “zero teste” na superfície 40 na condição ambiental C

Frequências (Hz)	F0- M121	F0 M122	F0 M123	P0 MÉDIA
125	-16,1	-15,0	-15,5	15,5
250	-16,4	-19,4	-17,9	17,9
500	-15,9	-15,0	-15,5	15,5
1000	-15,3	-18,1	-16,7	16,7
2000	-15,6	-16,5	-16,0	16,0
4000	-15,5	-19,0	-17,2	17,2
8000	-14,7	-16,4	-15,5	15,5

Tabela C.32 Índice pressão intensidade obtido durante o “zero teste” na superfície 60 na condição ambiental C

Frequências (Hz)	F0 M124	F0 M125	F0 M126	F0 MÉDIA
125	-21,00	-12,78	-19,44	16,9
250	-25,54	-23,55	-11,16	24,5
500	-18,89	-14,81	-16,71	16,8
1000	-25,15	-18,93	-14,98	22,0
2000	-30,40	-20,42	-14,64	25,4
4000	-16,97	-17,91	-11,99	17,4
8000	-18,01	-21,45	-13,15	19,7

Tabela C.33 Índice pressão intensidade obtido durante o “zero teste” na superfície 80 na condição ambiental C

Frequências (Hz)	F0 M127	F0 M128	F0 M129	P0 MÉDIA
125	-23,7	-12,3	-12,4	16,1
250	-15,8	-18,3	-25,4	19,8
500	-15,2	-14,2	-17,2	15,5
1000	-43,6	-16,5	-12,5	24,2
2000	-17,0	-14,6	-12,8	14,8
4000	-12,6	-14,3	-11,2	12,7
8000	-12,7	-17,1	-10,9	13,6

Tabela C.34 Índice pressão intensidade obtido durante o “zero teste” na superfície 110 na condição ambiental C

Frequências (Hz)	F0 M130	F0 M131	F0 M132	F0 MÉDIA
125	-15,08	20,8	2,9	-2,9
250	18,91	26,87	22,9	-22,9
500	-18,33	-17,37	-17,9	17,9
1000	21,45	-29,13	-3,8	3,8
2000	19,53	-19,53	0,0	0,0
4000	-17,94	-21,92	-19,9	19,9
8000	-13,49	-16,46	-15,0	15,0

Tabela C.35 Índice pressão intensidade obtido durante o “zero teste” na superfície 130 na condição ambiental C

Frequências (Hz)	F0 M133	F0 M134	F0 M135	F0 MÉDIA
125	-10,79	-16,93	-13,9	13,9
250	16,53	15,53	16,0	-16,0
500	-21,45	-23,68	-22,6	22,6
1000	21,47	18,38	19,9	-19,9
2000	-21,3	-32,04	-26,7	26,7
4000	-20,39	-24,18	-22,3	22,3
8000	-16,35	-15,87	-16,1	16,1

Tabela C.36 Índice pressão intensidade obtido durante o “zero teste” na superfície 40 na condição ambiental D

Frequências (Hz)	F0 167	F0 168	F0 169	F0 MÉDIA
125	-10,90	-1,60	-0,50	4,3
250	7,60	6,70	7,40	-7,2
500	10,60	9,50	10,30	-10,1
1000	10,90	11,20	11,40	-11,2
2000	11,30	11,70	12,10	-11,7
4000	10,80	10,80	11,60	-11,1
8000	11,60	11,50	12,50	-11,9

Tabela C.37 Índice pressão intensidade obtido durante o “zero teste” na superfície 60 na condição ambiental D

Frequências (Hz)	F0 170	F0 171	F0 172	P0 MÉDIA
125	5,2	5,1	5,6	-5,3
250	9,1	9,5	7,8	-8,8
500	8,8	9,1	8,8	-8,9
1000	10,6	10,6	10,7	-10,6
2000	10,8	11,1	10,9	-10,9
4000	9,6	9,7	10,0	-9,8
8000	10,4	10,5	10,7	-10,5

Tabela C.38 Índice pressão intensidade obtido durante o “zero teste” na superfície 80 na condição ambiental D

Frequências (Hz)	F0 170	F0 171	F0 172	F0 MÉDIA
125	5,2	5,1	5,6	-5,3
250	9,1	9,5	7,8	-8,8
500	8,8	9,1	8,8	-8,9
1000	10,6	10,6	10,7	-10,6
2000	10,8	11,1	10,9	-10,9
4000	9,6	9,7	10,0	-9,8
8000	10,4	10,5	10,7	-10,5

