



METODOLOGIAS PARA MEDIÇÃO DE ISOLAMENTO SONORO EM CAMPO E
PARA EXPRESSÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO NA AVALIAÇÃO DO
DESEMPENHO ACÚSTICO DE EDIFICAÇÕES

Ranny Loureiro Xavier Nascimento Michalski

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Ricardo Eduardo Musafir

Rio de Janeiro
Setembro de 2011

METODOLOGIAS PARA MEDIÇÃO DE ISOLAMENTO SONORO EM CAMPO E
PARA EXPRESSÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO NA AVALIAÇÃO DO
DESEMPENHO ACÚSTICO DE EDIFICAÇÕES

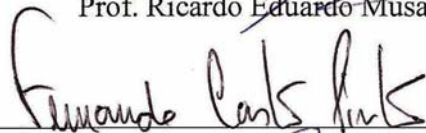
Ranny Loureiro Xavier Nascimento Michalski

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Examinada por:




Prof. Ricardo Eduardo Musafir, D.Sc.




Prof. Fernando Augusto de Noronha Castro Pinto, Dr.Ing.



Prof. Moysés Zindeluk, D.Sc.



Prof. Roberto Aizik Tenenbaum, D.Sc.



Prof. Samir Nagi Yousri Gerges, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2011

Michalski, Ranny Loureiro Xavier Nascimento

Metodologias para medição de isolamento sonoro em campo e para expressão da incerteza de medição na avaliação do desempenho acústico de edificações/ Ranny Loureiro Xavier Nascimento Michalski. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

XXI, 235 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Ricardo Eduardo Musafir

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Mecânica, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 190-197.

1. Acústica de Edificações. 2. Incerteza de Medição. I. Musafir, Ricardo Eduardo. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Mecânica. III. Título.

**À minha família,
meu bem maior sempre;
e à Sofia,
minha querida sobrinha,
que acabou de nascer.**

*‘Cantai ao Senhor um cântico novo,
ressoe o seu louvor na assembléia dos fiéis.’*

SALMO 149, 1

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelos dons da caridade, fé e esperança, e pelas maravilhas que acontecem na minha vida.

A meus pais, mãe Rose e pai Renato, e aos meus irmãos, Renan e Ramon, por tudo, sem mais nem menos. Com vocês não há incertezas.

Ao futuro pai dos meus filhos, Miguel, por seu apoio, incentivo e a certeza de que o casamento foi uma excelente escolha.

Aos meus avós maternos, Pai Elcio e Mãe Dala, meus grandes exemplos de vida.

Ao pessoal do LAENA (Laboratório de Ensaio Acústicos) do Inmetro: Daiana Ferreira, Paulo Massarani, Marco Nabuco e Ricardo Villela, pelo apoio, opiniões e receptividade. Se precisarem de uma estatística, recomendo a Daiana.

Aos estagiários do LAENA que ajudaram muito nas medições em campo, Gustavo e Vinicius e ao colega Caio. Sucesso para vocês!

Agradeço aos amigos e integrantes do LAVI (Laboratório de Acústica e Vibrações) da COPPE/UFRJ, Yuny Mar, Anderson Pessoa e Wallace Pacheco.

Ao meu orientador Ricardo Musafir por ter acreditado no meu trabalho.

Ao colega do Inmetro, Paulo Couto, da Divisão de Mecânica, por sua confiança e incentivo constantes em meu trabalho.

A toda a minha família e amigos que sempre compreenderam, respeitaram e incentivaram meus estudos e a realização deste trabalho.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo suporte e apoio financeiro ao conceder a bolsa PROMETRO de onde surgiram as primeiras incertezas necessárias a essa pesquisa.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D. Sc.).

METODOLOGIAS PARA MEDIÇÃO DE ISOLAMENTO SONORO EM CAMPO E
PARA EXPRESSÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO NA AVALIAÇÃO DO
DESEMPENHO ACÚSTICO DE EDIFICAÇÕES

Ranny Loureiro Xavier Nascimento Michalski

Setembro / 2011

Orientador: Ricardo Eduardo Musafir

Programa: Engenharia Mecânica

A fim de assegurar a confiabilidade de medições acústicas em edificações, foram estabelecidas metodologias para medição de isolamento sonoro aéreo em campo e para expressão das respectivas incertezas. Essas metodologias podem vir a ser utilizadas por profissionais qualificados para medir o desempenho acústico em edificações. Para tal, foram realizadas medições de isolamento sonoro aéreo entre salas e de fachadas, sob condições de repetitividade, com dois métodos de medição: método clássico – baseado em medições diretas dos níveis de pressão sonora – e método da função de transferência – baseado em medições de funções de transferência ou respostas impulsivas. Aos resultados das medições foram aplicados conceitos estatísticos de forma a validá-los e estimar suas incertezas considerando a propagação das incertezas e das distribuições. Os resultados obtidos mostram que as maiores contribuições para as incertezas devem-se às variações dos campos sonoros nos ambientes de teste. Baseado nos resultados obtidos, sugere-se o valor de 2 dB como incerteza de medição aceitável para os valores de desempenho acústico estabelecidos nas normas de desempenho de edificações brasileiras recentemente publicadas.

Abstract of Thesis Presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D. Sc.)

METHODOLOGIES FOR FIELD MEASUREMENT OF SOUND INSULATION
AND FOR THE EXPRESSION OF MEASUREMENT UNCERTAINTY IN THE
EVALUATION OF BUILDINGS ACOUSTIC PERFORMANCE

Ranny Loureiro Xavier Nascimento Michalski

September / 2011

Advisor: Ricardo Eduardo Musafir

Department: Mechanical Engineering

In order to ensure the reliability of building acoustic measurements, methodologies for field measurement of airborne sound insulation and for the expression of its uncertainties were established. These methodologies are likely to be used by professionals to measure the acoustic performance in buildings. With this aim, airborne sound insulation measurements between rooms and of façades were taken, under repeatability conditions, with two measurement methods: the traditional method – which is based on direct measurements of sound pressure levels – and the transfer function method – based on transfer function or impulse response measurements. Statistical concepts were applied to the measurement results in order to validate them and to estimate their uncertainties considering the propagation of both uncertainties and distributions. The results show that the largest contributions to the uncertainties are due to variations of sound fields in test environments. Based on the results, it is suggested the value of 2 dB as an acceptable measurement uncertainty to the acoustic performance values prescribed in the buildings performance standards recently published in Brazil.

ÍNDICE

	Pág.
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 – MEDIÇÕES DE ISOLAMENTO SONORO AÉREO	7
2.1 – Isolamento sonoro entre salas	7
2.1.1 – Tempo de reverberação T e área de absorção sonora equivalente A	8
2.1.2 – Diferença normalizada de nível D_n	9
2.1.3 – Diferença padronizada de nível D_{nT}	10
2.1.4 – Índice de redução sonora aparente R'	10
2.1.5 – Parâmetros de isolamento sonoro ponderados	12
2.2 – Método Clássico x Método da Função de Transferência	13
2.3 – Método Clássico: ISO 140-4	15
2.3.1 – Precisão do método	17
2.4 – Método da Função de Transferência: ISO 18233	18
2.4.1 – Resposta impulsiva e função de transferência	18
2.4.2 – Obtenção da resposta impulsiva a partir do sinal de excitação	21
2.4.3 – Medições de isolamento sonoro com o método da função de transferência	25
2.4.4 – Precisão do método da função de transferência	27
2.5 – Isolamento sonoro de fachadas	27
2.5.1 – Índice de redução sonora aparente R'_{45°	29
2.5.2 – Índice de redução sonora aparente $R'_{tr,s}$	29
2.5.3 – Diferença de nível D_{2m}	30
2.5.4 – Diferença padronizada de nível $D_{2m,nT}$	30
2.5.5 – Diferença normalizada de nível $D_{2m,n}$	30
2.6 – Medição de isolamento sonoro de fachadas com ruído de alto-falante	31
2.6.1 – Método de elemento com ruído de alto-falante	32
2.6.2 – Método global com ruído de alto-falante	33
2.7 – Medição de isolamento sonoro de fachadas com ruído de tráfego	34
2.7.1 – Método de elemento com ruído de tráfego rodoviário	34

2.7.2 – Método global com ruído de tráfego rodoviário	35
2.8 – Precisão de medições de isolamento de fachadas	35
2.9 – ISO 717 - procedimento para obter um valor único para caracterizar o isolamento	36
2.10 – Norma brasileira de desempenho de edificações	39
2.10.1 – Desempenho acústico	41
2.10.2 – Parte 1 - Requisitos gerais	42
2.10.2.1 – Requisito 1 - Isolação acústica de vedações externa	42
2.10.2.2 – Requisito 2 - Isolação acústica entre ambientes	43
2.10.2.3 – Requisito 3 - Ruídos por impactos e ruídos de equipamentos	43
2.10.3 – Parte 2 - Requisitos para sistemas estruturais	43
2.10.4 – Parte 3 - Requisitos para sistemas de pisos internos	43
2.10.4.1 – Requisito 1 - Ruído de impacto em piso	44
2.10.4.2 – Requisito 2 - Isolamento de ruído aéreo entre pisos de unidades habitacionais	44
2.10.5 – Parte 4 - Requisitos para sistemas de vedações verticais internas e externas	44
2.10.5.1 – Critério 1 - Diferença padronizada de nível ponderada promovida pela vedação externa (fachada e cobertura, no caso de casas térreas, e somente fachada, nos edifícios multipiso) em ensaio de campo	46
2.10.5.2 – Critério 2 - Índice de redução sonora ponderado dos elementos construtivos da fachada pelo ensaio de laboratório	47
2.10.5.3 – Critério 3 - Diferença padronizada de nível ponderada entre ambientes (vedações verticais internas) em ensaio de campo	47
2.10.5.4 – Critério 4 - Índice de redução sonora ponderado entre ambientes pelo ensaio de laboratório	48
2.10.6 – Parte 5 - Requisitos para sistemas de coberturas	48
2.10.6.1 – Requisito 1 - Isolação acústica da cobertura devida a sons aéreos (fontes de emissão externas)	49
2.10.6.2 – Critério 1 - Isolação acústica da cobertura devida a sons aéreos para casas térreas pelo ensaio de campo	49
2.10.6.3 – Critério 2 - Índice de redução sonora ponderado da cobertura pelo ensaio de laboratório	50
2.10.6.4 – Requisito 2 - Isolação de ruído de impacto para as coberturas acessíveis de uso coletivo	50

2.10.7 – Parte 6 - Requisitos para sistemas hidrossanitários	50
2.10.8 – Valores de incerteza admitidos	51
2.11 – Valores estabelecidos por outros países	52
CAPÍTULO 3 – INCERTEZAS EM ISOLAMENTO SONORO	53
3.1 – Documentos básicos em metrologia: VIM e GUM	53
3.2 – Incertezas em medições acústicas	55
3.2.1 – Primeiras discussões sobre incertezas em medições acústicas	56
3.2.2 – 2005 - Simpósio sobre incerteza em medições acústicas	57
3.2.3 – O avanço dos estudos no tema	59
3.3 – Inserção da presente pesquisa	62
CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA PARA EXPRESSÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO	63
4.1 – Introdução	63
4.2 – Metodologia proposta para validar os resultados das medições	65
4.3 – Estudo da distribuição dos conjuntos de repetições de medições	66
4.4 – Aplicação de critérios de rejeição	68
4.4.1 – Critério de Chauvenet	69
4.4.2 – Critério de Dixon	70
4.4.3 – Critério ou Teste de Cochran	71
4.4.4 – Critério ou Teste de Grubbs	72
4.5 – Estudo da compatibilidade entre os desvios-padrão de cada conjunto de repetições de medições	73
4.6 – Estudo da compatibilidade entre as médias de cada conjunto de repetições de medições	74
4.7 – Estimativa da incerteza de medição segundo o GUM	76
4.7.1 – Definição do mensurando	77
4.7.2 – Elaboração do diagrama causa-efeito	78
4.7.3 – Estimativas das incertezas-padrão das grandezas de entrada	78
4.7.3.1 – Avaliação Tipo A da incerteza-padrão	79
4.7.3.2 – Avaliação Tipo B da incerteza-padrão	80
4.7.4 – Cálculo dos coeficientes de sensibilidade	83

4.7.5 – Determinação dos componentes de incerteza das grandezas de entrada	83
4.7.6 – Combinação dos componentes para cálculo da incerteza-padrão combinada	84
4.7.6.1 – Método por cálculo das derivadas	84
4.7.6.2 – Método por simulação numérica	86
4.7.6.3 – Método por combinação de incertezas absolutas e relativas	87
4.7.7 – Cálculo dos graus de liberdade efetivos	88
4.7.8 – Determinação do fator de abrangência	88
4.7.9 – Estimativa da incerteza expandida	89
4.8 – Estimativa da incerteza de medição segundo o Suplemento do GUM	90
CAPÍTULO 5 – PRECISÃO SEGUNDO A ISO 140-2	95
5.1 – Introdução	95
5.2 – Valores de repetitividade r e valores de reprodutibilidade R	96
5.3 – Verificação dos valores r e R	100
5.4 – Intervalos de confiança a partir dos valores r e R	101
CAPÍTULO 6 – MEDIÇÕES REALIZADAS	102
6.1 – Medições de isolamento sonoro entre salas	102
6.2 – Instrumentação	104
6.2.1 – Sistema de geração e aquisição	106
6.2.2 – Posições dos microfones e da fonte sonora	108
6.3 – Medições realizadas com o método clássico	111
6.4 – Medições realizadas com o método da função de transferência	112
6.5 – Comparação entre o método da função de transferência e o método clássico – isolamento sonoro entre salas	114
6.6 – Parâmetros medidos com o método da função de transferência – isolamento sonoro entre salas	118
6.7 – Medições de isolamento sonoro de fachadas	122
6.7.1 – Posições dos microfones e da fonte sonora	124
6.8 – Comparação entre o método da função de transferência e o método clássico – isolamento sonoro de fachadas	129
6.9 – Parâmetros medidos com o método da função de transferência – isolamento sonoro de fachadas	133

CAPÍTULO 7 – ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA ISOLAMENTO SONORO ENTRE SALAS	136
7.1 – Introdução	136
7.2 – Estudo da distribuição dos conjuntos de repetições de medições	137
7.3 – Aplicação de critérios de rejeição	137
7.4 – Compatibilidade entre os desvios-padrão de cada conjunto de repetições	137
7.5 – Estudo da compatibilidade entre as médias de cada conjunto de repetições	139
7.6 – Obtenção da precisão segundo a ISO 140-2	140
7.7 – Estimativa da incerteza de medição de D_{nT} segundo o GUM	142
7.7.1 – Definição do mensurando	142
7.7.2 – Elaboração do diagrama causa-efeito	142
7.7.3 – Estimativas das incertezas-padrão das grandezas de entrada	143
7.7.3.1 – Incerteza referente às grandezas de entrada L_E e L_R e H_E e H_R	143
7.7.3.2 – Incerteza referente ao tempo de reverberação na sala receptora T	147
7.7.3.3 – Incerteza referente às condições ambientais	149
7.7.4 – Cálculo dos coeficientes de sensibilidade	149
7.7.5 – Determinação dos componentes de incerteza	149
7.7.6 – Combinação dos componentes para cálculo da incerteza-padrão combinada	150
7.7.7 – Cálculo dos graus de liberdade efetivos	152
7.7.8 – Determinação do fator de abrangência	153
7.7.9 – Estimativa da incerteza expandida	154
7.8 – Estimativa da incerteza de medição de D_{nT} pela “lei de propagação da distribuição”	159
7.9 – Comparação dos resultados obtidos pela “lei de propagação da incerteza” e pela “lei de propagação da distribuição”	161
CAPÍTULO 8 – ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA ISOLAMENTO SONORO DE FACHADAS	164
8.1 – Introdução	164
8.2 – Estudo da distribuição dos conjuntos de repetições de medições	164
8.3 – Aplicação de critérios de rejeição	165
8.4 – Compatibilidade entre os desvios-padrão de cada conjunto de repetições	165

8.5 – Estudo da compatibilidade entre as médias de cada conjunto de repetições	167
8.6 – Estimativa da incerteza de medição de $D_{ls,2m,nT}$ segundo o GUM	168
8.6.1 – Definição do mensurando	168
8.6.2 – Elaboração do diagrama causa-efeito	169
8.6.3 – Estimativas das incertezas-padrão das grandezas de entrada	169
8.6.3.1 – Incerteza referente às grandezas de entrada L_E e L_R e H_E e H_R	169
8.6.3.2 – Incerteza referente ao tempo de reverberação na sala receptora T	172
8.6.3.3 – Incerteza referente às condições ambientais	174
8.6.4 – Cálculo dos coeficientes de sensibilidade	174
8.6.5 – Determinação dos componentes de incerteza	175
8.6.6 – Combinação dos componentes para cálculo da incerteza-padrão combinada	175
8.6.7 – Cálculo dos graus de liberdade efetivos	177
8.6.8 – Determinação do fator de abrangência	177
8.6.9 – Estimativa da incerteza expandida	178
8.7 – Estimativa da incerteza de medição de $D_{ls,2m,nT}$ pela “lei de propagação da distribuição”	181
CAPÍTULO 9 – CONCLUSÕES	184
9.1 – Medições de isolamento sonoro aéreo entre salas e de fachadas	184
9.2 – Valor de incerteza sugerido para as normas de desempenho brasileiras	188
9.3 – Considerações finais e sugestões para trabalhos futuros	188
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	190
APÊNDICES	198

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1.1 - Ilustração de ruído propagado no ar e na estrutura	2
1.2 - Tipos de ondas nos sólidos	2
2.1 - Medição de isolamento sonoro aéreo entre ambientes	7
2.2 - Transmissão sonora entre salas	11
2.3 - Sistema linear	19
2.4 - Procedimentos para obter o decaimento do nível de pressão sonora - ISO 18233	21
2.5 - <i>Sweep</i> linear e <i>sweep</i> logarítmico, mostrados no domínio do tempo e da frequência	23
2.6 - Esquema da obtenção da resposta impulsiva da sala	24
2.7 - Geometria do método de alto-falante	31
2.8 - Medição de isolamento sonoro aéreo de fachada com alto-falante	33
2.9 - Curva de valores de referência para som aéreo em bandas de terço de oitava antes e após ser deslocada, com um exemplo de curva medida	38
3.1 - Capas da 1ª edição brasileira do VIM 2008 e da 3ª edição brasileira do GUM	53
4.1 - Critério de Chauvenet	69
4.2 - Conjuntos de medições e seus desvios-padrão combinados	74
4.3 - Propagação de incertezas para três grandezas de entrada	78
4.4 - Diagrama causa-efeito da medição do mensurando y	78
4.5 - Distribuição retangular	81
4.6 - Distribuição triangular	82
4.7 - Distribuição normal com 95,45% de probabilidade de abrangência	82
4.8 - Exemplo de balanço de incerteza	84
4.9 - Propagação de distribuições para três grandezas de entrada	92
6.1 - Vista externa dos cômodos medidos da edificação em Xerém	103
6.2 - Sala de aula no prédio 6, no campus do Inmetro	103
6.3 - Laboratório no prédio 6, no campus do Inmetro	103
6.4 - Sala de aula no CECO, em Xerém	103
6.5 - Sala de aula do LAVI, na COPPE	104
6.6 - Esquema de medição com o método clássico	105
6.7 - Esquema de medição com o método da função de transferência	105

6.8 - a) Pré-amplificador e microfone. b) Calibrador de nível sonoro	105
6.9 - Analisador <i>Norsonic</i> RTA 840 (método clássico)	106
6.10 - Computador e placa PCI do sistema <i>Hammerfall DSP Multiface</i>	107
6.11 - Caixa de entrada-saída do <i>Multiface RME Hammerfall DSP</i>	107
6.12 - Condicionador de sinais <i>Larson Davis</i> 2210 (método da função de transferência)	107
6.13 - Fonte sonora (dodecaedro com <i>subwoofer</i>)	108
6.14 - Amplificador <i>Camco</i>	108
6.15 - Esquema de posições em medições no local 1, dimensões em metros	110
6.16 - Esquema de posições em medições no local 2, dimensões em metros	110
6.17 - Esquema de posições em medições no local 3, dimensões em metros	110
6.18 - Esquema de posições em medições no local 4, dimensões em metros	111
6.19 - Esquema de posições em medições no local 5, dimensões em metros	111
6.20 - Termohigrômetro	112
6.21 - Sinal de excitação utilizado, no tempo e no domínio da frequência	113
6.22 - Comparação entre diferenças de nível obtidas pelos métodos no local 1	114
6.23 - Tempos de reverberação da sala receptora do local 1 pelos dois métodos	115
6.24 - Índices de redução sonora R' obtidos no local 1 com os dois métodos	116
6.25 - Diferenças normalizadas de nível D_n obtidas no local 1	116
6.26 - Diferenças padronizadas de nível D_{nT} obtidas no local 1	117
6.27 - Diferenças de níveis D entre as salas nos cinco ambientes de teste	118
6.28 - Tempos de reverberação das salas receptoras	119
6.29 - R' , D_n e D_{nT} medidos no local de teste 1	119
6.30 - R' , D_n e D_{nT} medidos no local de teste 2	120
6.31 - R' , D_n e D_{nT} medidos no local de teste 3	120
6.32 - R' , D_n e D_{nT} medidos no local de teste 4	121
6.33 - R' , D_n e D_{nT} medidos no local de teste 5	121
6.34 - Vista externa da fachada medida da edificação, local 1	123
6.35 - Vista externa da fachada medida da edificação, local 2	123
6.36 - Vista externa da fachada medida da edificação, local 3	123
6.37 - Vista externa da fachada medida da edificação, local 4	124
6.38 - Esquema de posições em medições no local 1, dimensões em metros	125
6.39 - Esquema de posições em medições no local 2, dimensões em metros	126
6.40 - Esquema de posições em medições no local 3, dimensões em metros	126
6.41 - Esquema de posições em medições no local 4, dimensões em metros	126

6.42 - Medição de isolamento sonoro global de fachada com alto-falante, local 1	127
6.43 - Medição de isolamento sonoro global de fachada com alto-falante, local 2	127
6.44 - Medição de isolamento sonoro global de fachada com alto-falante, local 3	128
6.45 - Medição de isolamento sonoro global de fachada com alto-falante, local 4	128
6.46 - $D_{ls,2m}$ da fachada do local 1 obtida com ruído branco e ruído rosa	129
6.47 - Comparação entre diferenças de nível obtidas pelos métodos no local 1	130
6.48 - Tempo de reverberação da sala receptora obtido pelo método da função de transferência	131
6.49 - $D_{ls,2m,nT}$ e $D_{ls,2m,n}$ da fachada do local 1 obtidas pelos dois métodos	132
6.50 - Diferenças de níveis $D_{ls,2m}$ entre as salas nos quatro ambientes de teste	133
6.51 - Tempos de reverberação das salas receptoras	133
6.52 - $D_{ls,2m,nT}$ e $D_{ls,2m,n}$ medidos no local de teste 2	134
6.53 - $D_{ls,2m,nT}$ e $D_{ls,2m,n}$ medidos no local de teste 3	134
6.54 - $D_{ls,2m,nT}$ e $D_{ls,2m,n}$ medidos no local de teste 4	135
7.1 - Desvios-padrão combinados s_p de D_{nT} na banda de 1/3 de oitava de 500 Hz	139
7.2 - Médias combinadas de D_{nT} na banda de 1/3 de oitava de 500 Hz	140
7.3 - Desvios-padrão de $s_x (R')$ para os cinco locais e os valores limites mr	141
7.4 - Diagrama causa-efeito do mensurando D_{nT} para os dois métodos	143
7.5 - Balanço de incerteza para o método clássico em 500 Hz	151
7.6 - Balanço de incerteza para o método da função de transferência em 500 Hz	152
7.7 - Incertezas expandidas de D_{nT} para os dois métodos	155
7.8 - Incertezas expandidas de D_{nT} para os cinco locais de teste	156
7.9 - Incertezas expandidas de D_{nT} estimadas pelo Método de Monte Carlo para os cinco locais de teste	161
7.10 - Incertezas expandidas de D_{nT} , para os dois métodos de medição utilizados no local 1, obtidas pelas duas metodologias aplicadas	162
7.11 - Incertezas expandidas de D_{nT} , para os outros quatro locais de teste, obtidas pelas duas metodologias aplicadas	162
8.1 - Desvios-padrão combinados s_p de $D_{ls,2m,nT}$ na banda de 1/3 de oitava de 500 Hz	167
8.2 - Médias combinadas de $D_{ls,2m,nT}$ na banda de 1/3 de oitava de 500 Hz	168
8.3 - Diagrama causa-efeito do mensurando $D_{ls,2m,nT}$ para os dois métodos	169
8.4 - Balanço de incerteza para o método da função de transferência em 500 Hz	176
8.5 - Incertezas expandidas de $D_{ls,2m,nT}$ para três locais de teste	179

8.6 - Incertezas expandidas de $D_{ls,2m,nT}$ estimadas pelo Método de Monte Carlo em função da frequência para três locais de teste

182

LISTA DE TABELAS

	Pág.
2.1 - Distâncias mínimas exigidas pela ISO 140-4 para medições de isolamento sonoro aéreo entre salas	16
2.2 - Arranjos de medição estabelecidos na ISO 140-14	17
2.3 - Visão geral dos diferentes métodos de medição	28
2.4 - Distâncias mínimas exigidas pela ISO 140-5 para medições na sala receptora	29
2.5 - Valores de referência para som aéreo em bandas de terço de oitava	37
2.6 - $D_{nT,w}$ para ensaio em campo e R_w para ensaio em laboratório	44
2.7 - $D_{2m,nT,w}$ da vedação externa para ensaio em campo	47
2.8 - R_w da fachada para ensaio em laboratório	47
2.9 - $D_{nT,w}$ entre ambientes para ensaio em campo e R_w dos componentes construtivos para ensaio em laboratório	48
2.10 - $D_{2m,nT,w}$ da vedação externa para ensaio em campo	50
2.11 - R_w da cobertura para ensaio em laboratório	50
2.12 - Critérios internacionais para isolamento sonoro entre ambientes	52
4.1 - Razão de desvio-padrão DR_0 em função do número de medições n	70
4.2 - Número de medições n e r_{ij} calculado para o critério de Dixon	71
4.3 - Equações de r_{ij} calculado para x_n e x_l suspeitos	71
4.4 - Determinação do fator de abrangência: Tabela t de <i>Student</i> ($v_{ef} \times k_{95\%}$)	89
5.1 - Valores de r e R extraídos das Tabelas A.1, A.2 e A.3 da ISO 140-2	98
5.2 - Fator m em função do número de medições n_x	100
6.1 - Ambientes de teste	102
6.2 - Características dos microfones capacitivos <i>Larson Davis 2559</i> de ½"	106
6.3 - Detalhes das dimensões dos ambientes de teste	109
6.4 - Índices ponderados obtidos para o local 1 com os dois métodos	117
6.5 - Valores ponderados para os cinco ambientes de teste	122
6.6 - Ambientes de teste	122
6.7 - Detalhes das dimensões dos ambientes de teste	125
6.8 - Índices ponderados obtidos para o local 1 com os dois métodos	132
6.9 - Valores ponderados para os quatro ambientes de teste	135

7.1 - Número de valores de D_{nT} rejeitados	137
7.2 - Valores obtidos para s_p de D_{nT} para os cinco locais ensaiados	138
7.3 - Valores de r , mr (para $n = 5$ e $n = 6$) e $s_x(R')$ para os cinco locais, em dB	141
7.4 - Incertezas-padrão de L_E , L_R , H_E e H_R relativas à repetitividade	145
7.5 - Incertezas-padrão combinadas de L_E , L_R , H_E e H_R	146
7.6 - Incertezas-padrão de T relativas à repetitividade para os dois métodos	147
7.7 - Incertezas-padrão combinadas de T para os dois métodos	148
7.8 - Coeficientes de sensibilidade para os métodos utilizados	149
7.9 - Componentes de incerteza para os métodos utilizados	150
7.10 - D_{nT} e estimativa de sua incerteza-padrão combinada para os dois métodos	151
7.11 - Graus de liberdade efetivos para os dois métodos	153
7.12 - Fatores de abrangência para os dois métodos	153
7.13 - Incertezas expandidas de D_{nT} para os dois métodos	154
7.14 - Valores ponderados das incertezas expandidas de D_{nT} , $U_w(D_{nT})$, em dB, para os cinco locais de teste	156
7.15 - Balanço de incerteza para o método clássico na banda de terço de oitava de 500 Hz	157
7.16 - Balanço de incerteza para o método da função de transferência na banda de terço de oitava de 500 Hz	158
7.17 - Distribuições de probabilidade atribuídas às fontes de incerteza das grandezas de entrada para os métodos clássico e da função de transferência.	159
7.18 - Incertezas expandidas de D_{nT} estimadas pelo Método de Monte Carlo	160
7.19 - Valores ponderados das incertezas expandidas de D_{nT} , $U_w(D_{nT})$, em dB, estimadas pelo Método de Monte Carlo, para os cinco locais de teste	161
8.1 - Número de valores de $D_{1s,2m,nT}$ rejeitados	165
8.2 - Valores obtidos para s_p de $D_{1s,2m,nT}$ para os quatro locais ensaiados	166
8.3 - Incertezas-padrão de $H_{1,2m}$ e H_2 , relativas à repetitividade	171
8.4 - Incertezas-padrão combinadas de $H_{1,2m}$ e H_2	172
8.5 - Incertezas-padrão de T relativas à repetitividade	173
8.6 - Incertezas-padrão combinadas de T	174
8.7 - Coeficientes de sensibilidade para os métodos utilizados	174
8.8 - Componentes de incerteza para os métodos utilizados	175
8.9 - $D_{1s,2m,nT}$ e estimativa de sua incerteza-padrão combinada	176
8.10 - Graus de liberdade efetivos	177

8.11 - Fatores de abrangência	177
8.12 - Incertezas expandidas de $D_{ls,2m,nT}$	178
8.13 - Valores ponderados das incertezas expandidas de $D_{ls,2m,nT}$, $U_w (D_{ls,2m,nT})$, em dB, para três locais de teste	179
8.14 - Balanço de incerteza para o método da função de transferência na banda de terço de oitava de 500 Hz	180
8.15 - Distribuições de probabilidade atribuídas às fontes de incerteza das grandezas de entrada para os métodos clássico e da função de transferência	181
8.16 - Incertezas expandidas de $D_{ls,2m,nT}$ estimadas pelo Método de Monte Carlo	182
8.17 - Valores ponderados das incertezas expandidas de $D_{ls,2m,nT}$, $U_w (D_{ls,2m,nT})$, em dB, estimadas pelo Método de Monte Carlo, para três locais de teste	183
9.1 - $D_{nT,w}$ e $U_w (D_{nT})$, em dB, para os cinco locais de teste.	186
9.2 - $D_{ls,2m,nT,w}$ e $U_w (D_{ls,2m,nT})$, em dB, para os quatro locais de teste.	187

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Nas grandes cidades e áreas urbanas, a poluição sonora é um problema importante. Ruído devido a tráfego, vizinhos, máquinas, indústrias, atividades comerciais e recreativas ou outras fontes incomoda e prejudica a qualidade de vida. A exposição prolongada a altos níveis de ruído pode causar danos à saúde, desde efeitos psicológicos à perda auditiva. Portanto, a qualidade acústica de um ambiente é um fator crucial para o bem estar e o conforto da população.

No Brasil, duas normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) abordam o tema “ruído” visando ao conforto acústico da população: a NBR 10151 [1], que fixa condições para medição de ruído em áreas habitadas e determina critérios para avaliação ou aceitabilidade do ruído em comunidades de acordo com o tipo de área habitada, e a NBR 10152 [2], que fornece limites aceitáveis de níveis de ruído para conforto acústico em vários ambientes em função da atividade realizada.

A energia sonora produzida numa dada sala de uma edificação não permanece exclusivamente nesse ambiente, mas se propaga por toda a edificação por qualquer caminho disponível e pode chegar a outros ambientes como ruído. A transmissão pode ser direta (através de elementos de separação entre as salas) ou indireta (através de paredes laterais, teto e chão). A energia sonora pode ser transmitida pelo ar através de ondas longitudinais (a vibração das partículas de ar ocorre na mesma direção da propagação da onda), ou por meio sólido, quando a propagação ocorre em uma estrutura da edificação, através de vários tipos de ondas (longitudinal, de cisalhamento, torsional, de flexão). A Figura 1.1 ilustra propagações de ruído via ar e via estrutura e a Figura 1.2, os tipos de ondas nos sólidos.

Uma edificação em particular pode ser afetada por diversas fontes de ruído, internas ou externas à mesma. Exemplos de ruídos internos são aqueles causados por conversas, passos, rádio, televisão, casas de máquinas, elevadores, etc. Fontes de ruído externas podem ser tráfego rodoviário, ferroviário ou aéreo, estabelecimentos comerciais, estabelecimentos industriais, etc.

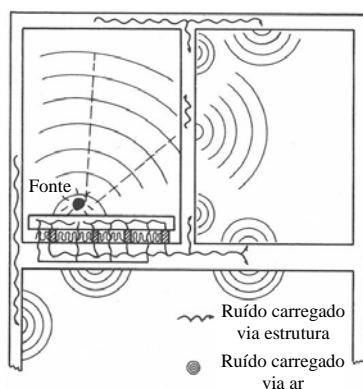


Figura 1.1 - Ilustração de ruído propagado no ar e na estrutura [3].

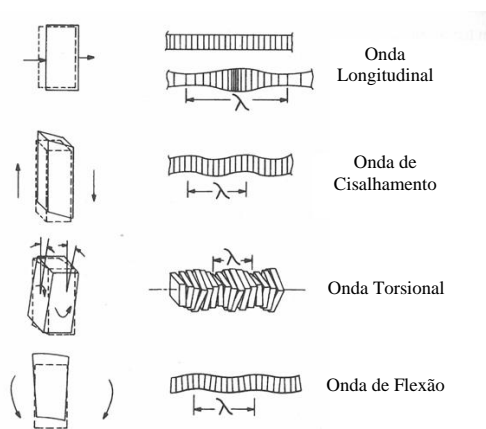


Figura 1.2 - Tipos de ondas nos sólidos [3].

Para se obter um bom desempenho acústico entre ambientes, busca-se atenuar a transmissão de energia sonora de um ambiente para outro, ou seja, obter isolamento sonoro aéreo ou de impacto, através de pisos, paredes ou divisórias comuns. O isolamento sonoro entre ambientes ocorre quando há uma redução significativa da passagem de som de um ambiente para outro. Diversos tipos de materiais podem ser usados para proporcionar ou melhorar esse isolamento.

Recentemente, o Comitê Brasileiro da Construção Civil (COBRACON) elaborou um conjunto de normas para a avaliação do desempenho de edificações de até cinco pavimentos, composto de seis partes, cujo título é “ABNT NBR 15575, *Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho*” [4]. As normas foram publicadas pela ABNT no ano de 2008 e passariam, em princípio, a ser válidas a partir de maio de 2010, entrando em vigor em novembro de 2010. Entretanto, às vésperas de tornarem-se obrigatórias, as normas tiveram seu prazo de obrigatoriedade de cumprimento adiado

para março de 2012. Vários itens são considerados nas normas, tais como desempenho estrutural, térmico, lumínico e o desempenho acústico. Este último abrange uma série de tópicos, entre eles: isolamento de ruídos aéreo e estrutural, isolamento sonoro de vedações externas, coberturas e fachadas e entre ambientes. Valores mínimos, intermediários e superiores são apresentados para alguns parâmetros de isolamento sonoro.

Para medições de isolamento sonoro, as normas brasileiras adotam a série de normas internacionais ISO 140 [5] e a norma ISO 10052 [6]. As medições podem ser realizadas em laboratório ou em campo. As partes 3 e 4 da ISO 140 abordam medições de isolamento sonoro aéreo entre salas em laboratório e em campo, respectivamente. A parte 5 considera medições em campo de isolamento sonoro aéreo de elementos de fachadas e de fachadas. As partes 6 e 7 abordam medições de isolamento sonoro de impacto de pisos em laboratório e em campo, respectivamente. Já a ISO 10052 descreve um método simplificado para medições em campo de isolamento sonoro aéreo e de impacto.

As medições de isolamento sonoro aéreo podem ser realizadas com três técnicas diferentes: o método chamado clássico, bastante utilizado mundialmente, que baseia-se em medições diretas dos níveis de pressão sonora e é descrito na ISO 140 [5]; um método mais novo, ainda pouco utilizado, baseado em medições de funções de transferência ou respostas impulsivas e abordado na ISO 18233 [7]; e o terceiro método, que utiliza medições de intensidade sonora e é descrito na ISO 15186 [8].

Embora os parâmetros de isolamento sonoro medidos de acordo com a norma ISO 140 [5] dependam da frequência, eles podem ser expressos por valores ponderados ou globais determinados a partir dos valores individuais para as diversas bandas de frequência. Esses valores ponderados são números únicos (independentes da frequência) obtidos de acordo com o procedimento descrito nas partes 1 e 2 da ISO 717 [9], [10].

Com a publicação da série de normas brasileiras de desempenho de edificações, a demanda por medições acústicas em edificações está aumentando e, a partir do momento em que as normas entrarem em vigor, essa demanda tende a aumentar cada vez mais. Portanto, profissionais deverão estar capacitados para realizar tais medições e surgirá uma nova necessidade: Como os consumidores, potenciais proprietários de um imóvel, poderão comparar os resultados do desempenho de diferentes edificações fornecidos por diferentes profissionais? Quais são as incertezas dessas medições? Medições realizadas por diferentes profissionais devem ser comparáveis entre si e com

os valores estabelecidos nas normas. Para que essa comparação seja possível, a incerteza dos resultados das medições deve ser expressa.

Todo resultado de medição deve ser expresso com a sua incerteza, que é a indicação quantitativa da qualidade dos resultados da medição e sem a qual os mesmos não podem ser comparados entre si ou com valores de referência estabelecidos. O documento internacional que padroniza como avaliar a incerteza do resultado de uma medição é o *Guia para a Expressão da Incerteza em Medição*, publicado como a norma ISO/IEC Guide 98 [11] e conhecido como GUM devido ao inglês “*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*”. O GUM já está em sua terceira edição brasileira [12], de agosto de 2003, publicada pela ABNT e pelo Inmetro (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial), mas sua versão internacional mais recente [11] é do ano de 2008.

Infelizmente, em acústica em geral, e particularmente em acústica de edificações, não há um procedimento completamente estabelecido usado em larga escala para se avaliar as incertezas das medições. A parte 2 da norma ISO 140 [13] aborda o tema “precisão” e apresenta algumas estimativas de incertezas baseadas em testes de repetitividade e de reprodutibilidade realizados em alguns laboratórios, mas não baseadas no GUM [11].

A globalização atual torna necessário que o método para avaliar e expressar a incerteza de medição seja uniforme em todo o mundo, de forma que as medições realizadas em países diferentes possam ser facilmente comparadas, assim como as propriedades acústicas de materiais fornecidas por diversos fabricantes. O GUM cita que pode ser necessário desenvolver normas específicas “*que tratem dos problemas peculiares a campos específicos de medição ou às várias utilidades das expressões quantitativas da incerteza*”. Essas normas específicas podem ser versões simplificadas do GUM e devem incluir detalhes apropriados ao nível de exatidão e de complexidade das medições e usos de interesse. Este é o caso da acústica de edificações.

A abordagem do GUM baseia-se na propagação das incertezas para obter a estimativa da incerteza de medição, mas apresenta algumas limitações. O método de simulação de Monte Carlo, descrito no Suplemento 1 do GUM [14] publicado em 2008, é um método alternativo ao da propagação das incertezas e utiliza a propagação de distribuições para estimar a incerteza.

Expressar a incerteza de medição é necessário. Entretanto, a incerteza sozinha não qualifica o resultado de uma medição. Anteriormente à avaliação da incerteza é

necessário validar as medições realizadas com o objetivo de assegurar a sua confiabilidade metrológica. O presente trabalho estabelece uma metodologia baseada em conceitos estatísticos de forma a evidenciar a confiabilidade metrológica dos resultados de medição.

Diante da situação atual, com poucos trabalhos abordando o tema, e da escassez de resultados disponíveis, a presente pesquisa visa a contribuir para a disseminação dos assuntos confiabilidade metrológica e incerteza de medição na área de acústica de edificações, aplicando os mesmos a medições de isolamento sonoro aéreo entre salas e de fachadas.

Os objetivos desta pesquisa são aplicar os métodos clássico e da função de transferência em medições de isolamento sonoro aéreo e estabelecer uma metodologia para a estimativa da incerteza dessas medições que venha a ser usada por profissionais considerados qualificados para medir o desempenho acústico em edificações.

A pesquisa consistiu nas seguintes etapas:

- Realizar medições em campo (*in situ*) de isolamento sonoro aéreo entre salas e de fachadas com o método clássico;
- Desenvolver um procedimento de medição de isolamento sonoro aéreo entre salas e de fachadas utilizando o método da função de transferência;
- Realizar medições em campo de isolamento sonoro aéreo entre salas e de fachadas com o método da função de transferência;
- Propor uma metodologia baseada em conceitos estatísticos que possibilite estabelecer a confiabilidade metrológica dos resultados medidos;
- Estimar a incerteza de medição em isolamento sonoro de acordo com o GUM;
- Estimar a incerteza de medição em isolamento sonoro de acordo com o método de simulação de Monte Carlo;
- Comparar os valores das estimativas da incerteza de medição obtidos através das metodologias do GUM e do método de Monte Carlo;
- Avaliar os valores das estimativas da incerteza de medição de modo a propor uma incerteza ou alguma tolerância aos valores de isolamento sonoro estabelecidos nas normas brasileiras de desempenho.

Para isto, são apresentados, no Capítulo 2, os procedimentos de medição dos parâmetros de isolamento sonoro aéreo em campo entre salas e de fachadas, de acordo com as normas ISO 140-4 [15] e ISO 140-5 [16], respectivamente. Os métodos de medição clássico e da função de transferência são descritos, seguidos por uma breve

explicação de como determinar os valores únicos dos parâmetros de isolamento conforme a ISO 717-1 [9]; o capítulo também apresenta um resumo dos requisitos e critérios de desempenho acústico estabelecidos na norma de desempenho brasileira para edifícios de até cinco pavimentos [4] e alguns valores estabelecidos por outros países.

O Capítulo 3 descreve dois documentos essenciais em metrologia, o Vocabulário Internacional de Metrologia [17], conhecido como VIM, e o Guia para a Expressão da Incerteza em Medição [11], GUM, e apresenta uma revisão bibliográfica sobre o tema incerteza em medições de isolamento sonoro.

O Capítulo 4 apresenta, inicialmente, definições de conceitos estatísticos, e, em seguida, a metodologia proposta para evidenciar a confiabilidade metrológica das medições realizadas no trabalho. Essa metodologia aborda desde a validação dos resultados obtidos até a estimativa da incerteza de medição desses resultados de acordo com o GUM [11] e com o seu suplemento [14].

O Capítulo 5 apresenta o procedimento para verificar a precisão das medições de isolamento sonoro descrito na parte 2 da ISO 140 [13].

O Capítulo 6 descreve as medições realizadas e os resultados obtidos, que são então avaliados através de testes estatísticos e estimativas das suas incertezas para medições de isolamento sonoro aéreo entre salas, no Capítulo 7, e para medições de isolamento sonoro aéreo de fachadas, no Capítulo 8.

Por fim, o Capítulo 9 apresenta as conclusões do trabalho.

CAPÍTULO 2

MEDIÇÕES DE ISOLAMENTO SONORO AÉREO

2.1. Isolamento sonoro entre salas

Nas medições de isolamento sonoro entre duas salas, uma das salas é considerada a sala emissora, na qual o som é gerado, e a outra sala, a sala receptora, conforme ilustrado na Figura 2.1.

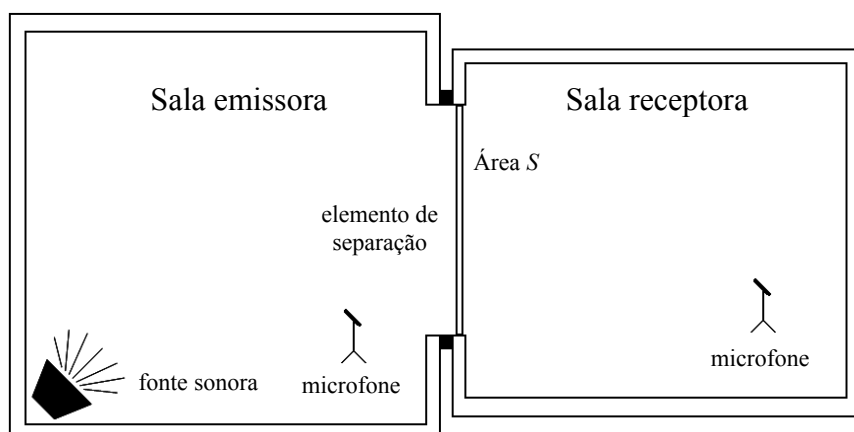


Figura 2.1 - Medição de isolamento sonoro aéreo entre ambientes.

A medição é realizada gerando-se um sinal de excitação na sala emissora e medindo-se a diferença de nível D em diferentes bandas de frequência (oitavas ou terço de oitavas) entre as salas, em dB:

$$D(f) = L_E(f) - L_R(f) , \quad (2.1)$$

onde $L_E(f)$ e $L_R(f)$ são os níveis de pressão sonora médios na sala emissora e na sala receptora nas bandas consideradas.

O nível de pressão sonora médio numa sala $L_{\text{médio}}(f)$, em dB, é o nível correspondente à média espacial e temporal do valor médio quadrático da pressão sonora na sala, na banda considerada, expresso por:

$$L_{\text{m\u00e9dio}}(f) = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{L_j/10} \right), \quad (2.2)$$

onde L_j \u00e9 o n\u00edvel de press\u00e3o sonora equivalente na sala medido durante um intervalo de tempo fixo numa das n posi\u00e7\u00f5es diferentes.

A diferen\u00e7a de n\u00edvel D entre as salas tamb\u00e9m pode ser calculada a partir da diferen\u00e7a logar\u00edtmica entre as fun\u00e7\u00f5es de transfer\u00eancia ac\u00fastica m\u00e9dias na sala emissora e na sala receptora, $H_E(f)$ e $H_R(f)$, respectivamente:

$$D(f) = 10 \log \left(|H_E(f)|^2 \right) - 10 \log \left(|H_R(f)|^2 \right). \quad (2.3)$$

A fun\u00e7\u00e3o de transfer\u00eancia ac\u00fastica m\u00e9dia $H_{\text{m\u00e9dia}}(f)$ numa sala \u00e9 dada por:

$$H_{\text{m\u00e9dia}}(f) = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{H_j/10} \right) \quad (2.4)$$

onde H_j \u00e9 a m\u00e9dia temporal da fun\u00e7\u00e3o de transfer\u00eancia ac\u00fastica medida durante um intervalo de tempo fixo numa das n posi\u00e7\u00f5es diferentes na sala. Fun\u00e7\u00e3o de transfer\u00eancia \u00e9 a representa\u00e7\u00e3o matem\u00e1tica da rela\u00e7\u00e3o entre a entrada e a sa\u00edda de um sistema linear. A fun\u00e7\u00e3o de transfer\u00eancia ac\u00fastica num ponto de uma sala ser\u00e1 discutida em detalhes no item 2.4, mas, resumidamente, corresponde \u00e0 rela\u00e7\u00e3o entre a entrada “ac\u00fastica” da sala e a sa\u00edda “ac\u00fastica” da sala no ponto. A entrada corresponde \u00e0 fonte sonora e inclui o sistema de gera\u00e7\u00e3o do sinal de excita\u00e7\u00e3o, o amplificador de pot\u00eancia, o alto-falante e qualquer outro dispositivo antes do centro ac\u00fastico da fonte sonora [18]. A sa\u00edda da sala inclui o microfone, seu pr\u00e9-amplificador associado, cabo, amplificador, condicionador e qualquer outro dispositivo que seja necess\u00e1rio ao funcionamento adequado do microfone [19].

Os par\u00e2metros de isolamento sonoro a\u00e9reo s\u00e3o obtidos a partir da diferen\u00e7a de n\u00edvel D entre as salas e de alguns par\u00e2metros ac\u00fasticos da sala receptora, definidos a seguir, todos dependentes da frequ\u00eancia.

2.1.1 Tempo de reverbera\u00e7\u00e3o T e \u00e1rea de absor\u00e7\u00e3o sonora equivalente A

O tempo de reverbera\u00e7\u00e3o de uma sala \u00e9 o par\u00e2metro b\u00e1sico que caracteriza o campo reverberante na sala, ou seja, caracteriza a pr\u00f3pria reverbera\u00e7\u00e3o no local. \u00c9

definido como o tempo necessário, a partir do fim de uma excitação sonora na sala, para o nível de pressão sonora cair 60 dB, isto é, o tempo para a energia sonora total cair a um milionésimo do seu valor inicial.

O tempo de reverberação T , expresso em segundos, depende do volume da sala V , em metros cúbicos, e da área de absorção sonora equivalente da sala A , em metros quadrados, e é calculado da maneira mais simples pela fórmula de Sabine:

$$T = 0,161 \frac{V}{A}. \quad (2.5)$$

O tempo de reverberação médio em uma sala equivale à sua média espacial nessa sala e a norma ISO 354 [20] descreve o procedimento para sua determinação.

A área de absorção sonora equivalente de uma sala expressa a quantidade de absorção sonora presente na mesma e abrange a soma de todas as diferentes partes da área total da superfície da sala, sendo o somatório dos produtos de todas as áreas S_i das n superfícies da sala com seus respectivos coeficientes de absorção sonora α_i :

$$A = \sum_{i=1}^n S_i \alpha_i. \quad (2.6)$$

2.1.2 Diferença normalizada de nível D_n

A diferença normalizada de nível, D_n , em dB, equivale à diferença de nível correspondente a uma área de absorção de referência na sala receptora, ou seja, é uma medida da redução nos níveis sonoros entre as salas, envolvendo a relação entre a área de absorção sonora equivalente da sala receptora, A , e uma área de absorção de referência, A_0 , que, para salas em residências ou salas de tamanho comparáveis, é igual a 10 m^2 ($A_0 = 10 \text{ m}^2$):

$$D_n = D - 10 \log \left(\frac{A}{A_0} \right), \quad (2.7)$$

onde D é diferença de nível entre as duas salas, em dB.

2.1.3 Diferença padronizada de nível D_{nT}

A diferença padronizada de nível, D_{nT} , em dB, equivale à diferença de nível correspondente a um valor de referência do tempo de reverberação na sala receptora. É uma medida da redução nos níveis sonoros entre uma sala e outra, envolvendo a relação entre o tempo de reverberação médio na sala receptora T , em segundos, e um tempo de reverberação de referência T_0 de 0,5 segundos, considerado na ISO 140 [5] por ser aproximadamente o tempo de reverberação encontrado em salas comuns de residências com mobília e razoavelmente independente do volume e da frequência. Com esta padronização da diferença de nível, pode-se afirmar que D_{nT} corresponde ao isolamento sonoro de uma sala comum em residências:

$$D_{nT} = D + 10 \log \left(\frac{T}{T_0} \right). \quad (2.8)$$

Se as duas salas têm volumes diferentes, D_{nT} dependerá da direção da transmissão sonora (direção da sala emissora para a sala receptora).

O valor $T_0 = 0,5$ s é equivalente à padronização da diferença de nível com respeito a uma área de absorção de referência $A_0 = 0,32$ V. Ou seja, se $A_0 = 0,32$ V, a diferença padronizada de nível é igual à diferença normalizada de nível, $D_{nT} = D_n$.

2.1.4 Índice de redução sonora aparente R'

A transmissão sonora de uma sala para outra, ilustrada na Figura 2.2, é composta por várias contribuições: transmissão direta pelo elemento de separação, transmissão direta por fendas ou aberturas, transmissões laterais (*flanking transmissions*), etc. Portanto, a potência sonora transmitida da sala emissora para a sala receptora consiste na soma de vários componentes, entre eles:

- potência que incide na partição e é transmitida diretamente por ela;
- potência que incide na partição e é transmitida por elementos de construção laterais;
- potência que incide nos elementos de construção laterais e é transmitida pela partição diretamente;

- potência que incide nos elementos de construção laterais e é transmitida por esses elementos laterais;

- potência que é transmitida (como som aéreo) através de vazamentos, por fendas, aberturas, dutos de ventilação, etc.

Os termos “partição”, “partição em teste”, “partição comum”, “amostra de teste”, “amostra ensaiada”, “parede divisória”, “parede comum” e “elemento de separação” possuem o mesmo significado. Nesse trabalho, será utilizado o termo “elemento de separação”.

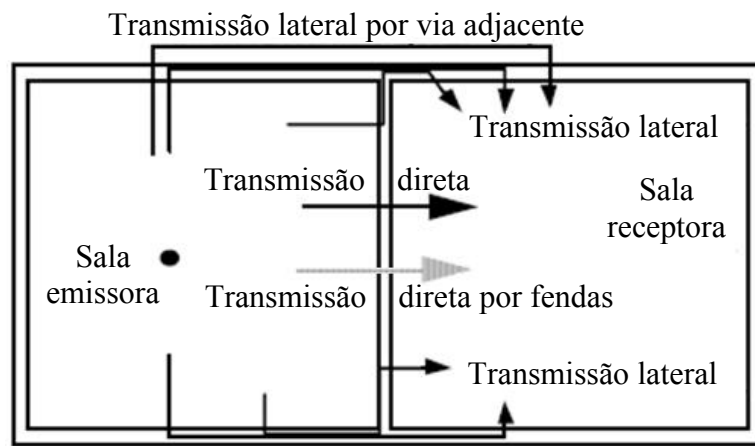


Figura 2.2 - Transmissão sonora entre salas.

O índice de redução sonora entre duas salas, R , ou “*Transmission Loss*”, TL , corresponde à diferença entre o nível da potência sonora incidente no elemento de separação e o nível da potência sonora transmitida para a sala receptora.

Para medições em laboratório, considera-se que a potência sonora transmitida para a sala receptora é igual à potência sonora transmitida através do elemento de separação, W_2 , ou seja, não são consideradas transmissões laterais ou por outros componentes, e o índice de redução sonora R é dado, em dB, por:

$$R = 10 \log \left(\frac{W_1}{W_2} \right), \quad (2.9)$$

onde W_1 equivale à potência sonora incidente no elemento de separação.

Para medições em campo, a potência sonora transmitida através de elementos de transmissão lateral ou por outros componentes, W_3 , pode ser significativa em relação à potência sonora transmitida através do elemento de separação, W_2 . Nesses casos, o

índice de redução sonora R passa a ser chamado de índice de redução sonora aparente notado por R' , sendo representado pela seguinte equação:

$$R' = 10 \log \left(\frac{W_1}{W_2 + W_3} \right), \quad (2.10)$$

onde $(W_2 + W_3)$ corresponde à potência sonora total transmitida para a sala receptora.

Sob a hipótese de que os campos sonoros são suficientemente difusos nas duas salas, o índice de redução sonora aparente R' é menos rigoroso que D_n ou D_{nT} e não depende da direção de transmissão sonora entre as salas durante a medição. O índice de redução sonora aparente R' pode ser expresso como [15]:

$$R' = D + 10 \log \left(\frac{S}{A} \right), \quad (2.11)$$

onde D é a diferença de nível entre as duas salas, em dB, S é a área do elemento de separação e A é a área de absorção sonora equivalente da sala receptora.

Segundo a ISO 140-4 [15], em geral, comparações entre resultados de medições em campo e medições em laboratório devem ser feitas apenas quando a área do elemento de separação S é de aproximadamente 10 m^2 .

2.1.5 Parâmetros de isolamento sonoro ponderados

Os parâmetros usados para quantificar o isolamento sonoro aéreo, dependentes da frequência e expressos em bandas de terço de oitava ou em bandas de oitava, podem ser convertidos em um único número fornecendo um índice ponderado, ou global, que caracteriza o desempenho acústico. Na prática, o valor único, ao invés de um conjunto de dados em bandas de frequência, facilita a comparação e a escolha rápida de materiais; mas deve-se tomar cuidado com o seu uso e não esquecer que os parâmetros na realidade dependem da frequência. Os valores únicos para os parâmetros D_n , D_{nT} e R' são expressos como D_{nw} , D_{nTw} e R'_w (diferença normalizada de nível ponderada, diferença padronizada de nível ponderada e índice de redução sonora aparente ponderado, respectivamente). O procedimento para obter o índice ponderado, descrito na norma ISO 717-1 [9], é explicado no item 2.9 deste capítulo.

2.2. Método Clássico x Método da Função de Transferência

Existem dois métodos para a medição da diferença de nível D entre salas, abordados nas normas internacionais ISO 140 [5] e ISO 18233 [7], chamados método clássico e método da função de transferência, respectivamente.

O método clássico é o método convencional de medição, onde os níveis de pressão sonora resultantes são determinados diretamente a partir de respostas das salas a um sinal de excitação aleatória ou impulsivo.

O desenvolvimento de processadores cada vez mais rápidos, potentes e com custos relativamente mais baixos possibilitou o avanço da acústica computacional e permitiu a implementação de técnicas novas e complexas de processamento de sinais e seu uso em equipamentos de medição sonora. Surgiu então um novo método, como é chamado o método de medição no qual um sinal determinístico pode ser usado como sinal de excitação para primeiro obter a resposta impulsiva ou a função de transferência das salas em teste e, a partir delas, a diferença de nível entre as salas.

A série de normas internacionais ISO 140 [5] aborda ensaios realizados com métodos de medição clássicos e bastante consagrados, como interrupção de ruído e medição direta do nível de pressão sonora; já a ISO 18233 [7] é uma norma recente que tem como objetivo estabelecer diretrizes e requisitos específicos para padronizar a aplicação de novos métodos de medição em acústica de salas e de edificações utilizando técnicas mais modernas e pode ser aplicada em medições de isolamento sonoro aéreo entre salas e de fachadas, do tempo de reverberação e de outros parâmetros acústicos de salas.

O método clássico é conhecido há bastante tempo e por isso é mais utilizado. O custo dos equipamentos de medição com esse método ainda é menor [21], mas o método da função de transferência é vantajoso em relação ao clássico, pois além de ser mais rápido, sofre menor influência do ruído de fundo, possui uma faixa dinâmica de medição maior e apresenta maior repetitividade.

Ambos os métodos podem ser utilizados tanto em laboratório como em campo, ou seja, no ambiente real (*in situ*). As medições realizadas em laboratório, num ambiente especial de teste, são usadas para determinar propriedades específicas de um material ou para fazer uma completa investigação do mesmo de forma a estabelecer dados acústicos ou um padrão de qualidade, dando suporte ao trabalho de projetistas em acústica. Também são usadas para garantir que a qualidade de um material ou amostra de

elemento de edificação esteja de acordo com normas internacionais ou regulamentações locais.

Entretanto, para a certificação de uma edificação propriamente dita, a única maneira de determinar se a edificação atende a necessidades legais é realizar medições na própria edificação, ou seja, *in situ*, e então comparar os valores dessas medições com os valores estabelecidos em normas ou regulamentações.

As salas de teste em laboratório são cuidadosamente construídas para evitar qualquer possibilidade de transmissão lateral. Dessa forma, toda energia na sala receptora terá sido transmitida através do elemento de separação. Já as medições *in situ* fornecem resultados mais próximos da realidade, pois incorporam, na prática, problemas conhecidos na área de edificações, como vazamento de ruído por instalação de elementos de edificações (portas, janelas, divisórias, etc.), transmissão lateral, falta de cuidados nos acabamentos, entre outros. O isolamento sonoro de elementos de edificação medido em campo é, então, geralmente menor do que o medido em laboratório e, por isto, deve-se tomar cuidado ao selecionar materiais de construção a partir de listas de dados de parâmetros acústicos de isolamento sonoro ensaiados em laboratório. Uma alternativa seria incluir um fator de segurança no cálculo de previsão do isolamento sonoro na construção de edificações.

Ao contrário de medições realizadas em laboratório, onde as incertezas podem ser controladas, as medições *in situ* podem levar à contaminação dos resultados, afetando a relação sinal-ruído, e, até o momento, existe pouca informação na literatura sobre incerteza de medições de isolamento sonoro realizadas em campo, o que será abordado no Capítulo 3. A parte 2 da ISO 140 [13] apresenta estimativas de incerteza obtidas a partir de ensaios de repetição e reprodução apenas para medições em laboratório utilizando o método clássico, que podem ser estendidas para medições em campo, mas essas incertezas não se baseiam em um procedimento específico para sua obtenção. Já para o método da função de transferência, não há valores disponíveis para medições em laboratório, nem para medições em campo, a não ser os trabalhos publicados a partir da presente pesquisa. As incertezas devem, portanto, ser estimadas, o que é um dos objetivos deste trabalho: realizar ensaios com o método da função de transferência em campo para que seja possível expressar suas incertezas de medição.

2.3. Método Clássico: ISO 140-4

A parte 4 da norma internacional ISO 140 [15] descreve o método para medições em campo, em função da frequência, de parâmetros de isolamento sonoro aéreo de paredes, pisos e portas internas entre dois cômodos sob condições de campo sonoro difuso em ambos os cômodos. Os parâmetros medidos são D_n , D_{nT} ou R' e os resultados podem ser usados para comparar isolamento sonoro entre salas e, no caso da norma brasileira de desempenho de edificações [4], para comparar o isolamento sonoro obtido em determinado edifício com os níveis de desempenho estabelecidos na mesma.

A norma ISO 140-4 descreve todo o procedimento de medição que deve ser realizado, considerando: o equipamento utilizado, a geração do campo sonoro na sala emissora, distâncias de separação mínimas entre microfones, alto-falantes e superfícies da sala, quantidade mínima e posicionamento de microfones e alto-falantes para a realização dos ensaios, mínima relação sinal-ruído admissível no ambiente de teste, etc.

Para obter a diferença de níveis D entre as salas, é gerado um campo sonoro na sala emissora e os níveis de pressão sonora são medidos nas duas salas. As medições não devem ser efetuadas na existência de interferências devido a fenômenos da natureza, como, por exemplo, trovões ou chuvas fortes.

O som gerado na sala emissora deve ser contínuo na faixa de frequência considerada, o espectro sonoro na sala emissora não deve ter variações em nível maiores do que 6 dB entre bandas de terço de oitava adjacentes, e a potência sonora deve ser alta o suficiente para que o nível de pressão sonora na sala receptora, em qualquer banda de frequência, seja pelo menos 10 dB maior que o nível do ruído de fundo. Caso isto não seja satisfeito, devem ser aplicadas correções descritas na norma.

Podem ser utilizadas uma única fonte sonora ou fontes sonoras múltiplas, assim como podem ser usados microfones se movendo ou em posições fixas, com apenas um ou vários microfones formando uma malha. A norma fornece valores mínimos de distâncias de separação para microfones e alto-falantes, listados na Tabela 2.1, os quais devem ser excedidos sempre que possível.

Tabela 2.1 - Distâncias mínimas exigidas pela ISO 140-4 [15] para medições de isolamento sonoro aéreo entre salas.

Entre diferentes posições de microfone	0,7 m
Entre diferentes posições de fonte sonora	0,7 m
Entre qualquer posição de microfone e contornos da sala (quaisquer superfícies na sala como paredes, teto, pisos, móveis, objetos ou difusores)	0,5 m
Entre o centro da fonte sonora e contornos da sala (Pequenas irregularidades dos contornos da sala podem ser desprezadas.)	0,5 m
Entre qualquer posição de microfone e fonte sonora	1,0 m
Entre pelo menos duas posições da fonte sonora	1,4 m

Duas ou mais posições da fonte sonora não devem estar localizadas num mesmo plano paralelo aos contornos da sala e a norma considera geralmente vantajoso colocar o alto-falante nos cantos da sala emissora. Deve-se tomar cuidado em relação à possível influência de transmissão lateral e ao aumento indesejável de flutuações no nível dentro da sala emissora.

De acordo com a ISO 140-4 [15], ao se utilizar apenas uma fonte sonora e posições fixas de microfone, são necessárias pelo menos cinco posições de microfone distribuídas dentro das salas, e pelo menos duas posições de fonte sonora na sala emissora, levando a um número mínimo de dez medições (uma medição em cada posição de microfone para cada posição do alto-falante).

Se as salas são de volumes diferentes, a maior deve ser escolhida como a sala emissora quando a diferença normalizada de nível, D_n , ou a diferença padronizada de nível, D_{nT} , forem avaliadas. Para avaliar o índice de redução sonora aparente, R' , resultados de uma única direção de transmissão sonora ou de ambas as direções podem ser usados.

Em cada posição fixa de microfone, o tempo de medição para se obter a média do nível deve ser de pelo menos 6 segundos para as bandas com frequência central abaixo de 400 Hz. Acima de 400 Hz, pode-se diminuir o tempo mínimo para 4 segundos.

A parte 14 da norma ISO 140 [22] fornece diretrizes para medições em situações especiais em campo e estabelece três arranjos (*set-ups*) de medição diferentes, dependendo da área do piso da sala emissora ou receptora, listados na Tabela 2.2. A expressão “arranjo de medição” equivale ao conjunto de equipamentos em uma medição. A norma considera que, para se obter a maior exatidão possível em todas as condições de medições, pode-se usar o arranjo de medição número 2 mesmo para salas com áreas de piso menores que 50 m².

Tabela 2.2 - Arranjos de medição estabelecidos na ISO 140-14 [22].

Arranjos de medição	1	2	3
Área do piso da sala [m ²]	< 50	50 a 100	> 100
Número de posições de alto-falantes	2	2	3
Número de posições de microfones fixos	5	10	15
Número total de medições realizadas na sala	10	20	45

Os níveis de ruído de fundo devem ser medidos para garantir que as medições na sala receptora não sejam afetadas por sons indesejados, como ruído externo às salas em teste ou ruído elétrico no sistema receptor. De acordo com a ISO 140-4 [15], o nível de ruído de fundo deve estar no mínimo 6 dB (e preferivelmente mais do que 10 dB) abaixo do nível combinado do sinal e do ruído de fundo. Se a diferença de níveis estiver entre 6 e 10 dB, devem ser calculadas correções para o nível do sinal conforme a equação abaixo, em dB:

$$L = 10 \log \left(10^{L_{sb}/10} - 10^{L_b/10} \right), \quad (2.12)$$

onde L é o nível do sinal ajustado, L_{sb} é o nível combinado do sinal e do ruído de fundo, e L_b é o nível do ruído de fundo. Se a diferença de níveis for menor ou igual a 6 dB em qualquer banda de frequência, deve-se usar a correção de 1,3 dB, correspondente a uma diferença de 6 dB, e indicar claramente no relatório de medição que os valores reportados de D_n , D_{nT} ou R' foram obtidos para o “limite de medição”.

Segundo a ISO 140-4 [15], as medições do tempo de reverberação da sala receptora devem ser feitas de acordo com o procedimento descrito na norma ISO 354 [20], mas com no mínimo seis medições de decaimento para cada banda de frequência, e não doze medições como estabelecido na ISO 354 e, portanto, devem ser usadas pelo menos uma posição de alto-falante e três posições de microfone com duas leituras em cada combinação fonte-receptor.

2.3.1 Precisão do método

Com relação à precisão do método clássico, a parte 4 da ISO 140 [15] cita que o procedimento de medição “*deve dar repetitividade satisfatória, determinada de acordo com o método dado na ISO 140 parte 2 e deve ser verificado de tempos em tempos, particularmente quando uma mudança é feita no procedimento ou instrumentação*”. A

ISO 140-2 [13] será abordada no Capítulo 5. Tal norma é bastante vaga, pois não estabelece um critério sobre como obter a incerteza do resultado da medição.

2.4. Método da Função de Transferência: ISO 18233

A ISO 18233 [7] descreve métodos de medição para serem usados como substitutos aos métodos clássicos especificados em normas como as da série ISO 140 [5] (medição de isolamento sonoro) e ISO 3382 [23] (medição de parâmetros acústicos de salas). Ela não substitui por completo essas duas, mas descreve um método diferente para realizar as medições, seguindo as normas que utilizam o método clássico com relação a: quais grandezas devem ser medidas, número e seleção de pontos de medição e condições para as medições. Também fornece requisitos para a seleção do sinal de excitação, o processamento do sinal e o controle do meio ambiente a ser ensaiado.

O método da função de transferência, também chamado de método da resposta impulsiva, baseia-se na teoria de sistemas lineares para estabelecer uma relação entre a excitação e a resposta à transmissão sonora. Seu processamento de sinais considera a transmissão sonora dentro de uma sala e entre salas como aproximadamente linear e invariante no tempo. Portanto, o método pode demonstrar maior sensibilidade a variações no tempo e mudanças nas condições ambientais do que o método clássico e há o risco de se obter resultados não confiáveis se algumas diretrizes descritas na ISO 18233 [7] não forem seguidas. A resposta impulsiva é a base de todas as medições e diversos métodos para sua obtenção são descritos na literatura [19], [24], [25] e [26].

2.4.1 Resposta impulsiva e função de transferência

A resposta $y(t)$ de um sistema linear e invariante no tempo, S , a uma dada excitação $x(t)$, esquematizada na Figura 2.3, é o resultado do produto de convolução da excitação $x(t)$ com a resposta impulsiva do sistema $h(t)$, onde a convolução é representada pelo símbolo $*$ e expressa no domínio do tempo por:

$$y(t) = x(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)h(t - \tau)d\tau . \quad (2.13)$$

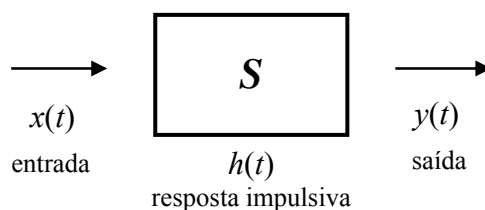


Figura 2.3 - Sistema linear.

No domínio da frequência, a resposta ou saída de um sistema linear $Y(f)$ é o resultado do produto da entrada $X(f)$ pela função de transferência do sistema $H(f)$,

$$Y(f) = X(f) \cdot H(f) , \quad (2.14)$$

onde $Y(f)$, $X(f)$ e $H(f)$ são as transformadas de Fourier de $y(t)$, $x(t)$ e $h(t)$, respectivamente.

Quando a entrada do sistema $x(t)$ é um impulso unitário $\delta(t)$, sua transformada de Fourier é igual a unidade e no domínio da frequência, a saída do sistema será igual à sua função de transferência, $Y(f) = H(f)$. Portanto, ao excitar um sistema linear e invariante no tempo com um impulso ideal, é possível obter a sua função de transferência, e através da transformada inversa de Fourier, obter a resposta impulsiva do sistema no domínio do tempo. Se a resposta impulsiva de um sistema for conhecida, pode-se obter a saída do sistema $y(t)$ para uma entrada qualquer $x(t)$.

No mundo real, impulsos podem ser aproximados por ações muito intensas e muito rápidas, em curtos intervalos de tempo, como tiro de pistola, estouro de balões ou centelha elétrica.

Uma prática comum para obter a resposta impulsiva de um sistema é excitá-lo com um sinal conhecido determinístico e de banda larga, como sequência de comprimento máximo (*Maximum Length Sequence*, MLS) ou varredura de senos (*sine sweep*), e medir a sua resposta.

A resposta impulsiva em um ponto da sala, assim como a função de transferência acústica correspondente, contém informação sobre a resposta da sala naquele ponto a qualquer sinal de entrada e é formada por uma interação complexa de ondas sonoras refletidas entre o piso, o teto, as paredes e os objetos na sala. A partir de seu processamento, podem ser calculadas várias grandezas e parâmetros acústicos, como tempo de reverberação, clareza, definição, entre outros. Um estudo detalhado das respostas impulsivas de um ambiente pode ajudar a identificar problemas acústicos no

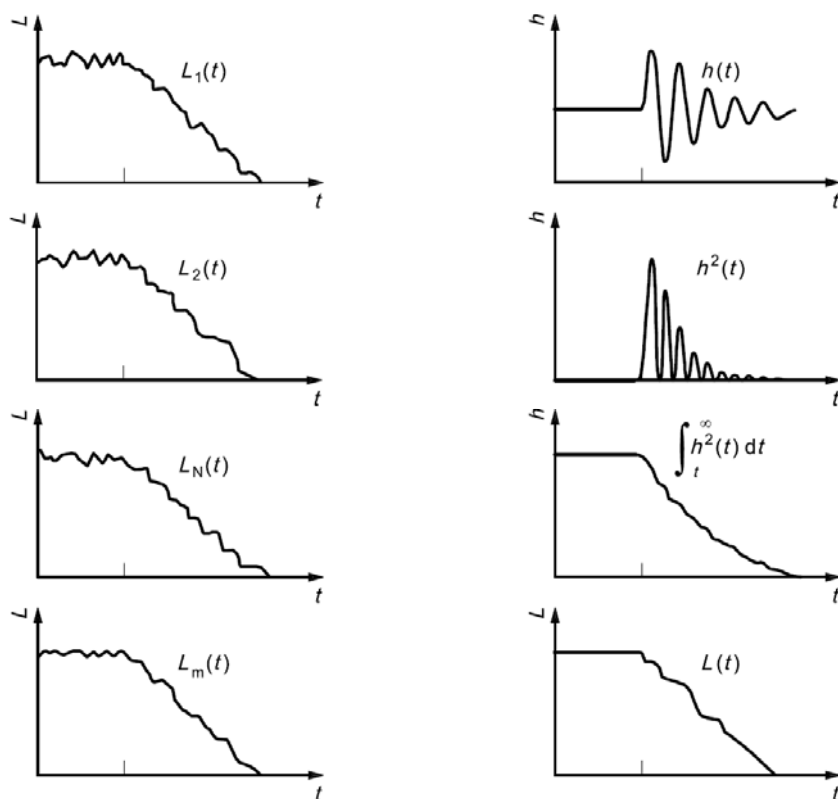
local, como reflexões não desejadas ou razão entre som direto e reverberação indesejada.

Em 1965, SCHROEDER [27] introduziu um novo método para medir o tempo de reverberação: o método da resposta impulsiva integrada. Ele propôs que as curvas de decaimento da energia sonora em um ponto de medição particular fossem obtidas a partir do processamento de uma única medição da resposta impulsiva relacionando o sinal de excitação (alto-falante) e o ponto de recepção (microfone) diretamente, sem a necessidade de se calcular médias.

Uma curva de decaimento é uma representação gráfica do decaimento do nível de pressão sonora quadrática em função do tempo após a fonte sonora ser desligada, e a partir da sua inclinação é obtido o tempo de reverberação. A Figura 2.4.a ilustra o método da interrupção do ruído que é o método convencional para se obter o tempo de reverberação, a partir das curvas de decaimento obtidas pela gravação do nível de pressão sonora após a excitação na sala ser desligada. Uma aproximação do decaimento, $L_m(t)$, é calculada pela média de vários decaimentos individuais, $L_1(t), L_2(t), \dots, L_N(t)$, obtidos com um sinal de excitação aleatório, como ruído branco, por exemplo.

Schroeder propôs que o decaimento da energia sonora em função do tempo pode ser calculado a partir da integração reversa no tempo do quadrado de apenas uma resposta impulsiva e que esse decaimento, obtido por uma única medição, corresponde ao resultado de um número infinito de médias de curvas de decaimento obtidas pelo método convencional da interrupção do ruído.

A Figura 2.4.b ilustra o decaimento do nível de pressão sonora em função do tempo, $L(t)$, obtido pelo método da resposta impulsiva integrada após o processamento da resposta impulsiva $h(t)$. Esse método se aplica à curva de decaimento e aos níveis estacionários se o sistema for linear e invariante no tempo e a teoria pode ser aplicada ao som na sala emissora, ao som na sala receptora e à transmissão sonora entre salas [7]. Para não violar a exigência de que o sistema seja invariante no tempo, não é aceitável mover a fonte ou os microfones durante as medições das respostas impulsivas das salas. O movimento do ar causado pelo vento e a mudança na velocidade do som devida a variações de temperatura podem violar essa exigência e devem ser evitados.



a - Método clássico

b - Método da função de transferência

Figura 2.4 - Procedimentos para obter o decaimento do nível de pressão sonora - ISO 18233 [7].

2.4.2 Obtenção da resposta impulsiva a partir do sinal de excitação

Os métodos clássicos de medição acústica em salas utilizam sinais de excitação aleatória, como ruído branco ou rosa. Devido à natureza aleatória da excitação, haverá variações nos resultados dos níveis medidos, que podem ser caracterizadas por grandes desvios-padrão e que limitam a repetitividade da medição, sendo necessário calcular a média de várias medições junto com a média espacial dentro da sala.

A resposta obtida pelo método clássico pode ser descrita como uma convolução entre o sinal de excitação e a resposta impulsiva da sala, como na equação (2.13). Entretanto, no caso clássico com ruído como sinal de excitação, a resposta à excitação é gravada diretamente e geralmente não são conhecidas informações sobre a resposta impulsiva.

Os métodos novos utilizam sinais de excitação determinísticos, isto é, sinais que podem ser exatamente reproduzidos, aumentando, desse modo, a repetitividade da

medição. A sala é excitada por um certo tempo e a resposta impulsiva é obtida através do processamento da resposta à excitação.

A norma ISO 18233 [7] aborda dois tipos de sinais de excitação: MLS e *sweep*, mas qualquer sinal determinístico poderia ser utilizado. Nas medições realizadas com o método da função de transferência neste trabalho, o sinal de excitação usado foi o *sweep*, por ser o mais adequado para diversas medições acústicas. O *sweep* ou varredura de senos é um sinal senoidal cuja frequência varia de um valor inicial a um final e uma de suas vantagens é o fato de permitir a transmissão de energia suficiente numa sala sem a necessidade de potências sonoras ou amplitudes do sinal extremamente altas, o que poderia resultar em efeitos não lineares. Outra vantagem é o fato de possuir alta resolução, exatidão e confiabilidade, de ser menos sensível à variação no tempo e de ser imune à distorção harmônica, alcançando assim uma faixa dinâmica muito alta com melhor relação sinal-ruído. Não é necessária a pré-emissão do sinal e nem várias medições para se obter a média, o que reduz o tempo de medição, tornando-a mais rápida [24].

A duração adequada do *sweep* deve ser um pouco maior do que a duração da resposta impulsiva a ser medida, para permitir a exclusão de distorção harmônica, deixando o ruído de fundo como praticamente a única limitação para a relação sinal-ruído a ser alcançada.

MÜLLER e MASSARANI [24] descrevem os dois tipos mais comuns de *sweep*: o linear e o logarítmico. O primeiro possui espectro branco, enquanto o segundo possui espectro rosa.

O *sweep* pode ser gerado tanto diretamente no domínio do tempo (através de um aumento gradual da frequência), como no domínio da frequência (obtido pela transformada inversa de Fourier de um espectro gerado artificialmente). A Figura 2.5 apresenta na parte superior um exemplo de *sweep* linear e na parte inferior, de *sweep* logarítmico, mostrados no domínio do tempo à esquerda e no domínio da frequência à direita.

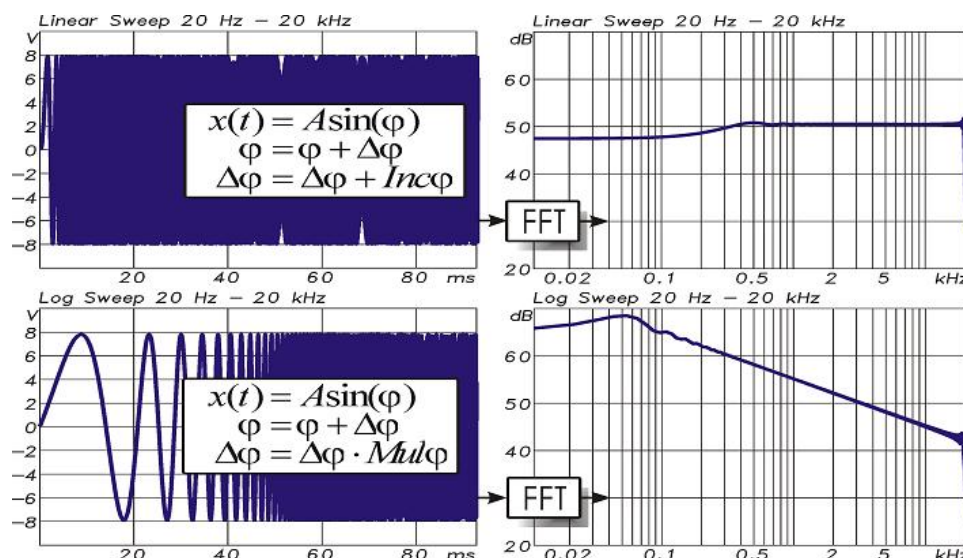


Figura 2.5 - *Sweep* linear e *sweep* logarítmico, mostrados no domínio do tempo e da frequência [24].

Ao estabelecer procedimentos para novos métodos baseados no método clássico, a ISO 18233 [7] utiliza a “relação sinal-ruído efetiva” como um substituto à relação sinal-ruído conhecida. A “relação sinal-ruído efetiva”, expressa em dB, é definida na norma como “dez vezes o logaritmo na base 10 da razão entre o valor médio quadrático da parte do sinal causada pela excitação e obtida pelo método novo e o valor médio quadrático da parte não-desejada do sinal obtida pelo mesmo método e causada por outras fontes que não a de excitação”.

Em medições de isolamento sonoro com *sweep*, não é necessário medir o ruído de fundo nas salas, como ocorre no método clássico, mas deve-se checar a relação sinal-ruído efetiva das respostas impulsivas ou das funções de transferência medidas nas salas emissora e receptora. A relação sinal-ruído efetiva deve ser maior ou igual à relação sinal-ruído requerida no método clássico, que é de 10 dB. Enquanto o método clássico utiliza procedimentos para corrigir os níveis medidos quando a relação sinal-ruído é baixa, o método da função de transferência pode ser usado para medir a relação sinal-ruído efetiva e então compensar automaticamente a influência do ruído. Como essa compensação faz parte do método, não devem ser aplicadas outras compensações de ruído, mesmo tendo sido descritas para o método clássico.

Quando o espectro do sinal de excitação não for branco, como nos casos do *sweep* logarítmico ou do sinal com amplitude não uniforme gerado efetivamente pelo alto-falante, a resposta impulsiva só pode ser obtida através da deconvolução com o filtro

inverso do sinal, construído no domínio da frequência e explicado a seguir. Essa operação é realizada no presente trabalho pelo *software Monkey Forest*, um programa de geração, aquisição e processamento de sinais, desenvolvido por Swen Müller no Inmetro (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial).

Com a geração do *sweep*, seu filtro inverso, apropriado para obter a resposta impulsiva, é automaticamente gerado e armazenado para posterior deconvolução da resposta impulsiva. O filtro inverso corresponde ao inverso do espectro do sinal de excitação, de forma que a frequência instantânea diminui com o tempo, no caso de um sinal de excitação linear. Para um *sweep* logarítmico, uma modulação de amplitude deve ser adicionada para compensar a energia diferente gerada em baixas e altas frequências. Um procedimento simples é transformar o sinal de excitação para o domínio da frequência, executar uma inversão complexa, e retransformá-lo para o domínio do tempo, como ilustrado no esquema da Figura 2.6.

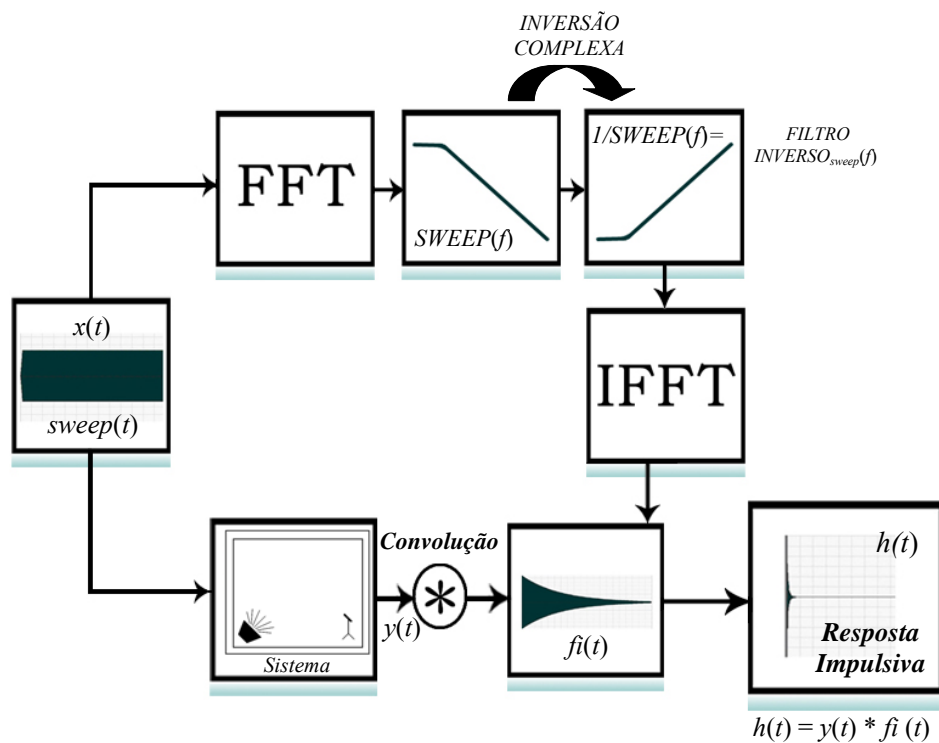


Figura 2.6 - Esquema da obtenção da resposta impulsiva da sala.

Como a convolução do sinal de excitação $x(t)$ com seu filtro inverso apropriado $\hat{f}(t)$ gera uma função impulso $\delta(t)$, então a resposta impulsiva do sistema pode ser obtida simplesmente convoluindo o sinal medido $y(t)$ com o filtro inverso $\hat{f}(t)$:

$$h(t) = y(t) * \hat{f}(t) , \quad (2.15)$$

onde $y(t) = x(t) * h(t)$. Pelo teorema da convolução: $H(f) = Y(f)/X(f)$.

Ao gerar um filtro inverso $\hat{f}_i(t)$ de forma que $y(t) * \hat{f}_i(t) = h(t)$, obtém-se:

$$Y(f) \cdot FI(f) = H(f) , \quad (2.16)$$

onde $FI(f)$ é a transformada de Fourier do filtro inverso $\hat{f}_i(t)$. A partir da transformada inversa de Fourier de $H(f)$ pode-se obter a resposta impulsiva $h(t)$. Ao utilizar um *sweep* como sinal de excitação em um ponto $y(t)$ numa sala e seu filtro inverso, pode-se realizar uma convolução da resposta da sala $y(t)$ no ponto captada pelo microfone (e gravada) com o filtro inverso do *sweep* $\hat{f}_i(t)$, para obter assim a resposta impulsiva da sala $h(t)$ naquele ponto, conforme o procedimento mostrado na Figura 2.6.

2.4.3 Medições de isolamento sonoro com o método da função de transferência

Nos itens anteriores, foram descritos a teoria e o processamento necessários para a obtenção das respostas impulsivas ou funções de transferência acústicas. A seguir a teoria é aplicada às medições de isolamento sonoro aéreo.

Se uma fonte sonora é colocada em uma sala emissora, o nível de pressão sonora L_E em um ponto E nessa sala pode ser obtido a partir da resposta impulsiva $h_E(t)$ entre o ponto de excitação e o ponto E na sala emissora. De maneira similar, o nível sonoro L_R medido em um ponto R na sala receptora adjacente pode ser obtido a partir da resposta impulsiva $h_R(t)$ entre o ponto de excitação na sala emissora e o ponto R na sala receptora. Consequentemente, a diferença de nível D entre as duas salas pode ser expressa como:

$$D = L_E - L_R = 10 \log \left[\frac{\int_0^{\infty} h_E^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h_R^2(t) dt} \right] . \quad (2.17)$$

No domínio do tempo, a ISO 18233 [7] recomenda o método de integração de Schroeder para obter a diferença de nível de pressão sonora D entre salas, enquanto no domínio da frequência, a função de transferência direta é considerada suficiente para obter a mesma diferença de nível. A equação (2.17) pode ser expressa como:

$$D = 10 \log \left[\frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} |H_E(\omega)|^2 d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_2} |H_R(\omega)|^2 d\omega} \right], \quad (2.18)$$

onde $H_E(\omega)$ é a função de transferência acústica relacionando uma posição de microfone e uma posição de fonte sonora na sala emissora e $H_R(\omega)$ é a função de transferência acústica relacionando uma posição de microfone na sala receptora e a mesma posição da fonte sonora na sala emissora, para uma banda de fração de oitava com frequência de banda inferior $f_1 = \omega_1/2\pi$ e frequência de banda superior $f_2 = \omega_2/2\pi$.

Outra forma de chegar à diferença de nível D é utilizando a função de transferência acústica para determinar os níveis de pressão sonora médios nas salas emissora e receptora, $L_E(f)$ e $L_R(f)$, respectivamente [19]:

$$L_E(f) = 10 \log(|H_E(f)|^2) + 10 \log\left(\frac{|X(f)|^2}{p_0^2}\right), \quad (2.19)$$

$$L_R(f) = 10 \log(|H_R(f)|^2) + 10 \log\left(\frac{|X(f)|^2}{p_0^2}\right), \quad (2.20)$$

onde $H_E(f)$ e $H_R(f)$ são as funções de transferência acústica médias na sala emissora e na sala receptora; $X(f)$ equivale à entrada “acústica” da sala, p_0 é a pressão sonora de referência e f é a frequência central da banda.

Subtraindo os dois níveis, obtém-se a expressão alternativa para D , a partir da diferença logarítmica entre as funções de transferência acústica médias na sala emissora e na sala receptora, H_E e H_R , respectivamente, como apresentada pela equação (2.3):

$$D(f) = 10 \log(|H_E(f)|^2) - 10 \log(|H_R(f)|^2). \quad (2.21)$$

Para obter os parâmetros de isolamento sonoro aéreo, as funções de transferência acústica das salas emissora e receptora devem ser medidas para cada combinação de posição fonte-receptor exigida pelo método clássico na ISO 140-4 [15] e, a partir de suas médias, determinada a diferença de níveis entre as salas.

O tempo de reverberação da sala receptora pode ser medido com o método da resposta impulsiva integrada, como descrito no item 2.4.1. Com a diferença de níveis D e as características da sala receptora, os parâmetros D_n , D_{nT} e R' podem ser calculados pelas equações (2.7), (2.8) e (2.11), respectivamente.

2.4.4 Precisão do método da função de transferência

A norma ISO 18233 [7] cita que “*a incerteza dos resultados obtidos a partir de medições de acordo com a norma deve ser avaliada, preferivelmente conforme o GUM*” [11] e informa que se a incerteza for relatada, a incerteza expandida deve ser fornecida junto com o fator de abrangência correspondente para a probabilidade de abrangência estabelecida. O GUM [11] será abordado nos Capítulos 3 e 4.

2.5. Isolamento sonoro de fachadas

A parte 5 da norma ISO 140 [16] descreve dois métodos para medições em campo de parâmetros de isolamento sonoro aéreo de elementos de fachadas e de fachadas completas, chamados métodos de elemento e métodos globais. Ambos podem usar um alto-falante ou o ruído de tráfego disponível, que pode ser rodoviário, ferroviário ou aéreo, como fonte sonora. Portanto, há quatro alternativas possíveis de medição para cada método.

A Tabela 2.3 fornece uma visão geral dos métodos com os parâmetros medidos em cada caso, que serão definidos nos próximos itens, todos dependentes da frequência.

Os métodos de elemento objetivam estimar o índice de redução sonora de um elemento de fachada, por exemplo, uma janela ou uma porta, e o método considerado mais exato pela norma ISO 140-5 [16] usa um alto-falante como fonte sonora. Já os métodos globais estimam a diferença de nível sonoro de fora para dentro (*outdoor/indoor*) sob condições reais de tráfego e os métodos globais considerados mais exatos pela norma usam o ruído de tráfego real (rodoviário, ferroviário ou aéreo) como fonte sonora.

Tabela 2.3 - Visão geral dos diferentes métodos de medição.

Método	Parâmetro	Campo de aplicação
Elemento		
alto-falante	R'_{45°	Método preferido para estimar o índice de redução sonora aparente de elementos de fachada
tráfego rodoviário	$R'_{tr,s}$	Alternativa ao primeiro método quando ruído de tráfego rodoviário com nível suficiente estiver disponível
tráfego ferroviário	$R'_{rt,s}$	Alternativa ao primeiro método quando ruído de tráfego ferroviário com nível suficiente estiver disponível
tráfego aéreo	$R'_{at,s}$	Alternativa ao primeiro método quando ruído de tráfego aéreo com nível suficiente estiver disponível
Global		
alto-falante	$D_{ls,2m,nT}$ $D_{ls,2m,n}$	Alternativa aos três métodos abaixo
tráfego rodoviário	$D_{tr,2m,nT}$ $D_{tr,2m,n}$	Método preferido para estimar o isolamento sonoro global de uma fachada exposta a ruído de tráfego rodoviário
tráfego ferroviário	$D_{rt,2m,nT}$ $D_{rt,2m,n}$	Método preferido para estimar o isolamento sonoro global de uma fachada exposta a ruído de tráfego ferroviário
tráfego aéreo	$D_{at,2m,nT}$ $D_{at,2m,n}$	Método preferido para estimar o isolamento sonoro global de uma fachada exposta a ruído de tráfego aéreo

A norma descreve todos os procedimentos de medição para cada caso considerando: equipamentos, princípios de medição, geração do campo sonoro, posições de microfones e alto-falantes necessárias para a realização dos testes, correções para ruído de fundo, etc.

Para medir o nível de pressão sonora médio na sala receptora pode-se usar um único microfone fixo movendo-o ponto a ponto, vários microfones fixos formando uma malha ou um microfone sendo deslocado continuamente. São necessárias pelo menos cinco posições fixas de microfone distribuídas na sala receptora para se obter o nível de pressão sonora médio do campo sonoro e valores mínimos de distâncias de separação são fornecidos – ver Tabela 2.4 – e devem ser excedidos sempre que possível. O nível do ruído de fundo L_b também deve ser medido e as correções, caso necessárias, são iguais às da ISO 140-4 [15], descritas anteriormente.

Tabela 2.4 - Distâncias mínimas exigidas pela ISO 140-5 [16] para medições na sala receptora.

Entre diferentes posições de microfone	0,7 m
Entre qualquer posição de microfone e contornos da sala (quaisquer superfícies na sala como paredes, teto, pisos, móveis, objetos ou difusores)	0,5 m
Entre qualquer posição de microfone e fonte sonora	1,0 m

2.5.1 Índice de redução sonora aparente R'_{45°

O índice de redução sonora aparente, R'_{45° , em dB, equivale à medida do isolamento sonoro aéreo de um elemento de edificação quando a fonte sonora é um alto-falante e o ângulo de incidência sonora, ou seja, o ângulo entre o eixo do alto-falante direcionado para o centro da amostra de teste e a normal à superfície da fachada, é 45° :

$$R'_{45^\circ} = L_{1,s} - L_2 + 10 \log \left(\frac{S}{A} \right) - 1,5 \quad (2.22)$$

onde $L_{1,s}$ é o nível de pressão sonora médio na superfície do elemento em teste, em dB, definido pela equação (2.2), sendo a média tomada em toda a superfície do elemento em teste incluindo efeitos de reflexão do mesmo e da fachada, L_2 é nível de pressão sonora médio na sala receptora, em dB, A é a área de absorção sonora equivalente na sala receptora e S é a área do elemento de separação determinada como descrito no Anexo A da ISO 140-5 [16]. No caso de fachada completa, S é igual à área da parte da fachada que pode ser vista a partir da sala receptora. A equação (2.22) é baseada nas hipóteses de que o som é incidente a partir de um ângulo de 45° e que o campo sonoro na sala receptora é perfeitamente difuso, o que na realidade não ocorre.

2.5.2 Índice de redução sonora aparente $R'_{tr,s}$

O índice de redução sonora aparente, $R'_{tr,s}$, em dB, é uma medida do isolamento sonoro aéreo de um elemento de edificação quando a excitação sonora é ruído de tráfego rodoviário e a posição do microfone do lado de fora é sobre a superfície de teste:

$$R'_{tr,s} = L_{eq,1,s} - L_{eq,2} + 10 \log \left(\frac{S}{A} \right) - 3 \quad (2.23)$$

onde $L_{eq,1,s}$ é o valor do nível de pressão sonora equivalente na superfície do elemento incluindo efeitos de reflexão do mesmo e da fachada, em dB, e $L_{eq,2}$ é o valor do nível de pressão sonora equivalente na sala receptora, em dB.

Se ruído de tráfego ferroviário é usado como fonte sonora, a notação é $R'_{rt,s}$. Se ruído de tráfego aéreo é usado, é $R'_{at,s}$.

2.5.3 Diferença de nível D_{2m}

A diferença de nível, D_{2m} , em dB, expressa para cada banda de frequência, é a diferença entre o nível de pressão sonora médio do lado de fora a 2 m da fachada, $L_{1,2m}$, e o nível de pressão sonora médio na sala receptora, L_2 , nas bandas consideradas:

$$D_{2m} = L_{1,2m} - L_2. \quad (2.24)$$

Se ruído de alto-falante é usado como fonte sonora, a notação é $D_{ls,2m}$. Para ruídos de tráfego rodoviário, ferroviário ou aéreo, as notações são respectivamente $D_{tr,2m}$, $D_{rt,2m}$ ou $D_{at,2m}$.

2.5.4 Diferença padronizada de nível $D_{2m,nT}$

A diferença padronizada de nível, $D_{2m,nT}$, em dB, equivale à diferença de nível correspondente a um valor de referência do tempo de reverberação na sala receptora ($T_0 = 0,5$ s) e é dada por:

$$D_{2m,nT} = D_{2m} + 10 \log \left(\frac{T}{T_0} \right). \quad (2.25)$$

Se a fonte sonora é ruído de alto-falante, o símbolo é $D_{ls,2m,nT}$. Para ruídos de tráfego rodoviário, ferroviário ou aéreo, as notações são $D_{tr,2m,nT}$, $D_{rt,2m,nT}$ ou $D_{at,2m,nT}$, respectivamente.

2.5.5 Diferença normalizada de nível $D_{2m,n}$

A diferença normalizada de nível, $D_{2m,n}$, em dB, equivale à diferença de nível correspondente a uma área de absorção de referência na sala receptora ($A_0 = 10 \text{ m}^2$), dada por:

$$D_{2m,n} = D_{2m} - 10 \log \left(\frac{A}{A_0} \right). \quad (2.26)$$

Se ruído de alto-falante é usado como fonte sonora, a notação é $D_{ls,2m,n}$. Para ruídos de tráfego rodoviário, ferroviário ou aéreo, as notações são $D_{tr,2m,n}$, $D_{rt,2m,n}$ ou $D_{at,2m,n}$.