Tabela C.39 Índice pressão intensidade obtido durante o “zero teste” na superfície 110 na condição ambiental C

Frequências (Hz)	F0 176	F0 177	F0 178	F0 MÉDIA
125	-5,5	-4,2	5,8	1,3
250	8,6	0,0	8,4	-5,7
500	9,8	9,7	9,5	-9,7
1000	9,9	10,1	9,7	-9,9
2000	10,4	10,4	10,6	-10,5
4000	10,4	10,2	10,3	-10,3
8000	11,5	11,3	11,4	-11,4

Tabela C.40 Índice pressão intensidade obtido durante o “zero teste” na superfície 130 na condição ambiental C

Freqüências (Hz)	F0 179	F0 180	F0 181	F0 MÉDIA
125	-4,5	8,3	-6,0	0,7
250	7,5	7,8	-3,4	-4,0
500	9,9	10,1	9,3	-9,8
1000	10,1	9,8	9,7	-9,9
2000	11,0	10,8	10,8	-10,9
4000	10,5	10,5	10,3	-10,4
8000	11,4	11,6	11,3	-11,4

Tabela C.41 Nível de potência sonora (dB) da fonte ensaiada obtido através da ISO 3743 (1999)

Freqüências (Hz)	Med-1	Med-2	Med-3	Med-4	Med-5	Med-6	Med-7
125	55,1	60,5	54,0	55,4	53,5	54,8	53,0
250	64,3	64,7	63,8	62,8	63,6	63,8	63,9
500	77,7	77,4	75,6	76,9	76,8	75,9	76,4
1000	84,9	85,4	84,5	85,3	84,7	84,4	85,1
2000	86,7	87,1	85,9	87,0	86,8	86,1	86,6
4000	87,5	87,9	86,6	87,7	87,3	87,1	88,4
8000	90,1	89,8	89,1	88,9	88,6	88,7	90,1

Tabela C.42 Nível de potência sonora (dB) da fonte ensaiada obtido através da ISO 3743-1 (1994)

Freqüências (Hz)	Med-1	Med-2	Med-3	Med-4	Med-5	Med-6	Med-7
125	55,2	56,1	53,6	53,5	56,5	54,8	53,9
250	65,2	64,9	64,8	65,4	64,1	64,8	64,3
500	77,3	77,8	77,4	77,7	78,7	76,8	78,5
1000	85,0	85,9	85,4	86,0	85,9	85,8	85,4
2000	87,6	87,9	87,7	87,5	88,3	88,0	87,7
4000	88,1	88,2	88,0	88,2	88,4	88,3	88,2
8000	89,3	89,6	89,3	89,2	89,5	89,8	89,3

Tabela C.41 Nível de potência sonora (dB) da fonte ensaiada obtido através da ISO 3743-2 (1994)

Freqüências (Hz)	Med-1	Med-2	Med-3	Med-4	Med-5	Med-6	Med-7
125	52,0	51,8	51,8	52,1	51,6	52,1	51,9
250	65,4	65,7	65,6	65,3	66,1	66,1	66,1
500	77,9	77,9	77,7	77,8	78,7	78,6	78,8
1000	85,3	85,2	85,1	85,2	86,1	86,2	86,1
2000	87,7	87,7	87,6	87,7	88,7	88,6	88,6
4000	88,6	88,6	88,4	88,5	89,4	89,4	89,5
8000	88,3	88,2	88,2	88,2	89,2	89,3	89,2

APÊNDICE D

ERROS

Neste Apêndice estão listados os erros de absorção da fonte, desarranjo de fase, quantidade de amostras e tempo de varredura para cada condição ambiental. As condições, superfícies e frequências que não constam das tabelas tiveram erro menor que 0,05 dB(A) e portanto não foram consideradas

Tabela D.1 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a absorção da fonte na superfície 40 na condição ambiental A

Frequências (Hz)	M1	M2	M3	M4	M5	M6
8000	0,24	0,25	0,22	0,25	0,25	0,26

Tabela D.2 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a absorção da fonte na superfície 60 na condição ambiental A