2.6. Medição de isolamento sonoro de fachadas com ruído de alto-falante

As medições de isolamento sonoro aéreo de fachadas com ruído de alto-falante podem ser realizadas para o método de elemento e para o método global. Em ambos, o princípio de medição consiste em colocar o alto-falante em uma ou mais posições do lado de fora da edificação a uma distância d da fachada, com ângulo de incidência sonora igual a $(45 \pm 5)^\circ$, como ilustrado na Figura 2.7. O nível de pressão sonora médio do lado de fora é determinado diretamente sobre a amostra de teste para o método de elemento e a 2 m em frente à fachada para o método global. Os parâmetros obtidos são R'_{45° , $D_{ls,2m,nT}$ ou $D_{ls,2m,n}$.

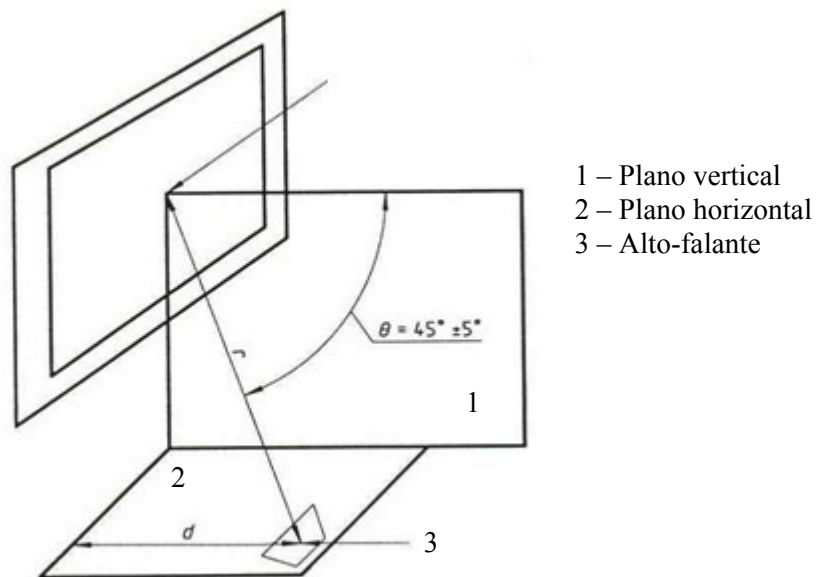


Figura 2.7 - Geometria do método de alto-falante [16].

Para medições com o método clássico, o som gerado pelo alto-falante deve ser permanente na faixa de frequência considerada, que deve ser de pelo menos 100 Hz a 3150 Hz, em bandas de terço de oitava. A potência sonora da fonte deve ser alta o suficiente para produzir um nível de pressão sonora na sala receptora de pelo menos 6 dB maior que o nível do ruído de fundo e o espectro sonoro na sala emissora não deve ter diferenças em níveis em bandas de terço de oitava pertencentes a uma banda de oitava maiores que 6 dB na banda de oitava de 125 Hz, 5 dB na banda de 250 Hz e 4 dB nas bandas mais altas.

Para medições com o método da função de transferência, o procedimento é exatamente o mesmo descrito para medições entre salas na ISO 18233 [7], mas, nesse caso, devem ser consideradas as posições e exigências da ISO 140-5 [16].

A distância d entre o alto-falante e a fachada deve ser escolhida de forma que a variação do nível de pressão sonora no elemento de separação seja minimizada. A fonte sonora deve estar preferencialmente localizada no chão, mas, alternativamente, para casos de elemento próximo ao chão, onde não é possível obter o ângulo de incidência sonora de $(45 \pm 5)^\circ$, pode-se posicioná-la o mais alto acima do chão que for possível na prática.

A distância r entre a fonte sonora e o centro do elemento deve ser no mínimo 5 m ($d > 3,5$ m) para o método de elemento com alto-falante, e pelo menos 7 m ($d > 5$ m) para o método global com alto-falante.

2.6.1 Método de elemento com ruído de alto-falante

O método de elemento com alto-falante fornece uma estimativa do índice de redução sonora aparente R'_{45° , obtido pela equação (2.22), que, sob circunstâncias específicas, pode ser comparada com o índice de redução sonora de elementos de fachada correspondentes obtidos em laboratórios. É o método preferido quando o objetivo da medição é avaliar o desempenho de um elemento de fachada específico em relação a seu desempenho em laboratório.

2.6.2 Método global com ruído de alto-falante

O método global com alto-falante quantifica o isolamento sonoro aéreo de uma fachada completa ou mesmo de uma edificação completa numa situação específica relativa a uma posição 2 m em frente à fachada ($D_{ls,2m,nT}$ e $D_{ls,2m,n}$). Esse método é útil quando, por diferentes razões práticas, a fonte de ruído real não pode ser usada; entretanto seu resultado não pode ser comparado com o de medições em laboratório.

Para esse método, não há requisitos especiais de teste. Os níveis de pressão sonora devem ser medidos com o microfone ao lado de fora da fachada, no meio da fachada, para se obter o nível de pressão sonora $L_{1,2m}$. O microfone deve estar a uma distância de $(2,0 \pm 0,2)$ m do plano da fachada ou a 1,0 m de um balaústre (em inglês *balustrade*) ou outra protrusão similar e sua altura no lado de fora deve ser 1,5 m acima do nível do chão da sala receptora. A Figura 2.8 ilustra uma medição desse tipo.

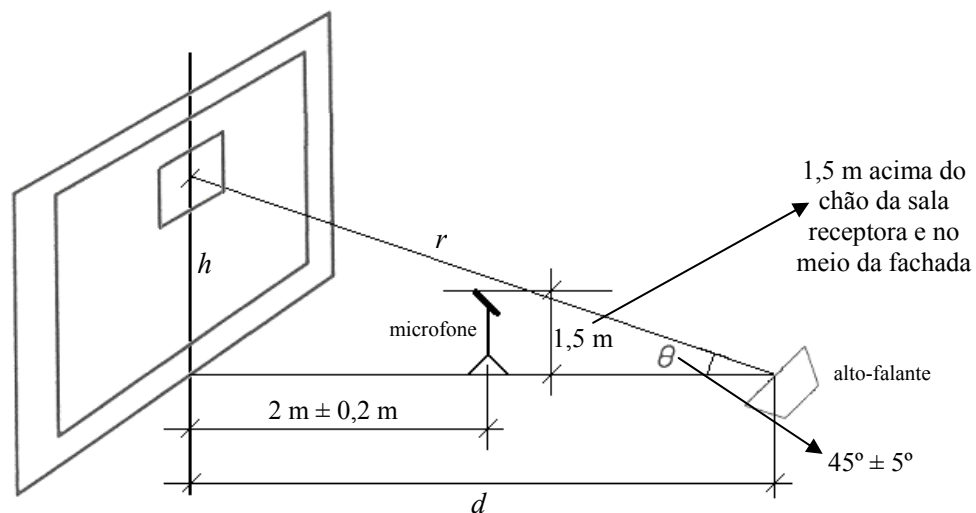


Figura 2.8 - Medição de isolamento sonoro aéreo de fachada com alto-falante.

Se a maior parte da fachada for uma construção em declive, como um telhado, a norma recomenda escolher uma posição mais distante ao telhado do que a parte projetada da parte vertical da fachada. Se a sala considerada tiver mais do que uma parede do lado de fora ou for muito grande, normalmente não é possível medir com apenas uma posição de fonte sonora, sendo necessário o uso de várias posições de fonte. O número de posições depende das características direcionais do alto-falante e da área da fachada.

Caso várias posições de fonte forem usadas, deve-se calcular a diferença de nível $D_{2m,i}$ pela equação (2.24) para cada combinação fonte-receptor e cada uma das n posições da fonte sonora, obtendo-se o valor total segundo a expressão, em dB:

$$D_{ls,2m} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum 10^{-D_{2m,i}/10} \right). \quad (2.27)$$

2.7. Medição de isolamento sonoro de fachadas com ruído de tráfego

O princípio de medição, tanto para o método de elemento quanto para o método global, considera que, se o som é incidente no elemento de separação a partir de diferentes direções e com intensidade variando (por exemplo, ruído de tráfego em ruas cheias), o índice de redução sonora ou a diferença de nível podem ser obtidos a partir dos níveis de pressão sonora equivalentes medidos em função da frequência em ambos os lados da amostra de teste.

2.7.1 Método de elemento com ruído de tráfego rodoviário

O método de elemento com ruído de tráfego rodoviário serve para os mesmos propósitos que o método de elemento com ruído de alto-falante. O parâmetro medido é $R'_{r,s}$, uma estimativa do índice de redução sonora aparente que, sob certas circunstâncias, pode ser comparado com o índice de redução sonora obtido em laboratório e é particularmente útil quando o método de elemento com ruído de alto-falante não pode ser usado. Segundo a ISO 140-5 [16], esses dois métodos fornecem resultados pouco diferentes e, devido ao ruído de fundo, o método com ruído de tráfego rodoviário tende a resultar em valores mais baixos do índice de redução sonora do que o método com ruído de alto-falante e é normalmente limitado para medir $R'_w < 40$ dB.

No Anexo D da parte 5 da ISO 140 [16], o método com ruído de tráfego rodoviário é substituído pelos métodos correspondentes com ruído de tráfego ferroviário e aéreo, quando os parâmetros obtidos são $R'_{r,s}$ e $R'_{at,s}$.

2.7.2 Método global com ruído de tráfego rodoviário

O método global com ruído de tráfego rodoviário quantifica o isolamento sonoro aéreo de uma fachada completa ou mesmo de uma edificação completa (numa situação específica) numa posição 2 m em frente à fachada, ou seja, fornece a redução sonora real de uma fachada num dado local relativa a uma posição 2 m em frente à fachada. Os parâmetros medidos são $D_{tr,2m,nT}$ e $D_{tr,2m,n}$ e esse é o método preferido quando o objetivo da medição é avaliar o desempenho da fachada completa, incluindo todos os caminhos de transmissão lateral, numa posição específica relativa a rodovias próximas. Entretanto, seu resultado não pode ser comparado com o de medições em laboratório.

Para os casos de ruído de tráfego ferroviário e aéreo, os parâmetros são $D_{rt,2m,nT}$, $D_{rt,2m,n}$, $D_{at,2m,nT}$ e $D_{at,2m,n}$.

2.8. Precisão de medições de isolamento de fachadas

Com relação à precisão, a norma ISO 140-5 [16] cita que o procedimento de medição “*deve dar repetitividade satisfatória, determinada de acordo com o método dado na ISO 140 parte 2 e que deve ser verificado de tempos em tempos, particularmente quando uma mudança é feita no procedimento ou instrumentação*”. Também informa que requisitos numéricos para repetitividade são dados na ISO 140-2.

Como o isolamento sonoro de janelas e de pequenos elementos de fachada depende de suas dimensões, os valores obtidos em campo podem diferir consideravelmente se a construção possuir uma área diferente daquela testada em laboratório. Segundo a ISO 140-5 [16], para uma área maior do que a testada em laboratório, o isolamento obtido em campo será geralmente menor.

Para medições com o método de elemento com ruído de alto-falante, conforme a ISO 140-5, se a variação nos níveis de pressão sonora entre as diferentes posições de microfone no lado de fora for menor que 10 dB, o valor do índice de redução sonora aparente ponderado $R'_{45^\circ,w}$, obtido por esse método, pode ser entre 0 e 2 dB acima do valor do índice de redução sonora correspondente R_w medido em laboratório, considerando idênticas as condições de montagem (tamanho do vão ou nicho, tipo de elemento e seu tamanho). Nas bandas de frequências abaixo de 250 Hz, as diferenças podem ser maiores [16]. Além disso, a reprodutibilidade das medições também deve ser

levada em consideração e a norma informa que medições em laboratório têm mostrado uma reprodutibilidade de aproximadamente 2 dB para o valor de R_w .

Para medições com o método global com ruído de alto-falante, a ISO 140-5 afirma que a reprodutibilidade costuma ser de aproximadamente 2 dB.

Para medições com os métodos de elemento e global com ruído de tráfego (rodoviário, ferroviário ou aéreo), segundo a ISO 140-5 [16], a precisão não é conhecida e a norma cita que “*então, os resultados de medição devem ser usados com muito cuidado.*”

2.9. ISO 717 - procedimento para obter um valor único para caracterizar o isolamento

A norma ISO 717 de 1996 tem como objetivo padronizar procedimentos para converter os valores de isolamento sonoro, dependentes da frequência, em valores únicos ou índices ponderados e é composta de duas partes, [9], [10], e de uma errata de 2006 [28]. Os valores únicos são úteis para classificar o isolamento sonoro e para simplificar o estabelecimento de requisitos ou níveis de desempenho acústico em normas ou códigos de edificações.

A ISO 717-1 [9] se aplica a medições de isolamento sonoro aéreo conforme as partes 3, 4, 5, 9 e 10 da ISO 140 [5] e leva em consideração diferentes espectros de fontes sonoras, como fontes internas à edificação e tráfego fora da mesma. A ISO 717-2 [10] é similar à primeira, porém se aplica a medições de isolamento de ruído de impacto, de acordo com as partes 6, 7 e 8 da ISO 140 [5] e os valores de referência são diferentes dos apresentados na parte 1.

As normas ISO 140 [5] estabelecem que os resultados devem ser arredondados para uma casa decimal antes do cálculo do valor único: $XX,XYZZ\dots$ deve ser arredondado para XX,X se Y for menor que 5 e para $XX,X + 0,1$ se Y for igual ou maior que 5. Conforme o procedimento da ISO 717-1 [9], os valores medidos dos parâmetros de isolamento sonoro aéreo, com uma casa decimal, são comparados com valores de referência fornecidos para as frequências de medição de 125 Hz a 2000 Hz em bandas de oitava e de 100 Hz a 3150 Hz em bandas de terço de oitava, mostrados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Valores de referência para som aéreo em bandas de terço de oitava [9].

Frequência [Hz]	Valores de referência [dB]	Frequência [Hz]	Valores de referência [dB]
100	33	630	53
125	36	800	54
160	39	100	55
200	42	1250	56
250	45	1600	56
315	48	2000	56
400	51	2500	56
500	52	3150	56

O procedimento de comparação é o seguinte:

Deve-se mover a curva de valores de referência (ver Figura 2.9) para cima ou para baixo em incrementos de 1 dB em direção à curva medida até que a soma dos desvios desfavoráveis ou deficiências seja próxima a 32,0 dB mas não superior a esse valor, para medição em 16 bandas de terço de oitava, ou 10,0 dB, para medição em 5 bandas de oitava. Um desvio desfavorável ou deficiência em uma frequência particular equivale à diferença entre o valor medido e o valor de referência, quando o valor medido é menor que o valor de referência.

O valor único ou índice ponderado de isolamento sonoro aéreo será o valor, em dB, da curva de referência em 500 Hz, após movê-la de acordo com o procedimento descrito.

Dessa forma, podem ser obtidos todos os parâmetros ponderados definidos anteriormente: $D_{n,w}$, $D_{nT,w}$, R'_w , $R'_{45^\circ,w}$, $R'_{tr,s,w}$, $D_{ls,2m,nT,w}$ ou $D_{tr,2m,nT,w}$ e $D_{ls,2m,n,w}$ ou $D_{tr,2m,n,w}$. A Figura 2.9 mostra a curva de referência com os valores da Tabela 2.5, a curva medida e a curva de referência após ser deslocada conforme o procedimento descrito. Nesse caso, o valor ponderado obtido é 39 dB, equivalente ao valor da curva de referência deslocada em 500 Hz.

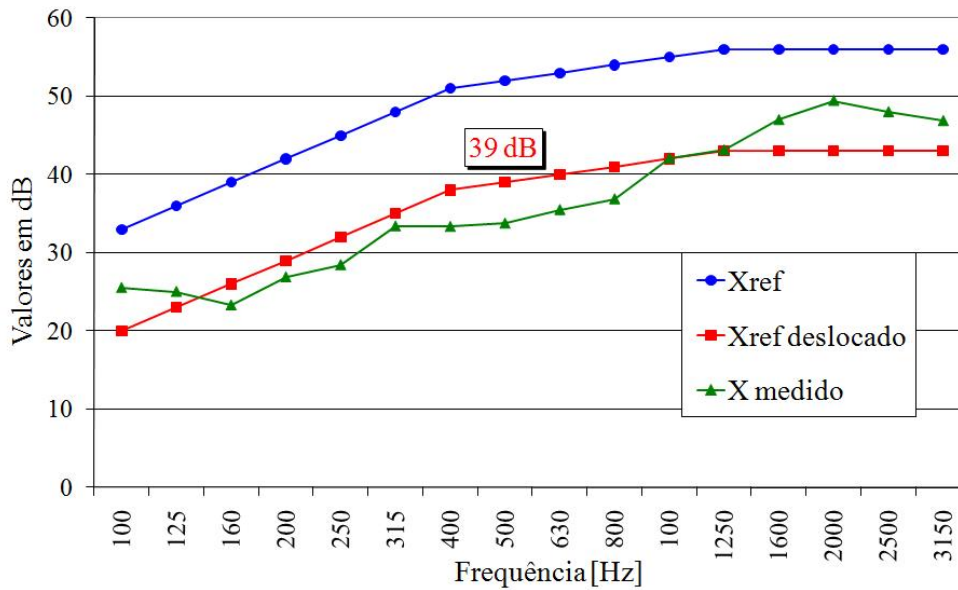


Figura 2.9 - Curva de valores de referência para som aéreo em bandas de terço de oitava antes e após ser deslocada, com um exemplo de curva medida.

Além dos valores ponderados, a ISO 717-1 [9] descreve cálculos para dois coeficientes de adaptação de espectro, C e C_{tr} , em dB, baseados em dois espectros típicos fornecidos (ruído rosa e ruído de tráfego rodoviário), ponderados em A e com o nível de espectro total normalizado para 0 dB. Os coeficientes de adaptação de espectro são valores a serem adicionados ao índice ponderado, considerando as características de espectros sonoros particulares de diferentes fontes sonoras.

Os coeficientes de adaptação de espectro surgiram quando pesquisas mostraram que alterações da curva de referência poderiam melhor representar a aplicação dos resultados. Entretanto, optou-se por manter a curva de referência acompanhada dos mesmos, para manter compatibilidade com o universo de dados já existentes [29]. Esses coeficientes são úteis para evitar o perigo de confusão entre diferentes índices ponderados com magnitudes parecidas e para avaliar curvas de isolamento sonoro com valores muito baixos numa única banda de frequência, pois, nesses casos, os valores ponderados obtidos com a curva de referência possuem validade limitada [9].

O valor do coeficiente de adaptação de espectro de ruído rosa, C , é calculado com o espectro nº 1 (ruído rosa ponderado em A) e o coeficiente de adaptação de espectro de ruído de trânsito, C_{tr} , é calculado com o espectro nº 2 (ruído de tráfego rodoviário ponderado em A). Os espectros da maioria das fontes usuais de ruído interno e externo prevalentes estão na faixa dos espectros nº 1 e nº 2, respectivamente, e, portanto, os

coeficientes de adaptação C e C_{tr} podem ser usados para caracterizar o isolamento sonoro com respeito a outros tipos de ruído. A norma fornece uma tabela que relaciona diferentes fontes de ruído com os coeficientes C e C_{tr} .

Para expressar o valor ponderado do resultado de medições de desempenho de elementos de edificação, os dois coeficientes de adaptação de espectro devem estar entre parênteses separados por ponto-e-vírgula após o valor ponderado, por exemplo: $D_{nT,w}(C; C_{tr}) = 39 (-1; -5)$ dB. Para expressar o valor único resultante de medições de desempenho de edificações e também valores de requisitos, deve-se apresentar somente o valor ponderado ou sua soma com o coeficiente de adaptação de espectro relevante, por exemplo: $R'_w + C_{tr} \geq 34$ dB (para fachadas) ou $D_{nT,w} + C \geq 38$ dB (entre residências). Ou seja, requisitos podem ser baseados apenas no valor ponderado X_w ou na soma ($X_w + C$) ou ($X_w + C_{tr}$), sendo que uma estimativa do nível interno ponderado em A a partir do nível de ruído de tráfego conhecido em frente à fachada e ponderado em A deve ser baseada na soma ($X_w + C_{tr}$) [9].

Segundo a ISO 717-1, para medições em campo de acordo com as partes 4 e 5 da ISO 140, pode haver diferenças entre valores únicos calculados a partir de medições em bandas de terço de oitava ou de oitava de aproximadamente ± 1 dB.

A norma informa que C é geralmente cerca de -1 , mas quando há uma queda na curva de isolamento sonoro numa única banda de frequência, C se torna menor que -1 . Portanto, ao comparar construções, pode ser apropriado considerar ambos R_w e C . Informa também que, para diferentes formatos de janela com a mesma construção básica, o valor do coeficiente C_{tr} será quase que geralmente o mesmo e nesses casos pode ser apropriado usar R_w para a sua classificação. No entanto, ao comparar tipos muito diferentes de construções, ambos R_w e C_{tr} devem ser considerados.

2.10. Norma brasileira de desempenho de edificações

O conjunto de normas brasileiras para a avaliação do desempenho de edifícios habitacionais de até cinco pavimentos, ABNT NBR 15575 [4], foi elaborado pelo Comitê Brasileiro da Construção Civil (COBRACON) e seu projeto circulou em consulta nacional antes da sua publicação pela ABNT no ano de 2008. As normas inicialmente passariam a ser válidas a partir de maio de 2010, entrando em vigor em

novembro de 2010. Entretanto, às vésperas de tornarem-se obrigatórias, as normas tiveram seu prazo de obrigatoriedade de cumprimento adiado para 12 de março de 2012.

A norma de desempenho busca atender às exigências dos usuários e é composta de seis partes que se referem a diferentes sistemas que compõem edifícios habitacionais de até cinco pavimentos: sistemas estruturais [30], pisos internos [31], vedações verticais internas e externas [32], coberturas [33] e sistemas hidrossanitários [34], sendo que a primeira parte da norma [35] se refere a requisitos gerais comuns aos outros sistemas.

O estabelecimento do desempenho é definido através de requisitos (qualitativos), critérios (quantitativos ou premissas) e métodos de avaliação que permitem mensurar o seu cumprimento e que podem ser desde a realização de ensaios laboratoriais ou ensaios em campo, inspeções em protótipos ou em campo, até simulações ou análise de projetos.

Juntamente com outros tópicos, como desempenho estrutural, térmico e lumínico, o desempenho acústico é considerado e as normas apresentam valores mínimos, intermediários e superiores para níveis de desempenho de alguns parâmetros de isolamento sonoro, que devem ser medidos em função da frequência de acordo com as normas internacionais ISO 140 [5] ou ISO 10052 [6] e com valores ponderados obtidos conforme a ISO 717 [9], [10].

Os níveis de desempenho mínimos (M) devem ser considerados e atendidos em alguns casos e recomendados em outros casos, enquanto os níveis intermediários (I) e superiores (S) objetivam possibilitar uma melhora na qualidade da edificação e uma análise da relação custo/benefício por parte dos usuários. Ou seja, ao comprar uma residência que atenda aos níveis de desempenho superiores (S), o morador saberá que está pagando mais caro por uma edificação com melhor desempenho, como se estivesse comprando esse desempenho. Para isto, a norma recomenda informar o nível de desempenho obtido quando este exceder o nível mínimo (M).

A avaliação do desempenho exige o domínio de conhecimentos sobre cada aspecto funcional da edificação, desde materiais e técnicas de construção, até as diferentes exigências dos usuários nas diversas condições de uso. A norma recomenda que a avaliação do desempenho seja realizada por *“instituições de ensino ou pesquisa, laboratórios especializados, empresas de tecnologia, equipes multi-profissionais ou profissionais de reconhecida capacidade técnica”*, ou seja, a norma não especifica a formação ou especialização desses profissionais. Em outras palavras, qualquer profissional ou equipe que se julgue capaz realizará as medições, o que pode vir a se

tornar um problema no futuro, pois será complicado garantir o resultado dessas medições.

No projeto das normas [36], que passou por consulta pública, considerava-se que, sempre que possível, os laboratórios especializados fossem “*acreditados pela Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaio (RBLE)*”, mas essa consideração foi retirada na versão publicada.

Embora a ABNT NBR 15575 [4] considere edificações de até cinco pavimentos, a maioria dos requisitos e critérios pode ser aplicada a edifícios com mais de cinco pavimentos, com exceção daqueles que dependam diretamente da altura do edifício.

A norma não se aplica a obras em andamento ou a edificações concluídas até a data da publicação da mesma, nem a projetos protocolados nos órgãos competentes até seis meses após essa data (que seria novembro de 2010, mas foi adiada para março de 2012) e também não se aplica a obras de reformas e nem de “*retrofit*” (remodelação ou atualização do edifício). Isto significa, na prática, que até a norma ser realmente atendida, levará certo tempo, embora não haja dúvida de que sua aplicação acarretará uma demanda por medições em campo ainda inédita em nosso país.

O adiamento da obrigatoriedade de cumprimento da norma deve-se a várias razões: aumentos de custos, dúvidas quanto ao conceito de desempenho, mudança de cultura para uma visão sistêmica das edificações, falta de dados da cadeia de fornecimento de produtos e sistemas, escassez de laboratórios para atender à demanda de ensaios, responsabilidade jurídica, cobranças do consumidor, etc.

Apesar de existirem aspectos técnicos a serem melhorados, a mudança foi mais uma questão política do que técnica e partiu basicamente do governo, preocupado com as habitações populares para as quais diferentes produtos e procedimentos precisarão ser adotados.

Após o adiamento, foram formados grupos de trabalho para analisar os itens considerados mais duvidosos e problemáticos, entre eles o conforto acústico, e a norma está atualmente em processo de revisão para permitir a adequação de alguns níveis de desempenho requeridos.

2.10.1 Desempenho acústico

Em relação ao comportamento acústico, o edifício habitacional deve proporcionar conforto e privacidade acústica aos seus ocupantes, assegurando a não inteligibilidade

da comunicação verbal entre ambientes adjacentes, através tanto do isolamento sonoro adequado entre ambientes do próprio edifício, como do isolamento sonoro adequado das vedações externas com relação aos ruídos aéreos provenientes de fontes externas à habitação. Ou seja, o edifício deve atenuar a propagação do som produzido e transmitido via ar ou estrutura devido a ruídos de uso normal (TV, conversa ou música, por exemplo) e ruídos de impactos ou de equipamentos (passos, queda de objetos, elevadores, válvulas de descarga, etc.). A parte 1 da ABNT NBR 15575 [4] lista as seguintes premissas que devem ser consideradas na fase de projeto:

- a) avaliação das condições do entorno, em relação ao ruído de fundo;
- b) nível de ruído externo à edificação e valores-limites estabelecidos para uso interno dos ambientes, ou seja, os níveis de ruído de fundo para o conforto acústico determinados de acordo com a NBR 10151 [1] e com limites especificados na NBR 10152 [2] a partir do local de implantação da obra e do uso a que se destina a edificação ou suas dependências, e conforme a legislação local;
- c) redução do ruído entre o lado externo e o lado interno de ambientes de uso específico, inclusive fachadas;
- d) condições de geração, propagação e recepção dos sons na edificação;
- e) ruídos variáveis, contínuos, de impactos e de vibrações de equipamentos, como motores-bomba, elevadores, válvulas de descarga, motores geradores de energia, tubulações de água e esgoto, ventilação e ar-condicionado.

2.10.2 Parte 1 - Requisitos gerais

A primeira parte da norma ABNT NBR 15575-1 [35] adota os seguintes requisitos e critérios gerais para desempenho acústico que devem ser considerados junto à análise do projeto e devem atender às NBR 10151 [1] e NBR 10152 [2], além de considerar os métodos de avaliação descritos nas outras partes da norma.

2.10.2.1 Requisito 1 - Isolação acústica de vedações externas

O critério relativo a esse requisito é chamado “nível tolerável de ruído no interior da habitação” e considera que a edificação submetida aos limites de estímulos sonoros externos especificados na NBR 10151 [1], deve atender aos limites especificados pela NBR 10152 [2], para níveis de ruído nos ambientes internos. A norma de desempenho

cita que o método de avaliação deve ser “*o mesmo especificado na NBR 10152*”; entretanto, a NBR 10152 não descreve nenhum método de avaliação, ela apenas fornece os níveis de ruído compatíveis com o conforto acústico em diversos ambientes e informa que devem ser seguidas as disposições de avaliação descritas na NBR 10151.

2.10.2.2 Requisito 2 - Isolação acústica entre ambientes

Esse requisito considera dois critérios: “isolação ao som aéreo entre pisos e paredes internas” e “isolação ao som aéreo da envoltória da habitação (vedações externas e coberturas)”, estabelecidos nas partes 3, 4 e 5 da ABNT NBR 15575 junto com seus respectivos métodos de avaliação.

2.10.2.3 Requisito 3 - Ruídos por impactos e ruídos de equipamentos

O critério relativo a esse requisito é chamado “ruídos gerados por impactos ou vibrações”, abordado nas partes 3, 4, 5 e 6 da norma, com seus métodos de avaliação especificados.

2.10.3 Parte 2 - Requisitos para sistemas estruturais

A segunda parte da norma [30] se refere ao sistema estrutural do edifício e o tópico desempenho acústico não é abordado.

2.10.4 Parte 3 - Requisitos para sistemas de pisos internos

O piso do edifício deve proporcionar isolamento sonoro tanto entre unidades distintas como entre dependências de uma mesma unidade, principalmente aquelas destinadas ao repouso noturno, ao lazer doméstico e ao trabalho intelectual. A terceira parte da ABNT NBR 15575 [31] se aplica a pisos internos ou sistemas de pisos, incluindo acabamentos sujeitos a desgastes e seus substratos que podem gerar ruídos em edificações de vários pavimentos. Ela pode ser aplicada a edifícios habitacionais independente do número de pavimentos, mas não a pisos industriais.

Com relação ao desempenho acústico, as seguintes normas são referenciadas nessa parte: NBR 10151 [1], NBR 10152 [2], ISO 10052 [6], ISO 140-3 [37], ISO 140-4 [15],

ISO 140-7 [38], ISO 717-1 [9] e ISO 717-2 [10]. Como essas normas ISO não possuem versões em português, a norma brasileira manteve os símbolos originais em inglês; o que também foi feito no presente trabalho.

2.10.4.1 Requisito 1 - Ruído de impacto em piso

O critério é chamado “ruído de impacto aéreo para ensaio de campo”, com os valores para os níveis de desempenho de isolamento sonoro de impacto proporcionado pelo entrepiso entre os ambientes obtidos conforme a ISO 140-7 [38] ou ISO 10052 [6] e a ISO 717-2 [10]. O Apêndice A deste trabalho apresenta tais valores e seus métodos de avaliação a título de curiosidade, pois no presente trabalho não será abordado isolamento de ruído de impacto.

2.10.4.2 Requisito 2 - Isolamento de ruído aéreo entre pisos de unidades habitacionais

Dois parâmetros de isolamento (para pisos ou para o conjunto piso e forro da unidade habitacional inferior) são considerados critérios para esse requisito: a “diferença padronizada de nível ponderada entre ambientes $D_{nT,w}$ ” ou o “índice de redução sonora ponderado R_w ”, dependendo se as medições são realizadas em campo ou em laboratório. Nos dois casos, portas e janelas devem estar fechadas durante as medições. A Tabela 2.6 apresenta os valores dos níveis de desempenho para esses critérios, sendo M o nível de desempenho mínimo de aceitação.

Tabela 2.6 - $D_{nT,w}$ para ensaio em campo e R_w para ensaio em laboratório [31].

Elemento	Campo $D_{nT,w}$ [dB]	Laboratório R_w [dB]	Nível de desempenho
Piso de unidade habitacional, posicionado sobre áreas comuns, como corredores	35	40	M
	40 a 45	45 a 50	I
	> 45	> 50	S
Piso separando unidades habitacionais autônomas (unidades habitacionais posicionadas em pavimentos distintos)	40	45	M
	45 a 50	50 a 55	I
	> 50	> 55	S

O método de avaliação dos critérios pode ser um dos três abaixo:

1) método de precisão, realizado em laboratório conforme a ISO 140-3 [37], que determina o índice de redução sonora R de componentes construtivos, em bandas de terço de oitava entre 100 Hz e 5000 Hz; e seu resultado é aplicável a diferentes projetos;

2) método de engenharia, realizado em campo de acordo com a ISO 140-4 [15], que determina rigorosamente a diferença padronizada de nível, D_{nT} , global, entre ambientes em campo, para bandas de terço de oitava entre 100 Hz e 3150 Hz ou bandas de oitava entre 125 Hz e 2000 Hz, mas seu resultado se restringe apenas ao sistema avaliado;

3) método simplificado, realizado somente em campo conforme a ISO 10052 [6], que fornece uma estimativa da diferença padronizada de nível, D_{nT} , em bandas de oitava entre 125 Hz e 2000 Hz, em situações onde não se dispõe de instrumentação necessária para medir o tempo de reverberação ou quando as condições de ruído de fundo não permitem obter esse parâmetro.

A escolha do método deve ser feita considerando-se as necessidades e características de cada um, embora, para medições em campo, a norma recomende utilizar o método de engenharia. Os valores únicos R_w ou $D_{nT,w}$ devem ser obtidos conforme a ISO 717-1 [9].

Caso o piso entre os ambientes consista de mais de um componente construtivo, o sistema composto pode ser ensaiado tanto em campo como em laboratório ou então cada componente pode ser ensaiado separadamente em laboratório e depois calculado o isolamento resultante do conjunto a partir dos valores individuais de cada componente.

2.10.5 Parte 4 - Requisitos para sistemas de vedações verticais internas e externas

A parte 4 da norma [32] se aplica a sistemas de vedações verticais internas e externas, como paredes e divisórias entre ambientes, que exercem importantes funções como: isolamento térmico e acústico, estanqueidade à água, compartimentação em casos de incêndio e capacidade de fixação de peças suspensas. Apenas um requisito acústico é considerado nessa parte, com quatro critérios de desempenho, devendo também ser compatível com os níveis de ruído de fundo conforme as NBR 10151 [1] e NBR 10152 [2]. As normas relativas à acústica também referenciadas são: ISO 140-3 [37], ISO 140-4 [15], ISO 140-5 [16], ISO 717-1 [9] e ISO 10052 [6].

As vedações verticais devem proporcionar isolamento sonoro entre o meio externo e o interno, bem como entre unidades condominiais distintas, além de isolamento

sonoro entre dependências de uma mesma unidade, principalmente quando destinadas ao repouso noturno, ao lazer doméstico e ao trabalho intelectual. O requisito acústico definido é chamado “níveis de ruído admitidos na habitação” e para verificar seu atendimento, as medições de isolamento sonoro podem ser feitas em campo ou em laboratório, com um dos três métodos a seguir:

1) método de precisão, realizado em laboratório de acordo com a ISO 140-3 [37], para obter o índice de redução sonora R de componentes construtivos e de elementos com mais de um componente (parede com janela ou com porta), ensaiando separadamente cada componente e depois calculando o isolamento global do conjunto;

b) método de engenharia, realizado em campo, conforme a ISO 140-4 [15] para vedações verticais internas ou conforme a ISO 140-5 [16] para vedações verticais externas e fachadas (conjunto fachada e cobertura, no caso de casas térreas, e somente fachada, nos edifícios multipiso). Esse método é o mais recomendado para medições em campo, pois é rigoroso ao determinar o isolamento sonoro global das vedações. Entretanto, seu resultado se restringe a apenas esse sistema;

3) método simplificado, realizado em campo de acordo com a ISO 10052 [6], que fornece uma estimativa do isolamento sonoro global da vedação interna ou externa (conjunto fachada e cobertura, em casas térreas, e apenas fachada, em edifícios multipiso).

2.10.5.1 Critério de desempenho 1 - Diferença padronizada de nível ponderada promovida pela vedação externa (conjunto fachada e cobertura, no caso de casas térreas, e somente fachada, nos edifícios multipiso) em ensaio de campo

Os ambientes do edifício habitacional devem atender à NBR 10152 [2] e devem ser avaliados os dormitórios e a sala de estar da unidade habitacional. No caso de edifícios multifamiliares ou conjuntos habitacionais, devem ser avaliados os dormitórios de unidades habitacionais escolhidas como sendo representativas.

As medições devem ser realizadas com portas e janelas fechadas, ensaiando a fachada completa, através de um dos dois métodos de campo descritos acima (método de engenharia conforme a ISO 140-5 [16] ou método simplificado), junto com o procedimento especificado na ISO 717-1 [9], para determinar o valor da diferença padronizada de nível ponderada a 2 metros da fachada, $D_{2m,nT,w}$.

Os níveis de desempenho estabelecidos para esse critério estão listados na Tabela 2.7, sendo o nível de desempenho mínimo M recomendado, e não obrigatório. Se a habitação estiver localizada junto a vias de tráfego intenso (rodoviário, ferroviário ou aéreo), deve-se acrescentar 5 dB aos valores de $D_{2m,nT,w}$. Para vedação externa de cozinhas, lavanderias e banheiros, não há exigências específicas.

Tabela 2.7 - $D_{2m,nT,w}$ da vedação externa para ensaio em campo [32].

Sistema (Elemento)	$D_{2m,nT,w}$ [dB]	$D_{2m,nT,w} + 5$ [dB]	Nível de desempenho
Vedação externa de dormitórios	25 a 29	30 a 34	M - recomendado
	30 a 34	35 a 39	I
	≥ 35	≥ 39	S

2.10.5.2 Critério de desempenho 2 - Índice de redução sonora ponderado dos elementos construtivos da fachada pelo ensaio de laboratório

Os níveis de desempenho para o índice de redução sonora ponderado da fachada, R_w , considerando paredes cegas, estão indicados na Tabela 2.8, onde o nível mínimo M é recomendado, e não obrigatório. O método de precisão deve ser usado junto com o procedimento da ISO 717-1 [9] na determinação dos valores de R_w . Para verificar o desempenho global, incluindo janelas, e na ausência de valores de R_w para fachadas com janelas, devem ser adotados os valores da Tabela 2.7 relativos a medições em campo.

Tabela 2.8 - R_w da fachada para ensaio em laboratório [32].

Sistema (Elemento)	R_w [dB]	$R_w + 5$ [dB]	Nível de desempenho
Fachada	30 a 34	35 a 39	M - recomendado
	35 a 39	40 a 44	I
	≥ 39	≥ 45	S

2.10.5.3 Critério de desempenho 3 - Diferença padronizada de nível ponderada entre ambientes (vedações verticais internas) em ensaio de campo

Os níveis de desempenho para a diferença padronizada de nível ponderada das vedações verticais internas, $D_{nT,w}$, são fornecidos na segunda coluna da Tabela 2.9 que considera os valores para paredes cegas medidos através de um dos métodos de campo descritos acima (de engenharia conforme a ISO 140-4 [15] ou simplificado) junto com o

procedimento da ISO 717-1 [9] para obter seu valor ponderado. O nível de desempenho mínimo M é recomendado, mas não é obrigatório.

Tabela 2.9 - $D_{nT,w}$ entre ambientes para ensaio em campo e R_w dos componentes construtivos para ensaio em laboratório [32].

Elemento da edificação	$D_{nT,w}$ [dB]	R_w [dB]	Nível de desempenho
Parede de salas e cozinhas entre uma unidade habitacional e áreas comuns de trânsito eventual, como corredores, halls e escadaria nos pavimentos-tipo	30 a 34	35 a 39	M - recomendado
	35 a 39	40 a 44	I
	≥ 40	≥ 45	S
Parede de dormitórios entre uma unidade habitacional e áreas comuns de trânsito eventual, como corredores, halls e escadaria nos pavimentos-tipo	40 a 44	45 a 49	M
	45 a 49	50 a 54	I
	≥ 50	≥ 55	S
Parede entre uma unidade habitacional e áreas comuns de permanência de pessoas, atividades de lazer e esportivas, como <i>home theater</i> , salas de ginástica, salão de festas, salão de jogos, banheiros e vestiários coletivos, cozinhas e lavanderias coletivas	45 a 49	50 a 54	M
	50 a 54	55 a 59	I
	≥ 55	≥ 60	S
Parede entre unidades habitacionais autônomas (parede de geminação)	40 a 44	45 a 49	M
	45 a 49	50 a 54	I
	≥ 50	≥ 55	S

2.10.5.4 Critério de desempenho 4 - Índice de redução sonora ponderado entre ambientes pelo ensaio de laboratório

O isolamento entre ambientes deve apresentar níveis de desempenho para o índice de redução sonora ponderado, R_w , conforme indicado na terceira coluna da Tabela 2.9. O método de avaliação é o mesmo do critério de desempenho 2 e o nível de desempenho M também é recomendado. Para verificar o desempenho global, incluindo portas, e na ausência de valores de R_w para paredes com portas, a norma informa que devem ser adotados os valores de $D_{nT,w}$, medidos em campo.

2.10.6 Parte 5 - Requisitos para sistemas de coberturas

A parte 5 da norma [33] considera sistemas de coberturas e seus componentes. O termo sistema de cobertura se refere à cobertura disposta no topo da construção, com as funções de assegurar estanqueidade às águas pluviais e salubridade, contribuir para o conforto termo-acústico do edifício e protegê-lo da deterioração por agentes naturais.

Com relação ao desempenho acústico, o sistema de cobertura deve proporcionar condições de isolamento sonoro para repouso noturno nos dormitórios e para atividades

intelectuais, de descanso e de lazer doméstico nas salas de estar e, no caso de edifícios que possibilitam acesso coletivo à cobertura, o projeto deve especificar o uso coletivo da cobertura que deve apresentar isolamento sonoro para ruídos transmitidos por impactos.

As normas referenciadas são: NBR 10151 [1], NBR 10152 [2], ISO 140-3 [37], ISO 140-4 [15], ISO 140-5 [16], ISO 140-7 [38], ISO 717-1 [9], ISO 717-2 [10] e ISO 10052 [6]. É uma premissa de projeto especificar o uso de cada ambiente e, para essa parte da norma, o nível de desempenho mínimo é de atendimento obrigatório e dois requisitos acústicos são especificados com os critérios de avaliação correspondentes.

2.10.6.1 Requisito 1 - Isolação acústica da cobertura devida a sons aéreos (fontes de emissão externas)

Esse requisito se refere ao isolamento de ruído aéreo, mas não ao ruído de impacto de chuva e, segundo a parte 5 da norma [33], o nível de desempenho mínimo foi estabelecido considerando nível de ruído de fundo ponderado em A de até 75 dB. As medições de isolamento sonoro podem ser realizadas em campo ou em laboratório, com um dos três métodos abaixo, com portas e janelas fechadas:

1) método de precisão, realizado em laboratório de acordo com a ISO 140-3 [37], para determinar o índice de redução sonora R dos componentes construtivos ou do conjunto de componentes;

2) método de engenharia, em campo, conforme a ISO 140-5 [16], para determinar o isolamento sonoro global da vedação externa, $D_{2m,nT,w}$, sendo o método mais recomendado para as medições em campo;

3) método simplificado, realizado em campo de acordo com a ISO 10052 [6].

2.10.6.2 Critério de desempenho 1 - Isolação acústica da cobertura devida a sons aéreos para casas térreas pelo ensaio de campo

A vedação externa da unidade habitacional (fachada e cobertura) deve apresentar diferença padronizada de nível ponderada a 2 metros da fachada, $D_{2m,nT,w}$, conforme os níveis indicados na Tabela 2.10. No caso de habitação localizada junto a vias de tráfego intenso, devem ser utilizados os valores de $D_{2m,nT,w}$ acrescidos de 5 dB. Para medir

$D_{2m,nT,w}$ pode-se utilizar um dos métodos em campo e o procedimento da ISO 717-1 [9] e, sempre que possível, deve-se adotar o método de engenharia.

Tabela 2.10 - $D_{2m,nT,w}$ da vedação externa para ensaio em campo [33].

Elemento (Sistema)	$D_{2m,nT,w}$ [dB]	$D_{2m,nT,w} + 5$ [dB]	Nível de desempenho
Vedação externa (fachada + cobertura)	30 a 34	35 a 39	<i>M</i> - obrigatório
	35 a 39	40 a 44	<i>I</i>
	≥ 40	≥ 45	<i>S</i>

2.10.6.3 Critério de desempenho 2 - Índice de redução sonora ponderado da cobertura pelo ensaio de laboratório

A cobertura da unidade habitacional deve apresentar índice de redução sonora ponderado R_w conforme a Tabela 2.11. Se a habitação estiver localizada junto a vias de tráfego intenso, deve-se somar 5 dB ($R_w + 5$ dB) e quando o sistema de cobertura for constituído por vários componentes, o ensaio deve ser realizado ou no sistema completo ou para cada componente e então calculado o isolamento resultante. Para determinar os valores de R_w deve ser usado o método de precisão em laboratório e a ISO 717-1 [9].

Tabela 2.11 - R_w da cobertura para ensaio em laboratório [33].

Elemento (Sistema)	R_w [dB]	$R_w + 5$ [dB]	Nível de desempenho
Cobertura	35 a 39	40 a 44	<i>M</i> - obrigatório
	40 a 44	45 a 49	<i>I</i>
	≥ 45	≥ 50	<i>S</i>

2.10.6.4 Requisito 2 - Isolação de ruído de impacto para as coberturas acessíveis de uso coletivo

O critério é chamado “isolação de ruídos de impactos em coberturas acessíveis de uso coletivo” e os valores dos níveis de desempenho e seus métodos de avaliação são apresentados no Apêndice A deste trabalho.

2.10.7 Parte 6 - Requisitos para sistemas hidrossanitários

A sexta e última parte da norma [34] se refere aos sistemas hidrossanitários, que são os sistemas hidráulicos prediais destinados a suprir os usuários com água potável e

de reuso, a coletar e afastar os esgotos sanitários, bem como a coletar e dar destino às águas pluviais. Essa parte da norma não faz nenhuma referência a normas da área de acústica, embora especifique um requisito de desempenho acústico com dois critérios de avaliação. O requisito é chamado “limitação de ruídos” e considera que os sistemas hidrossanitários da edificação não devem “*provocar ruídos desagradáveis aos seus usuários*”. Os critérios especificados para o requisito são “velocidade de escoamento da água” e “ruídos gerados por vibrações”. Para o primeiro critério, de acordo com a norma, a velocidade de escoamento da água nas tubulações dos sistemas prediais de água fria, água quente e águas pluviais não deve ser superior a valores fornecidos por algumas normas brasileiras específicas referenciadas, incluindo a NBR 10152 [2] quando aplicável. Para o segundo critério, as tubulações, equipamentos e demais componentes sujeitos a esforços dinâmicos devem ser projetados para que não propaguem vibrações aos elementos das edificações.

A norma informa que os métodos de avaliação consistem na análise de projeto quanto aos dispositivos previstos para eliminação de ruídos, incluindo a avaliação das justificativas técnicas, e quanto ao atendimento das normas referenciadas. Entretanto, não são especificados valores para nenhum desses critérios, o que nos permite concluir que são critérios ainda pouco estudados.

2.10.8 Valores de incerteza admitidos

Um ponto em aberto na ABNT NBR 15575 [4] é em relação a limites de tolerância ou incertezas nas medições. No projeto de norma [36] enviado à consulta pública havia notas com valores admissíveis de incertezas relativas às medições, resumidos a seguir:

- Para medições de $D_{nT,w}$: incerteza de ± 2 dB.
- Para medições de R_w : incerteza total de ± 2 dB, sendo ± 1 dB relativo à medição e ± 1 dB para garantir a representatividade da amostra ensaiada.
- Para medições de $D_{2m,nT,w}$: incerteza de ± 1 dB.

Entretanto, essas recomendações foram retiradas da versão publicada da norma de desempenho, na qual em nenhuma parte é fornecido qualquer valor relativo à incerteza de medição para os parâmetros acústicos considerados nos diferentes critérios de desempenho.

Apesar do conceito de incerteza ainda ser pouco utilizado e não estar difundido em todas as áreas de conhecimento consideradas na norma de desempenho, valores de incerteza ou limites de tolerância deveriam ser informados na versão publicada da norma.

2.11 Valores de isolamento estabelecidos por outros países

Assim como o Brasil, vários países possuem algum tipo de regulamentação de isolamento sonoro em edificações, e dentre esses praticamente todos apresentam critérios mais exigentes que os propostos na norma brasileira de desempenho, geralmente com os valores dos níveis intermediário ou superior.

A Tabela 2.12 apresenta exemplos de critérios de alguns países para o isolamento sonoro aéreo mínimo exigido entre ambientes. O Apêndice A apresenta exemplos para o isolamento sonoro de ruído de impacto em pisos.

Tabela 2.12 - Critérios internacionais para isolamento sonoro entre ambientes [29].

País	Tipo de regulamentação	Critério mínimo de isolamento
África do Sul	Regulamentação específica	$D_{nT,w} = 45$ dB
Alemanha	Norma DIN 4109	$R'_w = 54$ a 57 dB
Argentina	Norma IRAM 4044	$R'_w = 48$ dB
Austrália	Código de edificação	$R_w + C_{tr} = 50$ dB
Canadá	Código de edificação	FSTC = 55 dB
Estados Unidos	Diversas regulamentações	STC (laboratório) = 50 dB ou FSTC (campo) = 45 dB
França	Regulamentação específica	$D_{nT,w} + C_{tr} = 53$ dB
Holanda	Norma NEN 1070	$D_{nT,w} + C = 52$ a 57 dB
Itália	Regulamentação específica	$R_w = 50$ dB
Noruega	Norma NS 8175	$R'_w = 53$ dB (classe C)
Nova Zelândia	Código de edificação	$D_{nT,w} + C_{tr} = 55$ dB
Portugal	Regulamentação específica	$D_{n,w} = 50$ dB
Reino Unido	Regulamentação específica	$D_{nT,w} + C_{tr} = 45$ dB

CAPÍTULO 3

INCERTEZAS EM ISOLAMENTO SONORO

3.1. Documentos básicos em metrologia: VIM e GUM

O resultado de uma medição deve ser acompanhado de sua incerteza. Entretanto, antes de estimar a incerteza de uma medição, deve-se aplicar uma metodologia para avaliar a confiabilidade dos valores medidos, mesmo que tenham sido obtidos através de métodos normalizados [39], [40], [41]. Portanto, deve-se estabelecer uma metodologia para avaliar a confiabilidade metrológica dos resultados.

Os documentos normativos básicos em metrologia – a ciência da medição e sua aplicação – que contribuem para a harmonização internacional de procedimentos, termos e expressão dos resultados metrológicos são o “*Vocabulário Internacional de Metrologia*” (VIM) [17] e o “*Guia para a Expressão da Incerteza de Medição*” [11], conhecido como GUM. O VIM é um dicionário terminológico que define conceitos e termos associados à metrologia, enquanto o GUM é um guia que estabelece uma metodologia universal para a avaliação e expressão da incerteza de medição, tornando os resultados de medições possíveis de comparação. No Apêndice B do presente trabalho são definidos conceitos utilizados ao longo do texto de acordo com esses documentos. A Figura 4.1 mostra as capas das últimas versões brasileiras do VIM e do GUM e a seguir é apresentado um breve histórico dos dois.



Figura 4.1 - Capas da 1ª edição brasileira do VIM 2008 e da 3ª edição brasileira do GUM.

O VIM surgiu no contexto da metrologia mundial da segunda metade do século XX em busca da harmonização internacional das terminologias e definições utilizadas nos campos da metrologia e da instrumentação. Sua primeira edição foi publicada em 1984 e a segunda, revisada, foi publicada em 1993, com o nome “*International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology*” [42]. As necessidades de englobar medições em química e em medicina laboratorial e de incorporar conceitos que se referem à rastreabilidade metrológica e à incerteza de medição levaram o documento a uma nova revisão.

Em 1997, o Comitê Conjunto para Guias em Metrologia, cuja sigla JCGM vem do inglês “*Joint Committee for Guides in Metrology*”, foi formado por organizações internacionais que trabalham na área de metrologia, e possui dois grupos de trabalho: o Grupo de Trabalho 1 (JCGM/WG1), que tem a tarefa de promover o uso do GUM e preparar suplementos para sua ampla aplicação, e o Grupo de Trabalho 2 (JCGM/WG 2), que tem a tarefa de revisar o VIM e promover seu uso.

A terceira edição do VIM chamada “JCGM 200:2008, *International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms* (VIM) [17]” foi preparada pelo Grupo de Trabalho 2, aprovada e adotada por cada uma das organizações-membro do JCGM. Essa edição assume que não há diferença fundamental nos princípios básicos de medição em física, química, medicina laboratorial, biologia ou engenharia, e cancela e substitui a segunda edição de 1993. Paralelamente, o mesmo documento foi publicado em conjunto pelas organizações ISO (*International Organization for Standardization*) e IEC (*International Electrotechnical Commission*) com a mesma denominação, sendo referenciado como “ISO/IEC GUIDE 99:2007”.

Durante o ano de 2008, alguns técnicos e pesquisadores do Inmetro (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial), incluindo a autora, dedicaram-se à tradução para o português da terceira edição do VIM, com o objetivo de disseminar a cultura metrológica no país. O documento brasileiro é referenciado como “1ª Edição Brasileira do VIM 2008”.

Já o surgimento do GUM ocorreu da seguinte maneira. Em 1977, diante da falta de um consenso internacional sobre a expressão da incerteza de medição, o Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM) solicitou ao Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM) que abordasse o tema junto a laboratórios nacionais de metrologia e que fizesse alguma recomendação sobre o mesmo. O BIPM preparou um questionário detalhado sobre o assunto e o distribuiu para vários laboratórios e cinco organizações

internacionais. No ano de 1979, as respostas foram recebidas pelo BIPM e quase todos concordavam que seria importante haver um procedimento aceito internacionalmente para expressar a incerteza de medição. O BIPM organizou um encontro com especialistas de laboratórios nacionais de metrologia com o objetivo de chegar a tal procedimento e, em 1980, foi estabelecida a “Recomendação INC-1 (1980), *Expressão de Incertezas Experimentais*”, aprovada pelo CIPM em 1981 e reafirmada pelo mesmo em 1986. Essa recomendação está reproduzida no GUM [11].

A tarefa de desenvolver um guia detalhado baseado na Recomendação INC-1 foi solicitada pelo CIPM à ISO, já que essa organização poderia refletir melhor as necessidades vindas de interesses de áreas como indústria e comércio. A primeira versão surgiu em 1993 como ISO/TAG4-WG3 e, em 1995, o GUM foi publicado como “ISO/IEC Guide 98:1995, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)*” [43]. Em 2008, sua segunda edição foi publicada pelo JCGM como “JCGM 100:2008, *GUM 1995 with minor corrections – Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*”, e, paralelamente, pelas ISO e IEC como “ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*” [11].

O Inmetro já publicou junto à ABNT três edições do GUM em português: a primeira em 1997, a segunda em 1998 e a última em 2003, chamada “*Guia para a Expressão da Incerteza de Medição*” [12].

Diante de limitações do GUM, que serão abordadas no próximo capítulo, foi elaborado e publicado em 2008 o seu primeiro suplemento, que considera a propagação de distribuições usando o método de Monte Carlo para estimar a incerteza de medição. O documento também foi publicado em paralelo pelo JCGM e pelas ISO/IEC, como “JCGM 101:2008” e “ISO/IEC Guide 98-3:2008/Suppl 1:2008” [14], e ainda não possui versão em português, mas já está sendo preparada a sua tradução no Inmetro.

3.2. Incertezas em medições acústicas

Apesar dos métodos de avaliação da incerteza de medição descritos no GUM [11] e no seu suplemento [14] já serem utilizados em várias áreas de metrologia, como na química, por exemplo, que possui seu próprio guia [44], o tema incerteza em medições

acústicas permanece em aberto em algumas áreas, como em medições de isolamento sonoro, conforme será mostrado a seguir.

Segundo o comitê técnico em Acústica da ISO, ISO/TC 43, há um número crescente de pedidos por métodos de medições acústicas incluindo as incertezas de medição. Esses pedidos são feitos principalmente por laboratórios de ensaios acreditados, por consultores e por empresas que fazem suas próprias medições acústicas. Adicionalmente, de acordo com o plano operacional do comitê técnico ISO/TC 43 [45], a partir de 2010, toda norma publicada, nova ou revisada, deve conter uma avaliação da incerteza que esteja completamente de acordo com o procedimento descrito no GUM [11]. Portanto, é extremamente necessário um avanço no assunto incerteza em medições acústicas, área que está em expansão e que precisa de pesquisa, segundo o comitê técnico.

Na literatura, há alguns trabalhos publicados abordando estimativa da incerteza de medições de isolamento sonoro realizadas com o método clássico em laboratório, mas poucos para medições em campo. Esses trabalhos geralmente utilizam valores de resultados de testes interlaboratoriais realizados anteriormente, junto com a aplicação de conceitos como valor de repetitividade e valor de reprodutibilidade conforme a norma sobre “precisão” em medições de isolamento sonoro, parte 2 da ISO 140 [13], e poucos trabalhos utilizam o GUM [11].

Quando o assunto é incerteza de medições de isolamento sonoro realizadas com o método de medição da função de transferência, quase nada é encontrado na literatura, nem testes de reprodutibilidade e nem de repetitividade, a não ser os trabalhos publicados relativos a presente pesquisa, que vem avançando na investigação do tema: [46], [47], [48], [49], [50] e [51].

A seguir são abordados alguns trabalhos publicados sobre incerteza em medições de isolamento sonoro, em ordem cronológica, evidenciando o interesse atual no tema.

3.2.1 Primeiras discussões sobre incertezas em medições acústicas

Em setembro de 2003, aconteceu na Alemanha um seminário do grupo de trabalho do comitê técnico em Acústica da ISO, ISO/TC 43, exclusivamente sobre incerteza de medição na área de acústica e, a partir daí, começaram a ser discutidas as questões da necessidade de se estimar a incerteza dos resultados de medições acústicas seguindo os conceitos básicos e procedimentos descritos no GUM [11], algo que ainda não era feito.

WEISE [52] apresentou em 2003 um trabalho abordando e aplicando os conceitos básicos do GUM para medições de nível de pressão sonora. O autor concluiu que as incertezas relativas a níveis de pressão sonora podem ser muito grandes comparadas às incertezas de outras áreas de conhecimento, principalmente para poucos pontos de medição, e que, ao aumentar o número de pontos, a distribuição converge para uma gaussiana. Weise citou também que o GUM deveria ser usado cuidadosamente.

O trabalho de GOYDKE *et al.* [53] em 2003 mostrou algumas considerações sobre avaliação da incerteza de índices ponderados em acústica de edificações e estimou valores para as incertezas do índice de redução sonora ponderado R_w de três elementos construtivos, medidos em laboratório conforme a ISO 140-3 [37]. Entretanto, o autor utilizou os valores dos desvios-padrão de reprodutibilidade obtidos conforme a ISO 140-2 [13] como sendo os desvios-padrão combinados do índice de redução sonora R , quando esses, na verdade, deveriam ser obtidos de acordo com o GUM [11]. Embora os conceitos do GUM não tenham sido aplicados por completo, o trabalho evidencia que a incerteza de medição passou a ser considerada necessária ao afirmar que “*o desempenho acústico de elementos construtivos deve ser expresso não apenas por um índice ponderado determinado de acordo com procedimentos normalizados, mas a expressão do valor de sua incerteza é urgentemente necessária*” e ainda que “*no futuro a incerteza deverá ser expressa de acordo com o GUM*”.

Uma intercomparação promovida pela Associação de Laboratórios Acreditados de Portugal com medições em campo de isolamento sonoro realizada em 2004, gerou ao longo dos anos seguintes alguns estudos e trabalhos sobre o tema ([54], [55], [56]), aplicando inicialmente a metodologia da ISO 140-2 [13] e depois a do GUM [11].

3.2.2 Simpósio sobre incerteza em medições acústicas

Em Le Mans, na França, em 2005, houve um simpósio do INCE-EUROPE específico sobre incerteza em acústica chamado “*Managing Uncertainty in Noise Measurement and Prediction*”. Trabalhos foram apresentados com os autores se aventurando mais a fundo na aplicação dos conceitos do GUM.

SIMMONS [57] apresentou um trabalho sobre incerteza de isolamento sonoro com o método clássico a partir de resultados de um teste de comparação interlaboratorial com a aplicação do GUM, mas considerou apenas os desvios-padrão das medições no balanço de incertezas e, por fim, o autor concluiu que, “*entretanto,*

ainda há várias incertezas a serem consideradas”. Parte do mesmo trabalho foi publicada no mesmo ano no ForumAcusticum 2005 em Budapeste [58], mas sem a aplicação dos conceitos do GUM.

SIMMONS [57] afirma que as instruções das normas para a escolha da área da amostra ou do elemento de separação S e do volume da sala receptora V são ambíguas e deveriam ser melhoradas e sugere que, para expressar o isolamento sonoro aéreo em campo, o ideal é usar a diferença padronizada de nível ponderada $D_{nT,w}$, ao invés do índice de redução sonora aparente ponderado R'_w , pois S e V não influenciam no resultado de $D_{nT,w}$, o que facilita a estimativa da incerteza da medição. Essa opção é adotada pela norma brasileira de desempenho de edifícios de até cinco pavimentos, ABNT NBR 15575 [4], que considera o parâmetro $D_{nT,w}$ para medições em campo de isolamento sonoro aéreo entre ambientes e $D_{2m,nT,w}$ para medições de isolamento sonoro aéreo de fachadas ou coberturas em campo.

Outro trabalho abordando incertezas em medições acústicas em edifícios foi o de GERRETSEN [59], em 2005, e embora não tenha utilizado o GUM, o autor enfatiza que a determinação do desempenho acústico medido em edifícios só pode ser feita com o valor da incerteza expresso, mas que, entretanto, as regulamentações geralmente especificam valores fixos para os parâmetros de isolamento sonoro, sem nenhuma referência às suas incertezas ou sobre como lidar com essas incertezas, dando motivos para intensas discussões toda vez que um resultado de medição mostra que determinado requisito não é satisfeito. Esse tipo de situação é o que se espera em nosso país após a norma de desempenho ABNT NBR 15575 [4] entrar em vigor.

Ainda em 2005, WITTSTOCK [60] apresentou trabalho no ForumAcusticum investigando as incertezas em medições de isolamento sonoro aéreo e listando diferentes fatores que podem contribuir para sua determinação, embora aponte que apenas alguns desses fatores podem ser quantificados. Também foram usados resultados de intercomparações disponíveis na literatura e as incertezas obtidas foram comparadas com os valores de repetitividade e de reprodutibilidade estabelecidos na ISO 140-2 [13], concluindo-se que esses valores são geralmente menores que as incertezas reais obtidas. Wittstock também discutiu se ao definir o modelo do mensurando, as considerações devem ser baseadas numa mesma escala em dB ou em grandezas físicas. O teste estatístico de Kolmogorov-Smirnov foi aplicado aos resultados de 20 medições para verificar se as distribuições do índice de redução sonora R em dB eram gaussianas e o

resultado foi positivo. Portanto, o autor concluiu ser apropriado concentrar-se nas grandezas níveis de pressão sonora.

A investigação de Wittstock, junto com os outros estudos, levou a um conhecimento mais profundo das incertezas e de suas implicações em acústica de edificações, mesmo com questões importantes ainda não resolvidas.

3.2.3 O avanço dos estudos no tema

No ano de 2006, o plano operacional do comitê técnico ISO/TC 43 [45] priorizou a necessidade de se investigar as incertezas dos métodos de medições acústicas, devido a solicitações feitas pelos usuários de suas normas.

No mesmo ano, foi iniciada a presente pesquisa no Laboratório de Ensaios Acústicos (LAENA) do Inmetro, com o objetivo inicial de estudar e avaliar as incertezas em medições de isolamento sonoro em campo visando futuramente à certificação de pessoas capacitadas para realizar medições de isolamento sonoro. A pesquisa foi desenvolvida em cooperação com o CNPq dentro do “Programa de Capacitação Científica e Tecnológica para a Metrologia Científica e Industrial do Inmetro, PROMETRO, Convênio Inmetro/CNPq”.

Em 2007, no 19º Congresso Internacional em Acústica (ICA) em Madrid, houve uma sessão técnica chamada “Métodos de medição e normas em acústica de salas e de edificações” onde foram apresentados os trabalhos de NASCIMENTO *et al.* [46], ANTUNES [56], IZEWSKA e CZYZEWSKI [61] e CID e SEOANE [62]. Os quatro trabalhos abordam incerteza em medições acústicas de isolamento sonoro a partir da metodologia do GUM [11], mas todos são bastante iniciantes.

No mesmo congresso, INGO e PASCAL [63] afirmam que, “*apesar dos métodos do GUM já serem aplicados em muitas normas relacionadas a medições, os conceitos discutidos ainda não encontraram seu caminho para estratégias práticas em medições de acústica de salas*”.

Até recentemente, vários anos após a publicação da primeira versão do GUM [43], trabalhos em acústica ainda utilizavam o desvio-padrão como sendo a própria incerteza, sem aplicar e nem ao menos citar o GUM, como é o caso do trabalho de ALBA *et al.* [64] em 2007, ao relatar a “incerteza” de medições em campo de isolamento sonoro aéreo de paredes de tijolo vazado (*hollow-brick*) realizadas com o método clássico. A média e o desvio-padrão de dez medições foram obtidos e

mostraram diferenças significativas nos valores de isolamento, apesar da mesma construção ter sido medida.

Em 2007, WITTSTOCK [65] investigou a incerteza de índices ponderados de isolamento sonoro analisando uma grande quantidade de resultados de testes interlaboratoriais e desenvolvendo métodos para calcular essa incerteza a partir dos valores de isolamento sonoro por bandas de terço de oitava de frequência e suas incertezas associadas. O método de Monte Carlo foi usado para verificar os cálculos e concluiu-se que os efeitos de correlação entre bandas de terço de oitava influenciam significativamente a incerteza do índice ponderado, mas que, entretanto, esses efeitos não podem ser previstos, e, portanto, o autor recomenda usar as incertezas médias obtidas a partir dos testes de intercomparação até que um entendimento mais profundo permita o cálculo dessas incertezas.

No ano seguinte, no congresso Acoustics' 08, em Paris, houve uma sessão dentro da área de acústica arquitetônica chamada “Métodos de medição e incerteza em acústica de edificações” (*Measuring methods and uncertainty in building acoustics*). A sessão realizada em uma ampla sala de conferências estava lotada e com pessoas em pé, demonstrando grande interesse pelo assunto. Dentre os treze resumos de trabalhos da sessão, oito eram sobre incerteza, mas apenas três trabalhos sobre incerteza em medições de isolamento sonoro foram apresentados: os trabalhos de MICHALSKI *et al.* [47], REHFELD [66] e WSZOLEK [67].

REHFELD [66], da *Saint Gobain Glass*, aplicou os conceitos da ISO 140-2 [13], e não os do GUM [11], aos resultados de um teste interlaboratorial de medições do índice de redução sonora R com o método clássico conforme a ISO 140-3 [37], do qual participaram 23 laboratórios europeus. Os resultados mostraram que nem todos os valores de repetitividade e de reprodutibilidade estavam abaixo dos valores estabelecidos na ISO 140-2. O autor conclui que a dispersão nos resultados deve-se ao fato das instalações dos laboratórios variarem bastante entre um laboratório e outro.

WSZOLEK [67] abordou a incerteza de medição do índice de isolamento sonoro aéreo realizada em laboratório com o método clássico através da lei de propagação da incerteza de acordo com o GUM [11]. O autor considera a avaliação do isolamento sonoro difícil ou mesmo ambígua, não apenas para medições em campo como também em laboratório, apesar do fato de haver procedimentos de medição normalizados internacionalmente, ou seja, a série de normas ISO 140 [5], e conclui que a maior contribuição para a incerteza vem da não-homogeneidade do campo sonoro nas salas.

IZEWSKA [68] em seu trabalho sobre incerteza em medição do coeficiente de absorção sonora, afirma que “*devido à falta de avaliação de incerteza baseada em abordagem de validação interlaboratorial, esta deve ser realizada pelo próprio laboratório*”.

Em 2010, WITHFIELD e GIBBS [69] [70] publicaram dois trabalhos em diferentes congressos baseados nas mesmas medições de isolamento sonoro aéreo de salas com pisos leves de madeira com o método clássico, a partir de um estudo detalhado em campo, com o objetivo de identificar os componentes que mais contribuem para variações nas medições. Os principais componentes de variabilidade verificados foram as medições de nível de pressão sonora nas salas emissora e receptora. A contribuição do tempo de reverberação foi relativamente pequena [69]. Uma técnica estatística associada com análise de variância chamada ANOVA foi utilizada para quantificar a variabilidade das medições, entretanto o resultado obtido foi considerado elevado e os autores concluem que a variabilidade deve ser reduzida, pois o sistema de medição para o caso em estudo pode não ser adequado [70].

No mesmo ano, no Cairo, diante da necessidade de informar a incerteza de medições em campo de isolamento sonoro aéreo entre salas, SEDDEQ [71] aplicou os conceitos do GUM [11] aos resultados de medições realizadas com o método clássico usando a norma americana “ASTM E336 – *Standard test method for measurement of airborne sound attenuation between rooms in buildings, 2005.*” O autor verifica que as maiores contribuições para a incerteza são relacionadas ao nível de pressão sonora nas salas emissora e receptora e um pouco menos ao tempo de reverberação. Os valores de incerteza expandida dos parâmetros de isolamento sonoro similares a D_n e D_{nT} vão de 0,68 dB a 1,77 dB na faixa de frequência considerada.

Poucos trabalhos abordaram incertezas em medições de isolamento sonoro aéreo de fachadas. Ainda em 2010, BERARDI *et al.* [72] investigaram os limites da técnica de medição de acordo com a ISO 140-5 [16], estabelecendo sua reprodutibilidade de acordo com a ISO 140-2 [13]. O trabalho considerou a influência de posições de alto-falante e microfone (que, de acordo com a ISO 140-5, devem ser flexíveis para se adaptar às características de diferentes edifícios) na reprodutibilidade do isolamento sonoro de fachadas. De acordo com os autores, “*medições confiáveis são de grande importância para que seja possível comparar e discutir o desempenho de edificações*”.

3.3 Inserção da presente pesquisa

O contexto atual da necessidade global de investigações sobre o tema “incerteza em medições de isolamento sonoro”, juntamente com a entrada em vigor do conjunto de normas de desempenho de edifícios habitacionais brasileiras [4], que trará o aumento da demanda por medições em campo, assim como de discussões sobre determinado requisito ser ou não considerado satisfeito, comprova a relevância e aplicabilidade do presente trabalho.

A pesquisa considera incertezas de medições realizadas em campo não apenas com o método clássico, mas também, e principalmente, com o método da função de transferência, o também chamado método novo, para o qual, embora a norma ISO 18233 [7] estabeleça que o GUM [11] deva ser usado na avaliação da incerteza dos resultados, os poucos estudos sobre o assunto encontrados na literatura são apenas os originados da presente pesquisa [47], [49], [50], [51].

Entretanto, estimar a incerteza de medição não significa somente aplicar aos valores medidos os conceitos do GUM [11] ou do seu suplemento [14]. A estimativa da incerteza de uma medição só pode ser obtida após a aplicação de uma metodologia que avalie o grau de confiabilidade dessa medição, ou seja, que valide sua confiabilidade metrológica [39], [40], [41]. Essa validação dos dados medidos pode ser realizada aplicando-se conceitos estatísticos específicos aos valores dos resultados obtidos na medição.

O próximo capítulo trata desse assunto e propõe uma metodologia para verificar a confiabilidade metrológica dos resultados de medições e para estimar as incertezas dessas medições através do GUM [11] e do seu suplemento [14]. Os capítulos seguintes descrevem as medições de isolamento sonoro aéreo realizadas em campo com os dois métodos de medição e sob condições de repetitividade, para depois aplicar a metodologia proposta aos resultados obtidos nas medições.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA PARA EXPRESSÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO

4.1. Introdução

Nesse capítulo é apresentada a metodologia proposta para a expressão da incerteza de medição, desde a validação dos resultados até a estimativa da incerteza.

O ponto inicial para a validação do resultado de uma medição é obter um conjunto de repetições de medições realizadas em uma amostra. A partir dos dados amostrais é feita uma inferência estatística sobre os parâmetros da população, como sua média e seu desvio-padrão.

Estatística inferencial é a parte da estatística que se interessa pelas generalizações, ou seja, por transferências de conclusões das amostras para as populações. Ferramentas estatísticas podem ser aplicadas, objetivando avaliar o grau de confiabilidade das medições, avaliar o sistema como um todo e ajudar na tomada de decisões para aprovação dos resultados das medições realizadas [41].

A metodologia será descrita em etapas. Inicialmente, são fornecidas definições de alguns conceitos estatísticos básicos utilizados ao longo do texto [40], [73], [74].

Média aritmética \bar{x} : É a média aritmética dos n resultados de medições x_i :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i . \quad (4.1)$$

Variância experimental $s^2(x)$: É a soma dos quadrados das diferenças entre cada um dos n valores do conjunto de medições e sua média aritmética, dividida pelo número de medições n menos uma unidade:

$$s^2(x) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 . \quad (4.2)$$

Número de graus de liberdade v : Equivale ao número de determinações independentes (tamanho da amostra) menos o número de parâmetros estatísticos a serem avaliados na população. Geralmente, é o número de medições n (elementos na amostra) menos uma unidade.

Desvio-padrão ou desvio-padrão experimental $s(x)$: É a raiz quadrada positiva da variância $s^2(x_i)$ e caracteriza a dispersão dos resultados em relação à média \bar{x} ,

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} . \quad (4.3)$$

Variância experimental da média $s^2(\bar{x})$: É a melhor estimativa da variância da média aritmética \bar{x} dos n resultados de medições considerados:

$$s^2(\bar{x}) = \frac{s^2(x)}{n} . \quad (4.4)$$

Desvio-padrão experimental da média $s(\bar{x})$: É a raiz quadrada positiva da variância experimental da média $s^2(\bar{x})$ e corresponde a uma estimativa do desvio-padrão da distribuição da média aritmética \bar{x} :

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} . \quad (4.5)$$

Desvio-padrão de repetitividade: É o desvio-padrão de resultados de medições obtidos sob condições de repetitividade, portanto é um parâmetro de dispersão da distribuição dos resultados medidos sob condições de repetitividade, as quais compreendem: o mesmo procedimento de medição; os mesmos operadores; o mesmo sistema de medição; as mesmas condições de operação; o mesmo local e medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares durante um curto período de tempo. Da mesma forma, a variância de repetitividade também pode ser definida como um parâmetro de dispersão dos resultados medidos sob condições de repetitividade [40].

Desvio-padrão de reprodutibilidade: É o desvio-padrão de resultados de medições obtidos sob condições de reprodutibilidade, portanto é um parâmetro de dispersão da

distribuição dos resultados medidos sob condições modificadas de medição, chamadas condições de reprodutibilidade. Essas podem compreender: diferentes locais; diferentes operadores; diferentes sistemas de medição (procedimentos, métodos, instrumentos, entre outros) ou medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares, devendo ser especificadas as condições que mudaram e aquelas que não. A variância de reprodutibilidade também pode ser definida como um parâmetro de dispersão dos resultados [40].

4.2. Metodologia proposta para validar os resultados das medições

Para validar os resultados das medições, ou seja, para avaliar a confiabilidade metrológica dos resultados medidos, é necessário aplicar conceitos estatísticos junto com a experiência técnica de quem realiza as medições. Isso pode ser feito, por exemplo, avaliando a homogeneidade entre médias e entre desvios-padrão dos conjuntos de repetições das medições que forneceram o resultado. Novas medições devem ser avaliadas continuamente através de um estudo estatístico, objetivando o controle dessa confiabilidade metrológica.

A norma ISO 5725 [40] aborda a confiabilidade metrológica, com critérios de rejeição de dados, análise de variância e determinação de repetitividade e de reprodutibilidade. O termo “*outlier*” ou ‘valor a ser rejeitado’ é usado para indicar um membro de um conjunto de valores que é inconsistente com os outros membros daquele conjunto. Os valores rejeitados não devem ser incluídos na obtenção dos desvios-padrão e na estimativa da incerteza.

Quem tem pouco conhecimento das técnicas estatísticas costuma apresentar dificuldades ao aplicar os inúmeros conceitos de maneira ordenada e objetiva, e embora atualmente haja uma grande variedade de programas computacionais estatísticos disponíveis, se o usuário não dominar os conceitos estatísticos, a utilização de qualquer programa poderá ser prejudicial e talvez até inviabilizar a solução do problema.

A metodologia proposta no presente trabalho para validar os resultados das medições segue as etapas listadas abaixo:

- 1) estudo da distribuição dos conjuntos de repetições de medições;
- 2) aplicação de critérios de rejeição de valores individuais de cada conjunto visando à otimização de seus respectivos desvios-padrão;

3) estudo da compatibilidade entre os desvios-padrão de cada conjunto de repetições de medições, ou estudo da repetitividade do resultado de medição;

4) estudo da compatibilidade entre as médias de cada conjunto de repetições de medições;

5) e, por último, a estimativa da incerteza de medição segundo o GUM [11] e o seu suplemento [14].

A seguir são descritas as diversas etapas.

4.3. Estudo da distribuição dos conjuntos de repetições de medições

Também chamado de ‘análise do tipo de distribuição dos dados da amostra’, o estudo da distribuição consiste em analisar o tipo de distribuição dos dados medidos, objetivando possibilitar a aplicação de métodos paramétricos de inferência estatística. A estatística paramétrica está dentro da estatística inferencial e engloba todas as técnicas de inferência que dependem do conhecimento prévio de parâmetros, ou seja, do conhecimento relativo à distribuição de probabilidade da variável [75]. Uma das condições que deve ser satisfeita é que os dados amostrais devem pertencer a uma população distribuída normalmente, ou seja, os testes paramétricos exigem suposições sobre a distribuição da população envolvida, enquanto os métodos não paramétricos não dependem dessas exigências.

As medidas de forma de uma distribuição normal podem ser a assimetria e a curtose [76]. A assimetria é o grau de desvio ou afastamento da simetria de uma distribuição e a curtose é o grau de achatamento/alongamento de uma distribuição. Distribuições normais são simétricas e os valores da assimetria e da curtose são zero.

De acordo com o Teorema do Limite Central, para amostras repetidas, aleatórias e independentes, tomadas de qualquer população que tenha média μ e variância σ^2 , ao aumentar o tamanho da amostra n , a distribuição das médias amostrais tende a uma distribuição normal [74]. A dúvida que surge é quão grande o tamanho da amostra n deve ser antes que a distribuição se torne aproximadamente normal, pois, na maioria dos casos, o custo experimental impõe um limite sobre o número de medições.

DECOURSEY [74] considera que o tamanho da amostra depende da forma da distribuição original. Se a população original for distribuída normalmente, amostras de qualquer tamanho serão distribuídas normalmente, mas se a distribuição original não for

normal, amostras maiores se aproximam da distribuição normal. Médias de amostras tomadas para quase todas as distribuições encontradas na prática serão normalmente distribuídas com erro desprezível se o tamanho da amostra for pelo menos 30. O Teorema do Limite Central é importante em engenharia, pois muitos dos conjuntos de dados abordados são médias e, dessa maneira, a distribuição normal se aplica se a amostra for grande o suficiente.

Existem testes qualitativos e testes quantitativos para analisar se um conjunto de dados de uma amostra se comporta como uma distribuição normal ou gaussiana. Os testes qualitativos correspondem a métodos gráficos e dependem de interpretação subjetiva, já os testes quantitativos são mais aplicados e eficientes e consistem em calcular uma estatística característica para cada teste e verificar se o seu valor é significativo para uma determinada probabilidade [39]. Os testes quantitativos estatísticos mais usados são: o teste de Kolmogorov-Smirnov, utilizado quando a média e o desvio-padrão da população são desconhecidos e recomendado para grandes amostras ($n > 30$), o teste de Lilliefors, uma adaptação do teste de Kolmogorov-Smirnov aplicado quando a média e o desvio-padrão da população são conhecidos, e o teste de Shapiro-Wilk, que pode ser usado em amostras cujo tamanho pode variar de 3 a 50 [77].

O tamanho das amostras utilizadas no presente trabalho é $n = 5$ ou $n = 6$. Devido a esse tamanho, o teste de Shapiro-Wilk será aplicado e sua estatística-teste, $W_{\text{calculado}}$, é:

$$W_{\text{calculado}} = \frac{\left(\sum_{i=1}^k a_{n-i+1} \cdot (x_{n-i+1} - x_i) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (4.6)$$

onde n é o tamanho da amostra, x_i é o valor da medição da amostra em análise ordenado em ordem crescente, \bar{x} é a média aritmética dos n resultados de medições e a_{n-i+1} é o coeficiente calculado por Shapiro e Wilk, obtido na Tabela C.1 do Apêndice C.

Os valores críticos da estatística W_{tabelado} ou W_{critico} são extraídos da Tabela C.2 do Apêndice C, em função do intervalo de confiança e do número de graus de liberdade. A condição para que o conjunto de dados da amostra siga uma distribuição normal é que $W_{\text{calculado}} \geq W_{\text{tabelado}}$ e não se pode esquecer de ordenar os valores de maneira crescente.

4.4. Aplicação de critérios de rejeição

Antes de interpretar um conjunto de resultados medidos, é necessário verificar a existência de valores que possam ser considerados dispersos, ou seja, valores que provavelmente não pertençam àquele conjunto de resultados. Entretanto, valores suspeitos não podem ser simplesmente rejeitados sem antes ser aplicado um método estatístico [41].

Há uma grande variedade de testes estatísticos para determinar se uma observação deve ser rejeitada e todos estabelecem um intervalo com uma determinada significância estatística, mas, infelizmente, não existe um único critério que possa ser usado para decidir se um resultado considerado suspeito se deve a um erro sistemático acidental ou a variações aleatórias. A única base confiável para rejeição ocorre quando se sabe que alguns erros específicos tenham sido cometidos na obtenção de um resultado. Nesses casos, procedimentos estatísticos podem ser aplicados para “condicionar” dados experimentais que contenham valores medidos erroneamente.

A aplicação de critérios de rejeição de valores individuais de cada conjunto visa à otimização de seus respectivos desvios-padrão. Segundo NATRELA [78], *“não existe critério que seja superior ao julgamento de um técnico experiente, que esteja familiarizado com o processo de medição”*. Regras estatísticas devem ser usadas tanto para auxiliar técnicos inexperientes que estejam trabalhando com um novo processo de medição como para aqueles que apenas desejam justificar uma tomada de decisão. O importante é usar o mesmo critério ao longo de todo o trabalho.

MASSART *et al.* [79] compararam oito testes diferentes de rejeição para avaliar quatro valores suspeitos numa série de vinte e uma observações e, dependendo do teste utilizado, nenhum ou até mais de quatro valores foram rejeitados. OLIVEIRA [80] também comparou três testes diferentes e obteve valores rejeitados diferentes. Esses estudos mostram que a rejeição de dados por testes estatísticos não deve ser realizada como uma rotina principal ou uma aplicação rotineira. Além disso, quando um ou mais dados são rejeitados em uma amostra, deve-se averiguar o motivo das rejeições porque pode significar que o método de medição não esteja sob controle e que ações corretivas devam ser tomadas.

Os testes estatísticos mais comuns para verificar se um ou mais valores podem ser considerados dispersos são os seguintes: Chauvenet, Dixon, Cochran e Grubbs. Os testes de Cochran e Grubbs são geralmente os mais utilizados antes de se proceder à

interpretação de resultados populacionais de distribuição normal e são os testes abordados na ISO 5725-2 [40], norma que descreve uma maneira de determinar a repetitividade e a reprodutibilidade de um método de medição a partir de testes interlaboratoriais.

4.4.1 Critério de Chauvenet

Segundo o Teorema do Limite Central, o desvio-padrão do resultado de medições pode ser reduzido aumentando-se o número de medições e os “erros” podem ser caracterizados por uma função normal. O critério de Chauvenet fornece uma base para a tomada de decisão de excluir ou não um dado de um conjunto de valores medidos, admitindo que o conjunto de medições possui uma distribuição normal com média \bar{x} e desvio-padrão s conhecidos, e especifica que um valor deve ser rejeitado caso a possibilidade de se obter um desvio particular em relação à média (desvio-padrão relativo à média) seja menor que $1/(2n)$, conforme ilustrado na Figura 4.1.

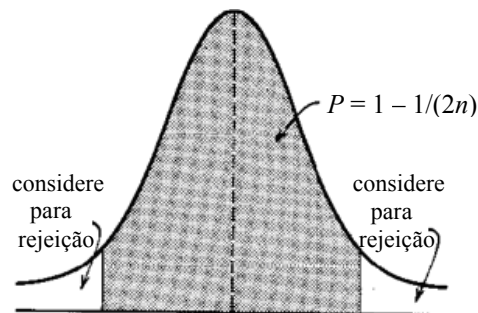


Figura 4.1 - Critério de Chauvenet.

Para aplicar o teste de Chauvenet, deve-se calcular, para cada valor medido x_i , a “razão de desvio-padrão” ou a “razão do desvio individual para o desvio-padrão”, DR_i :

$$DR_i = \frac{|x_i - \bar{x}|}{s(\bar{x})}. \quad (4.7)$$

Os valores de DR_i devem ser comparados com uma razão padrão de referência, DR_0 , obtida da Tabela 4.1 em função do número de medições n . O valor de DR_0 também pode ser obtido da distribuição normal para n medições e determinada probabilidade $P = 1 - \alpha/2$, onde $\alpha = 1/(2n)$. Por exemplo, se $n = 10$, tem-se $\alpha/2 = 0,025$ e $P = 0,975$ e,

a partir dessa probabilidade P , o valor $DR_0 = 1,96$ pode ser obtido da distribuição normal.

Tabela 4.1 - Razão de desvio-padrão DR_0 em função do número de medições n .

n	DR_0	n	DR_0	n	DR_0
2	1,15	9	1,92	50	2,57
3	1,38	10	1,96	100	2,81
4	1,54	15	2,13	300	3,14
5	1,65	20	2,24	500	3,29
6	1,73	25	2,33	1000	3,48
7	1,80	30	2,40	-	-
8	1,86	40	2,48	-	-

Ao aplicar o teste de Chauvenet, devem ser comparados os valores de DR_i com DR_0 . Quando $DR_i > DR_0$, o valor medido x_i deve ser rejeitado. Se o valor for rejeitado, recalcula-se a média e o desvio-padrão e o critério pode ser aplicado uma segunda ou terceira vez para eliminar outros valores dispersos. Segundo HOLMAN [81], entretanto, esse critério deve ser aplicado apenas uma vez para cada conjunto de experimentos de uma mesma população.

O Apêndice G apresenta um exemplo de aplicação do teste de Chauvenet.

4.4.2 Critério de Dixon

O critério ou teste de Dixon verifica se um resultado pertence à mesma distribuição dos outros resultados, admitindo que o conjunto de medições possui distribuição normal. O teste tem como objetivo identificar valores afastados (extremos) e compará-los com valores tabelados com certo nível de significância (geralmente de 1% e 5%) [41]. O nível de significância corresponde à diferença entre 100% e a probabilidade considerada. Para uma probabilidade de 95%, por exemplo, o nível de significância é 5%.

O teste de Dixon possui a vantagem de não necessitar do conhecimento da estimativa do desvio-padrão e sua aplicação é feita da seguinte maneira:

Deve-se observar o tamanho da amostra, isto é, o número de medições n , e, a partir da Tabela 4.2, obter os fatores da estatística-teste r_{ij} . Os dados da amostra devem ser ordenados de maneira crescente, ou seja, $x_1 < x_2 < x_3 < \dots < x_{n-1} < x_n$, e deve-se

calcular a estatística-teste r_{ij} para os dois valores extremos (x_1 e x_n) pelas equações da Tabela 4.3.

Tabela 4.2 - Número de medições n e r_{ij} calculado para o critério de Dixon.

Número de medições	r_{ij}
$3 \leq n \leq 7$	r_{10}
$8 \leq n \leq 10$	r_{11}
$11 \leq n \leq 13$	r_{21}
$14 \leq n \leq 25$	r_{22}

Tabela 4.3 - Equações de r_{ij} calculado para x_n e x_1 suspeitos.

r_{ij}	x_n suspeito	x_1 suspeito
r_{10}	$(x_n - x_{n-1}) / (x_n - x_1)$	$(x_2 - x_1) / (x_n - x_1)$
r_{11}	$(x_n - x_{n-1}) / (x_n - x_2)$	$(x_2 - x_1) / (x_{n-1} - x_1)$
r_{21}	$(x_n - x_{n-2}) / (x_n - x_2)$	$(x_3 - x_1) / (x_{n-1} - x_1)$
r_{22}	$(x_n - x_{n-2}) / (x_n - x_3)$	$(x_3 - x_1) / (x_{n-2} - x_1)$

Em seguida, deve-se escolher uma probabilidade e identificar o valor $r_{ij(\text{tabelado})}$ ou $r_{ij(\text{crítico})}$, na tabela de Dixon reproduzida no Apêndice D, em função do número de medições n e do nível de significância para a probabilidade escolhida. A condição para que cada valor medido não seja rejeitado é que $r_{ij(\text{calculado})} \leq r_{ij(\text{tabelado})}$.

Um exemplo de aplicação do teste de Dixon é apresentado no Apêndice G para o mesmo conjunto de valores usados no exemplo do teste de Chauvenet e, nesse caso, os valores rejeitados não são os mesmos para os dois testes.

4.4.3 Critério ou Teste de Cochran

O teste de Cochran é utilizado para verificar a homogeneidade das variâncias quando se deseja decidir se uma estimativa da variância é excessivamente grande ou não, em comparação com um grupo, como por exemplo: se a variância dos resultados obtidos por um laboratório é diferente da obtida por outros laboratórios. É um teste unilateral, pois verifica somente os valores mais altos do conjunto, e é aplicado da seguinte maneira:

Devem-se calcular todas as variâncias s_i dos resultados de cada laboratório e então somá-las para calcular o valor da estatística-teste de Cochran, $C_{\text{calculado}}$, dada pela razão entre a maior variância, $s_{\text{máx}}^2$, considerada suspeita, e o somatório de todas as variâncias:

$$C_{\text{calculado}} = \frac{s_{\text{máx}}^2}{\sum_{i=1}^p s_i^2}, \quad (4.8)$$

onde p é o número de laboratórios com n medições realizadas em cada um.

O passo seguinte é comparar o valor calculado com valores tabelados para uma probabilidade pré-estabelecida, geralmente 95%, considerando o número de variâncias envolvidas e o número de graus de liberdade utilizado nos cálculos. A tabela com os valores C_{tabelado} é dada no Apêndice E. O critério para não haver rejeição é $C_{\text{calculado}} \leq C_{\text{tabelado}}$. Caso contrário, a variância em questão é considerada como não homogênea e o valor é rejeitado como disperso, devendo o mesmo ser omitido [40], [41]. O teste de Cochran deve então ser repetido com os valores remanescentes.

4.4.4 Critério ou Teste de Grubbs

O teste de Grubbs é utilizado para verificar se as médias obtidas pelos vários laboratórios são compatíveis, após ser efetuado o teste de Cochran, e também para tomar decisões sobre valores a serem rejeitados [40].

Os dados da amostra (valores medidos) devem ser ordenados em ordem crescente assumindo-se que o menor valor, x_1 , e/ou o maior valor, x_n , são suspeitos como valores a serem rejeitados. Calcula-se a estatística-teste de Grubbs, $G_{\text{calculado}}$, para o primeiro (x_1) e o último (x_n) valores. A estatística-teste é definida por:

$$G = \frac{|x_i - \bar{x}|}{s} \quad \text{ou} \quad G_1 = \frac{\bar{x} - x_1}{s} \quad \text{e} \quad G_n = \frac{x_n - \bar{x}}{s}, \quad (4.9)$$

onde x_i é o resultado da i -ésima medição, \bar{x} é a média aritmética do conjunto de valores da amostra ou de um laboratório e s é o desvio-padrão do conjunto de valores.

Os valores resultantes G_1 e G_n devem então ser comparados com valores tabelados, G_{tabelado} , extraídos das tabelas do Apêndice F para uma determinada probabilidade. A condição para que cada valor testado não seja rejeitado é que $G_{\text{calculado}} \leq G_{\text{tabelado}}$. Se um dos valores for rejeitado, ele deve ser retirado do conjunto e um novo teste deve ser realizado, e assim sucessivamente.

No Apêndice G, o teste de Grubbs é aplicado ao mesmo conjunto de valores usados nos testes de Chauvenet e de Dixon. O teste de Grubbs é considerado mais robusto [80] e possui a vantagem de ser bilateral.

4.5. Estudo da compatibilidade entre os desvios-padrão de cada conjunto de repetições de medições

Também chamado de ‘estudo da compatibilidade entre as dispersões dos conjuntos de repetições’ [73] ou ‘homogeneidade entre variâncias’, ou ainda ‘teste de F ’ ou ‘teste de Fisher’ [41], [74], o teste de comparação entre desvios-padrão é aplicado para verificar se um conjunto de repetições apresenta maior variabilidade que outro conjunto ou para comparar duas variâncias, pois quanto maior a variância, maior a heterogeneidade entre os elementos de um conjunto. Através da distribuição de Fisher, é possível verificar se as variâncias de dois ou mais conjuntos de repetições (ou de duas amostras da mesma população) s_1^2 e s_2^2 podem ser consideradas homogêneas entre si, para uma probabilidade desejada. O procedimento do teste é descrito a seguir:

Primeiro, calcula-se a razão entre os quadrados da maior sobre a menor variância, para obter o valor da estatística-teste $F_{calculado}$,

$$F_{calculado} = \frac{s_1^2}{s_2^2}. \quad (4.10)$$

Como $s_1^2 \geq s_2^2$, $F_{calculado}$ será maior ou igual à unidade. O valor $F_{tabelado}$ ou $F_{crítico}$ é extraído das tabelas da distribuição de Fisher, em função dos graus de liberdade ($n - 1$) de cada variância e de uma determinada probabilidade, geralmente 95%. O Apêndice H contém as tabelas para nível de significância de 1% e 5%.

A condição para homogeneidade é $F_{calculado} \leq F_{tabelado}$. Se a condição for satisfeita, aceita-se a igualdade das variâncias. Entretanto, deve-se lembrar que essa análise não permite concluir nada sobre a relação entre a média de cada conjunto e a média total dos conjuntos de repetições, pois apenas as variâncias são avaliadas.

Se as variâncias de dois conjuntos são conhecidas e homogêneas, o desvio-padrão combinado ou agrupado das amostras, s_p , pode ser calculado através da equação (4.11) [73], [74], onde q é o número de conjuntos de medições, n_i é número de repetições em

cada conjunto ou tamanho da amostra, v_i é o número de graus de liberdade do desvio-padrão de cada amostra ($v_i = n_i - 1$) e s_i^2 é a variância do i -ésimo conjunto de medições de cada amostra,

$$s_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^q v_i s_i^2}{\sum_{i=1}^q v_i}} = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2 + \dots + (n_q - 1)s_q^2}{n_1 + n_2 + \dots + n_q - q}}. \quad (4.11)$$

A Figura 4.2 representa os desvios-padrão e as médias aritméticas de conjuntos de medições em um dado laboratório. Os desvios-padrão de todas as amostras estarão sob controle quando seus respectivos desvios-padrão combinados, a cada momento da avaliação, se mantiverem constantes [39]. Portanto, para cada novo conjunto de medições realizadas no laboratório, deve-se efetuar o estudo da compatibilidade entre os desvios-padrão, calculando o desvio-padrão combinado e verificando se o mesmo é constante ao longo do tempo ou de novas medições, como no gráfico da Figura 4.2. Isso equivale a um estudo da repetitividade do resultado da medição.

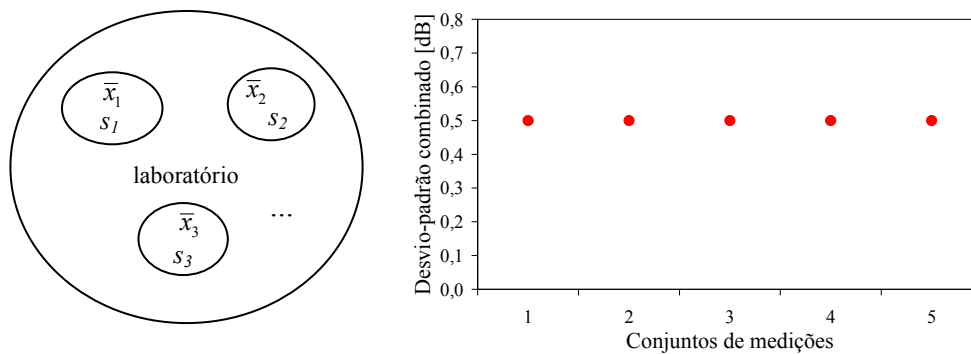


Figura 4.2 - Conjuntos de medições e seus desvios-padrão combinados.

4.6. Estudo da compatibilidade entre as médias de cada conjunto de repetições de medições

Também chamado de ‘teste de homogeneidade entre as médias de uma amostra’, o teste de comparação entre duas ou mais médias tem como objetivo verificar se duas ou

mais medições de uma mesma amostra podem ser consideradas iguais numa determinada probabilidade desejada [41].

Inicialmente, devem-se caracterizar os dois conjuntos de medições através de suas médias (\bar{x}_1 e \bar{x}_2), variâncias (s_1^2 e s_2^2) e tamanhos (n_1 e n_2), para então calcular o valor da estatística-teste t de *Student* pelas equações (4.12) ou (4.13) se $n_1 = n_2$ ou se $n_1 \neq n_2$:

$$t_{\text{calculado}} = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{s_1^2 + s_2^2}{n}}} \quad (n_1 = n_2 = n), \quad (4.12)$$

$$t_{\text{calculado}} = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{s_p \sqrt{\frac{n_1 + n_2}{n_1 n_2}}} \quad (n_1 \neq n_2), \quad (4.13)$$

onde s_p é o desvio-padrão combinado dado pela equação (4.11) para os dois conjuntos.

Antes de comparar $t_{\text{calculado}}$ com t_{tabelado} , é necessário verificar se as variâncias dos dois conjuntos são homogêneas entre si. Portanto, uma condição necessária para comparar as médias dos dois conjuntos é que os desvios-padrão dos conjuntos sejam homogêneos entre si. Isso é feito de acordo com o teste de Fisher descrito no item 4.5. O valor t_{tabelado} ou $t_{\text{crítico}}$ pode ser obtido da tabela da distribuição t de *Student* (Apêndice I), em função dos graus de liberdade ν e da probabilidade p . O número de graus de liberdade de t_{tabelado} é $\nu = (n_1 + n_2) - 2$.

O uso da distribuição t de *Student* pressupõe que a variável tenha distribuição normal na população. A distribuição t de *Student* é mais achatada no centro e mais espalhada nas caudas do que a normal, mas também é simétrica, e por isso as tabelas só registram valores de $t_{\text{críticos}}$ positivos (na metade direita da curva) [75]. Portanto, atenção deve ser dada ao fato de que as tabelas de t de *Student* (Apêndice I) se referem à curva unicaudal, quando na verdade, deve ser considerada a curva bicaudal, ou seja, para uma probabilidade de 95% deve-se extrair os valores da coluna para $t_{.975}$ ou para a probabilidade unilateral 0,025.

A condição para que as médias \bar{x}_1 e \bar{x}_2 sejam consideradas homogêneas, isto é, iguais entre si, é que $t_{\text{calculado}} \leq t_{\text{tabelado}}$ para determinada probabilidade.