Frequências (Hz)	M7	M8	M9	M10	M11	M12
125	0,78	0,54	0,68	0,46	0,32	0,32
500	2,60	2,61	2,60	2,58	2,56	2,56
1000	2,08	2,11	2,13	2,08	2,07	2,07
2000	0,84	0,85	0,86	0,83	0,83	0,83
8000	1,02	1,03	1,04	1,04	1,03	1,03

Tabela D.3 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a absorção da fonte na superfície 80 na condição ambiental A

Frequências (Hz)	M13	M14	M15	M16	M17	M18
125	2,58	2,40	2,42	3,76	4,45	3,37
250	2,26	2,24	2,23	2,32	2,25	2,21
500	1,83	1,85	1,90	1,84	1,88	1,86
1000	1,51	1,50	1,54	1,55	1,57	1,55
2000	0,43	0,43	0,43	0,43	0,44	0,44
4000	0,87	0,88	0,88	0,87	0,89	0,88
8000	3,25	3,25	3,32	3,05	3,12	3,11

Tabela D.4 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a absorção da fonte na superfície 110 na condição ambiental A

Frequências (Hz)	M19	M20	M21	M22	M23	M24
4000	0,81	0,80	0,81	0,81	0,81	0,81

Tabela D.5 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a absorção da fonte na superfície 130 na condição ambiental A

Frequências (Hz)	M25	M26	M27	M28	M29	M30
125	0,03	0,03	0,03	2,31	0,28	0,28
500	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
1000	2,14	2,15	2,14	2,03	2,09	2,08
2000	0,72	0,74	0,73	0,68	0,71	0,70
4000	0,44	0,44	0,44	0,42	0,43	0,43

Tabela D.6 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a absorção da fonte superfície 40 na condição ambiental B

Freqüências (Hz)	M46	M47	M48	M49	M50	M51
125	3,51	3,07	3,29	3,53	3,30	3,52
250	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
500	0,10	0,10	0,10	0,09	0,10	0,10
1000	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
2000	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
4000	0,21	0,21	0,21	0,19	0,20	0,20
8000	0,23	0,23	0,23	0,20	0,21	0,21

Tabela D.7 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a absorção da fonte superfície 80 na condição ambiental B

Freqüências (Hz)	M58	M59	M60	M61	M62	M63
125	1,09	1,57	1,32	1,25	1,22	0,96

Tabela D.8 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a absorção da fonte superfície 110 na condição ambiental B

Freqüências (Hz)	M64	M65	M66	M67	M68	M69
8000	0,40	0,41	0,40	0,48	0,44	0,44

Tabela D.9 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a absorção da fonte superfície 40 na condição ambiental C

Freqüências (Hz)	M91	M92	M93	M94	M95	M96
125	0,76	0,69	0,76	0,88	0,74	0,81
250	0,53	0,50	0,50	0,52	0,52	0,52
500	0,51	0,54	0,53	0,56	0,56	0,56
1000	0,41	0,43	0,42	0,45	0,45	0,45
2000	0,41	0,43	0,43	0,45	0,45	0,45
4000	0,34	0,35	0,35	0,38	0,38	0,38
8000	0,40	0,43	0,43	0,47	0,46	0,47

Tabela D.10 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a absorção da fonte superfície 60 na condição ambiental C

Freqüências (Hz)	M97	M98	M99	M100	M101	M102
250	0,06	0,04	1,47	0,08	0,12	0,60
500	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,06

Tabela D.11 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a absorção da fonte superfície 80 na condição ambiental C

Freqüências (Hz)	M103	M104	M105	M106	M107	M108
125	0,42	0,92	0,42	0,92	0,69	0,57

Tabela D.12 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a absorção da fonte superfície 110 na condição ambiental C

Freqüências (Hz)	M109	M110	M111	M112	M113	M114
500	0,14	0,13	0,14	0,15	0,14	0,14
1000	2,64	2,61	2,62	2,76	2,67	2,71
4000	0,08	0,07	0,08	0,08	0,07	0,07
8000	0,23	0,22	0,23	0,23	0,22	0,22

Tabela D.13 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a absorção da fonte superfície 130 na condição ambiental C

Freqüências (Hz)	M115	M116	M117	M118	M119	M120
125	0,96	0,96	0,96	0,90	1,08	0,99

Tabela D.14 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a absorção da fonte superfície 60 na condição ambiental D

Freqüências (Hz)	M142	M143	M144	M145	M146	M147
125	0,82	0,80	0,80	0,89	0,78	0,84

Tabela D.15 Erro do nível de potência sonora (dB) devido ao desarranjo de fase na superfície 40 na condição ambiental A