Outra maneira de verificar a compatibilidade entre as médias é através do intervalo de confiança da diferença entre as médias das duas amostras, definido para $n_1 \neq n_2$ por:

$$|\bar{x}_1 - \bar{x}_2| \pm t_{(v,p)} \cdot s_p \sqrt{\frac{n_1 + n_2}{n_1 n_2}}, \quad (4.14)$$

onde $t_{(v,p)}$ é t_{tabelado} , função dos graus de liberdade v do desvio-padrão combinado e da probabilidade p (obtido da distribuição t de *Student*, Apêndice I). Nesse caso, a condição para que as médias \bar{x}_1 e \bar{x}_2 sejam homogêneas entre si para a probabilidade de 95% é que o intervalo da diferença entre elas contenha o zero.

Com o objetivo de avaliar a confiabilidade metrológica, deve-se verificar a homogeneidade entre as médias de todas as amostras para cada conjunto de medições realizadas ao longo do tempo e um gráfico de controle de estudo das médias pode ser útil. As médias estarão sob controle quando a média das médias a cada momento da avaliação for constante [39].

Adicionalmente, a distribuição t também pode ser usada para comparar a média aritmética \bar{x} de uma amostra pequena ($n < 30$) com um valor considerado referência ou padrão, x_{ref} , como, por exemplo, a média aritmética (presumida) da população. Nesse caso, o intervalo de confiança será:

$$\bar{x} - \frac{t \cdot s}{\sqrt{n}} \leq x_{ref} \leq \bar{x} + \frac{t \cdot s}{\sqrt{n}}. \quad (4.15)$$

4.7. Estimativa da incerteza de medição segundo o GUM

O *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição*, GUM [11], descreve um método para avaliar a incerteza do resultado de uma medição baseado em propagação de incertezas. Essas incertezas geralmente consistem de vários componentes que podem ser agrupados em duas categorias, A ou B, de acordo com o método utilizado para estimar seu valor numérico.

A metodologia do GUM pode ser resumida nas seguintes etapas, descritas nesse item: 1º) definição do mensurando; 2º) elaboração do diagrama causa-efeito;

3º) estimativas das incertezas-padrão das grandezas de entrada; 4º) cálculo dos coeficientes de sensibilidade; 5º) determinação dos componentes de incerteza das grandezas de entrada; 6º) combinação dos componentes para cálculo da incerteza-padrão combinada, com três maneiras diferentes apresentadas; 7º) cálculo dos graus de liberdade efetivos; 8º) determinação do fator de abrangência; e, por último; 9º) estimativa da incerteza expandida. Dentre as etapas, a mais importante é a primeira.

4.7.1 Definição do mensurando

Mensurando é o objeto da medição, ou seja, a grandeza que se pretende medir, e normalmente não é medido diretamente, mas determinado a partir de n grandezas de entrada através de um modelo de medição, que corresponde a uma relação matemática entre todas as grandezas que estão envolvidas na medição [17]. Uma forma geral de modelo de medição é dada por:

$$h(Y, X_1, X_2, \dots, X_n) = 0, \quad (4.16)$$

onde Y é a grandeza de saída no modelo de medição, ou seja, o valor verdadeiro do mensurando, e X_i são as grandezas de entrada no modelo de medição.

O valor verdadeiro do mensurando Y é então calculado a partir da função de medição f : $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$. Mas o que se mede, na verdade, é a estimativa y do mensurando Y e as estimativas x_i das grandezas de entrada X_i : $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Em casos mais complexos onde há duas ou mais grandezas de saída, o modelo de medição consiste em mais de uma equação.

A função de medição f também é usada para calcular a incerteza de medição associada ao valor medido de y , onde x_i são as grandezas cujos valores e incertezas são determinados diretamente durante a medição, como a temperatura ou a umidade, por exemplo, incluindo todas as correções e fatores de correção que possam contribuir com um componente significativo da incerteza para o resultado de medição. Existem também outras grandezas, cujos valores e incertezas provêm de fontes externas à medição, como valores obtidos de certificados de padrões, materiais de referência, etc.

Geralmente um método de medição, mesmo normalizado, não retrata perfeitamente o mensurando quando se objetiva estimar a sua incerteza de medição. Nesses casos, um bom entendimento da medição do mensurando possibilita deduzir

uma equação que de alguma maneira contenha todas as possíveis fontes de incertezas das grandezas de entrada [39].

Nessa primeira etapa, deve-se definir a grandeza de saída e as grandezas que serão medidas; decidir de quais grandezas de entrada depende a grandeza de saída e desenvolver o modelo de medição que relaciona tais grandezas. A Figura 4.3 é um esquema que ilustra o conceito de propagação de incertezas para a função de medição $Y = f(X_i)$, com três grandezas de entrada independentes X_1 , X_2 e X_3 estimadas pelos valores x_1 , x_2 e x_3 e com incertezas-padrão $u(x_1)$, $u(x_2)$ e $u(x_3)$. As estimativas da grandeza de saída y e da incerteza de medição $u(y)$ também são indicadas.

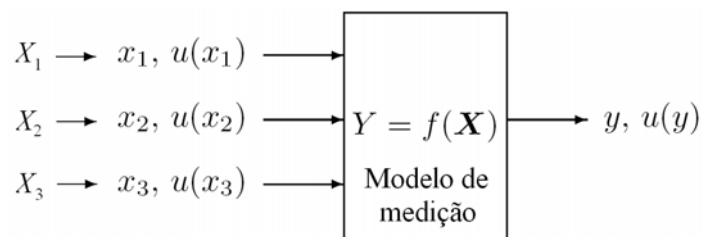


Figura 4.3 - Propagação de incertezas para três grandezas de entrada.

4.7.2 Elaboração do diagrama causa-efeito

O diagrama causa-efeito, com um exemplo ilustrado na Figura 4.4, mostra todas as fontes de incerteza das grandezas de entrada que definem a incerteza do mensurando y .

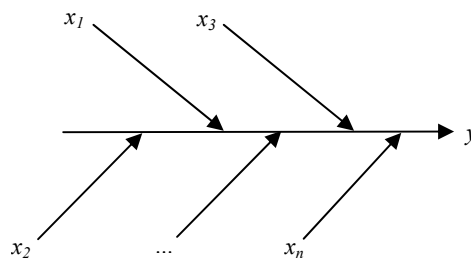


Figura 4.4 - Diagrama causa-efeito da medição do mensurando y .

4.7.3 Estimativas das incertezas-padrão das grandezas de entrada

As avaliações das incertezas-padrão das fontes de entrada podem ser do Tipo A ou do Tipo B, baseadas em distribuições de probabilidade e com componentes de incerteza resultantes quantificados por variâncias ou desvios-padrão, como explicado a seguir.

4.7.3.1 Avaliação Tipo A da incerteza-padrão

A avaliação Tipo A da incerteza-padrão é o método de avaliação de um componente da incerteza de medição por uma análise estatística dos resultados de uma série de medições independentes sob condições de repetitividade para uma das grandezas de entrada x_i . Nesse caso, a incerteza-padrão equivale ao desvio-padrão experimental da média $s(\bar{x})$, dado pela equação (4.5) e que corresponde a uma estimativa do desvio-padrão da distribuição da média aritmética \bar{x} :

$$u(x_i) = s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}}. \quad (4.17)$$

Nesse tipo de avaliação da incerteza, o número de graus de liberdade ν_i de $u(x_i)$ é igual a $(n - 1)$ para a grandeza estimada pela média aritmética de n medições e os componentes classificados na categoria A podem ser estimados com base na distribuição estatística dos valores medidos e caracterizados por estimativas dos desvios-padrão experimentais $s(x_i)$ (ou das variâncias experimentais $s^2(x_i)$) e pelo número de graus de liberdade ν_i .

A incerteza de medição associada com a estimativa \bar{x} ou x_i é avaliada de acordo com um dos dois métodos abaixo:

1) A variância experimental das observações $s^2(x_i)$, dada pela equação (4.2), é uma estimativa da variância σ^2 da distribuição de probabilidade de x e sua raiz quadrada é o desvio-padrão experimental $s(x_i)$, dada pela equação (4.3), que caracteriza a dispersão dos valores x_i em torno de sua média aritmética \bar{x} . A melhor estimativa da variância da média aritmética \bar{x} é a variância experimental da média $s^2(\bar{x})$ dada pela equação (4.4) e a incerteza-padrão $u(\bar{x})$ associada à estimativa de entrada \bar{x} corresponde ao desvio-padrão experimental da média $s(\bar{x})$, como nas equações (4.5) e (4.17). Portanto, a incerteza Tipo A é igual à incerteza-padrão associada à média e corresponde ao desvio-padrão experimental da média.

2) Para uma medição que esteja bem caracterizada sob controle estatístico, pode ser obtida a estimativa da variância combinada s_p^2 ou do desvio-padrão combinado s_p , dado pela equação (4.11), que caracterizará melhor a dispersão dos resultados do que o desvio-padrão estimado de um número limitado de medições. Nesse caso, quando o

valor do mensurando x é determinado a partir de n medições independentes, a variância experimental da média é melhor estimada por s_p^2/n do que por $s^2(\bar{x})/n$ e a incerteza-padrão pode ser expressa por:

$$u(\bar{x}) = \frac{s_p}{\sqrt{n}}. \quad (4.18)$$

4.7.3.2 Avaliação Tipo B da incerteza-padrão

Quando a avaliação da incerteza-padrão de um componente da incerteza de medição é realizada por um método diferente daquele adotado para a avaliação Tipo A, ou seja, por outros meios que não a análise estatística, a avaliação é denominada do Tipo B. Esses meios podem ser distribuições de probabilidade supostas, baseadas na experiência pessoal ou em outras informações como: dados de medições anteriores, especificações do fabricante, dados provenientes de certificados de calibração e de outros certificados, conhecimento geral do comportamento e propriedades de materiais e instrumentos relevantes, incertezas provenientes de resultados de testes de comparações, incertezas atribuídas a dados de referência provenientes de medições, de manuais ou de publicações, valores publicados por autoridade competente, valor de um material de referência certificado, valor da classe de exatidão de um instrumento de medição verificado, etc. Portanto, nesse caso, a incerteza-padrão $u(x_i)$ é avaliada por julgamento científico, baseada em todas as informações disponíveis sobre a possível variabilidade de x_i .

Os componentes classificados na categoria B podem ser caracterizados por desvios-padrão (aproximações de variâncias u_j^2 , cuja existência é suposta, e aproximações de desvios-padrão u_j) estimados a partir de funções densidade de probabilidade. Uma avaliação Tipo B da incerteza-padrão pode ser tão confiável quanto uma avaliação Tipo A, especialmente quando a avaliação do Tipo A for baseada em um número relativamente pequeno de medições estatisticamente independentes.

Uma das estimativas da incerteza-padrão Tipo B, $u(x_i)$, é obtida quando os valores de x_i têm uma determinada distribuição assumida e um intervalo de dispersão, sendo possível estimar o limite superior e o inferior para a grandeza de entrada x_i e considerar que a probabilidade de que o valor x_i esteja dentro do intervalo $[a_-, a_+]$, para efeitos práticos, é igual à unidade, e a de que esteja fora desse intervalo, é igual a zero.

Distribuições enfocadas normalmente são a retangular, a triangular e a normal, e exemplos de avaliações do Tipo B, segundo o GUM [11], são descritos a seguir:

1) Se não há conhecimento específico sobre os possíveis valores de X_i dentro do intervalo, pode-se apenas supor que é igualmente provável que X_i esteja em qualquer lugar dentro dele, assumindo-se que a variação de x_i tenha distribuição retangular (ou uniforme) num intervalo simétrico de largura $a_+ - a_-$, ($2a$), como na Figura 4.5, cuja função densidade de probabilidade é dada por:

$$\begin{cases} f(x) = \frac{1}{a_+ - a_-}, \text{ para } a_- \leq x \leq a_+; \\ f(x) = 0, \text{ para qualquer outro valor.} \end{cases} \quad (4.19)$$

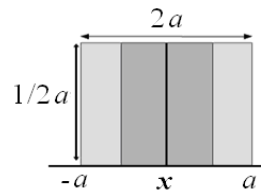


Figura 4.5 - Distribuição retangular.

A esperança ou valor esperado de X_i corresponde ao ponto médio do intervalo, isto é, $x_i = (a_+ + a_-)/2$, e possui uma variância associada $\sigma^2(x_i) = (a_+ - a_-)^2/12$. Se a diferença entre os limites, $a_+ - a_-$, for igual a $2a$, a variância se torna: $\sigma^2(x_i) = a^2/3$; e a incerteza-padrão Tipo B será a raiz quadrada da variância dessa distribuição, com grau de liberdade infinito ($\nu = \infty$),

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}}. \quad (4.20)$$

2) Em muitos casos, é mais próximo da realidade que a ocorrência dos valores seja menos provável perto dos limites do intervalo do que perto do ponto médio, ou seja, que os valores centrais do intervalo de distribuição sejam mais prováveis do que os próximos ao limite. É, então, razoável substituir a distribuição retangular simétrica por uma distribuição trapezoidal simétrica, tendo lados inclinados iguais (um trapézio isósceles), base de largura $a_+ - a_- = 2a$ e topo de largura $2a\beta$, onde $0 \leq \beta \leq 1$. À medida que $\beta \rightarrow 1$, essa distribuição trapezoidal se aproxima da distribuição retangular, enquanto que para $\beta = 0$, se torna uma distribuição triangular num intervalo ($\pm a$), como na Figura 4.6.

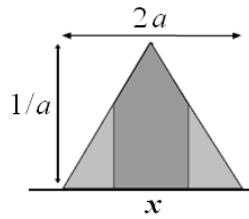


Figura 4.6 - Distribuição triangular.

Supondo uma distribuição trapezoidal para X_i , sua esperança será $x_i = (a_+ - a_-)/2$ e sua variância associada será $\sigma^2(x_i) = a^2(1 + \beta^2)/6$. Para uma distribuição triangular, $\beta = 0$ e a estimativa da incerteza-padrão é dada por:

$$u(x_i) = \sqrt{\sigma^2(x_i)} = \frac{a}{\sqrt{6}}. \quad (4.21)$$

3) Se a estimativa da incerteza de uma fonte de entrada x_i pode ser obtida a partir de um certificado de calibração, especificação do fabricante, manual técnico ou outra fonte com informações de probabilidade, nesses casos, a estimativa da incerteza-padrão é simplesmente o valor fornecido da incerteza expandida U dividido pelo multiplicador ou fator de abrangência k , ambos declarados:

$$u(x_i) = \frac{U}{k}. \quad (4.22)$$

4) Pode-se também encontrar declarada uma incerteza que defina um intervalo com determinada probabilidade de abrangência (ou nível da confiança). Se não for indicado de outro modo, supõe-se que uma distribuição normal foi usada para calcular tal incerteza e, nesse caso, a incerteza-padrão de x_i pode ser obtida dividindo-se a incerteza informada pelo fator de abrangência apropriado para a distribuição normal, como, por exemplo: $k = 1,64$; 1,96; 2; 2,58 ou 3; para 90%, 95%, 95,45%, 99% ou 99,73%, respectivamente. A Figura 4.7 mostra uma distribuição normal com $k = 2$.

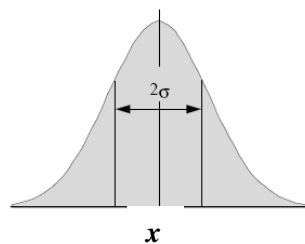


Figura 4.7 - Distribuição normal com 95,45% de probabilidade de abrangência.

5) Distribuições assimétricas também podem ser consideradas e são discutidas nos anexos F.2.4.4 e G.5.3 do GUM [11].

4.7.4 Cálculo dos coeficientes de sensibilidade

Os coeficientes de sensibilidade descrevem como o valor de uma estimativa da grandeza de saída y varia com mudanças nos valores das estimativas das grandezas de entrada x_i . O coeficiente de sensibilidade do mensurando y em relação à grandeza de entrada x_i é definido como a derivada de y em relação à x_i ,

$$c_{x_i} = \frac{\partial y}{\partial x_i}. \quad (4.23)$$

No caso de não haver uma relação direta entre o mensurando e alguma grandeza de entrada, é necessário realizar um experimento para se determinar qual é a variação do mensurando em relação a essa grandeza.

4.7.5 Determinação dos componentes de incerteza das grandezas de entrada

A partir das estimativas das incertezas-padrão das grandezas de entrada do mensurando e dos seus coeficientes de sensibilidade, pode-se avaliar cada componente de incerteza respectivo, na mesma unidade do mensurando. Esse procedimento é bastante útil, pois permite avaliar de forma objetiva o impacto da incerteza de cada grandeza de entrada na incerteza combinada do mensurando. O componente de incerteza na unidade do mensurando y referente à grandeza de entrada x_i , $u_{x_i}(y)$, é dado por:

$$u_{x_i}(y) = \frac{\partial y}{\partial x_i} u(x_i) = c_{x_i} u(x_i), \quad (4.24)$$

onde c_{x_i} é o coeficiente de sensibilidade de y referente à grandeza de entrada x_i e $u(x_i)$ é a incerteza-padrão referente à grandeza de entrada x_i .

A formulação da incerteza de medição e de seus componentes, assim como de seu cálculo e combinação é chamada balanço de incerteza pelo VIM [17]. A Figura 4.8 é um exemplo de um gráfico de ‘balanço de incerteza’ na medição de um mensurando. A

análise do gráfico permite descobrir quais fontes de incerteza predominam, ou seja, geram as maiores contribuições de incertezas. Segundo COUTO [39], o balanço de incerteza pode ser importante porque, se os limites de tolerância de um processo necessitarem de otimização, o gráfico indicará quais são as fontes prioritárias para melhorar a exatidão de forma a atender aos limites otimizados de tolerância.

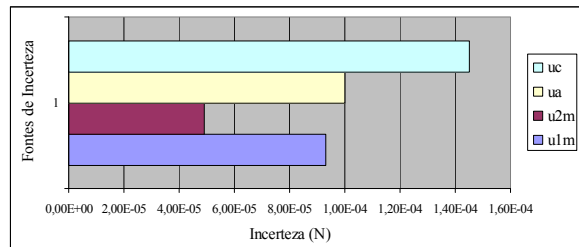


Figura 4.8 - Exemplo de balanço de incerteza.

4.7.6 Combinação dos componentes para cálculo da incerteza-padrão combinada

A incerteza-padrão combinada de y , representada por $u_c(y)$, equivale à incerteza-padrão do resultado de uma medição, quando esse resultado é determinado a partir de valores de várias outras grandezas, e é obtida a partir da combinação das incertezas-padrão individuais $u(x_i)$ associadas às grandezas de entrada x_i no modelo de medição.

O GUM [11] fornece duas equações para combinar as incertezas-padrão: uma para grandezas de entrada não correlacionadas e outra para grandezas de entrada correlacionadas. Entretanto, com ou sem equação disponível, há três maneiras básicas de se calcular a incerteza: 1) Método por cálculo das derivadas (esse método pode apresentar, em alguns casos, uma grande dificuldade); 2) Método por simulação numérica; 3) Método por combinação de incertezas absolutas e relativas (esse método é frequentemente o mais conveniente para incertezas de medições com muitas grandezas de entrada, como é o caso da área química). A diferença entre os três está no modo de se calcular os coeficientes de sensibilidade do mensurando em relação a cada fonte de entrada. Esses métodos são descritos a seguir.

4.7.6.1 Método por cálculo das derivadas

A incerteza-padrão combinada é uma estimativa do desvio-padrão associado ao resultado e corresponde à raiz quadrada positiva de uma soma de termos: as variâncias

ou covariâncias das grandezas de entrada, ponderadas de acordo com quanto o resultado da medição varia com mudanças nessas grandezas [17]. O GUM considera a chamada “lei de propagação da incerteza” e indica duas equações para determinar a incerteza-padrão combinada, baseadas em distribuição normal e em uma aproximação de primeira ordem da série de Taylor. Quando a expansão de primeira ordem não resultar em uma aproximação aceitável, os termos de ordem superior devem ser incluídos na expansão da série [82] e, portanto, o GUM contém algumas limitações e pode apresentar dificuldades quando a equação do mensurando for complexa e difícil de ser derivada.

Para grandezas de entrada não correlacionadas, isto é, independentes, calcula-se a incerteza-padrão combinada $u_c(y)$ do mensurando como:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot u(x_i) \right)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (c_{x_i} \cdot u(x_i))^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (u_{x_i}(y))^2}, \quad (4.25)$$

onde n é número de grandezas de entrada, $u(x_i)$ é a incerteza-padrão associada à grandeza de entrada x_i e que pode ser avaliada pelo Tipo A ou B, c_{x_i} é o coeficiente de sensibilidade de y em relação à x_i e $u_{x_i}(y)$ é o componente de incerteza na unidade de y relativo à x_i .

Para grandezas de entrada correlacionadas ou interdependentes, isto é, em caso de correlações entre grandezas de entrada no modelo de medição, as covariâncias devem ser consideradas no cálculo da incerteza-padrão combinada, cujo valor ao quadrado é dado por:

$$\begin{aligned} u_c^2(y) &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial y}{\partial x_i} \frac{\partial y}{\partial x_j} u(x_i, x_j) = \\ &= \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot u(x_i) \right)^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial y}{\partial x_i} \frac{\partial y}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \end{aligned} \quad (4.26)$$

ou, em termos dos coeficientes de correlação $r(x_i, x_j)$:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n (c_{x_i} \cdot u(x_i))^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n c_{x_i} c_{x_j} u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j) \quad (4.27)$$

onde $u(x_i, x_j) = u(x_j, x_i)$ é a covariância estimada, associada a x_i e x_j , e $r(x_i, x_j) = u(x_i, x_j) / (u(x_i)u(x_j))$ é o coeficiente de correlação, com $r(x_i, x_j) = r(x_j, x_i)$ e $-1 \leq r(x_i, x_j) \leq +1$. Se as estimativas x_i e x_j forem independentes, $r(x_i, x_j) = 0$ e as equações (4.26) e (4.27) recaem na equação (4.25).

4.7.6.2 Método por simulação numérica

Uma metodologia alternativa para obter a incerteza de medição é através de uma simulação numérica simples, descrita no guia EURACHEM/CITAC [44], documento usado em medições analíticas e baseado no GUM [11]. Supondo que o mensurando y seja definido pela equação (4.28) e que as incertezas u_r , u_w e u_z , referentes às grandezas de entrada r , w e z , respectivamente, possam ser estimadas como no item 4.7.3, tem-se:

$$y = \frac{r \cdot w}{z}. \quad (4.28)$$

Para ser feita a simulação numérica, um novo cálculo do mensurando é realizado para cada grandeza de entrada, somando-se a essa grandeza a sua respectiva incerteza, segundo:

$$y_r = \frac{(r + u_r) \cdot w}{z}; \quad (4.29)$$

$$y_w = \frac{r \cdot (w + u_w)}{z}; \quad (4.30)$$

$$y_z = \frac{r \cdot w}{(z + u_z)}. \quad (4.31)$$

O valor original y do mensurando irá variar para y_i , devido à consideração das incertezas u_i das respectivas grandezas de entrada. Desse modo, o componente de incerteza de cada grandeza de entrada na unidade do mensurando y será definido pelo módulo da diferença entre o valor y_i e o valor original y , $|y_i - y|$. A incerteza combinada do mensurando y poderá então ser obtida por:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n |y_i - y|^2}. \quad (4.32)$$

4.7.6.3 Método por combinação de incertezas absolutas e relativas

O GUM [11] também considera os seguintes casos em que se pode obter a incerteza-padrão combinada através de incertezas absolutas e relativas:

1) Para os modelos que incluem apenas uma soma ou diferença de grandezas, por exemplo, $y = a_{x1} + a_{x2} + \dots + a_{xn}$, a incerteza-padrão combinada será a raiz quadrada de uma soma quadrática de desvios-padrão absolutos:

$$u_c(y) = \sqrt{u_{x1}^2 + u_{x2}^2 + \dots + u_{xn}^2}. \quad (4.33)$$

2) Para os modelos que incluem apenas um produto ou um quociente de grandezas, como por exemplo, $y = (ax_1 \times bx_2) / (cx_3 \times \dots \times zx_n)$, a incerteza-padrão combinada será a raiz quadrada de uma soma quadrática de desvios-padrão relativos:

$$u_c(y) = \sqrt{\left(\frac{u_{x1}}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{u_{x2}}{x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{u_{xn}}{x_n}\right)^2}. \quad (4.34)$$

Por exemplo, supondo o mesmo mensurando y da equação (4.28) com as incertezas u_r , u_w e u_z referentes às grandezas de entrada r , w e z , as incertezas relativas para cada grandeza são obtidas pela fração, (u_i/i) , e a incerteza-padrão combinada do mensurando y será obtida por:

$$u_c(y) = \sqrt{\left(\frac{u_r}{r}\right)^2 + \left(\frac{u_w}{w}\right)^2 + \left(\frac{u_z}{z}\right)^2}. \quad (4.35)$$

3) Em alguns casos, pode ser mais conveniente decompor o modelo matemático original em expressões menores, contendo apenas operações cobertas por uma das regras acima. Por exemplo, a expressão $y = (ax_1 + bx_2) / (cx_3 + dx_4)$ pode ser decomposta nos elementos $(ax_1 + bx_2)$ e $(cx_3 + dx_4)$, e então aplicados os procedimentos acima.

4.7.7 Cálculo dos graus de liberdade efetivos

O cálculo do número de graus de liberdade efetivos ν_{ef} da incerteza-padrão combinada do mensurando y é feito através da equação de Welch-Satterthwaite, equação (4.36), onde os graus de liberdade das maiores fontes de incerteza são os que dominam a estimativa:

$$\nu_{ef} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_{x_i}^4(y)}{\nu_i}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{(c_{x_i} \cdot u(x_i))^4}{\nu_i}}, \quad (4.36)$$

onde $u_c(y)$ é a incerteza-padrão combinada do mensurando y , n é o número de grandezas de entrada x_i , $u_{x_i}(y)$ é o componente de incerteza na unidade do mensurando relativo à x_i , ν_i é o número de graus de liberdade associado a x_i , $u(x_i)$ é a incerteza-padrão referente a x_i , e c_{x_i} é o coeficiente de sensibilidade de y referente a x_i .

O número de graus de liberdade é um número inteiro e, sempre que houver números decimais no valor dos graus de liberdade efetivos, somente a parte inteira deve ser considerada. O número de graus de liberdade de uma incerteza-padrão Tipo A é o número de medições n menos uma unidade, $\nu = (n - 1)$, enquanto o de uma incerteza-padrão Tipo B é considerado infinito $\nu \rightarrow \infty$.

4.7.8 Determinação do fator de abrangência

O fator de abrangência k é um fator numérico usado como um multiplicador da incerteza-padrão combinada $u_c(y)$ do mensurando y , de modo a se obter a incerteza expandida, em função do número de graus de liberdade efetivos, da probabilidade de abrangência desejada e do tipo de distribuição estatística, sendo definido a partir da distribuição t de *Student*. Seu valor está tipicamente na faixa de 2 a 3, e, ao adotar uma probabilidade de abrangência de 95,45% ($\approx 95\%$), k será igual a 2 para quase todos os fins. Porém, se o número de graus de liberdade for pequeno, o valor 2 pode ser insuficiente e k deve ser calculado. Isso ocorre, na prática, quando a contribuição dos componentes do Tipo A é significativa em relação à incerteza combinada.

O fator k deve ser obtido através de uma tabela em função do número de graus de liberdade efetivos ν_{ef} para uma determinada probabilidade. A Tabela 4.4, por exemplo,

fornece valores de $k_{95\%}$, ou seja, k para uma probabilidade de abrangência de 95% em função de ν_{ef} .

Tabela 4.4 - Determinação do fator de abrangência: Tabela t de *Student* ($\nu_{ef} \times k_{95\%}$).

ν_{ef}	$k_{95\%}$	ν_{ef}	$k_{95\%}$	ν_{ef}	$k_{95\%}$	ν_{ef}	$k_{95\%}$
1	12,71	9	2,26	17	2,11	25	2,06
2	4,30	10	2,23	18	2,10	26	2,06
3	3,18	11	2,20	19	2,09	27	2,05
4	2,78	12	2,18	20	2,09	28	2,05
5	2,57	13	2,16	21	2,08	29	2,05
6	2,45	14	2,14	22	2,07	30	2,04
7	2,36	15	2,13	23	2,07	-	-
8	2,31	16	2,12	24	2,06	∞	2,00

A partir de 30 medições, pode-se adotar $k_{95\%} = 2$ para a distribuição t de *Student*, entretanto, recai-se diretamente numa distribuição normal e a aplicabilidade do método é reduzida, pois a distribuição t de *Student* é justamente para pequenas amostras. O anexo G do GUM [11] aborda esse tema.

4.7.9 Estimativa da incerteza expandida

A incerteza-padrão combinada $u_c(y)$ já é a incerteza-padrão do resultado de uma medição e pode ser utilizada para expressar a incerteza desse resultado de medição. Entretanto, para satisfazer às necessidades de algumas aplicações industriais, comerciais ou regulamentadoras, assim como a requisitos nas áreas de saúde e de segurança, pode ser necessário declarar uma incerteza que defina um intervalo em torno do resultado da medição que englobe uma grande porção da distribuição de valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando.

Ao fazer o produto entre o fator de abrangência e a incerteza-padrão combinada, obtém-se a incerteza expandida U ,

$$U(y) = k_{(\nu_{ef}, p)} \cdot u_c(y) \quad (4.37)$$

e pode-se dizer que os resultados obtidos estarão dentro dos limites da incerteza expandida que for informada para uma determinada probabilidade de abrangência p . O GUM [11] assume que a distribuição da grandeza de saída é gaussiana (para $\nu = \infty$) ou t de *Student* (para $\nu < \infty$).

Portanto, o resultado da medição do mensurando Y deve ser expresso como $Y = y \pm U$, onde y é a melhor estimativa do valor atribuível a Y , e $(y \pm U)$ é o intervalo em torno do resultado no qual se espera abranger uma grande fração da distribuição dos valores que podem ser atribuídos ao mensurando.

O GUM [11] recomenda usar o termo “intervalo de abrangência”, e não “intervalo de confiança”, para evitar confusão com o conceito estatístico e informa que um intervalo de abrangência não está necessariamente centrado no valor medido escolhido, conforme abordado no seu suplemento [14].

Nessa última etapa, após a estimativa da incerteza expandida, também pode ser elaborado outro tipo de balanço de incerteza, incluindo todas as informações relativas à estimativa da incerteza, como por exemplo: o modelo de medição, as estimativas e incertezas associadas às grandezas consideradas no modelo, os coeficientes de sensibilidade, os tipos de funções de densidade de probabilidade, os graus de liberdade, o tipo de avaliação da incerteza de medição e qualquer fator de abrangência [17].

4.8. Estimativa da incerteza de medição segundo o Suplemento do GUM

A abordagem do GUM [11], conforme relatado no próprio, apresenta algumas deficiências ou limitações, como:

1) Linearização do modelo: No princípio de propagação das incertezas, a expansão da série de Taylor utilizada envolve apenas os termos de primeira ordem, entretanto, em alguns casos, quando a relação funcional entre o mensurando e suas grandezas de entrada não for linear, a expansão de primeira ordem de Taylor pode não ser uma aproximação aceitável, sendo necessários termos de ordem superior.

2) Suposição da normalidade do mensurando: De acordo com o GUM [11], na estimativa da incerteza expandida, costuma-se considerar que o mensurando tem distribuição normal e é bastante comum descobrir declarações de incertezas obtidas usando o fator de abrangência $k = 2$, que corresponde a uma probabilidade de abrangência de 95,45%.

3) Cálculo dos graus de liberdade efetivos através da equação de Welch-Satterthwaite, equação (4.36), que é um problema insolúvel, pois as incertezas do Tipo B contribuem com um número infinito de graus de liberdade.

Devido às limitações apresentadas, o GUM indica que outros métodos numéricos ou analíticos podem ser necessários. Dessa forma, o JCGM (Comitê Conjunto para Guias em Metrologia), em seu trabalho de revisão do GUM, decidiu, ao invés de alterar o texto atual, produzir suplementos para o mesmo. Como alternativa às limitações apresentadas, o primeiro suplemento [14] aplica o conceito de “propagação da distribuição de probabilidade”, substituindo o que o GUM chama de “lei de propagação da incerteza”.

Casos típicos de aplicação da abordagem do suplemento [14] são situações em que: a distribuição de probabilidade não é normal, as contribuições de incerteza podem ser grandes comparadas à estimativa do mensurando, os valores da incerteza associada são comparáveis em magnitude com o mensurando ou próximos do limite de detecção, o modelo é não linear ou complexo, a assimetria da distribuição das grandezas de entrada é significativa, e o modelo não é diferenciável ou existe dificuldade ou inconveniente no cálculo das derivadas parciais e na aplicação dos termos de ordem superior da série de Taylor.

O método de simulação de Monte Carlo é a técnica aplicada no suplemento do GUM para estimar a incerteza de medição e equivale a um procedimento numérico que trabalha com probabilidades de distribuições, geração de números aleatórios e simulação de valores para solucionar problemas matemáticos. Nesse método, a função densidade de probabilidade, *fdp*, da grandeza de saída é obtida a partir de simulações propagando as funções densidade de probabilidade das grandezas de entrada através do modelo do mensurando.

A Figura 4.9 ilustra o conceito de propagação de distribuições para um exemplo simples com três grandezas de entrada independentes X_i no modelo de medição do mensurando $Y = f(X_i)$. A partir da função distribuição do mensurando, podem ser obtidos quaisquer parâmetros estatísticos desejados, incluindo o resultado da medição, a média, o desvio-padrão, a incerteza-padrão de medição e os limites do intervalo correspondente a uma determinada probabilidade de abrangência [82].

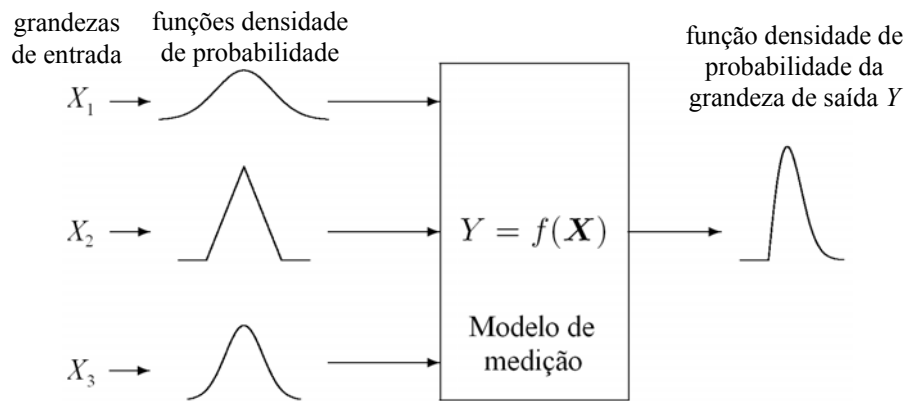


Figura 4.9 - Propagação de distribuições para três grandezas de entrada.

O nome ‘Monte Carlo’ surgiu da capital do jogo e de Mônaco, devido a conceitos como ‘roleta’, ‘aleatoriedade’, etc. [82]. Atualmente, devido à alta velocidade dos computadores pessoais e planilhas eletrônicas poderosas, a técnica de Monte Carlo tem se tornado cada vez mais popular em várias áreas de conhecimento, sendo uma importante ferramenta para combinar distribuições.

Uma vantagem de estimar a incerteza com o método de Monte Carlo é que não são necessários os cálculos dos coeficientes de sensibilidade, dos graus de liberdade efetivos e dos coeficientes de correlação, pois esses já estão inclusos no modelo [82]. Outra vantagem é que o modelo de medição pode ser não linear, pode ter um número arbitrário de variáveis e pode também conter relações implícitas, pois o método não depende da natureza do modelo.

Uma desvantagem reside no caráter numérico que a técnica impõe, em particular a natureza computacional intensiva, embora o tempo de cálculo seja de apenas alguns segundos [83]. SOUSA e RIBEIRO [84], [85] lembram que é necessário avaliar cuidadosamente a qualidade dos geradores de números aleatórios utilizados e das condições de repetitividade e reprodutibilidade, entre outras, e MOSCATI *et al* [82] usa o programa computacional *Microsoft Excel* para gerar números aleatórios.

Se houver dúvida quanto à validade da aplicação da “lei de propagação da incerteza” ou da “propagação da distribuição de probabilidade”, o suplemento do GUM [14] recomenda que a incerteza seja primeiramente calculada segundo a “lei de propagação da incerteza” e que depois seja aplicado o método de Monte Carlo com número de simulações suficientemente grande. Os resultados obtidos pelos dois métodos devem ser apresentados para uma mesma probabilidade de abrangência e os

limites dos intervalos encontrados podem, então, ser comparados. Essa comparação é um meio de validar o uso do método de propagação da incerteza para determinada situação. Quando a abordagem do método de Monte Carlo indicar que a propagação das incertezas é inadequada, deve-se usar, a partir daí, o método de Monte Carlo ao invés do método de propagação das incertezas.

Os passos típicos para estimar a grandeza de saída, a incerteza de medição associada e o intervalo para uma determinada probabilidade de abrangência, pelo método de Monte Carlo, são: 1º) definição do mensurando; 2º) elaboração do diagrama causa-efeito; 3º) estimativas das incertezas-padrão das grandezas de entrada; 4º) identificação das funções densidade de probabilidade de cada fonte de incerteza; 5º) seleção do número M de iterações de Monte Carlo; 6º) simulação; 7º) cálculo dos M resultados; 8º) escolha da função densidade de probabilidade; 9º) estimativa da incerteza expandida.

As três primeiras etapas são semelhantes às do método de propagação de incertezas, descrito no item 4.7. O procedimento tem início com a definição do modelo da estimativa do mensurando, $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, e a elaboração do diagrama causa-efeito, seguidos pela estimativa das incertezas das grandezas de entrada, que corresponde à seleção das fontes de incerteza (de cada grandeza de entrada) significativas para a incerteza do resultado da medição.

As etapas seguintes são descritas abaixo:

Cada fonte de incerteza de cada grandeza de entrada tem sua própria função densidade de probabilidade e, na quarta etapa, essas funções devem ser atribuídas às fontes de incerteza, a partir do conhecimento disponível.

Deve-se então estabelecer o número M de iterações ou de simulações de Monte Carlo adequado para a exatidão do resultado que se deseja. O próximo passo é a simulação:

Para se obter a função densidade de probabilidade da grandeza de saída, são gerados M valores $\{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iM}\}$ para cada fonte de incerteza, que é considerada como uma variável aleatória com uma determinada função densidade de probabilidade. Os valores são obtidos a partir de um gerador de números aleatórios com probabilidades características das respectivas funções densidade de probabilidade, levando em consideração as correlações totais e parciais entre elas.

Pelo Teorema do Limite Central, a distribuição da média \bar{x} de uma série de medições repetidas e independentes se aproxima de uma distribuição normal,

independentemente da distribuição dos dados originais x_i , e o valor médio das estimativas da grandeza de saída obtida converge na razão de $M^{-1/2}$ para a média do valor exato da distribuição do mensurando Y [83].

Em seguida, são calculados M valores de resultados do mensurando $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_M\}$ pela equação que define a função de medição do mensurando e os M conjuntos de valores $\{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iM}\}$ obtidos para cada variável x_i .

Com os M valores de resultados calculados $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_M\}$, é possível obter a função densidade de probabilidade do próprio mensurando (grandeza de saída) e, a partir desta, são extraídos seu valor médio, tomado como o resultado do mensurando y , seu desvio-padrão, tomado como a incerteza-padrão combinada e o intervalo de abrangência para uma determinada probabilidade.

Quando o valor de simetria da distribuição discreta obtida para a grandeza de saída estiver próximo de zero, o intervalo de abrangência para a probabilidade p se torna simétrico e a incerteza expandida $U(y)$ pode ser aproximada por [39]

$$U(y) = \frac{y_{(1+p)M/2} - y_{(1-p)M/2}}{2}. \quad (4.38)$$

Outra maneira de determinar os limites para um intervalo de abrangência com uma probabilidade p é através dos percentis. O percentil $100p$ corresponde ao valor na posição Mp da distribuição discreta de y . Para um intervalo de abrangência de 95%, os percentis 2,5 e 97,5 ($y_{(0,025M)}$ e $y_{(0,975M)}$) do conjunto de resultados gerados para o mensurando y , são considerados os limites do intervalo de abrangência [14].

CAPÍTULO 5

PRECISÃO SEGUNDO A ISO 140-2

5.1. Introdução

Nesse capítulo, é descrito como se estimar a incerteza de medição conforme a ISO 140-2 [13], o que não é exatamente uma estimativa da incerteza, pois não corresponde à incerteza de medição obtida de acordo com os documentos internacionais normalizados sobre incerteza de medição, o GUM [11] e o seu suplemento [14]. Ao invés de utilizar variâncias das grandezas individuais que formam o resultado de medição, a ISO 140-2 utiliza conceitos de repetitividade e de reprodutibilidade conforme a ISO 5725 [40], obtidos a partir de resultados de medições completas de isolamento sonoro, para estabelecer a precisão do método de ensaio e de suas medições.

Segundo o plano operacional do comitê técnico ISO/TC 43 [45], o GUM [11] e seu suplemento [14], devem ser aplicados às medições acústicas. No caso das medições de isolamento sonoro, a ISO 140 está passando por um processo de revisão para se adequar a esses documentos.

A parte 2 da ISO 140, de 1991 [13], com o título “*Determinação, verificação e aplicação de dados de precisão*”, considera as influências aleatórias e sistemáticas nas medições de isolamento sonoro descritas nas várias partes da norma ISO 140 [5]. Tais partes deixam alguns detalhes das instalações de ensaios e procedimentos à escolha do operador, pois não é possível especificar completamente a construção de laboratórios de ensaio ou as condições de campo sonoro obtidas dentro das salas.

Enquanto as influências aleatórias podem ser determinadas por medições independentes repetidas sob condições de repetitividade, as influências sistemáticas (devidas, por exemplo, ao tamanho e à forma das salas, condições de montagem da amostra e calibração do equipamento de medição) não podem ser determinadas por um procedimento simples. Geralmente, são necessárias medições de comparação em diferentes locais de testes e o conhecimento das influências aleatórias sob essas condições para se obter as influências sistemáticas.

5.2. Valores de repetitividade r e valores de reprodutibilidade R

A ISO 140-2 [13] fornece diretrizes para determinar e aplicar os chamados ‘valor de repetitividade’ r e ‘valor de reprodutibilidade’ R , bem como para verificá-los em diferentes configurações de medição. A obtenção desses valores a partir de resultados de testes interlaboratoriais deve estar de acordo com a norma ISO 5725 [40].

Em 1991, a versão da ISO 5725 em vigor era a de 1986 com o título “*Precision of test methods – Determination of repeatability and reproducibility for a standard test method by inter-laboratory tests*”. A norma foi revisada e publicada em 1994 sob o título “*Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results*” [40], quando passou a abranger o conceito de ‘veracidade’ (*trueness*) além do conceito de ‘precisão’. Nessa última edição, r é chamado de ‘limite de repetitividade’ e R de ‘limite de reprodutibilidade’. Repetitividade e reprodutibilidade referem-se a dois extremos, o primeiro descrevendo a variabilidade mínima nos resultados de medições e o segundo, a variabilidade máxima. Medidas intermediárias de variabilidade entre esses dois extremos também podem ser obtidas, mas não são consideradas na ISO 140-2.

O ‘valor de repetitividade’ r é definido como “*o valor igual ou abaixo do qual a diferença absoluta entre dois resultados de medições únicos obtidos sob condições de repetitividade pode ser esperada estar com uma probabilidade de 95%*”, ou seja, a diferença absoluta entre dois resultados de medições obtidos sob condições de repetitividade deve ser menor ou igual que o ‘valor de repetitividade’ r para uma probabilidade de 95%. Da mesma maneira, o ‘valor de reprodutibilidade’ R é definido como “*o valor igual ou abaixo do qual a diferença absoluta entre dois resultados de medições únicos obtidos sob condições de reprodutibilidade pode ser esperada estar com uma probabilidade de 95%*”. Os valores r e R são expressos, respectivamente, por:

$$r = 2,8\sqrt{s_r^2} \quad , \quad (5.1)$$

$$R = 2,8\sqrt{s_R^2} = 2,8\sqrt{s_r^2 + s_L^2} \quad , \quad (5.2)$$

onde s_r^2 é a estimativa da variância de repetitividade, ou seja, o quadrado do desvio-padrão dos resultados de medições obtidos sob condições de repetitividade, e equivale à média aritmética das ‘variâncias dentro dos laboratórios’ (*within-laboratory variances*) calculada considerando todos os laboratórios participantes do teste interlaboratorial (ponderada de acordo com o número de resultados válidos retornados pelos

participantes após os valores dispersos serem rejeitados [40]), s_R^2 é a estimativa da variância de reprodutibilidade, um parâmetro que caracteriza a dispersão da distribuição dos resultados de medições sob condições de reprodutibilidade, e s_L^2 é a estimativa da variância entre laboratórios tomada para todos os laboratórios participantes. Como s_r^2 e s_L^2 são estimativas dos valores de σ_r^2 e σ_L^2 , que não são conhecidos, r e R também são estimativas, e, portanto, estão sujeitos a erros.

Os testes de comparação entre laboratórios são necessários para a determinação de r e R e a norma considera a organização e a avaliação desses testes como processos complicados que envolvem problemas estatísticos e devem ser confiados a um profissional com conhecimento especial de estatística, cujas tarefas são: dar assistência durante o desenvolvimento do teste interlaboratorial; analisar os dados e eliminar valores rejeitados através de testes estatísticos, como os abordados no Capítulo 4; além de calcular os valores r e R do método de medição a partir dos dados válidos e verificar se eles correspondem a uma probabilidade de 95%, como estabelecido nas definições, por meio dos dados a partir dos quais eles foram computados [13].

As medições de isolamento sonoro devem ser realizadas de acordo com as partes relevantes da ISO 140 [5] e a amostra de ensaio não deve ser desmontada entre medições de repetição. O conjunto de posições de microfones e de fontes, para o qual a média é obtida, deve ser selecionado para cada medição; pelo menos oito laboratórios participantes devem fornecer, no mínimo, cinco resultados de medições completas cada um e esses resultados não devem ser pré-selecionados de maneira alguma pelos laboratórios antes de serem reportados.

O valor de repetitividade r é interpretado da seguinte maneira pela ISO 140-2 [13]: Para cada banda de frequência, a diferença entre dois resultados de medições do índice de redução sonora em laboratórios, com material de teste idêntico, mesmo operador ou equipe de medição e mesmo equipamento, num curto intervalo de tempo, não deve exceder na média os valores de repetitividade r (ver Tabela 5.1), mais do que uma vez, em operação normal e correta dos métodos de medição conforme a ISO 140-3 [37].

A interpretação do valor de reprodutibilidade R é semelhante: Para cada banda de frequência, a diferença entre dois resultados de medições independentes do índice de redução sonora, obtidos por dois operadores ou duas equipes de medição, em diferentes laboratórios, com amostras idênticas, não deve exceder na média, mais do que uma vez,

os valores de R fornecidos (ver Tabela 5.1), em operação normal e correta dos métodos de medição de acordo com a ISO 140-3 [37].

Nas medições em campo, as condições acústicas não estão sob o controle do operador e na maioria dos casos elas devem ser aceitas como são. A ISO 140-2 [13] considera que, se forem usados procedimentos e equipamentos verificados por medições em laboratórios, os valores de repetitividade e de reprodutibilidade podem ser considerados essencialmente similares àqueles das medições em laboratório. Dessa forma, a interpretação de R para medições em campo do índice de redução sonora aparente seria: Para cada banda de frequência, a diferença entre dois resultados de medições independentes obtidos por dois operadores ou duas equipes de medição, no mesmo local, não deve exceder na média, mais do que uma vez, os valores de R da Tabela 5.1, com operação correta dos métodos de medição conforme a ISO 140-4 [15].

Na época da publicação da parte 2 da norma ISO 140, os procedimentos para determinar a repetitividade e a reprodutibilidade ainda não haviam sido usados em larga escala em acústica de edificações e não existiam dados numéricos precisos dos desvios-padrão e também dos valores r e R de resultados de medições completas. Portanto, a norma informa que o que há disponível são apenas “tentativas” de valores de r e R dos métodos de medição de acordo com as partes 3, 4, 6 e 8 da ISO 140, para bandas de terço de oitava, obtidos a partir de poucos testes. A Tabela 5.1 reproduz alguns valores das Tabelas A.1, A.2 e A.3 da ISO 140-2. Os tipos de amostras e condições de medição estão indicados em seguida.

Tabela 5.1 - Valores de r e R extraídos das Tabelas A.1, A.2 e A.3 da ISO 140-2 [13].

Frequência [Hz]	r para índice de redução sonora (ISO 140-3) - da Tabela A.1.	R para índice de redução sonora (ISO 140-3 e ISO 140-4) - das Tabelas A.2 e A.3.
100	4,5	9
125	4	8,5
160	3,5	6
200	3,5	5,5
250	2,5	5,5
315	2,5	4,5
400	2	4,5
500	2	4
630	1,5	3,5
800	1,5	3
1000	1,5	2,5
1250	1,5	3
1600	1,5	3,5
2000	1,5	3,5
2500	1,5	3,5
3150	1,5	3,5

Os valores de repetitividade r foram extraídos da Tabela A.1 da ISO 140-2, para medições em laboratórios de acordo com a ISO 140-3 [37], e são baseados na média ponderada de resultados dos testes interlaboratoriais listados abaixo [13]:

- Teste 1: de 1976 envolvendo oito laboratórios na Alemanha, com seis medições completas em cada laboratório, usando como amostras uma construção de madeira semelhante acusticamente a uma “*double-glazed window*”.

- Teste 2: de 1983 com cinco laboratórios na Escandinávia, seis medições completas em cada um, usando como amostras “*glazing in a staggered test opening*”.

- Teste 3: realizado de 1982 a 1985 por sete laboratórios na Bélgica e nos Países Baixos, usando como amostras uma partição leve (*lightweight partition*) e duas paredes de tijolos (*brick*) com massa por unidade de área de 225 kg/m² e 450 kg/m², sendo obtida a média desses resultados.

- Teste 4: realizado em 1985/1986 com oito laboratórios e seis medições completas em cada um, usando como amostras “*double-glazing (6/16/6)*”.

Os valores de reprodutibilidade R foram obtidos da Tabela A.2, para medições em laboratórios conforme a ISO 140-3 [37], e são baseados na média aritmética dos resultados dos testes interlaboratoriais 2, 3 e 4, listados acima. Para medições em campo de acordo com a ISO 140-4 [15], os valores de R foram extraídos da Tabela A.3, obtidos dos valores correspondentes na Tabela A.2. A norma cita que eles “*foram obtidos sob boas condições acústicas e podem ser piores em salas pequenas ou em salas com transmissão lateral significativa*”.

Segundo a ISO 140-2 [13], para medições em laboratório, uma repetitividade de 1 dB é normalmente obtida para índices ponderados e a reprodutibilidade normalmente está na faixa de 1 dB a 3 dB. Para medições de isolamento sonoro de fachadas e entre fachadas realizadas de acordo com a parte 5 da ISO 140 [16], não há dados de precisão disponíveis.

A norma também indica que é necessário determinar os valores r e R para isolamento sonoro através de testes interlaboratoriais baseados na ISO 5725 [40] com várias amostras, e que tais experimentos devem ser realizados o mais rápido possível. Como visto no Capítulo 3, alguns trabalhos desenvolvidos a partir de testes interlaboratoriais com medições de isolamento sonoro aplicaram a ISO 140-2.

5.3. Verificação dos valores r e R

A ISO 140-2 [13] permite que um laboratório que não tenha participado do teste interlaboratorial para determinar os valores de r e R possa verificar se o seu procedimento de medição está adequado, a partir de resultados obtidos do teste interlaboratorial. Um laboratório x , por exemplo, ao realizar uma série de medições de repetitividade, pode verificar seus valores r se pelo menos cinco medições completas ($n_x \geq 5$) contendo 16 bandas de terço de oitava de frequência forem realizadas com uma amostra de teste similar àquela usada no teste interlaboratorial. Os valores r obtidos são considerados satisfatórios se o desvio-padrão s_x para todas as bandas de frequência satisfizer a condição $s_x \leq mr$, onde m é um fator dado na norma pela Tabela 5.2, e r é o valor de repetitividade determinado no teste interlaboratorial e fornecido na Tabela 5.1 para o índice de redução sonora. Para $n_x \leq 15$, o fator m é $m = 1,07/\sqrt[4]{n_x}$, com erro de 2% [13].

Tabela 5.2 - Fator m em função do número de medições n_x [13].

Número de medições n_x	5	6	7	8	9	10
Fator m	0,72	0,68	0,65	0,63	0,61	0,60

Após ter passado na verificação de repetitividade descrita acima, o laboratório x também pode verificar seus valores de reprodutibilidade R , comparando a própria média dos seus n_x resultados de medições, \bar{y}_x , com a média geral de todos os resultados de medições do teste interlaboratorial, $\bar{\bar{y}}$, para cada uma das 16 bandas de frequência.

Ao se comparar valores de R é muito importante que a amostra seja a mais similar possível às amostras do teste interlaboratorial, pois, ao incluir o laboratório x , qualquer diferença nas propriedades da amostra afetará diretamente a reprodutibilidade.

A ISO 140-2 fornece uma expressão para calcular as diferenças críticas $|\bar{\bar{y}} - \bar{y}_x|$, para cada banda de frequência, considerando que r e R tenham sido determinados no teste interlaboratorial. Essas diferenças críticas não devem ser excedidas em mais do que 5% dos casos, ou seja, não mais do que uma vez. Se isso ocorrer, os resultados do laboratório x devem ser considerados suspeitos e ações corretivas devem ser tomadas.

5.4. Intervalos de confiança a partir dos valores r e R

A ISO 140-2 [13] também descreve três casos de interesse para determinar o intervalo de confiança para o valor verdadeiro μ (que pode ser, por exemplo, um requisito ou um valor especificado em um contrato ou regulamentação) para uma probabilidade de 95%.

O primeiro caso ocorre quando, em um único laboratório, apenas uma determinação y é feita da grandeza sendo medida. Nesse caso, o intervalo de confiança para o valor verdadeiro μ deve ser:

$$y - \frac{R}{\sqrt{2}} < \mu < y + \frac{R}{\sqrt{2}}. \quad (53)$$

O segundo caso ocorre quando, em um único laboratório, n medições da grandeza são feitas com um valor médio $\bar{y}_{r,n}$. O intervalo de confiança para o valor μ é:

$$\bar{y}_{r,n} - \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{R^2 - r^2 \left(1 - \frac{1}{n}\right)} < \mu < \bar{y}_{r,n} + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{R^2 - r^2 \left(1 - \frac{1}{n}\right)}. \quad (54)$$

O terceiro caso ocorre se cada um dos p laboratórios realiza uma única medição da grandeza com um valor $\bar{y}_{R,n}$. Nesse caso, o intervalo de confiança para o valor verdadeiro μ será:

$$\bar{y}_{R,n} - \frac{R}{\sqrt{2p}} < \mu < \bar{y}_{R,n} + \frac{R}{\sqrt{2p}}. \quad (55)$$

O capítulo seguinte descreve as medições de isolamento sonoro realizadas em campo de forma a possibilitar a posterior estimativa de suas incertezas.

CAPÍTULO 6

MEDIÇÕES REALIZADAS

6.1. Medições de isolamento sonoro entre salas

A seguir, são descritas as medições de isolamento sonoro aéreo entre salas, realizadas em campo, com os métodos clássico e o da função de transferência, utilizando-se como sinal de excitação ruído branco e varredura de senos (*sweep*), respectivamente. Os tempos de reverberação da sala receptora e as diferenças de nível entre a sala emissora e a sala receptora foram medidos.

As primeiras medições foram realizadas no Laboratório de Ensaios Acústicos do Inmetro (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial), com o objetivo de testar o equipamento de medição e comparar os métodos. Em seguida, foram realizados vários conjuntos de medições *in situ* entre salas disponíveis. Cinco locais diferentes, listados na Tabela 6.1 e ilustrados nas Figuras 6.1 a 6.5, foram escolhidos de forma a possibilitar uma investigação da estimativa da incerteza do método da função de transferência. No local 1, os dois métodos de medição foram utilizados; nos outros locais, utilizou-se apenas o método da função de transferência. As condições ambientais foram medidas e se mantiveram constantes durante as medições.

Tabela 6.1 - Ambientes de teste.

Número	Local das medições realizadas
1	Cômodos de uma edificação de um pavimento situada no campus de laboratórios de metrologia do Inmetro, em Xerém, Figura 6.1.
2	Salas de aula, no segundo pavimento do prédio 6, no campus de laboratórios de metrologia do Inmetro, em Xerém, Figura 6.2.
3	Laboratórios, no primeiro pavimento do prédio 6, no campus de laboratórios de metrologia do Inmetro, em Xerém, Figura 6.3.
4	Salas de aula, no Colégio Estadual Círculo Operário (CECO), em Xerém, Figura 6.4.
5	Laboratório de Acústica e Vibrações (LAVI) e sua sala de aula, na COPPE/UFRJ, na Ilha do Fundão, sala I - 230, Figura 6.5.



Figura 6.1 - Vista externa dos cômodos medidos da edificação em Xerém.



Figura 6.2 - Sala de aula no prédio 6, no campus do Inmetro.



Figura 6.3 - Laboratório no prédio 6, no campus do Inmetro.



Figura 6.4 - Sala de aula no CECO, em Xerém.



Figura 6.5 - Sala de aula do LAVI, na COPPE.

6.2. Instrumentação

Os equipamentos utilizados nas medições estão listados abaixo:

- 2 pré-amplificadores *Larson Davis* PRM 902;
- 2 microfones capacitivos ½” de incidência aleatória *Larson Davis* modelo 2559;
- Calibrador de nível sonoro *Bruel&Kjaer* Tipo 4231;
- Termohigrômetro *Vaisala* HM 34;
- Amplificador *Camco Vortex* - 2.6;
- Placa de aquisição de sinais *RME Hammerfall DSP Multiface*;
- Computador com *software Monkey Forest*;
- Fonte sonora (dodecaedro com *subwoofer*);
- Analisador em tempo real RTA 840-2 *Norsonic* - para o método clássico;
- Condicionador de sinais (Multiplexador) *Larson Davis* 2210 - para o método da função de transferência;
- 2 tripés (para os microfones).

Os instrumentos utilizados estavam com seus certificados de calibração dentro do prazo de validade (dois anos a partir da data de calibração) e foram transportados para os locais de medição em caixas especiais.

Os esquemas de medição são apresentados nas Figuras 6.6 e 6.7 para os dois métodos. A principal diferença entre eles é que, enquanto no clássico o sinal dos microfones é gravado e processado pelo analisador RTA 840 da marca *Norsonic*, no método da função de transferência o sinal dos microfones é gravado e processado pelo *software Monkey Forest*.

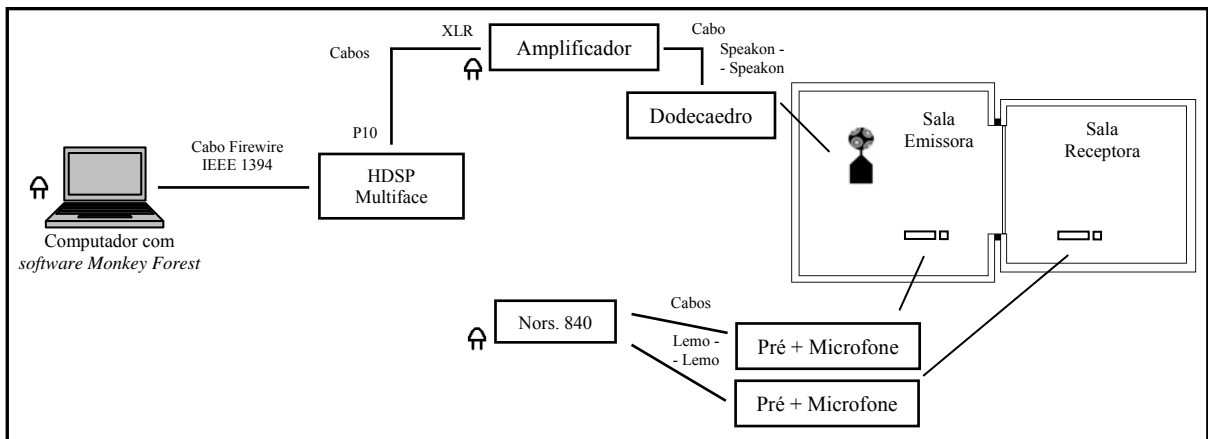


Figura 6.6 - Esquema de medição com o método clássico.

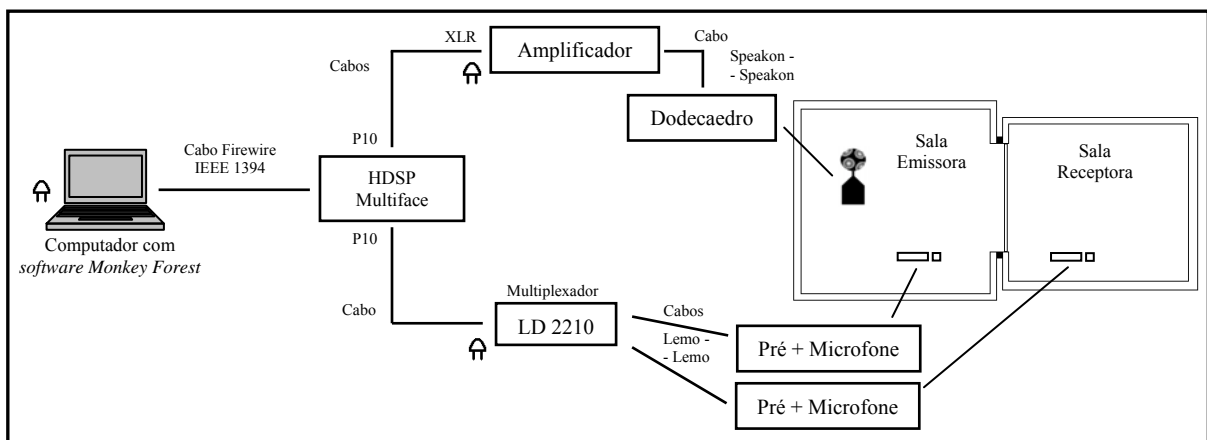


Figura 6.7 - Esquema de medição com o método da função de transferência.

O microfone usado para a captação do sinal deve ser sensível à incidência aleatória, com resposta plana na faixa de interesse. O microfone capacitivo de $\frac{1}{2}$ polegada com pré-amplificador *Larson Davis*, ilustrado na Figura 6.8, possui resposta plana em campo difuso até aproximadamente 10 kHz. A Tabela 6.2 apresenta algumas características dos microfones utilizados, onde o termo ‘sensibilidade típica’ corresponde à sensibilidade do circuito aberto (microfone eletricamente descarregado).

Antes de cada medição, os microfones foram ajustados através do calibrador de nível sonoro da *Bruel&Kjaer*, mostrado na Figura 6.8, que gera um nível de pressão sonora de 94 dB na frequência de 1000 Hz para os microfones de $\frac{1}{2}$ ”.

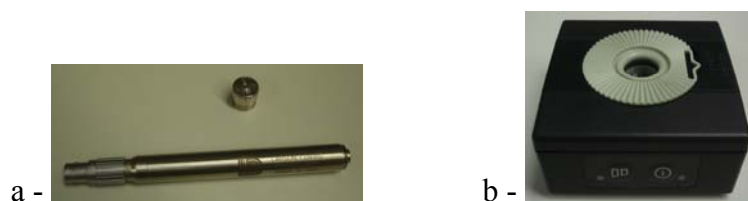


Figura 6.8 - a) Pré-amplificador e microfone. b) Calibrador de nível sonoro.

Tabela 6.2 - Características dos microfones capacitivos *Larson Davis 2559* de ½”.

Diâmetro: ½ polegada	
Sensibilidade típica	nº de série 2411: -37,87 dB re 1 V/PA (250 Hz)
	nº de série 2532: -38,19 dB re 1 V/PA (250 Hz)
Faixa de resposta de frequência plana em campos difuso e livre: 20 Hz a 10 kHz	
Voltagem de polarização: 200 V	
Condições de teste	nº de série 2411: 24,3°C / 1016,4 mbar / 35,7% UR
	nº de série 2532: 24,2°C / 1014,0 mbar / 30,3% UR

6.2.1 Sistema de geração e aquisição

Nas medições com o método clássico, as diferenças de nível e o tempo de reverberação foram obtidos a partir dos níveis de pressão sonora medidos pelo analisador *Norsonic RTA 840*, que possui 2 canais de entrada analógicos. Em cada canal entrava o sinal de um microfone. O RTA 840, ilustrado na Figura 6.9, também possui 2 saídas analógicas, amplificador de entrada, conversor analógico-digital, filtro e gerador de sinais, mas seu gerador de sinais apresentou problemas durante as medições e foi substituído pelo sistema de aquisição *Hammerfall DSP Multiface* da marca *RME*, funcionando com o *software Monkey Forest*.



Figura 6.9 - Analisador *Norsonic RTA 840* (método clássico).

Para o método da função de transferência, o sistema de gravação e geração de sinais utilizado foi o *Hammerfall DSP Multiface* com o *software Monkey Forest*. Para funcionar, o sistema da *RME* precisa de uma placa de aquisição da mesma marca, que pode ser tanto para desktop (PCI) como para laptop (PCMCIA). O sistema possui alta taxa de amostragem (96 kHz) e 36 canais de 24 bits, entre eles 8 entradas e 8 saídas analógicas. A placa é conectada à caixa de entrada-saída do *Multiface* por um cabo IEEE 1394 de 6 pinos que também funciona como fonte de alimentação para essa caixa. A transferência de dados não usa o protocolo de transmissão *FireWire*, geralmente utilizado através da conexão IEEE 1394, mas sim um protocolo próprio do fabricante.

O computador usado para geração de sinais nos dois métodos e para as medições com o método da função de transferência foi um computador portátil industrial robusto feito para trabalhar em campo, mas já antigo, um Pentium III com Windows 98 como sistema operacional e com a placa PCI instalada. O Windows 98 foi utilizado pois permite a utilização do DOS puro, necessário para executar o *software Monkey Forest* nas medições. A Figura 6.10 mostra o computador empregado e a placa de aquisição de sinais PCI do sistema *Hammerfall DSP*, e a Figura 6.11, a caixa de entrada-saída do *Multiface RME Hammerfall DSP*.



Figura 6.10 - Computador e placa PCI do sistema *Hammerfall DSP Multiface*.



Figura 6.11 - Caixa de entrada-saída do *Multiface RME Hammerfall DSP*.

No método da função de transferência, o multiplexador *Larson Davis*, visto na Figura 6.12, foi usado para condicionar o sinal captado pelo microfone e o sinal enviado para o sistema de aquisição.



Figura 6.12 - Condicionador de sinais *Larson Davis 2210* (método da função de transferência).

Com relação à fonte sonora, o ideal é que os transdutores sejam omnidirecionais, como é o caso do dodecaedro com *subwoofer* usado nas medições e ilustrado na Figura 6.13. A fonte foi construída no Inmetro e sua resposta foi medida, sendo possível

aplicar uma correção aos sinais de excitação devido à resposta não plana da fonte em algumas frequências, de maneira a otimizar a operação da fonte. Como o dodecaedro possui resposta fraca em baixas frequências, foi dada ênfase nessas frequências para que a fonte emitisse energia sonora suficiente em toda a faixa de frequência considerada (de 100 Hz a 3150 Hz, de acordo com a ISO 140-4 [15]).



Figura 6.13 - Fonte sonora (dodecaedro com *subwoofer*).

O amplificador de potência usado, mostrado na Figura 6.14, é um equipamento bastante potente e capaz de atender às necessidades das medições. A fonte sonora foi alimentada pelo sistema de aquisição com os sinais gerados.



Figura 6.14 - Amplificador *Camco*.

Após as medições, os resultados gravados foram processados em planilhas desenvolvidas no *software Microsoft Excel* para obtenção dos parâmetros acústicos.

6.2.2 Posições dos microfones e da fonte sonora

As posições dos microfones e da fonte sonora foram escolhidas de acordo com as especificações da norma ISO 140-4 [15]. Apesar da norma não falar sobre alturas dos microfones, foram utilizadas alturas diferentes para diferentes posições dos microfones, de forma que os microfones não ficassem todos no mesmo plano.

Para medições das diferenças de nível em bandas de frequência com os dois métodos, foram utilizadas cinco posições de microfone distribuídas em cada sala e duas posições diferentes de fonte sonora na sala emissora. As medições foram realizadas simultaneamente com um microfone em cada sala, no total de dez medições, exceto para as medições no local 3, onde dez posições de microfone foram usadas em cada sala. Para as medições dos tempos de reverberação, foi usada uma posição adicional de microfone com duas posições de fonte, no total de 12 medições, mais do que as 6 especificadas na ISO 140-4 [15].

A Tabela 6.3 lista detalhes das dimensões das salas e as Figuras 6.15 a 6.19 apresentam os esquemas das salas com o posicionamento da fonte sonora (F) e dos microfones (M) para cada uma das salas. Foram feitas seis medições completas do isolamento sonoro aéreo entre as salas em condições de repetitividade, com exceção do local 3, onde cinco medições foram realizadas. Essas quantidades de medições estão de acordo com a ISO 5725 [40].

Tabela 6.3 - Detalhes das dimensões dos ambientes de teste.

Local	$V_{\text{sala emissora}}$	$V_{\text{sala receptora}}$	$A_{\text{piso sala emissora}}$	$A_{\text{piso sala receptora}}$	pé direito	$S_{\text{divisória}}$
1	64 m ³	51 m ³	25 m ²	20 m ²	2,62 m	13 m ²
2	147 m ³	147 m ³	54 m ²	54 m ²	2,70 m	25 m ²
3	165 m ³	162 m ³	55 m ²	55 m ²	2,97 m	27 m ²
4	169 m ³	123 m ³	53 m ²	38 m ²	3,20 m	20 m ²
5	140 m ³	109 m ³	53 m ²	41 m ²	2,65 m	11 m ²

No local 1, as duas salas estavam vazias. As salas dos locais 2 e 3 possuem grandes áreas de piso e no local 2, que são salas de aula, havia mesas e cadeiras nas salas. Já no local 3, além da sala receptora possuir divisórias, havia várias mesas de escritório, cadeiras e alguns armários, enquanto a sala emissora estava praticamente vazia, com apenas alguns móveis desmontados e encostados na parede contrária à parede divisória; por esses motivos, foram usadas dez posições de microfone em cada sala. No local 4, salas de aula de um colégio, as cadeiras e mesas estavam espalhadas pelas salas. O local 5, além de mesas, cadeiras e armários, possui uma pequena divisória na sala emissora, e dentro dessa divisória não foram escolhidas posições de microfone. A parede de separação entre as salas do local 5 tem formato de “L”, diferente das demais, e há também um pequeno “hall” de entrada entre as duas salas.

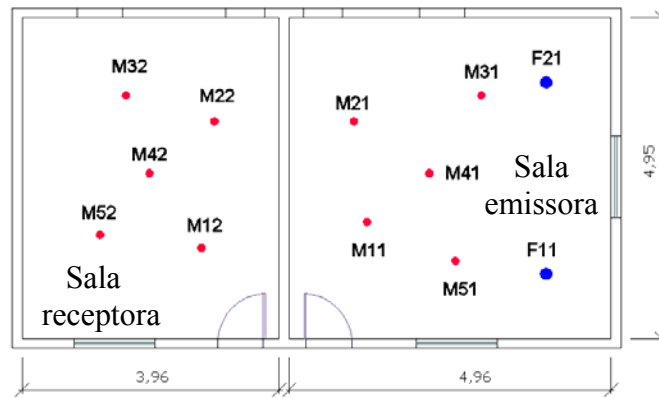


Figura 6.15 - Esquema de posições em medições no local 1, dimensões em metros.

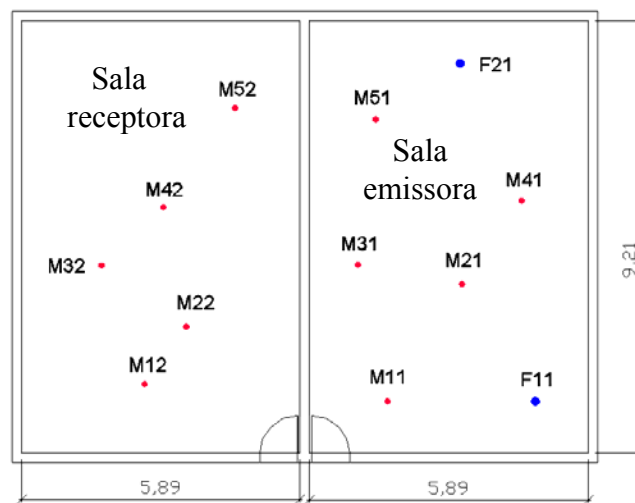


Figura 6.16 - Esquema de posições em medições no local 2, dimensões em metros.

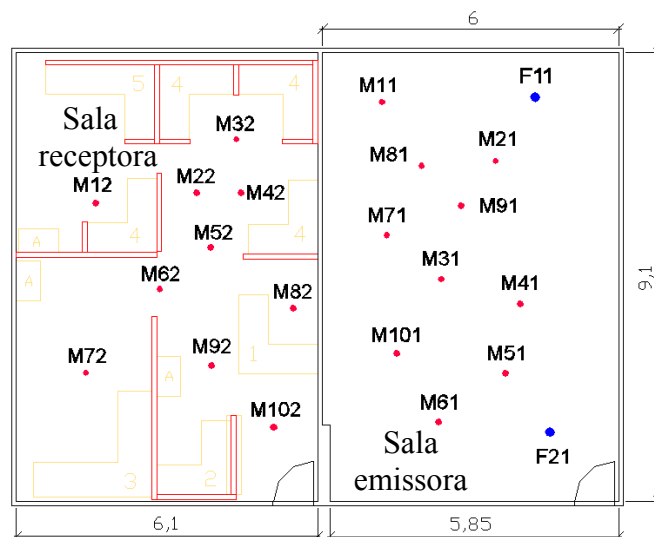


Figura 6.17 - Esquema de posições em medições no local 3, dimensões em metros.



Figura 6.18 - Esquema de posições em medições no local 4, dimensões em metros.

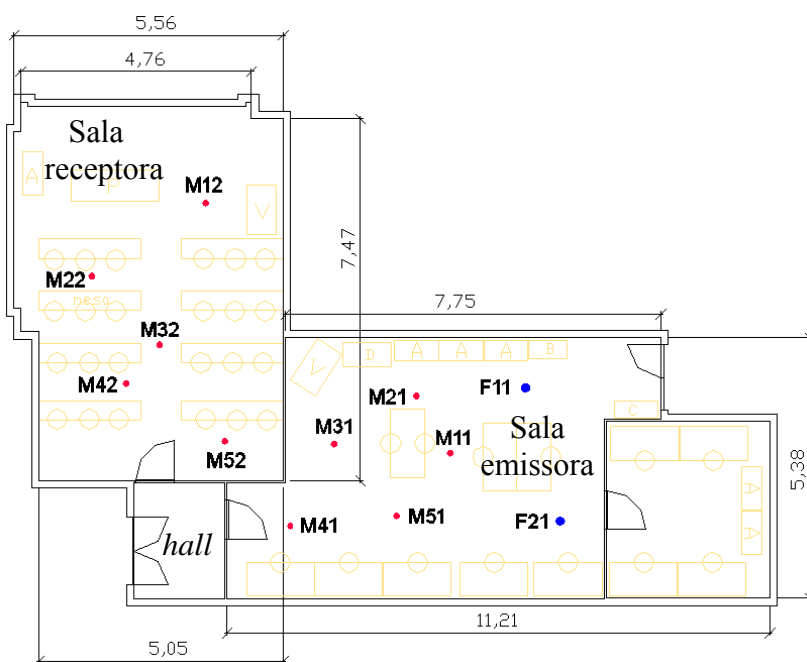


Figura 6.19 - Esquema de posições em medições no local 5, dimensões em metros.

6.3. Medições realizadas com o método clássico

No método clássico, a diferença de nível para cada banda de frequência foi obtida a partir da medição direta dos níveis de pressão sonora nas duas salas e o tempo de reverberação através do método de interrupção de ruído. Após a montagem dos equipamentos conforme o esquema da Figura 6.6, as etapas abaixo foram seguidas:

1) leitura e registro da temperatura e da umidade relativa do ar nos dois cômodos, utilizando o termohigrômetro, ilustrado na Figura 6.20.

2) ajuste ou calibração dos microfones, imediatamente antes e após cada medição, usando o calibrador de nível sonoro e o analisador *Norsonic* RTA 840.



Figura 6.20 - Termohigrômetro.

3) medição e registro do ruído de fundo nos dois cômodos usando o *Norsonic* RTA 840, para cada posição de microfone em cada sala, durante 30 segundos.

4) medição e registro dos níveis de pressão sonora nos dois cômodos usando o *Norsonic* RTA 840, com a sala emissora sendo excitada por um ruído branco durante 30 segundos, para todas as posições de microfone em cada sala e as duas posições de fonte na sala emissora.

5) medição e registro dos tempos de reverberação da sala receptora, após a excitação sonora na sala com ruído branco ser desligada. O analisador *Norsonic* RTA 840 processou as curvas de decaimento e calculou os tempos de reverberação.

6) Pós-processamento dos dados medidos e gravados no *Norsonic* RTA 840 para obter as diferenças de nível em bandas de frequência entre as salas e os demais parâmetros de isolamento sonoro.

6.4. Medições realizadas com o método da função de transferência

No método da função de transferência acústica, a geração, a aquisição e o processamento do sinal medido foram controlados pelo computador com o sistema de aquisição associado. A resposta da sala, capturada pelo microfone, foi processada pelo *software Monkey Forest*, que permite obter a função de transferência acústica da sala e filtrá-la em bandas de terço de oitava, para posterior cálculo das diferenças de nível. As etapas abaixo foram realizadas:

1) leitura e registro da temperatura e da umidade relativa do ar nos dois cômodos, utilizando o termohigrômetro.

2) ajuste do sistema de medição usando o calibrador, os microfones e o *software*. O método clássico requer que o equipamento de medição seja verificado com um calibrador de nível sonoro. No método da função de transferência, isto é feito através de

uma regulagem do sistema de medição. Como as grandezas medidas são diferenças de nível, os resultados obtidos pelo método da função de transferência normalmente não são dependentes da sensibilidade absoluta dos canais.

O procedimento realizado foi o seguinte: os microfones são inseridos no calibrador que gera o nível de 94 dB em 1 kHz. Os valores desses níveis lidos pelo equipamento são registrados para os dois canais com microfones em uso e a diferença entre os valores dos dois canais, um deles designado como canal de referência, é anotada para efeito de comparação entre os sinais dos dois microfones. A resposta do outro canal é então comparada à resposta do canal de referência e ambas devem ser iguais, para cada medição realizada. Após este ajuste, iniciaram-se as medições de isolamento.

3) medição e registro das funções de transferência acústica nos dois cômodos, pelo sistema de aquisição e o *software*, para cada posição de microfone e fonte sonora, com a excitação na sala emissora.

O sinal de excitação utilizado, apresentado na Figura 6.21 no domínio do tempo, à esquerda, e da frequência, à direita, é uma sobreposição de dois *sweeps* (varreduras de seno) não lineares gerados no *Monkey Forest*, com apenas 1 ciclo, ou seja, sem repetição, e com duração de 12 segundos, intervalo de tempo maior que a duração da resposta impulsiva, para evitar distorção harmônica. O sinal com maior amplitude é o *sweep* com frequência variando de aproximadamente 20 Hz a 200 Hz, para excitar o *subwoofer*, enquanto o sinal com menor amplitude é o *sweep* cuja frequência varia de 120 Hz a 10 kHz, de modo a excitar os 12 *tweeters* do dodecaedro. É possível observar a sobreposição dos sinais em torno da frequência de 160 Hz.

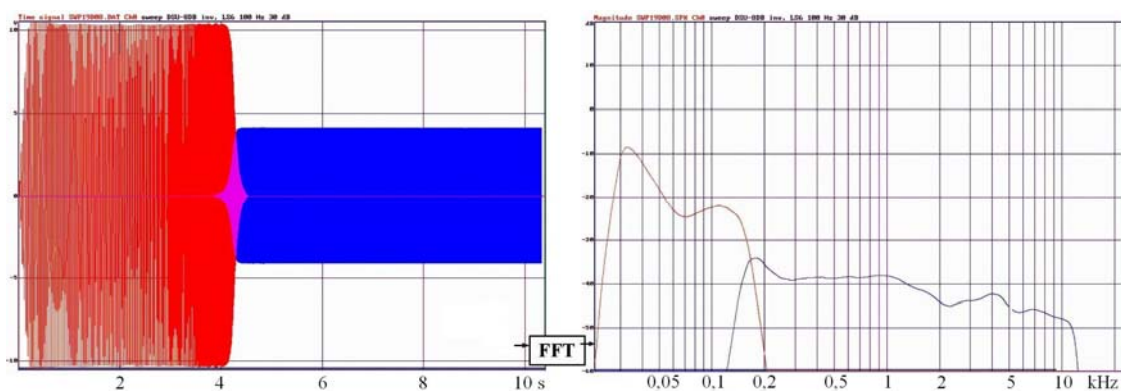


Figura 6.21 - Sinal de excitação utilizado, no tempo e no domínio da frequência.

4) medição e registro dos tempos de reverberação da sala receptora usando o sistema de aquisição e o *software*, através do processamento de integração reversa das respostas impulsivas da sala para obter as curvas de decaimento, e, então, os tempos de reverberação. O sinal de excitação foi o mesmo usado nas medições das funções de transferência, os *sweeps* da Figura 6.21.

6.5. Comparação entre o método da função de transferência e o método clássico – isolamento sonoro entre salas

Os resultados das medições de isolamento sonoro aéreo entre as salas do local de teste 1 obtidos com os dois métodos foram comparados. As médias das diferenças de nível obtidas com os dois métodos são apresentadas para as bandas de terço de oitava na Figura 6.22. O ruído de fundo médio nas salas era de 40 dB(A). Durante a excitação, os níveis de pressão sonora eram aproximadamente 92 dB(A) na sala emissora e 58 dB(A) na sala receptora. É possível verificar no gráfico a concordância entre os métodos, bem como uma pequena elevação dos valores obtidos com o método da função de transferência nas duas primeiras bandas de frequência e a partir de 1000 Hz e, para o método clássico, entre 160 Hz e 800 Hz.

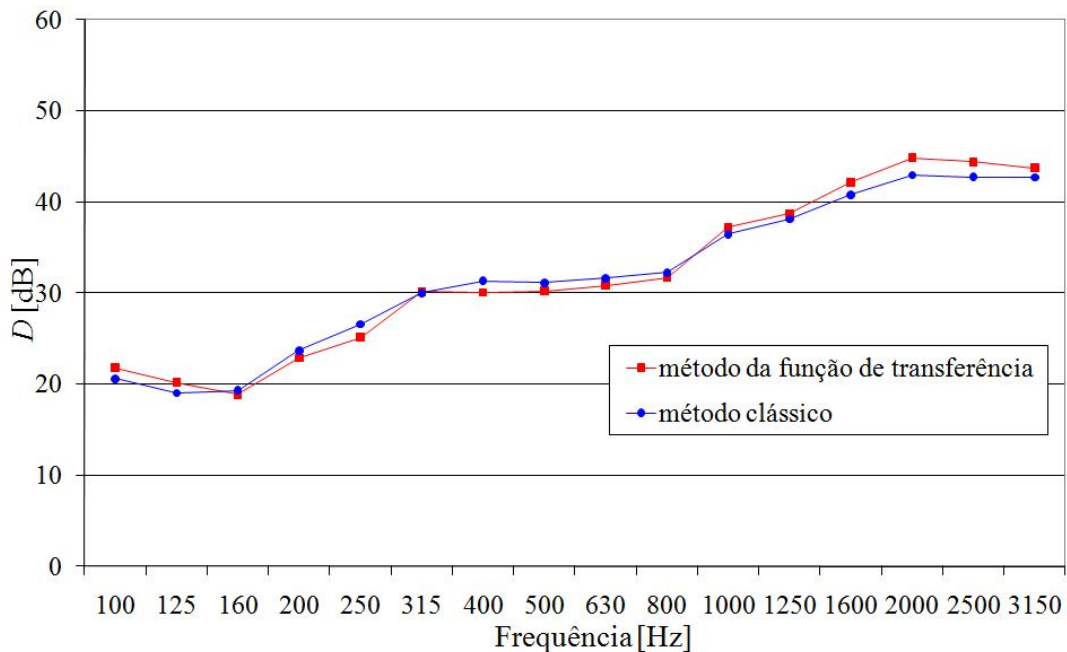


Figura 6.22 - Comparação entre diferenças de nível obtidas pelos métodos no local 1.

A Figura 6.23 mostra os tempos de reverberação médios da sala receptora do local 1 obtidos com os dois métodos. Nesse caso, as diferenças são maiores.

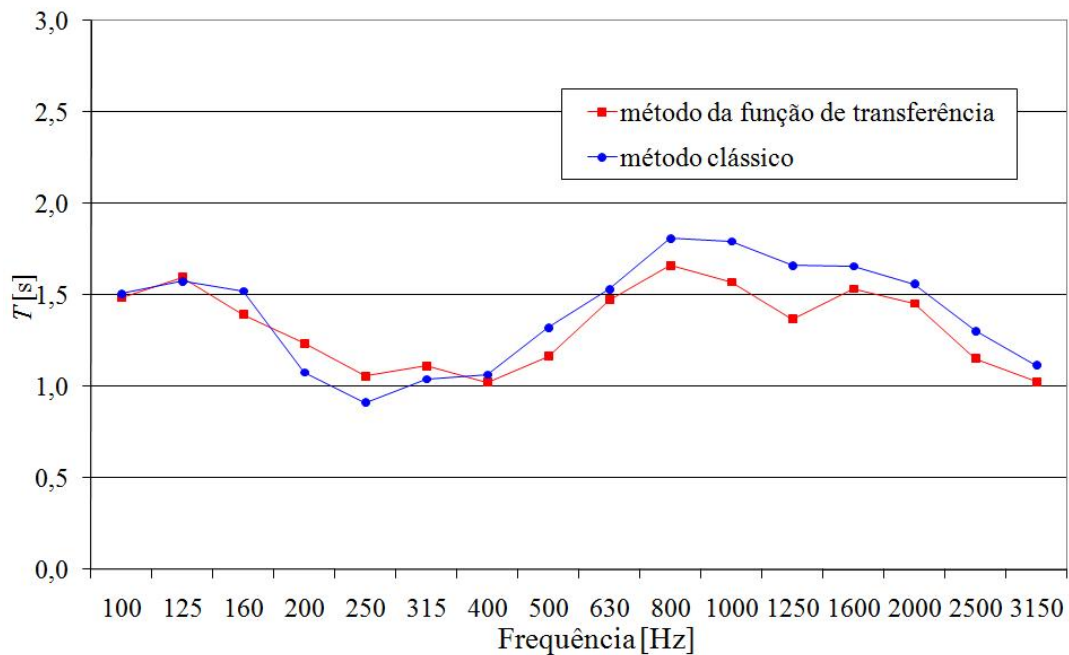


Figura 6.23 - Tempos de reverberação da sala receptora do local 1 pelos dois métodos.

Os parâmetros de isolamento sonoro aéreo em campo R' , D_n e D_{nT} (índice de redução sonora, diferença normalizada de nível e diferença padronizada de nível), são mostrados, respectivamente, nas Figuras 6.24, 6.25 e 6.26, para as bandas de frequência consideradas. Esses parâmetros possuem o mesmo comportamento da diferença de nível D entre as salas, Figura 6.22, pois dependem principalmente de D .

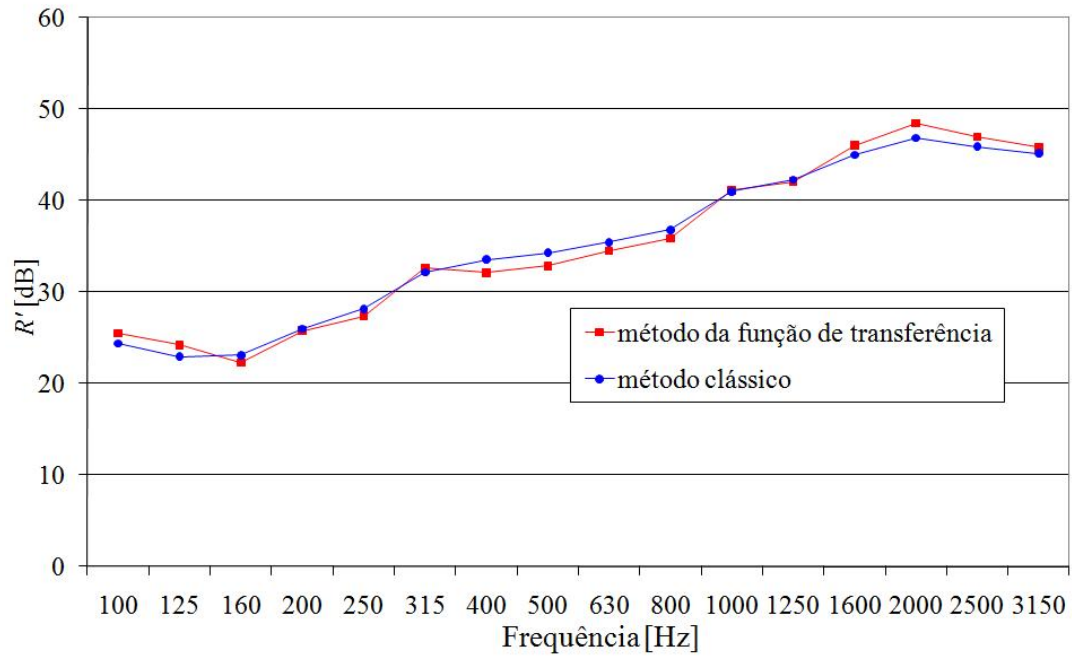


Figura 6.24 - Índices de redução sonora R' obtidos no local 1 com os dois métodos.

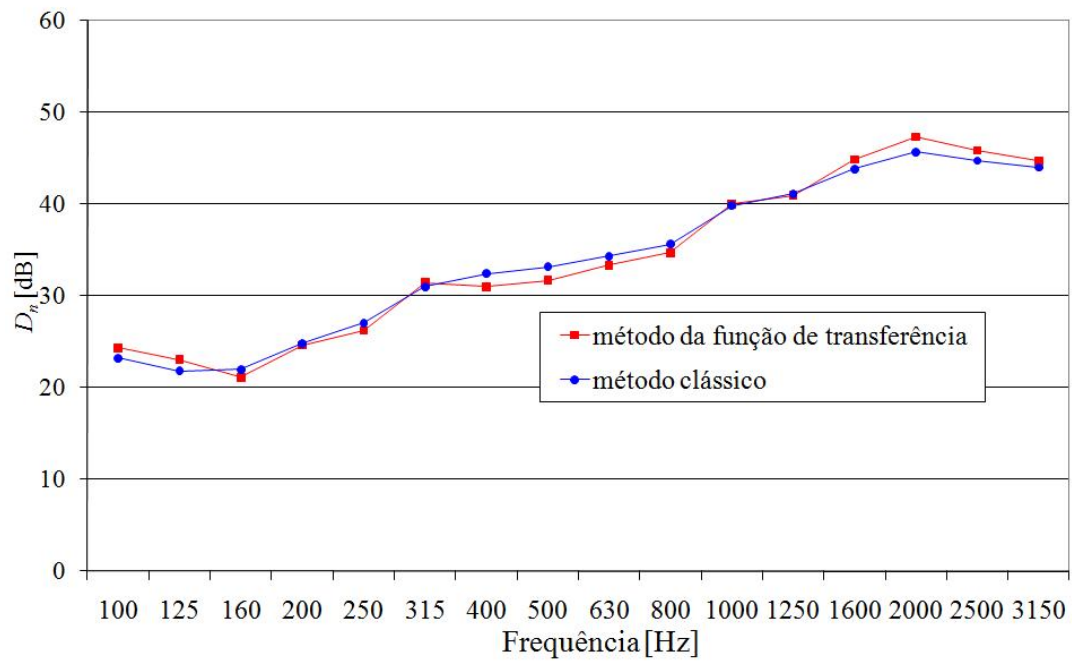


Figura 6.25 - Diferenças normalizadas de nível D_n obtidas no local 1.

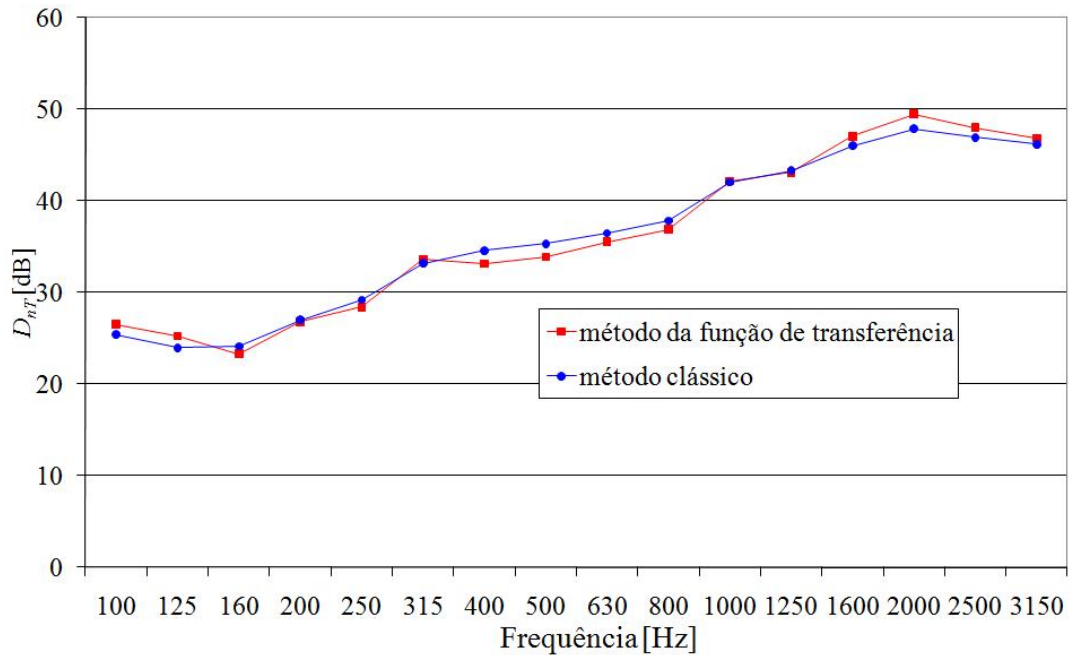


Figura 6.26 - Diferenças padronizadas de nível D_{nT} obtidas no local 1.

Os índices ponderados R'_w , D_{nw} e $D_{nT,w}$ (índice de redução sonora ponderado, diferença normalizada de nível ponderada e diferença padronizada de nível ponderada, respectivamente) e os coeficientes de adaptação de espectro, obtidos conforme o procedimento da ISO 717-1 [9], são dados na Tabela 6.4 para os dois métodos.

Tabela 6.4 - Índices ponderados obtidos para o local 1 com os dois métodos.

Método	R'_w [dB]	D_{nw} [dB]	$D_{nT,w}$ [dB]
Função de transferência	38 (-1; -5)	37 (-1; -5)	39 (-1; -5)
Clássico	39 (-2; -5)	37 (-1; -4)	40 (-2; -5)

A pequena elevação nos valores medidos com o método clássico entre as bandas de 160 Hz e 800 Hz leva a uma diferença de até 1 dB nos índices ponderados R'_w e $D_{nT,w}$. Nesse caso, em particular, os valores medidos de $D_{nT,w}$, 39 dB para o método da função de transferência e 40 dB para o clássico, podem gerar discussão ao serem comparados com os valores estabelecidos na parte 4 da norma brasileira de desempenho de edificações, ABNT NBR 15575-4 [32], onde o nível de desempenho acústico mínimo (M) para $D_{nT,w}$ de paredes entre unidades habitacionais autônomas é de 40 a 44 dB, conforme a Tabela 2.9. Portanto, para essa situação, medições com o método da função de transferência levariam a um desempenho insatisfatório, enquanto que medições com o método clássico levariam ao nível de desempenho mínimo. Entretanto, essa comparação entre os valores medidos e os estabelecidos não é confiável

metrologicamente se a incerteza dos resultados medidos não for informada. Mesmo que a norma de desempenho brasileira não informe nada sobre incerteza ou tolerância, as medições devem vir acompanhadas da incerteza. Essa incerteza será estimada no próximo capítulo aplicando a metodologia proposta aos valores medidos.

6.6. Parâmetros medidos com o método da função de transferência – isolamento sonoro entre salas

As Figuras 6.27 a 6.33 apresentam, para as bandas de frequência, os valores médios das diferenças de níveis D entre as salas, dos tempos de reverberação das salas receptoras e dos parâmetros de isolamento sonoro aéreo em campo (R' , D_n e D_{nT}) medidos com o método da função de transferência nos cinco locais de teste.

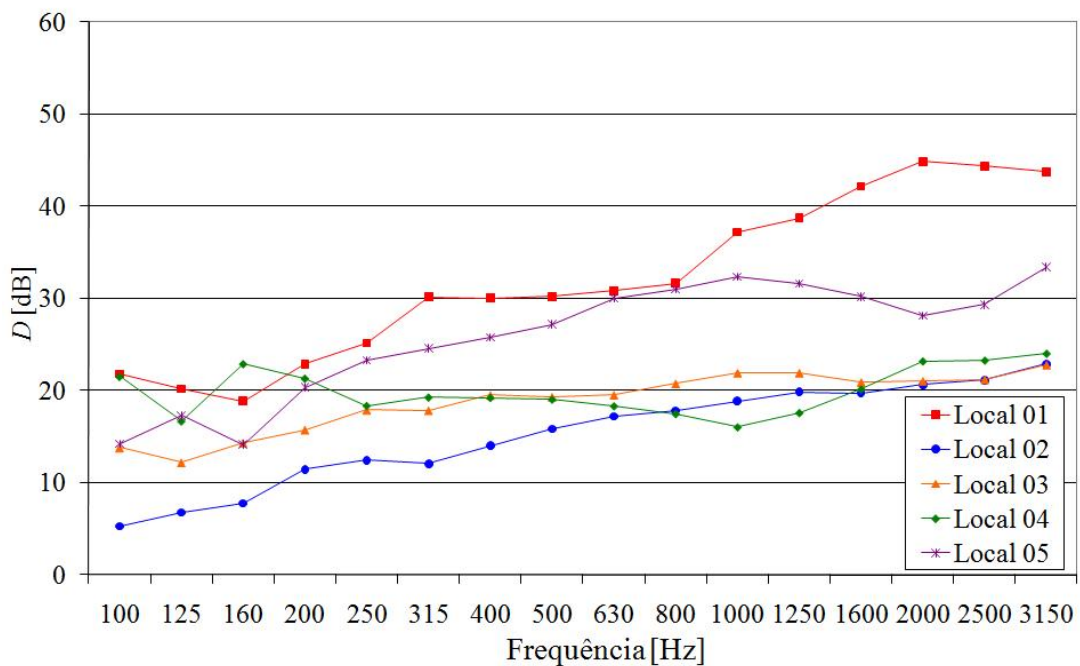


Figura 6.27 - Diferenças de níveis D entre as salas nos cinco ambientes de teste.