Freqüências (Hz)	M1	M2	M3	M4	M5	M6
125	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Tabela D.16 Erro do nível de potência sonora (dB) devido ao desarranjo de fase na superfície 60 na condição ambiental A

Freqüências (Hz)	M7	M8	M9	M10	M11	M12
125	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07

Tabela D.17 Erro do nível de potência sonora (dB) devido ao desarranjo de fase na superfície 80 na condição ambiental A

Freqüências (Hz)	M13	M14	M15	M16	M17	M18
125	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12

Tabela D.18 Erro do nível de potência sonora (dB) devido ao desarranjo de fase na superfície 110 na condição ambiental A

Freqüências (Hz)	M19	M20	M21	M22	M23	M24
125	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
250	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
500	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
1000	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
2000	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
4000	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Tabela D.19 Erro do nível de potência sonora (dB) devido ao desarranjo de fase na superfície 130 na condição ambiental A

Freqüências (Hz)	M25	M26	M27	M28	M29	M30
125	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
250	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
500	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
1000	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
2000	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
4000	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
8000	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06

Tabela D.20 Erro do nível de potência sonora (dB) devido ao desarranjo de fase na superfície 40 na condição ambiental B

Freqüências (Hz)	M46	M47	M48	M49	M50	M51
125	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10

Tabela D.21 Erro do nível de potência sonora (dB) devido ao desarranjo de fase na superfície 60 na condição ambiental B

Freqüências (Hz)	M52	M53	M54	M55	M56	M57
125	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
250	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
500	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
1000	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Tabela D.22 Erro do nível de potência sonora (dB) devido ao desarranjo de fase na superfície 80 na condição ambiental B

Freqüências (Hz)	M58	M59	M60	M61	M62	M63
125	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
250	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
500	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
1000	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
2000	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
4000	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
8000	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Tabela D.23 Erro do nível de potência sonora (dB) devido ao desarranjo de fase na superfície 110 na condição ambiental B

Freqüências (Hz)	M64	M65	M66	M67	M68	M69
125	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
250	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
500	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
1000	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
2000	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
4000	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
8000	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09

Tabela D.34 Erro do nível de potência sonora (dB) devido ao desarranjo de fase na superfície 130 na condição ambiental B

Freqüências (Hz)	M70	M81	M82	M83	M84	M85
125	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59
250	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
500	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
1000	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
2000	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
4000	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
8000	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12

Tabela D.35 Erro do nível de potência sonora (dB) devido ao desarranjo de fase na superfície 110 na condição ambiental C

Freqüências (Hz)	M109	M110	M111	M112	M113	M114
125	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08

Tabela D.26 Erro do nível de potência sonora (dB) devido ao desarranjo de fase na superfície 130 na condição ambiental C

Freqüências (Hz)	M115	M116	M117	M118	M119	M120
125	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11

Tabela D.27 Erro do nível de potência sonora (dB) devido ao desarranjo de fase na superfície 40 na condição ambiental D

Freqüências (Hz)	M136	M137	M138	M139	M140	M141
125	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
250	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06

Tabela D.28 Erro do nível de potência sonora (dB) devido ao desarranjo de fase na superfície 60 na condição ambiental D

Freqüências (Hz)	M142	M143	M144	M145	M146	M147
125	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
250	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08

Tabela D.29 Erro do nível de potência sonora (dB) devido ao desarranjo de fase na superfície 80 na condição ambiental D

Freqüências (Hz)	M148	M149	M150	M151	M152	M153
125	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
250	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13

Tabela D.39 Erro do nível de potência sonora (dB) devido ao desarranjo de fase na superfície 110 na condição ambiental D

Freqüências (Hz)	M154	M155	M156	M157	M158	M159
125	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28
250	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25

Tabela D.30 Erro do nível de potência sonora (dB) devido ao desarranjo de fase na superfície 130 na condição ambiental D

Freqüências (Hz)	M160	M161	M162	M163	M164	M165
125	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70
250	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
2000	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Tabela D.31 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a quantidade de amostra na superfície 40 na condição ambiental A

Freqüências (Hz)	M1	M2	M3	M4	M5	M6
125	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14

Tabela D.32 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a quantidade de amostra na superfície 60 na condição ambiental A