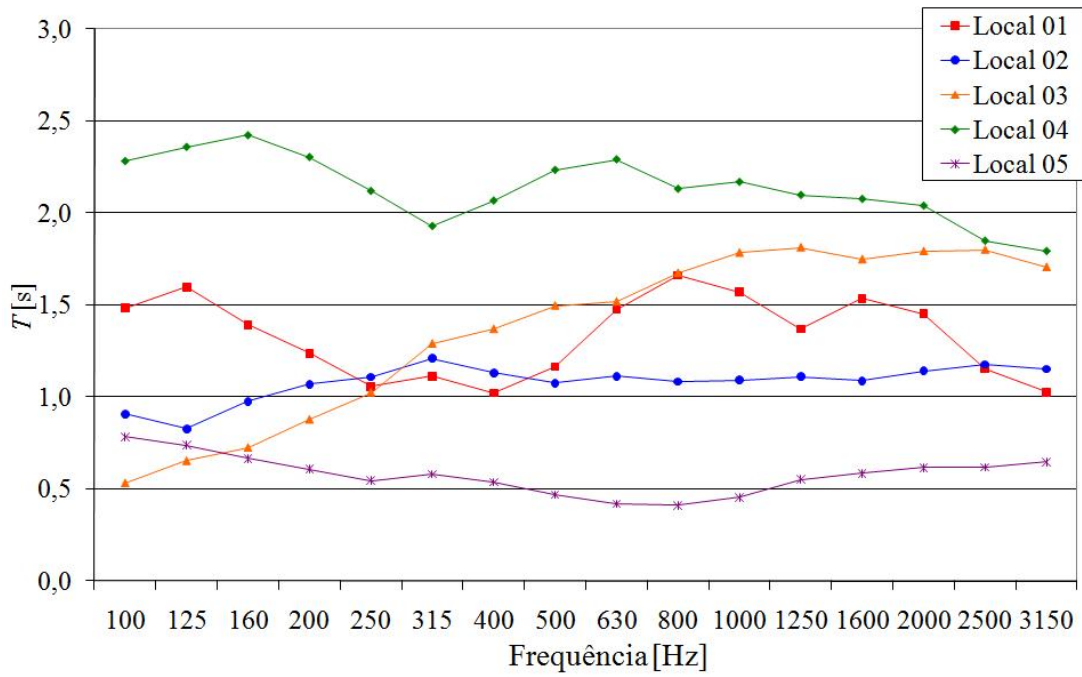


Figura 6.28 - Tempos de reverberação das salas receptoras.

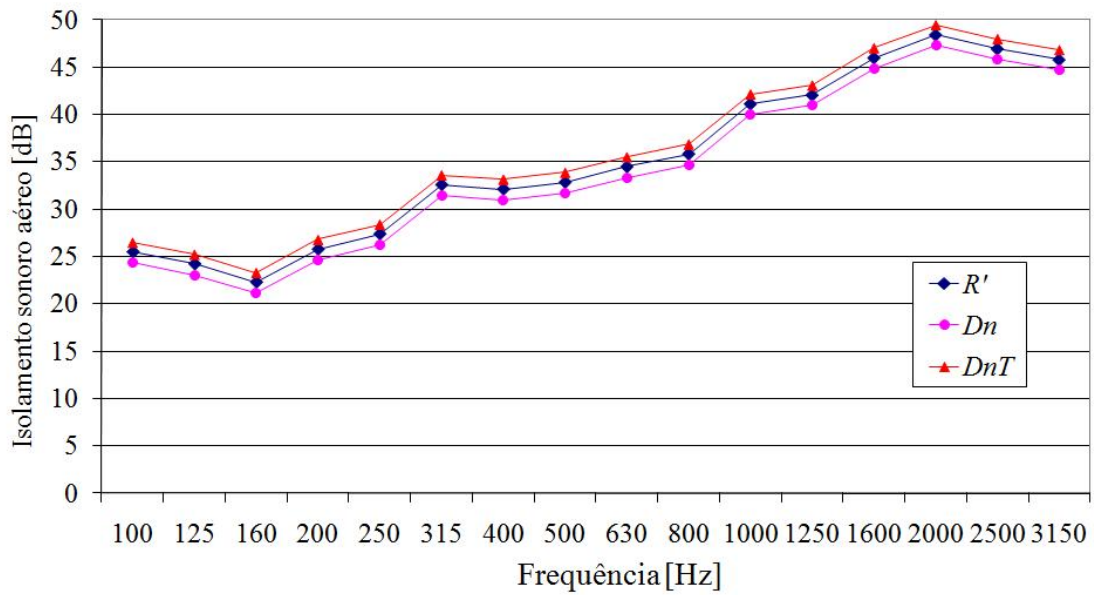


Figura 6.29 - R' , D_n e D_{nT} medidos no local de teste 1.

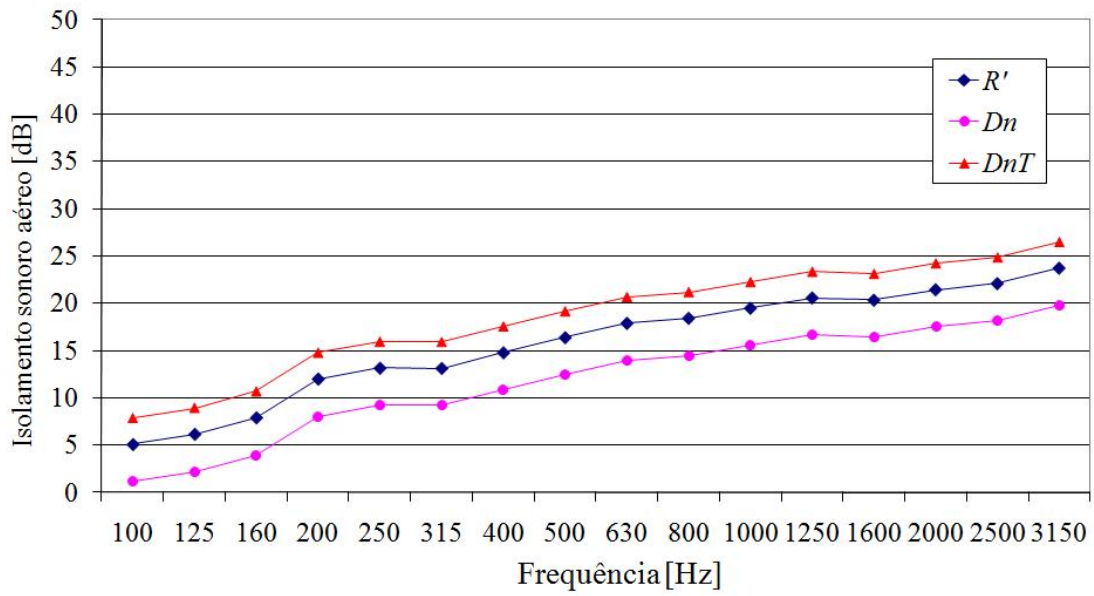


Figura 6.30 - R' , D_n e D_{nT} medidos no local de teste 2.

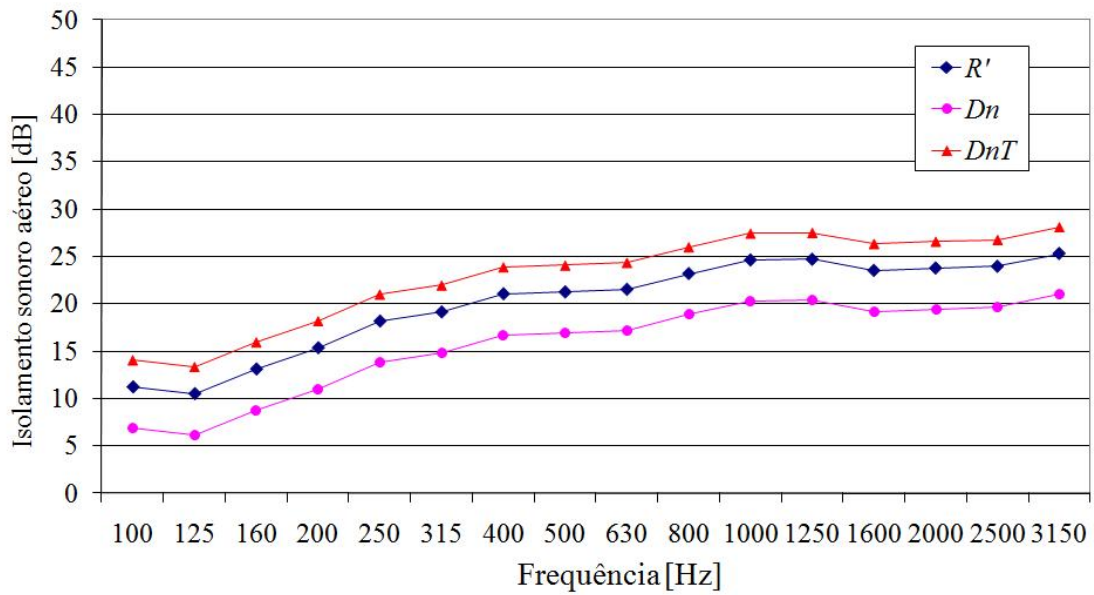


Figura 6.31 - R' , D_n e D_{nT} medidos no local de teste 3.

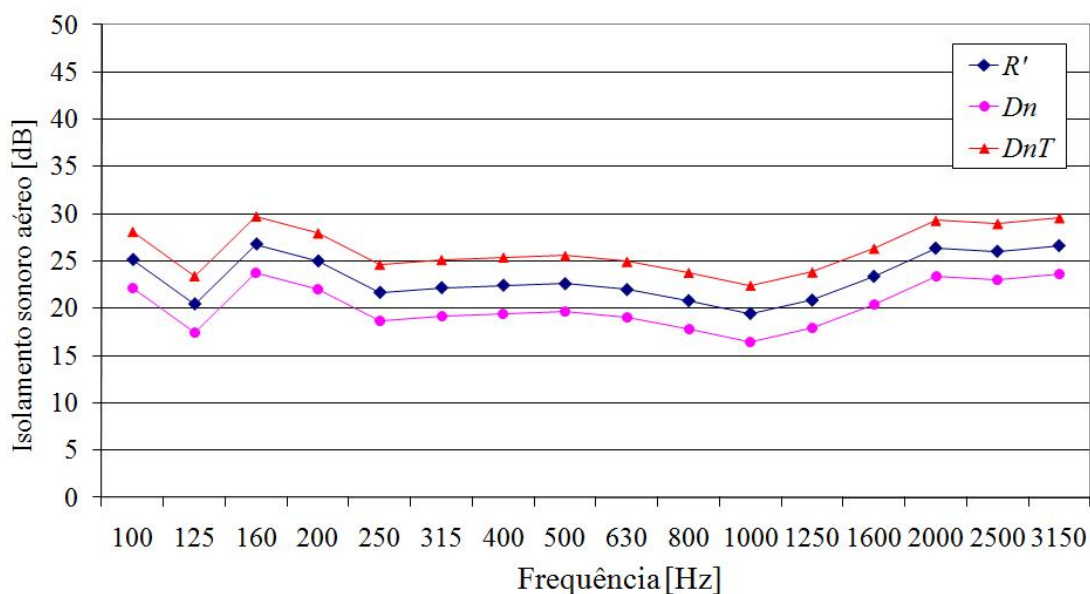


Figura 6.32 - R' , D_n e D_{nT} medidos no local de teste 4.

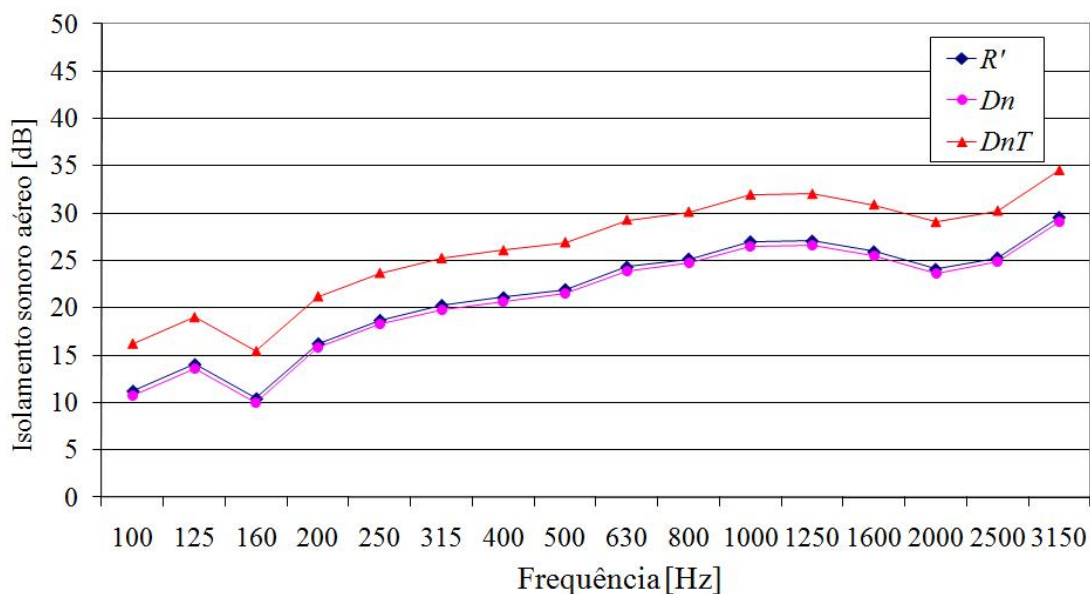


Figura 6.33 - R' , D_n e D_{nT} medidos no local de teste 5.

A Tabela 6.5 lista os valores dos parâmetros ponderados para os cinco locais com seus coeficientes de adaptação de espectro. Observando as figuras e a tabela, nota-se que o isolamento sonoro é maior no local 1, bem pequeno no local 2, e com valores intermediários e parecidos nos locais 3 e 4. O local 1 não atende ao nível de desempenho acústico mínimo recomendado pela ABNT NBR 15575-4 [32] para $D_{nT,w}$

para ensaio em campo de paredes entre unidades habitacionais autônomas, enquanto que os outros locais apresentam valores ainda menores para esse parâmetro, estando todos abaixo do nível de desempenho mínimo.

Tabela 6.5 - Valores ponderados para os cinco ambientes de teste.

Local	R'_w [dB]	D_{nw} [dB]	$D_{nT,w}$ [dB]
1	38 (-1; -5)	37 (-1; -5)	39 (-1; -5)
2	19 (0; -3)	15 (0; -3)	22 (-1; -3)
3	23 (0; -2)	19 (-1; -2)	26 (-1; -2)
4	23 (0; -1)	20 (0; -1)	26 (0; -1)
5	25 (-1; -3)	25 (-1; -4)	30 (-1; -3)

6.7. Medições de isolamento sonoro de fachadas

As medições de isolamento sonoro aéreo de fachadas foram realizadas em campo com os dois métodos de medição, seguindo os mesmos procedimentos das medições de isolamento sonoro aéreo entre salas descritos nos itens 6.3 e 6.4 deste capítulo, substituindo-se os microfones na sala emissora pelo microfone do lado de fora 2 metros em frente à fachada.

Quatro fachadas diferentes de edificações localizadas no campus de laboratórios de metrologia do Inmetro, em Xerém, foram escolhidas para as medições e vários conjuntos de medições foram efetuados de forma a possibilitar a validação dos resultados e a estimativa das incertezas. Os locais estão listados na Tabela 6.6 e ilustrados nas Figuras 6.34 a 6.37.

No local 1, os dois métodos de medição foram utilizados e comparados; nos outros locais, utilizou-se apenas o método da função de transferência.

Tabela 6.6 - Ambientes de teste.

Número	Local das medições realizadas
1	Fachada de uma edificação de um pavimento, Figura 6.34.
2	Fachada de uma edificação de um pavimento, Sala 01, Figura 6.35.
3	Fachada de uma edificação de um pavimento, Sala 02, Figura 6.36.
4	Fachada de uma edificação de um pavimento, Sala 00, Figura 6.37.



Figura 6.34 - Vista externa da fachada medida da edificação, local 1.



Figura 6.35 - Vista externa da fachada medida da edificação, local 2.



Figura 6.36 - Vista externa da fachada medida da edificação, local 3.



Figura 6.37 - Vista externa da fachada medida da edificação, local 4.

Nos quatro locais, ruído de tráfego era quase inexistente e, por esse motivo, o isolamento sonoro global da fachada foi medido através do método com alto-falante. A faixa de frequência considerada foi a mesma das medições entre salas, de 100 Hz a 3150 Hz, e os parâmetros de isolamento sonoro medidos foram a diferença padronizada de nível $D_{ls,2m,nT}$ e a diferença normalizada de nível $D_{ls,2m,n}$, expressas pelas equações (2.25) e (2.26), respectivamente.

As medições foram realizadas de acordo com os requisitos da ISO 140-5 [16] e da ISO 18233 [7] e com os mesmos equipamentos das medições de isolamento sonoro entre salas, com exceção da fonte sonora localizada do lado de fora da fachada. O dodecaedro com *subwoofer* foi substituído por uma caixa de som também fabricada no Inmetro com um alto-falante coaxial da marca *Selenium* de 12 polegadas de diâmetro. As condições ambientais foram medidas e se mantiveram constantes durante as medições.

6.7.1 Posições dos microfones e da fonte sonora

As posições dos microfones e da fonte sonora foram escolhidas de acordo com as especificações da norma ISO 140-5 [16]. Para medir as diferenças de nível com os dois métodos, foram usadas cinco posições de microfones distribuídas nas salas receptoras, uma posição de microfone em frente à fachada e uma posição de fonte sonora em frente à fachada, no total de 5 medições, exceto para o local 4 onde 10 posições de microfones foram escolhidas na sala receptora, no total de 10 medições. O microfone localizado em frente à fachada estava a 2 metros do meio da fachada com altura de 1,5 m acima do chão da sala receptora, para cada local de medição.

Para medir o tempo de reverberação das salas receptoras foi usado o dodecaedro com *subwoofer* como fonte sonora, uma posição adicional de microfone e duas posições de fonte dentro da sala, no total de 12 medições.

A Tabela 6.7 lista detalhes das dimensões das salas receptoras e das fachadas e as Figuras 6.38 a 6.41 apresentam os esquemas das salas com o posicionamento dos microfones (M) e das fontes sonoras (F) dentro e fora das edificações para cada fachada.

Tabela 6.7 - Detalhes das dimensões dos ambientes de teste.

Local	$A_{\text{piso sala receptora}}$	pé direito _{sala receptora}	$V_{\text{sala receptora}}$	S_{fachada}
1	25 m ²	2,62 m	64 m ³	13 m ²
2	13 m ²	2,56 m	33 m ³	8 m ²
3	13 m ²	2,56 m	33 m ³	8 m ²
4	49 m ²	2,56 m	126 m ³	21 m ²

No local de medição 1, foram realizadas apenas três medições de isolamento sonoro aéreo das fachadas com o método clássico e, em seguida, partiu-se para as medições com o método da função de transferência. Entretanto, durante a terceira medição de repetitividade, a construção foi solicitada pelo Inmetro para outras atividades e deixou de estar disponível para as medições acústicas. Por isso, não foram completadas as medições de repetitividade.

As poucas medições realizadas no local 1 dificultam a validação dos resultados e um estudo adequado da repetitividade das mesmas [40]; já nos outros locais (2, 3 e 4), foram feitas seis medições completas de isolamento sonoro com o método da função de transferência, em condições de repetitividade, de acordo com a ISO 5725 [40].

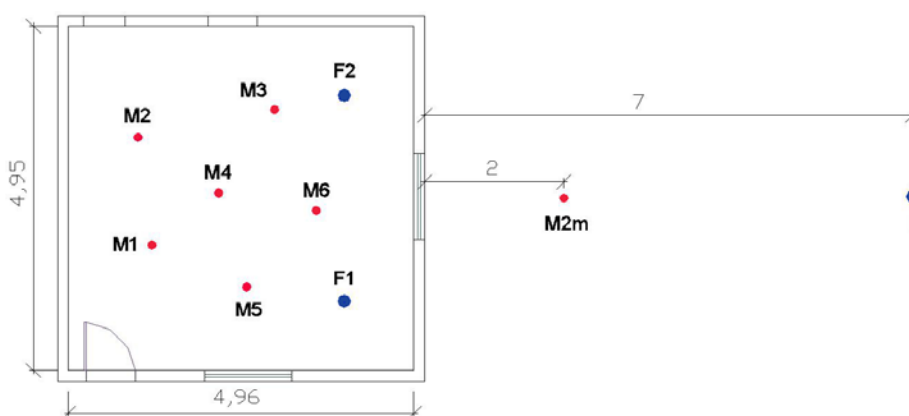


Figura 6.38 - Esquema de posições em medições no local 1, dimensões em metros.

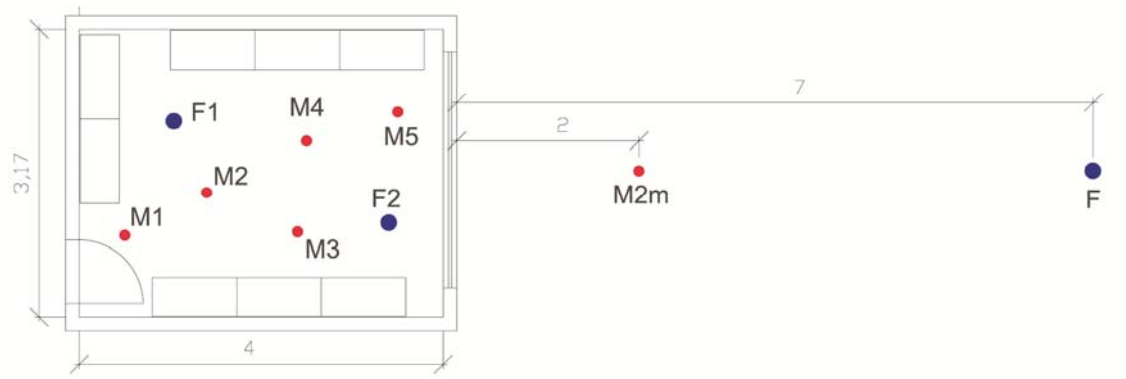


Figura 6.39 - Esquema de posições em medições no local 2, dimensões em metros.

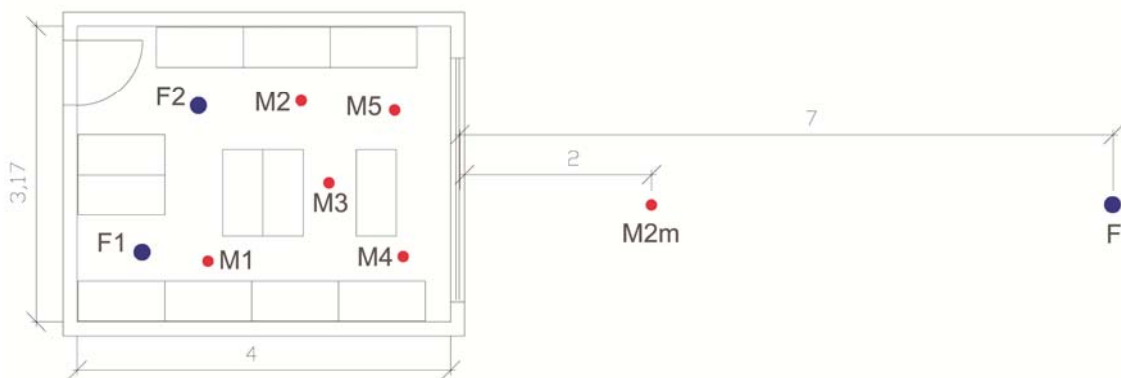


Figura 6.40 - Esquema de posições em medições no local 3, dimensões em metros.

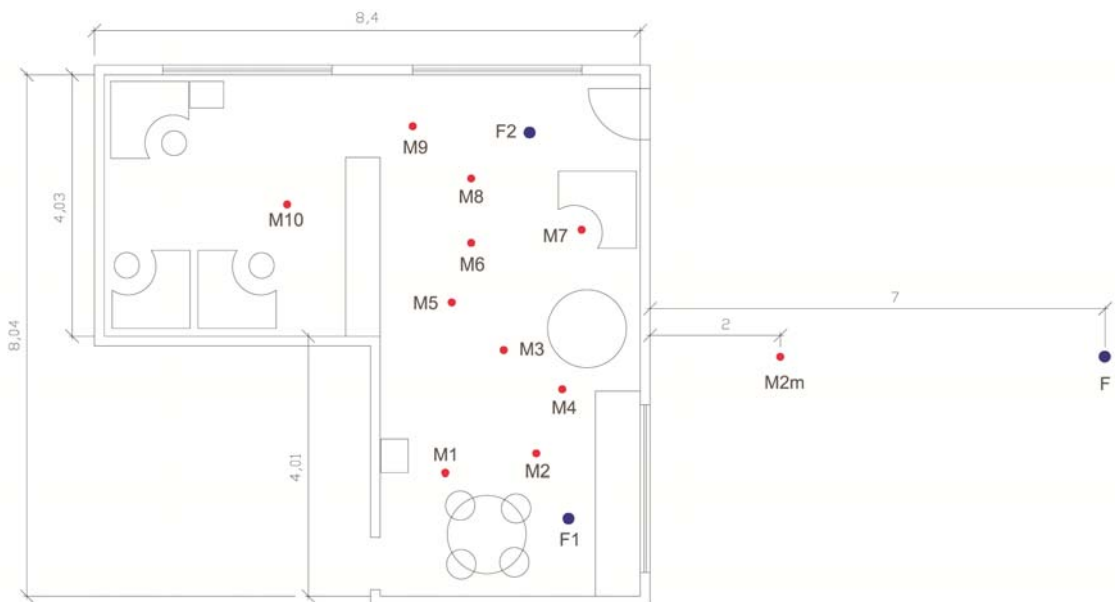


Figura 6.41 - Esquema de posições em medições no local 4, dimensões em metros.

A edificação do local 1 é a mesma das primeiras medições de isolamento sonoro entre salas *in situ* (local 1). A sala receptora nesse caso é a sala emissora das medições de isolamento entre salas e estava vazia durante as medições. A fachada cujo isolamento foi medido é de concreto e contém uma parte de vidro, que não é uma janela.

Os locais 2, 3 e 4 são salas diferentes de uma mesma edificação disponível para as medições. As fachadas são de concreto e cada uma possui uma janela de correr de 2,5 m x 1,2 m. As salas receptoras dos locais 2 e 3 possuem estantes dispostas de maneiras diferentes dentro das salas. No local 2 as estantes estavam encostadas nas paredes e no local 3, dispostas ao longo da sala. A sala receptora do local 4 possui uma maior área de piso e em formato de “L”, por isso foram usadas 10 posições de microfones nesse local, onde havia móveis de escritório (mesas, cadeiras e alguns armários). A fachada do local 4, além da janela, também possui uma porta de madeira e vidro de 0,8 m x 2,1 m.

As Figuras 6.42 a 6.45 mostram as medições de isolamento sonoro das fachadas.



Figura 6.42 - Medição de isolamento sonoro global de fachada com alto-falante, local 1.



Figura 6.43 - Medição de isolamento sonoro global de fachada com alto-falante, local 2.



Figura 6.44 - Medição de isolamento sonoro global de fachada com alto-falante, local 3.



Figura 6.45 - Medição de isolamento sonoro global de fachada com alto-falante, local 4.

Na fachada em teste do local 1, como pode ser visto na Figura 6.42, há um degrau do lado de fora próximo à fachada de 13 cm de altura entre o nível do chão da sala receptora e o nível do chão onde a fonte e o microfone estão localizados. A altura do centro da fachada pelo lado de fora é $h = 2,04$ m, o que, pelo lado de dentro da sala receptora, equivale a uma altura de 1,80 m. Portanto, o nível do chão da sala receptora está 24 cm acima do nível do chão do lado de fora da fachada e para que o microfone estivesse 1,5 m acima do chão da sala receptora, foi posicionado a uma altura de 1,74 m acima do chão do lado de fora da fachada.

Conhecendo o valor da altura do centro da fachada, h , foram escolhidas as distâncias r e d (entre a fonte sonora e o centro da fachada, e entre o alto-falante e a fachada, respectivamente) que atendessem às exigências da ISO 140-5 [16] para medições com o método global e ruído emitido por alto-falante: ($r \geq 7$ m) e ($d \geq 5$ m).

Na fachada do local 1, sendo $h = 2,0$ m, ao supor $r = 7$ m, d deve ser igual ou maior que 6,7 m e esses valores podem ser usados, pois satisfazem à norma ISO 140-5.

Dessa maneira, foram escolhidas as distâncias, $d = 7$ m, $h = 2$ m e $r = 7,3$ m. A fonte sonora foi então posicionada no chão a 7 metros do meio da fachada com ângulo de incidência sonora de aproximadamente 45° .

Os mesmos cuidados foram tomados para os outros três locais de modo que também atendessem às exigências da ISO 140-5.

6.8. Comparação entre o método da função de transferência e o método clássico – isolamento sonoro de fachadas

Os resultados do isolamento sonoro aéreo de fachadas do local de teste 1 obtidos com os dois métodos de medição foram comparados.

Ruído rosa e ruído branco foram usados como sinais de excitação nas medições das diferenças de nível com o método clássico, para posterior comparação entre os dois. A Figura 6.46 apresenta os resultados de $D_{ls,2m}$, a diferença entre o nível de pressão sonora do lado de fora a 2 m da fachada e o nível de pressão sonora médio na sala receptora, expressa pela equação (2.24), para cada banda de frequência, obtida com ruído branco e ruído rosa.

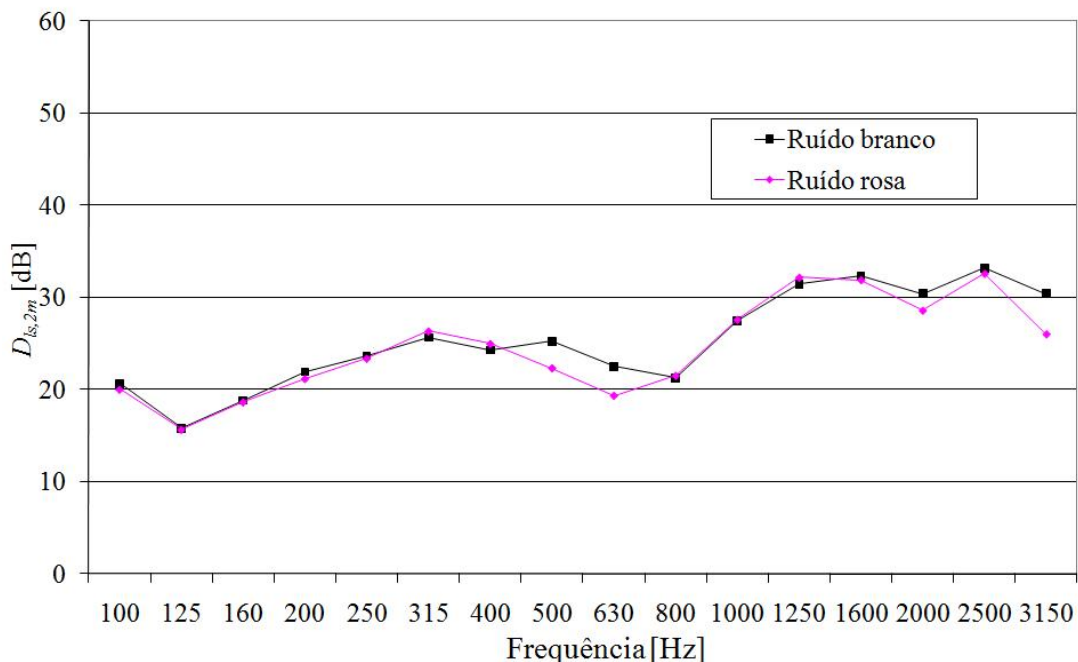


Figura 6.46 - $D_{ls,2m}$ da fachada do local 1 obtida com ruído branco e ruído rosa.

Observa-se uma boa concordância nas baixas frequências, mas nas médias e nas altas, as diferenças chegam a até 4 dB. O ruído de fundo do lado de fora da edificação era aproximadamente 47 dB(A), enquanto que na sala receptora era 31 dB(A). Durante a excitação, os níveis de pressão sonora eram aproximadamente 80 dB(A) do lado de fora e 52 dB(A) na sala receptora.

O sinal de excitação usado nas medições com o método da função de transferência foi uma varredura de senos (*sweep*) e as médias das diferenças de nível $D_{ls,2m}$ obtidas com esse método e com o método clássico são apresentadas para as bandas de terço de oitava na Figura 6.47.

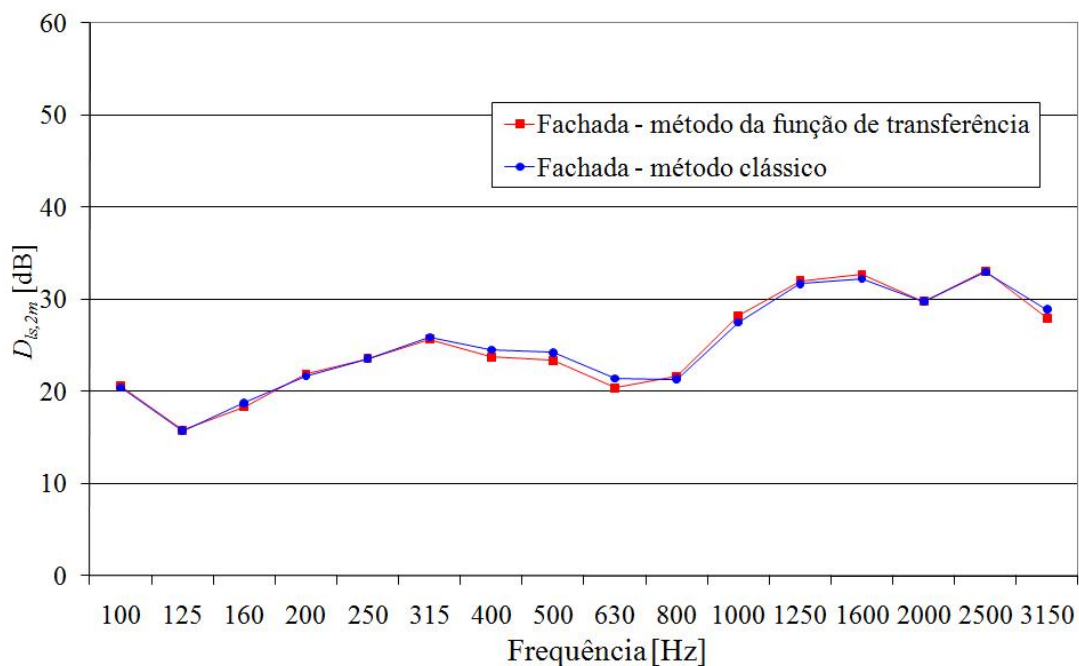


Figura 6.47 - Comparação entre diferenças de nível obtidas pelos métodos no local 1.

Os valores das diferenças de nível $D_{ls,2m}$ obtidas pelos dois métodos são bastante parecidos, como pode ser visto na Figura 6.47, e possuem comportamento semelhante ao das diferenças de níveis medidas D entre salas, mostradas na Figura 6.22, também com uma pequena elevação dos valores obtidos pelo método clássico nas frequências médias.

Os tempos de reverberação da sala receptora foram medidos com o método da função de transferência e a Figura 6.48 mostra o tempo de reverberação médio da sala receptora para as bandas de frequência consideradas.

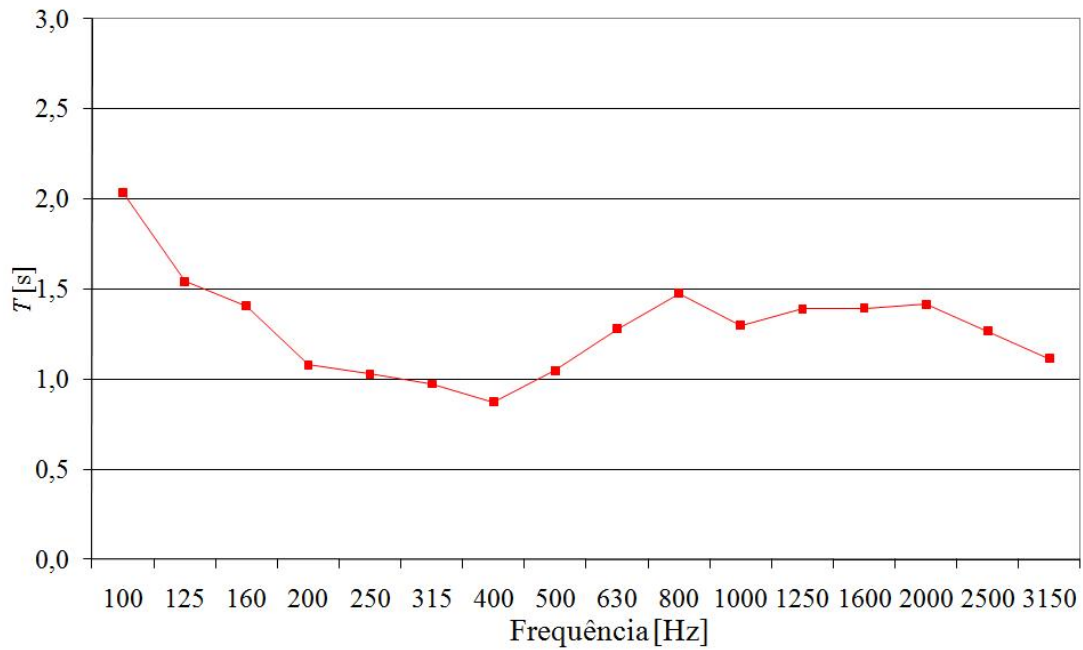


Figura 6.48 - Tempo de reverberação da sala receptora obtido pelo método da função de transferência.

Os parâmetros de isolamento sonoro aéreo de fachadas em campo $D_{ls,2m,n}$ e $D_{ls,2m,nT}$ (diferença normalizada de nível e diferença padronizada de nível), são calculados a partir dos valores de $D_{ls,2m}$ e do tempo de reverberação médio da sala receptora e são mostrados na Figura 6.49 para os dois métodos. Como dependem principalmente de $D_{ls,2m}$, os parâmetros possuem o mesmo comportamento de $D_{ls,2m}$, Figura 6.47.

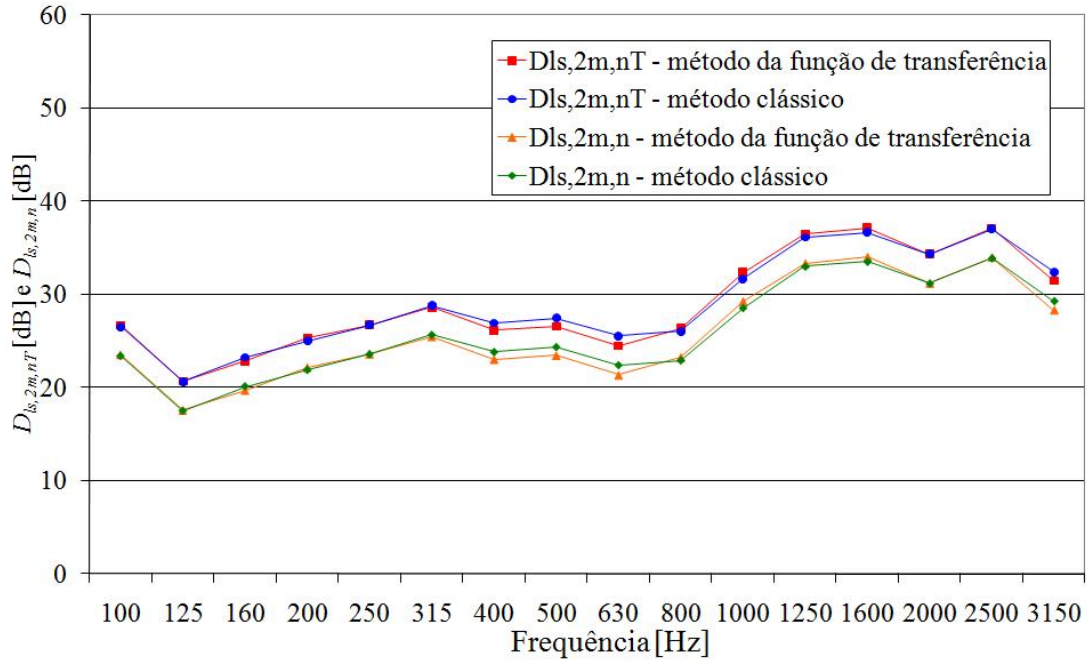


Figura 6.49 - $D_{ls,2m,nT}$ e $D_{ls,2m,n}$ da fachada do local 1 obtidas pelos dois métodos.

Os índices ponderados $D_{ls,2m,n,w}$ e $D_{ls,2m,nT,w}$ (diferença normalizada de nível ponderada e diferença padronizada de nível ponderada) e os coeficientes de adaptação de espectro, determinados de acordo com a ISO 717-1 [9], são apresentados na Tabela 6.8 para os dois métodos.

Tabela 6.8 - Índices ponderados obtidos para o local 1 com os dois métodos.

Método	$D_{ls,2m,n,w}$ [dB]	$D_{ls,2m,nT,w}$ [dB]
Função de transferência	28 (-1; -3)	31 (-1; -3)
Clássico	28 (-1; -2)	31 (-1; -2)

Os valores são iguais para os dois métodos com uma diferença de 1 dB nos coeficientes de adaptação de espectro de ruído de trânsito, C_{tr} . Os valores recomendados pela ABNT NBR 15575-4 [32] para o nível de desempenho acústico mínimo para $D_{2m,nT,w}$ de vedação externa para ensaio em campo são de 25 a 29 dB e para o nível intermediário, de 30 a 34 dB (Tabela 2.7). Nesse caso, a fachada apresenta desempenho acústico considerado intermediário, mas, da mesma maneira que no caso anterior, informações sobre a incerteza das medições são necessárias para que as comparações sejam confiáveis.

6.9. Parâmetros medidos com o método da função de transferência – isolamento sonoro de fachadas

As Figuras 6.50 e 6.51 apresentam, em função da frequência, os valores médios das diferenças de níveis $D_{ls,2m}$ das fachadas e dos tempos de reverberação das salas receptoras medidos com o método da função de transferência nos quatro locais de teste.

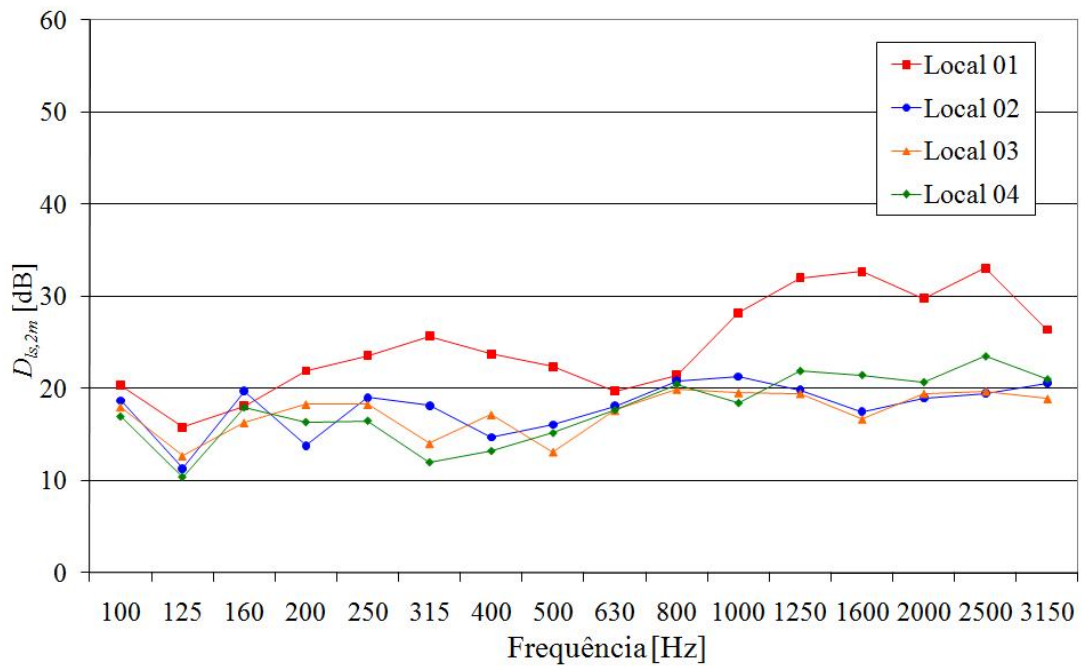


Figura 6.50 - Diferenças de níveis $D_{ls,2m}$ das fachadas nos quatro ambientes de teste.

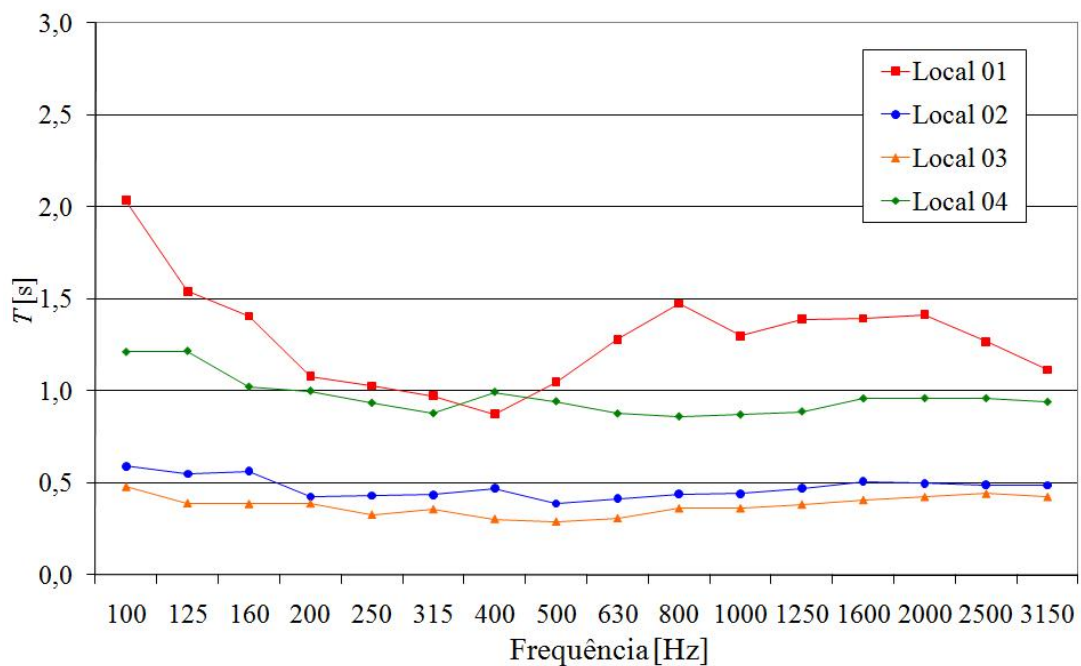


Figura 6.51 - Tempos de reverberação das salas receptoras.

As Figuras 6.52 a 6.54 mostram os parâmetros de isolamento sonoro aéreo de fachadas em campo ($D_{ls,2m,n}$ e $D_{ls,2m,n,T}$) para os locais 2, 3 e 4.

Os valores dos parâmetros ponderados para os quatro locais estão listados na Tabela 6.9.

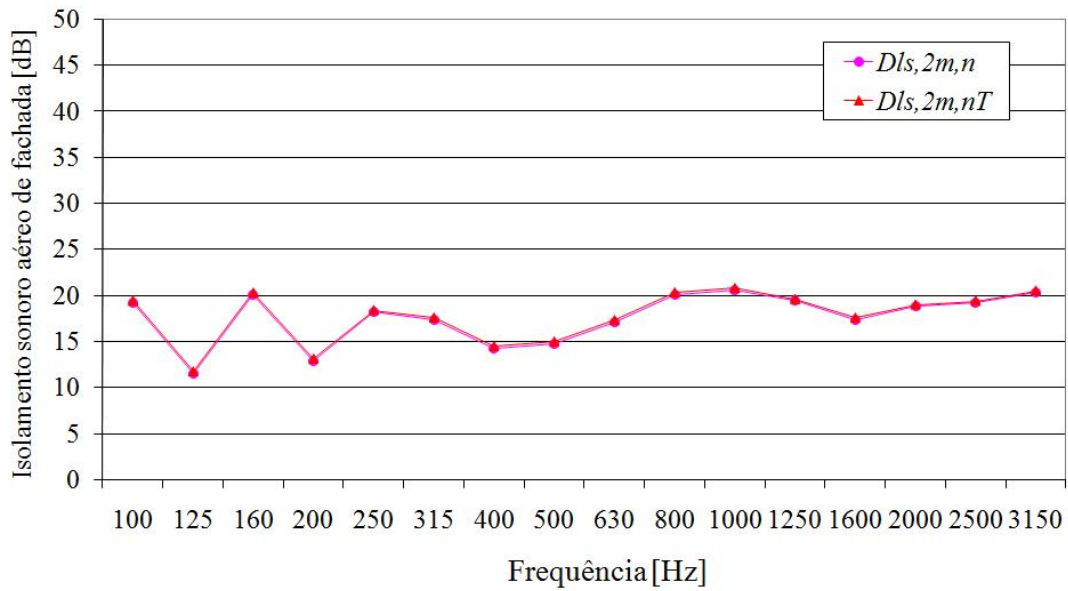


Figura 6.52 - $D_{ls,2m,n}$ e $D_{ls,2m,n,T}$ da fachada do local de teste 2.