Freqüências (Hz)	M7	M8	M9	M10	M11	M12
125	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
250	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Tabela D.33 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a quantidade de amostra na superfície 80 na condição ambiental A

Freqüências (Hz)	M13	M14	M15	M16	M17	M18
125	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
250	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06

Tabela D.34 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a quantidade de amostra na superfície 110 na condição ambiental A

Freqüências (Hz)	M19	M20	M21	M22	M23	M24
125	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
250	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09

Tabela D.35 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a quantidade de amostra na superfície 130 na condição ambiental A

Freqüências (Hz)	M25	M26	M27	M28	M29	M30
125	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
250	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10

Tabela D.36 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a quantidade de amostra na superfície 40 na condição ambiental B

Freqüências (Hz)	M46	M47	M48	M49	M50	M51
125	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
250	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09

Tabela D.37 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a quantidade de amostra na superfície 60 na condição ambiental B

Freqüências (Hz)	M52	M53	M54	M55	M56	M57
125	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
250	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09

Tabela D.38 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a quantidade de amostra na superfície 80 na condição ambiental B

Freqüências (Hz)	M58	M59	M60	M61	M62	M63
125	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
250	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
500	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Tabela D.39 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a quantidade de amostra na superfície 110 na condição ambiental B

Freqüências (Hz)	M64	M65	M66	M67	M68	M69
125	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54
250	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
500	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06

Tabela D.40 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a quantidade de amostra na superfície 130 na condição ambiental B

Freqüências (Hz)	M70	M81	M82	M83	M84	M85
125	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
250	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
500	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07

Tabela D.41 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a quantidade de amostra na superfície 80 na condição ambiental C

Freqüências (Hz)	M103	M104	M105	M106	M107	M108
125	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Tabela D.42 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a quantidade de amostra superfície 130 na condição ambiental C

Freqüências (Hz)	M115	M116	M117	M118	M119	M120
125	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11

Tabela D.43 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a quantidade de amostra na superfície 40 na condição ambiental D

Freqüências (Hz)	M136	M137	M138	M139	M140	M141
125	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51
250	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
500	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
1000	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06

Tabela D.44 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a quantidade de amostra na superfície 60 na condição ambiental D

Freqüências (Hz)	M142	M143	M144	M145	M146	M147
125	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76
250	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
500	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13

Tabela D.45 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a quantidade de amostra de amostra na superfície 80 na condição ambiental D

Freqüências (Hz)	M148	M149	M150	M151	M152	M153
125	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
250	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
500	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18

Tabela D.46 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a quantidade de amostra na superfície 110 na condição ambiental D

Freqüências (Hz)	M154	M155	M156	M157	M158	M159
125	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Tabela D.47 Erro do nível de potência sonora (dB) devido a quantidade de amostra na superfície 130 na condição ambiental D

Freqüências (Hz)	M160	M161	M162	M163	M164	M165
125	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
250	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
500	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
1000	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
2000	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08

Tabela D.48 Erro do nível de potência sonora (dB) devido ao tempo de varredura na superfície 110 na condição ambiental A

Freqüências (Hz)	M19	M20	M21	M22	M23	M24
125	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Tabela D.49 Erro do nível de potência sonora (dB) devido ao tempo de varredura na superfície 130 na condição ambiental A

Freqüências (Hz)	M25	M26	M27	M28	M29	M30
125	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06

Tabela D.50 Erro do nível de potência sonora (dB) devido ao tempo de varredura na superfície 80 na condição ambiental B

Freqüências (Hz)	M58	M59	M60	M61	M62	M63
125	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Tabela D.51 Erro do nível de potência sonora (dB) devido ao tempo de varredura na superfície 110 na condição ambiental B

Freqüências (Hz)	M64	M65	M66	M67	M68	M69
125	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
250	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Tabela D.52 Erro do nível de potência sonora (dB) devido ao tempo de varredura na superfície 130 na condição ambiental B

Freqüências (Hz)	M70	M81	M82	M83	M84	M85
125	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
250	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07

Tabela D.53 Erro do nível de potência sonora (dB) devido ao tempo de varredura na superfície 60 na condição ambiental D

Freqüências (Hz)	M142	M143	M144	M145	M146	M147
250	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Tabela D.54 Erro do nível de potência sonora (dB) devido ao tempo de varredura na superfície 130 na condição ambiental D

Freqüências (Hz)	M160	M161	M162	M163	M164	M165
125	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
250	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
500	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
1000	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
2000	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08