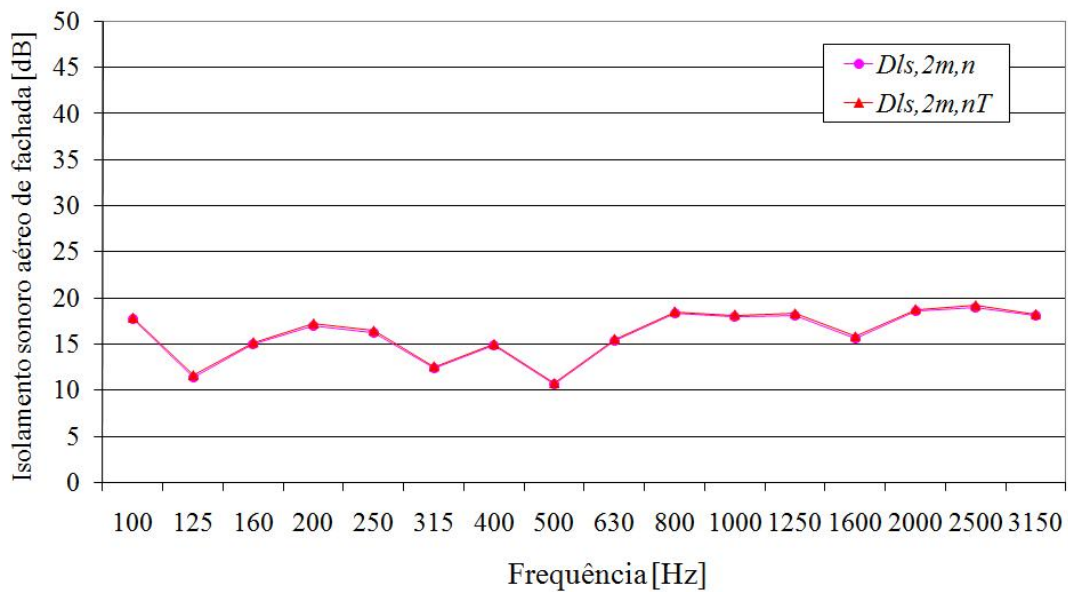


Figura 6.53 - $D_{ls,2m,n}$ e $D_{ls,2m,n,T}$ da fachada do local de teste 3.

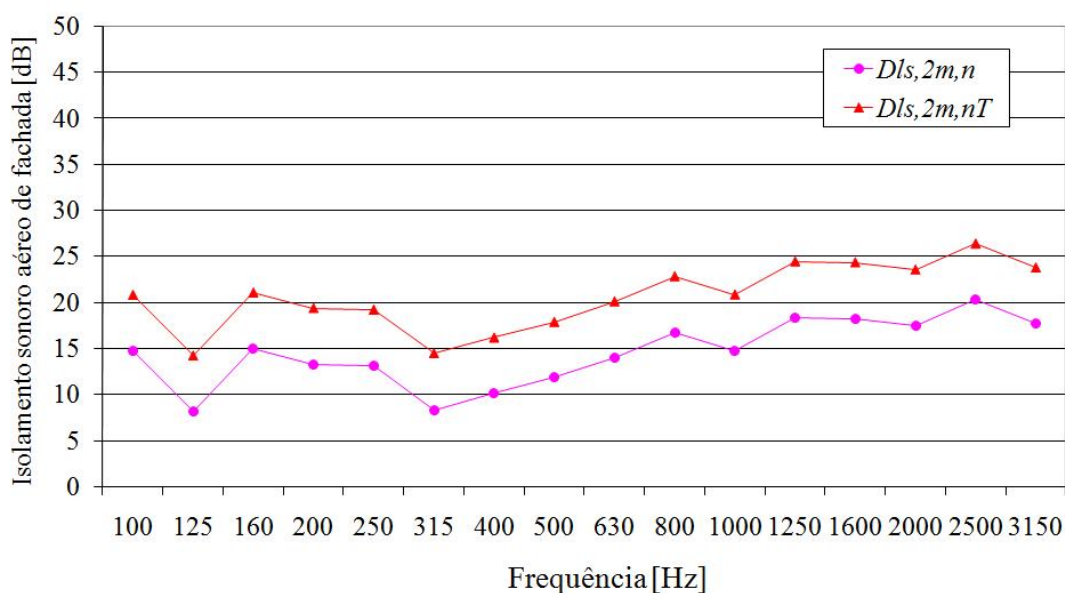


Figura 6.54 - $D_{ls,2m,n}$ e $D_{ls,2m,nT}$ da fachada do local de teste 4.

Tabela 6.9 - Valores ponderados para os quatro ambientes de teste.

Local	$D_{ls,2m,n,w}$ [dB]	$D_{ls,2m,nT,w}$ [dB]
1 - clássico	28 (-1; -2)	31 (-1; -2)
1 - função de transferência	28 (-1; -3)	31 (-1; -3)
2 - função de transferência	18 dB (0; 0)	19 (-1; -1)
3 - função de transferência	17 dB (-1; -1)	17 (0; -1)
4 - função de transferência	16 dB (0; -2)	22 (0; -2)

Diferentemente do local 1, os valores de $D_{ls,2m,nT,w}$ dos locais 2, 3 e 4 não atendem ao nível de desempenho mínimo estabelecido na ABNT NBR 15575-4 [32] para ensaio em campo de vedação externa.

Deve-se lembrar que o resultado de medições com o método global e ruído de alto-falante não pode ser comparado com o de medições em laboratório. Portanto, um projetista ou consultor deve tomar cuidado ao utilizar dados de elementos construtivos obtidos em laboratórios para projetar o isolamento sonoro global, devendo considerar as possíveis diferenças entre medições em laboratório e em campo. A série de normas ISO 15712 [86] aborda como estimar o desempenho acústico de isolamento sonoro aéreo e de impacto em edificações a partir do desempenho dos seus elementos construtivos.

O passo seguinte é aplicar a metodologia proposta para validar os resultados das medições e estimar suas incertezas.

CAPÍTULO 7

ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA ISOLAMENTO SONORO ENTRE SALAS

7.1. Introdução

O mensurando diferença padronizada de nível entre as salas emissora e receptora, D_{nT} , foi escolhido para análise dos resultados e estimativa da incerteza, pois esse é o parâmetro considerado nas normas de desempenho brasileiras para medições em campo de isolamento sonoro aéreo entre ambientes.

Como apenas a incerteza de medição não valida o resultado, antes de estimar as incertezas de medições, através tanto da ‘propagação de incertezas’ como da ‘propagação de distribuições’, foi aplicada a metodologia proposta no Capítulo 4 para verificar a validação de todos os resultados medidos, para cada uma das dezesseis bandas de terço de oitava entre 100 Hz e 3150 Hz, o que torna a análise estatística um pouco trabalhosa.

Para validar os resultados obtidos com o método clássico e avaliar sua incerteza, foram usados os valores das seis medições realizadas sob condições de repetitividade no ambiente de teste 1; e para validar os resultados e avaliar a incerteza do método da função de transferência foram utilizados os valores das seis medições realizadas em condições de repetitividade nos locais 1, 2, 4 e 5 e das cinco medições no local 3. O Apêndice J apresenta os valores obtidos de D_{nT} .

Também foi verificada a “precisão” das medições de acordo com a parte 2 da norma ISO 140 [13], discutida no Capítulo 5. Embora a ISO 140-2 tenha sido elaborada a partir de medições de testes de comparação realizadas em laboratório, os valores de repetitividade r para o índice de redução sonora aéreo aparente R' (medido em campo) são considerados similares aos do índice de redução sonora aéreo R (medido em laboratório). Portanto, apesar das medições terem sido realizadas em campo, é possível uma comparação com os valores da norma. Nesse caso, como a ISO 140-2 se refere ao parâmetro R' , esse foi o parâmetro considerado, e não D_{nT} .

7.2. Estudo da distribuição dos conjuntos de repetições de medições

Seguindo a metodologia descrita no item 4.3, para amostras de tamanho pequeno, foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk a cada conjunto de medições, com a comparação entre $W_{calculado}$ e seus respectivos valores críticos, $W_{tabelado}$, para uma probabilidade de 95%, conforme a tabela do Apêndice C. Todos os valores $W_{calculado}$ na faixa de frequência considerada foram maiores do que os valores $W_{tabelado}$, condição para a normalidade. Pode-se, então, considerar que as medições de D_{nT} seguem uma distribuição normal.

7.3. Aplicação de critérios de rejeição

Os critérios de rejeição descritos no Capítulo 4 foram aplicados aos valores medidos de D_{nT} . Como o critério de Grubbs é atualmente o recomendado em metrologia conforme a ISO 5725 [40] e também é o mais severo, conclui-se que esse pode ser aplicado a futuras medições realizadas.

A Tabela 7.1 lista o número de valores rejeitados pelo critério de Grubbs para cada conjunto de medições nos locais de teste, informando qual é a banda de frequência e o número da medição do valor rejeitado. Com a rejeição dos valores considerados dispersos, o desvio-padrão das medições diminuiu, assim como a sua incerteza.

Tabela 7.1 - Número de valores de D_{nT} rejeitados.

Local de medição	Método de medição	Número de valores rejeitados
1	função de transferência	1 (medição 01 - 100 Hz)
1	clássico	1 (medição 01 - 400 Hz)
2	função de transferência	0
3	função de transferência	0
4	função de transferência	0
5	função de transferência	1 (medição 01 - 125 Hz)

7.4. Compatibilidade entre os desvios-padrão de cada conjunto de repetições

A análise da homogeneidade entre as variâncias das D_{nT} medidas foi realizada através do teste estatístico de Fisher, descrito no item 4.5, combinando-se as medições.

Inicialmente o teste foi aplicado entre as duas primeiras medições e a terceira, depois entre as três primeiras medições e a quarta, seguidas pelas quatro primeiras medições e a quinta e por último entre as cinco primeiras medições e a sexta, com exceção do último conjunto para as medições no local 3. Todos os desvios-padrão em todas as bandas de frequência atenderam à condição necessária para a homogeneidade ($F_{calculado} \leq F_{tabelado}$) para uma probabilidade de 95%. Portanto, a análise estatística evidenciou que as variâncias de cada conjunto de repetições de medições são homogêneas entre si para essa probabilidade.

Foram então calculados os desvios-padrão combinados das medições, s_p , de acordo com a equação (4.11), para as combinações de todas as medições em cada um dos cinco ambientes de testes, apresentados na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 - Valores obtidos para s_p de D_{nT} para os cinco locais ensaiados.

Frequência [Hz]	Local 1		Local 2	Local 3	Local 4	Local 5
	s_{p1} [dB] função de transferência	s_{p1} [dB] clássico	s_{p2} [dB]	s_{p3} [dB]	s_{p4} [dB]	s_{p5} [dB]
100	1,14	0,18	0,85	0,38	0,38	0,48
125	0,79	0,46	0,20	0,24	0,89	0,45
160	0,97	0,48	0,34	0,17	0,63	0,48
200	0,44	0,41	0,70	0,12	0,64	0,32
250	0,53	0,56	0,42	0,27	0,38	0,49
315	0,85	0,59	0,66	0,12	0,28	0,48
400	0,31	1,43	0,33	0,10	0,54	0,41
500	0,45	0,90	0,23	0,26	0,33	0,63
630	0,86	0,77	0,35	0,28	0,23	0,11
800	0,34	0,69	0,38	0,17	0,35	0,31
1000	0,76	0,63	0,15	0,09	0,50	0,14
1250	0,54	0,51	0,57	0,18	0,32	0,41
1600	0,55	1,17	0,26	0,18	0,31	0,28
2000	0,75	1,70	0,23	0,13	0,15	0,41
2500	1,22	1,61	0,28	0,29	0,16	0,53
3150	1,09	1,03	0,42	0,19	0,24	0,34

A Figura 7.1 apresenta os desvios-padrão combinados dos cinco locais para as combinações das medições realizadas, na banda de terço de oitava de frequência centrada em 500 Hz. A combinação 1 equivale ao conjunto “medição 01 + medição 02 + medição 03”, a combinação 2, ao conjunto “medição 01 + medição 02 + medição 03 + medição 04”, e assim por diante.

Pode-se observar que os valores estabilizam com a adição de novas medições, confirmando a homogeneidade entre os desvios-padrão. Em 500 Hz, o desvio-padrão

combinado obtido com o método da função de transferência no local 1 é cerca de 0,4 dB, enquanto que, com o método clássico, é de quase 1 dB. A diferença entre esses valores contribuirá para a diferença entre as incertezas obtidas para cada método.

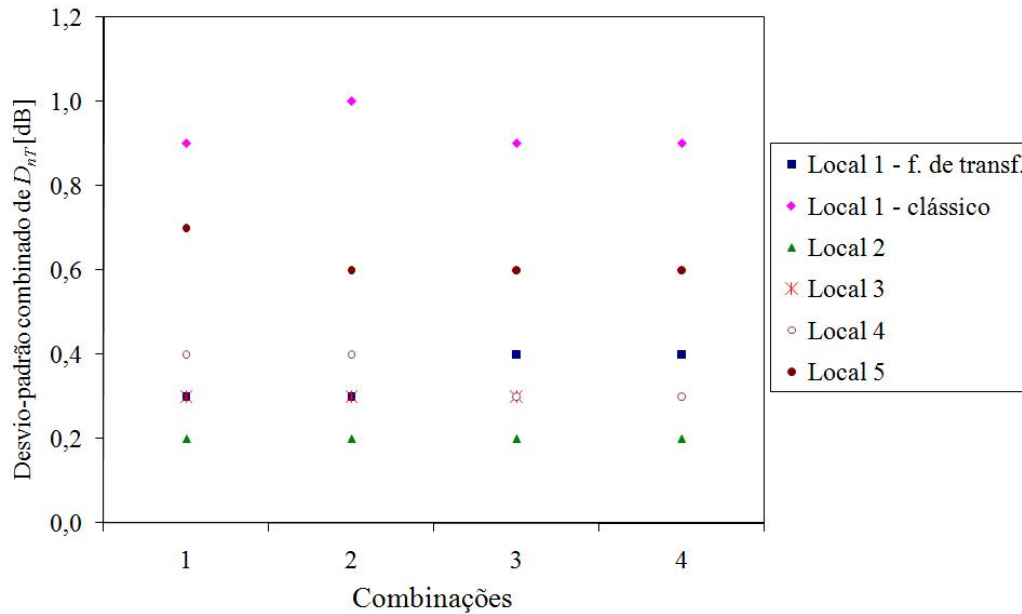


Figura 7.1 - Desvios-padrão combinados s_p de D_{nT} na banda de 1/3 de oitava de 500 Hz.

7.5. Estudo da compatibilidade entre as médias de cada conjunto de repetições

A última etapa da validação dos resultados é o teste de homogeneidade entre as médias de cada conjunto de repetições de medições. Aplicando-se a metodologia descrita no item 4.6 para combinações de medições, pode-se constatar a homogeneidade entre as médias das medições de D_{nT} para os seis conjuntos de medições com uma probabilidade de 95%. A Figura 7.2 mostra as médias para as combinações das medições dos cinco locais de testes na banda de terço de oitava centrada em 500 Hz. Diferentemente da análise da homogeneidade entre as variâncias, nesse caso a combinação 1 equivale a “medição 01 + medição 02”, a combinação 2 a “medição 01 + medição 02 + medição 03”, e assim por diante.

Verifica-se que os valores se mantêm constantes com a adição de novas medições e pode-se concluir que as médias estão sob controle. Observa-se também que, na banda de frequência central de 500 Hz, os valores de D_{nT} obtidos para o local 1 com os dois métodos são os maiores valores entre os cinco ambientes de testes com uma diferença

de cerca de 1 dB entre eles. O local 2 possui o menor valor de D_{nT} e os locais 3, 4 e 5 possuem valores intermediários entre 20 dB e 30 dB.

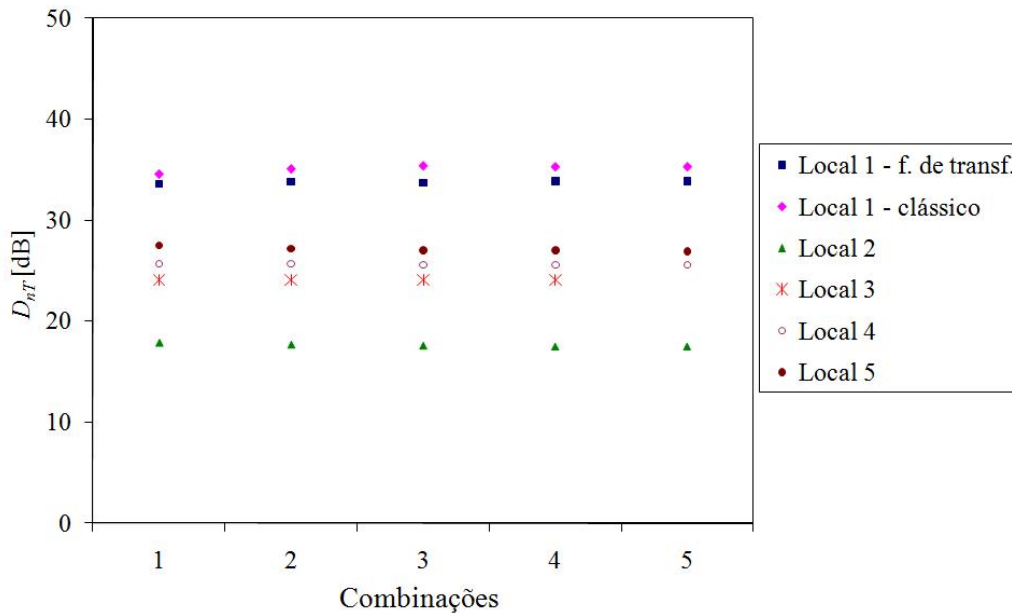


Figura 7.2 - Médias combinadas de D_{nT} na banda de 1/3 de oitava de 500 Hz.

7.6. Obtenção da precisão segundo a ISO 140-2

Antes de estimar a incerteza das medições, optou-se por verificar a precisão conforme descrito na ISO 140-2 [13] e apresentado no Capítulo 5. Mesmo sem ter participado de um teste interlaboratorial para determinar os valores de repetitividade, é possível verificar se o procedimento de medição do presente trabalho está adequado. Supondo-se que as medições tenham sido feitas com elementos de separação similares àqueles dos testes interlaboratoriais descritos na norma, pode-se verificar a condição $s_x \leq mr$, onde s_x é o desvio-padrão das medições no laboratório x , m é o fator obtido da Tabela 5.2 em função do número de medições n e r é o valor de repetitividade determinado no teste interlaboratorial, extraído da Tabela 5.1.

A Tabela 7.3 apresenta, para as bandas de frequência consideradas: na segunda coluna, os valores de repetitividade r da ISO 140-2 [13]; na terceira e na quarta colunas, esses valores multiplicados pelo fator m para cinco e seis medições, 0,72 e 0,68, respectivamente; e nas colunas seguintes, os valores dos desvios-padrão s_x de R' para os cinco ambientes ensaiados. Esses valores são mostrados na Figura 7.3, junto com os valores limites mr para cinco e seis medições.

Tabela 7.3 - Valores de r , mr (para $n = 5$ e $n = 6$) e $s_x(R')$ para os cinco locais, em dB.

Frequência [Hz]	r para R medições em laboratório (ISO 140-3)	mr ($n=5$)	mr ($n=6$)	Local 1		Local 2	Local 3	Local 4	Local 5
				$s_1(R')$ função de transferência	$s_1(R')$ clássico	$s_2(R')$	$s_3(R')$	$s_4(R')$	$s_5(R')$
100	4,5	3,2	3,1	0,96	0,18	0,92	0,41	0,36	0,43
125	4,0	2,9	2,7	0,75	0,49	0,27	0,25	0,83	0,36
160	3,5	2,5	2,4	1,11	0,44	0,31	0,16	0,56	0,45
200	3,5	2,5	2,4	0,57	0,50	0,66	0,14	0,70	0,45
250	2,5	1,8	1,7	0,57	0,62	0,36	0,31	0,35	0,40
315	2,5	1,8	1,7	0,72	0,63	0,68	0,11	0,28	0,44
400	2,0	1,4	1,4	0,29	1,27	0,31	0,11	0,50	0,45
500	2,0	1,4	1,4	0,48	0,81	0,27	0,22	0,31	0,55
630	1,5	1,1	1,0	0,82	0,71	0,32	0,25	0,26	0,19
800	1,5	1,1	1,0	0,35	0,66	0,35	0,20	0,29	0,25
1000	1,5	1,1	1,0	0,92	0,64	0,15	0,09	0,46	0,43
1250	1,5	1,1	1,0	0,58	0,49	0,58	0,18	0,31	0,82
1600	1,5	1,1	1,0	0,52	1,26	0,26	0,17	0,25	0,29
2000	1,5	1,1	1,0	0,68	1,75	0,27	0,16	0,17	0,38
2500	1,5	1,1	1,0	1,10	1,72	0,35	0,38	0,19	0,51
3150	1,5	1,1	1,0	1,00	1,28	0,51	0,21	0,25	0,40

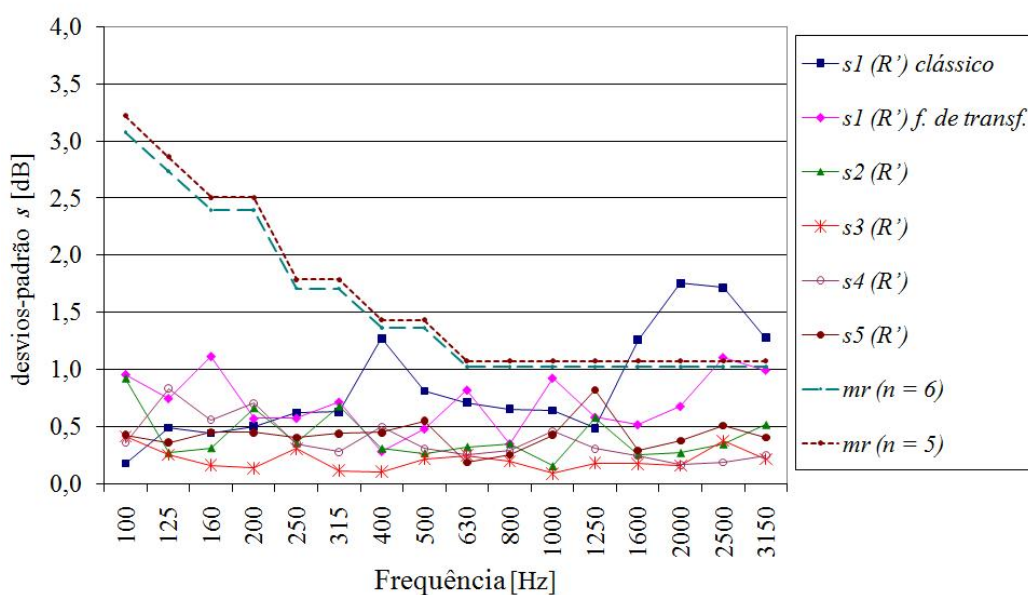


Figura 7.3 - Desvios-padrão de $s_x(R')$ para os cinco locais e os valores limites mr .

A partir da Tabela 7.3 e da Figura 7.3, pode-se concluir que os valores de repetitividade obtidos nas medições realizadas são satisfatórios de acordo com a ISO 140-2 [13], pois, excetuando-se os valores em negrito na tabela (para o método clássico nas frequências mais altas), a condição $s_x \leq mr$ é satisfeita. Entretanto, deve-se notar que os elementos de separação são diferentes dos considerados na norma. Os

valores de reprodutibilidade não foram verificados, pois dependem de resultados de testes interlaboratoriais.

7.7. Estimativa da incerteza de medição de D_{nT} segundo o GUM

7.7.1 Definição do mensurando

O mensurando escolhido para a estimativa da incerteza foi a diferença padronizada de nível, D_{nT} , obtida a partir das grandezas de entrada, através do modelo de medição cuja função para o método clássico é expressa para cada banda de frequência por:

$$D_{nT}|_{\text{clássico}} = L_E - L_R + 10 \log \left(\frac{T}{T_0} \right), \quad (7.1)$$

onde L_E , L_R , T e T_0 são as grandezas de entrada, sendo T_0 uma constante igual a 0,5 s.

Para o método da função de transferência, as grandezas de entrada são H_E , H_R , T e T_0 , e a equação é escrita, para cada banda de frequência, como:

$$D_{nT}|_{\text{função de transferência}} = H_E - H_R + 10 \log \left(\frac{T}{T_0} \right). \quad (7.2)$$

Caso necessário, as grandezas de entrada podem ser definidas por outras equações que contenham novas grandezas e fontes de incerteza que influenciem no mensurando.

7.7.2 Elaboração do diagrama causa-efeito

O diagrama causa-efeito para as estimativas da incerteza de medição de D_{nT} é ilustrado na Figura 7.4, para os dois métodos, considerando as condições ambientais, as grandezas de entrada e suas fontes de incerteza (relativas às repetições realizadas, ao arredondamento do equipamento e ao conjunto de medição utilizado).

Segundo COUTO [39], também devem ser consideradas as fontes de incerteza relativas à reprodutibilidade do laboratório no método de medição avaliado, entretanto esses dados não são conhecidos e não foram incluídos.

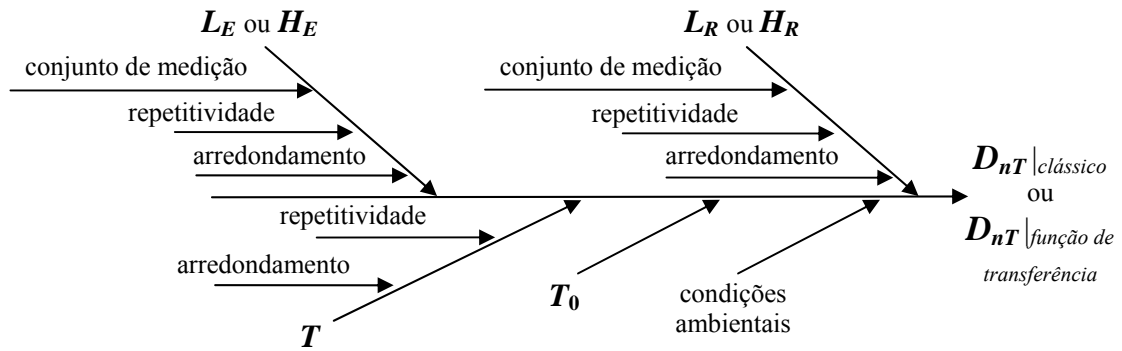


Figura 7.4 - Diagrama causa-efeito do mensurando D_{nT} para os dois métodos.

7.7.3 Estimativas das incertezas-padrão das grandezas de entrada

Nessa etapa, foram avaliadas as incertezas-padrão das fontes de entrada para cada uma das 16 bandas de terço de oitava consideradas. Os valores apresentados a seguir são relativos às medições realizadas no local de teste 1. Ao longo do texto, serão apresentados os valores para os outros quatro ambientes de teste.

7.7.3.1 Incerteza referente às grandezas de entrada L_E e L_R e H_E e H_R

As estimativas de incerteza referentes às grandezas de entrada níveis de pressão sonora médios, L_E e L_R , e funções de transferência acústica médias, H_E e H_R , seguiram o mesmo procedimento descrito abaixo, onde os subscritos E e R , relativos a sala emissora e sala receptora, não aparecem. Foram consideradas três fontes de incerteza para cada grandeza de entrada, como ilustrado no diagrama causa-efeito da Figura 7.4.

Pode-se expressar a grandeza L por:

$$L(f) = L_{med}(f) + \delta L_{cj. med}(f) + \delta L_{arred}(f), \quad (7.3)$$

onde $L_{med}(f)$ é o nível de pressão sonora médio obtido pelo conjunto de medições, $\delta L_{cj. med}(f)$ é a contribuição da incerteza de L devida ao conjunto de medição e $\delta L_{arred}(f)$ é a contribuição da incerteza de L devida ao arredondamento do equipamento.

Da mesma maneira, a grandeza H pode ser expressa por:

$$H(f) = H_{med}(f) + \delta H_{cj. med}(f) + \delta H_{arred}(f), \quad (7.4)$$

onde $H_{med}(f)$ é a função de transferência acústica média obtida pelo conjunto de medições, $\delta H_{cj. med}(f)$ é a contribuição da incerteza de H devida ao conjunto de medição e $\delta H_{arred}(f)$ é a contribuição da incerteza de H devida ao arredondamento do equipamento.

As grandezas $\delta L_{cj. med}(f)$ e $\delta L_{arred}(f)$ possuem valor nulo, mas suas incertezas associadas, $u(\delta L_{cj. med}(f))$ e $u(\delta L_{arred}(f))$, podem não ser nulas. O mesmo ocorre para as grandezas do método da função de transferência: $\delta H_{cj. med}(f) = \delta H_{arred}(f) = 0$, mas $u(\delta H_{cj. med}(f))$ e $u(\delta H_{arred}(f))$ podem não ser nulas.

Considerando as grandezas não-correlacionadas, as incertezas-padrão combinadas das incertezas de L e H são obtidas pela “lei de propagação da incerteza” pelas equações (7.5) e (7.6), para os métodos clássico e da função de transferência, respectivamente,

$$u_c(L(f)) = \sqrt{u(L_{med}(f))^2 + u(\delta L_{cj. med}(f))^2 + u(\delta L_{arred}(f))^2}, \quad (7.5)$$

$$u_c(H(f)) = \sqrt{u(H_{med}(f))^2 + u(\delta H_{cj. med}(f))^2 + u(\delta H_{arred}(f))^2}. \quad (7.6)$$

1) Incerteza relativa ao conjunto de repetições:

A avaliação da incerteza-padrão relativa ao conjunto de repetições é do Tipo A, e como os dados foram tratados estatisticamente, a incerteza-padrão é definida pelo desvio-padrão experimental da média, utilizando o desvio-padrão combinado s_p obtido após os testes estatísticos, dado pela equação (4.18).

A Tabela 7.4 apresenta os valores das incertezas-padrão relativas à repetitividade para as bandas de terço de oitava de 100 Hz a 3150 Hz para os dois métodos.

Para a banda de terço de oitava centrada em 500 Hz, por exemplo, as incertezas relativas à repetitividade obtidas para L_E e L_R com o método clássico e para H_E e H_R com o método da função de transferência são, respectivamente:

$$u(L_{E_{med}}(500 \text{ Hz})) = \frac{s_p(L_{E_{med}})}{\sqrt{n}} = \frac{2,14}{\sqrt{6}} = 0,88 \text{ dB}, \quad u(L_{R_{med}}(500 \text{ Hz})) = \frac{2,43}{\sqrt{6}} = 0,99 \text{ dB},$$

$$u(H_{E_{med}}(500 \text{ Hz})) = \frac{s_p(H_{E_{med}})}{\sqrt{n}} = \frac{0,3}{\sqrt{6}} = 0,12 \text{ dB}, \quad \text{e} \quad u(H_{R_{med}}(500 \text{ Hz})) = \frac{0,23}{\sqrt{6}} = 0,09 \text{ dB}.$$

Tabela 7.4 - Incertezas-padrão de L_E , L_R , H_E e H_R relativas à repetitividade.

Frequência [Hz]	Método clássico		Método da função de transferência	
	$u(L_{E_{med}})$ [dB]	$u(L_{R_{med}})$ [dB]	$u(H_{E_{med}})$ [dB]	$u(H_{R_{med}})$ [dB]
100	0,89	0,83	0,09	0,40
125	1,02	1,08	0,41	0,53
160	0,98	0,96	0,23	0,33
200	1,34	1,45	0,11	0,22
250	1,02	1,25	0,10	0,06
315	0,85	0,86	0,10	0,22
400	0,77	0,85	0,12	0,14
500	0,88	0,99	0,12	0,09
630	0,88	0,97	0,13	0,20
800	0,96	0,78	0,10	0,09
1000	0,93	0,86	0,22	0,10
1250	1,12	1,12	0,08	0,15
1600	1,18	1,16	0,09	0,28
2000	1,28	1,40	0,14	0,26
2500	1,35	1,48	0,09	0,34
3150	1,46	1,51	0,07	0,33

2) Incerteza relativa ao conjunto de medição:

Considerando contribuições conhecidas da instrumentação usada, como a resposta não-plana do microfone (correção do microfone), a não-linearidade do analisador sonoro na faixa de frequência considerada e a calibração do analisador, a avaliação da incerteza relativa ao conjunto de medição é do Tipo B, assumindo-se uma distribuição retangular num intervalo de $\pm 0,5$ dB em toda a faixa de frequência para os dois métodos. A incerteza-padrão nesse caso é dada por:

$$u(\delta L_{cj. med}) = u(\delta H_{cj. med}) = \frac{0,5}{\sqrt{3}} = 0,29 \text{ dB.} \quad (7.7)$$

Para o método clássico, a incerteza relativa ao medidor de nível de pressão sonora (analisador) é conhecida e equivale à incerteza obtida a partir da incerteza expandida declarada no certificado de calibração do medidor utilizado na medição, o analisador *Norsonic* RTA 840, onde $U_{certific.} = 0,2$ dB e $k = 2$. Portanto, a incerteza-padrão relativa ao medidor de nível sonoro é definida por $u(L_{anal.}) = U_{certific.}/k = 0,1$ dB. Entretanto, foi considerado que essa contribuição da incerteza já está incluída no valor de 0,29 dB fornecido pela equação (7.7), relativa ao conjunto de medição completo.

3) Incerteza relativa ao arredondamento do equipamento:

Considerando um arredondamento de 0,1 dB para toda a faixa de frequência, a avaliação da incerteza relativa à resolução estipulada do equipamento será do Tipo B para uma distribuição retangular, e a incerteza-padrão será igual para os dois métodos:

$$u(\delta L_{arred}) = u(\delta H_{arred}) = \frac{0,1/2}{\sqrt{3}} = 0,029 \text{ dB.} \quad (7.8)$$

4) Combinando as incertezas-padrão:

Pode-se então incluir os valores acima nas equações (7.5) e (7.6) para o cálculo da estimativa da incerteza-padrão combinada de L e H :

$$u_c(L(f)) = \sqrt{\left(\frac{s_p(L(f))}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(\frac{0,5}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0,1/2}{\sqrt{3}}\right)^2}, \quad (7.9)$$

$$u_c(H(f)) = \sqrt{\left(\frac{s_p(H(f))}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(\frac{0,5}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0,1/2}{\sqrt{3}}\right)^2}. \quad (7.10)$$

A Tabela 7.5 apresenta os valores obtidos para $u_c(L_E)$, $u_c(L_R)$, $u_c(H_E)$ e $u_c(H_R)$ em função da frequência para os dois métodos.

Tabela 7.5 - Incertezas-padrão combinadas de L_E , L_R , H_E e H_R .

Frequência [Hz]	Método clássico		Método da função de transferência	
	$u_c(L_E)$ [dB]	$u_c(L_R)$ [dB]	$u_c(H_E)$ [dB]	$u_c(H_R)$ [dB]
100	0,94	0,88	0,30	0,50
125	1,06	1,12	0,51	0,61
160	1,02	1,00	0,37	0,44
200	1,37	1,48	0,31	0,37
250	1,06	1,28	0,31	0,30
315	0,90	0,91	0,31	0,36
400	0,83	0,90	0,31	0,32
500	0,92	1,04	0,31	0,30
630	0,92	1,01	0,32	0,35
800	1,01	0,84	0,31	0,30
1000	0,97	0,91	0,36	0,31
1250	1,16	1,16	0,30	0,33
1600	1,22	1,19	0,30	0,40
2000	1,32	1,43	0,32	0,39
2500	1,38	1,51	0,30	0,45
3150	1,49	1,53	0,30	0,44

7.7.3.2 Incerteza referente ao tempo de reverberação na sala receptora T

Para o tempo de reverberação foram consideradas duas fontes de incerteza para os dois métodos, como ilustrado na Figura 7.4.

A incerteza-padrão combinada das incertezas de T será expressa por:

$$u_c(T(f)) = \sqrt{u(T_{med}(f))^2 + u(\delta T_{arred}(f))^2} . \quad (7.11)$$

1) Incerteza relativa ao conjunto de repetições:

A avaliação da incerteza relativa ao conjunto de medição é do Tipo A. Com os dados tratados estatisticamente, a incerteza-padrão é definida pelo desvio-padrão experimental da média:

$$u(T_{med}(f)) = \frac{s_p(T(f))}{\sqrt{n}} . \quad (7.12)$$

A Tabela 7.6 apresenta os valores obtidos para as incertezas relativas à repetitividade, $u(T_{med})$, em função da frequência para os dois métodos.

Tabela 7.6 - Incertezas-padrão de T relativas à repetitividade para os dois métodos.

Frequência [Hz]	$u(T_{med}) _{clássico}$ [s]	$u(T_{med}) _{função\ de\ transferência}$ [s]
100	0,024	0,020
125	0,041	0,025
160	0,049	0,039
200	0,030	0,029
250	0,031	0,023
315	0,025	0,024
400	0,039	0,027
500	0,033	0,034
630	0,030	0,027
800	0,017	0,031
1000	0,032	0,036
1250	0,078	0,067
1600	0,023	0,012
2000	0,035	0,021
2500	0,047	0,014
3150	0,026	0,008

Para a banda de terço de oitava de 500 Hz, por exemplo:

$$u(T_{med}(500\text{ Hz}))|_{clássico} = \frac{0,080}{\sqrt{6}} = 0,033\text{ s},$$

$$u(T_{med}(500 \text{ Hz}))\Big|_{\text{função de transferência}} = \frac{0,083}{\sqrt{6}} = 0,034 \text{ s.}$$

2) Incerteza relativa ao arredondamento do equipamento:

Assumindo-se uma distribuição retangular para o arredondamento de 0,1 s na faixa de frequência considerada, a avaliação será do Tipo B com incerteza-padrão:

$$u(\delta T_{arred}) = \frac{0,1/2}{\sqrt{3}} = 0,029 \text{ s.} \quad (7.13)$$

A equação (7.11) para o cálculo da incerteza-padrão combinada relativa às incertezas do tempo de reverberação será:

$$u_c(T(f)) = \sqrt{\left(\frac{s_p(T(f))}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(\frac{0,1/2}{\sqrt{3}}\right)^2}. \quad (7.14)$$

A Tabela 7.7 apresenta os valores obtidos para $u_c(T)$ em função da frequência em bandas de terço de oitava para os dois métodos.

Tabela 7.7 - Incertezas-padrão combinadas de T para os dois métodos.

Frequência [Hz]	$u_c(T)\Big _{\text{clássico}}$ [s]	$u_c(T)\Big _{\text{função de transferência}}$ [s]
100	0,038	0,035
125	0,050	0,038
160	0,057	0,049
200	0,041	0,041
250	0,042	0,037
315	0,038	0,037
400	0,048	0,039
500	0,044	0,044
630	0,042	0,040
800	0,034	0,043
1000	0,043	0,046
1250	0,083	0,073
1600	0,037	0,031
2000	0,046	0,035
2500	0,055	0,032
3150	0,039	0,030

7.7.3.3 Incerteza referente às condições ambientais

Condições ambientais como temperatura, umidade relativa do ar e pressão atmosférica podem influenciar nas medições, mas suas contribuições para a estimativa das incertezas de medição são muito pequenas e não foram consideradas no presente trabalho.

7.7.4 Cálculo dos coeficientes de sensibilidade

A Tabela 7.8 apresenta os coeficientes de sensibilidade do mensurando D_{nT} em relação às grandezas de entrada para os dois métodos de medição utilizados.

Tabela 7.8 - Coeficientes de sensibilidade para os métodos utilizados.

Método clássico		Método da função de transferência	
grandezas de entrada	coeficientes de sensibilidade	grandezas de entrada	coeficientes de sensibilidade
L_E	$\frac{\partial D_{nT}}{\partial L_E} = 1$	H_E	$\frac{\partial D_{nT}}{\partial H_E} = 1$
L_R	$\frac{\partial D_{nT}}{\partial L_R} = -1$	H_R	$\frac{\partial D_{nT}}{\partial H_R} = -1$
T	$\frac{\partial D_{nT}}{\partial T} = \frac{10 \log(e)}{T} = \frac{4,34}{T}$	T	$\frac{\partial D_{nT}}{\partial T} = \frac{10 \log(e)}{T} = \frac{4,34}{T}$

7.7.5 Determinação dos componentes de incerteza

Os componentes de incerteza das grandezas de entrada, mostrados na Tabela 7.9, são obtidos multiplicando-se os coeficientes de sensibilidade das grandezas de entrada pelas respectivas estimativas das incertezas-padrão. Esses componentes possuem a mesma unidade do mensurando e, por isso, são úteis para avaliar o impacto da incerteza de cada grandeza de entrada na incerteza combinada do mensurando.

Tabela 7.9 - Componentes de incerteza para os métodos utilizados.

Método clássico		Método da função de transferência	
grandezas de entrada	componentes de incerteza	grandezas de entrada	componentes de incerteza
L_E	$\frac{\partial D_{nT}}{\partial L_E} \cdot u(L_E) = 1 \cdot u(L_E)$	H_E	$\frac{\partial D_{nT}}{\partial H_E} \cdot u(H_E) = 1 \cdot u(H_E)$
L_R	$\frac{\partial D_{nT}}{\partial L_R} \cdot u(L_R) = -1 \cdot u(L_R)$	H_R	$\frac{\partial D_{nT}}{\partial H_R} \cdot u(H_R) = -1 \cdot u(H_R)$
T	$\frac{\partial D_{nT}}{\partial T} \cdot u(T) = \frac{4,34}{T} \cdot u(T)$	T	$\frac{\partial D_{nT}}{\partial T} \cdot u(T) = \frac{4,34}{T} \cdot u(T)$

7.7.6 Combinação dos componentes para cálculo da incerteza-padrão combinada

Considerando as grandezas de entrada não-correlacionadas, obtém-se a incerteza-padrão combinada do mensurando, $u_c(D_{nT})$, pela “lei de propagação da incerteza”, expressa na equação (4.25) e reescrita a seguir para os dois métodos:

$$u_c(D_{nT})|_{\text{clássico}} = \sqrt{\left(\frac{\partial D_{nT}}{\partial L_E}\right)^2 u^2(L_E) + \left(\frac{\partial D_{nT}}{\partial L_R}\right)^2 u^2(L_R) + \left(\frac{\partial D_{nT}}{\partial T}\right)^2 u^2(T)} \quad , \quad (7.15)$$

$$u_c(D_{nT})|_{\text{função de transf.}} = \sqrt{\left(\frac{\partial D_{nT}}{\partial H_E}\right)^2 u^2(H_E) + \left(\frac{\partial D_{nT}}{\partial H_R}\right)^2 u^2(H_R) + \left(\frac{\partial D_{nT}}{\partial T}\right)^2 u^2(T)} \quad . \quad (7.16)$$

Os resultados obtidos de D_{nT} e da estimativa de sua incerteza-padrão combinada, em função da frequência, estão apresentados na Tabela 7.10.

Tabela 7.10 - D_{nT} e estimativa de sua incerteza-padrão combinada para os dois métodos.

Frequência [Hz]	$D_{nT\text{clássico}}$ [dB]	$u_c(D_{nT}) _{\text{clássico}}$ [dB]	$D_{nT\text{função de transf.}}$ [dB]	$u_c(D_{nT}) _{\text{função de transf.}}$ [dB]
100	24,9	1,3	25,5	0,6
125	23,9	1,5	25,0	0,8
160	24,2	1,4	23,3	0,6
200	26,6	2,0	26,9	0,5
250	28,9	1,7	28,5	0,5
315	33,1	1,3	33,4	0,5
400	34,4	1,2	33,3	0,5
500	35,1	1,4	33,7	0,5
630	36,3	1,4	35,5	0,5
800	38,1	1,3	36,9	0,4
1000	42,1	1,3	42,1	0,5
1250	43,3	1,6	43,1	0,5
1600	46,1	1,7	47,0	0,5
2000	47,9	1,9	49,4	0,5
2500	46,8	2,1	48,0	0,6
3150	46,0	2,1	46,9	0,5

As Figuras 7.5 e 7.6 mostram o balanço de incerteza na medição de D_{nT} para a banda de terço de oitava centrada em 500 Hz, onde são apresentados, para os dois métodos, os valores da incerteza-padrão combinada do mensurando $u_c(D_{nT})$ e os valores dos componentes de incerteza das três grandezas de entrada.

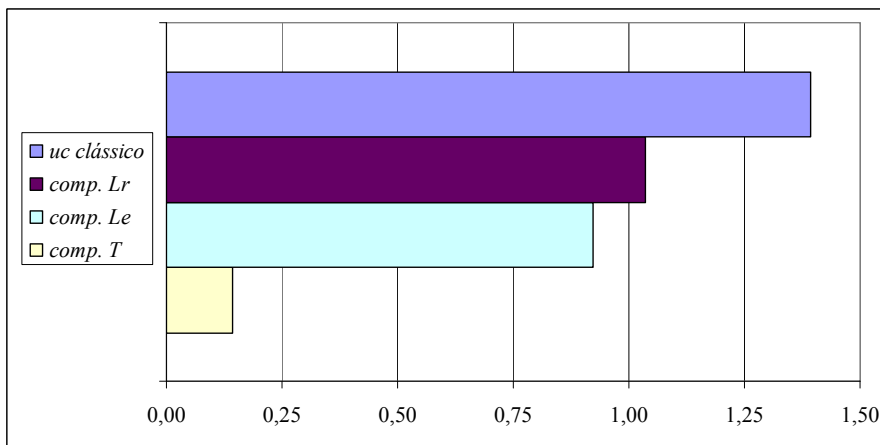


Figura 7.5 - Balanço de incerteza para o método clássico em 500 Hz.

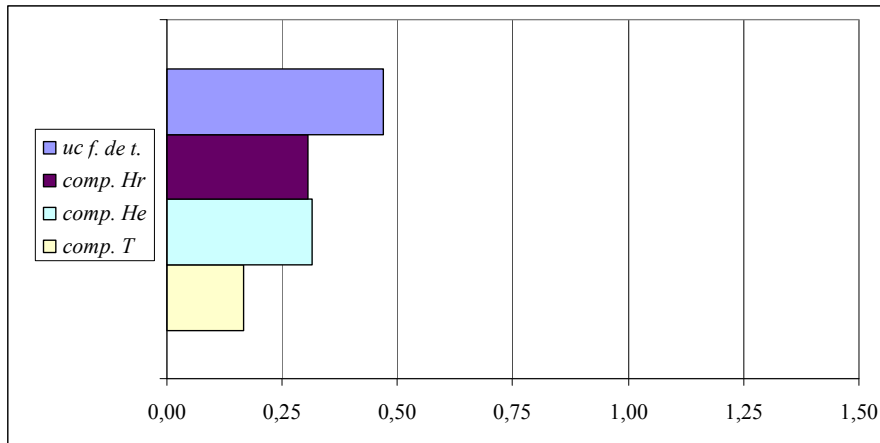


Figura 7.6 - Balanço de incerteza para o método da função de transferência em 500 Hz.

Observando as figuras, é fácil perceber que as fontes de incerteza de L_R , L_E , H_R e H_E predominam, ou seja, geram as maiores contribuições para a incerteza-padrão combinada. Dessa forma, as condições dos campos sonoros nas salas emissora e receptora têm influência determinante na incerteza final de medição. Esse comportamento é o mesmo para toda a faixa de frequência considerada. Se for desejado diminuir a incerteza de medição, deve-se, portanto, reduzir a incerteza relativa às grandezas L e H .

No caso particular do local 1, os desvios-padrão de H_E e H_R obtidos nas medições com o método da função de transferência foram bastante pequenos e, portanto, a incerteza-padrão combinada acabou sendo influenciada pela incerteza referente ao conjunto de medição (0,29 dB). Isso não aconteceu nos outros locais de teste, onde os desvios-padrão de H_E e H_R foram maiores.

7.7.7. Cálculo dos graus de liberdade efetivos

Os graus de liberdade efetivos ν_{ef} foram calculados para as frequências centrais das bandas consideradas através da equação de Welch-Satterthwaite, equação (4.36). Seus valores são expressos por números inteiros e apresentados na Tabela 7.11.

Tabela 7.11 - Graus de liberdade efetivos para os dois métodos.

Frequência [Hz]	$\nu_{ef \text{ clássico}}$	$\nu_{ef \text{ função de transferência}}$
100	18	16
125	18	18
160	18	20
200	18	21
250	18	23
315	19	21
400	19	23
500	18	23
630	18	20
800	18	20
1000	18	20
1250	19	29
1600	18	18
2000	18	19
2500	18	17
3150	18	18

7.7.8. Determinação do fator de abrangência

Os fatores de abrangência k foram determinados para cada frequência a partir dos valores obtidos para os graus de liberdade efetivos ν_{ef} e da distribuição t de *Student* para a probabilidade de abrangência de 95% e estão listados na Tabela 7.12.

Tabela 7.12 - Fatores de abrangência para os dois métodos.

Frequência [Hz]	$k_{\text{clássico}}$	$k_{\text{função de transferência}}$
100	2,10	2,12
125	2,10	2,10
160	2,10	2,09
200	2,10	2,08
250	2,10	2,07
315	2,09	2,08
400	2,09	2,07
500	2,10	2,07
630	2,10	2,09
800	2,10	2,09
1000	2,10	2,09
1250	2,09	2,05
1600	2,10	2,10
2000	2,10	2,09
2500	2,10	2,11
3150	2,10	2,10

7.7.9. Estimativa da incerteza expandida

As incertezas expandidas listadas na Tabela 7.13 e ilustradas na Figura 7.7 são obtidas por:

$$U(D_{nT}) = k \cdot u_c(D_{nT}). \quad (7.17)$$

A última linha da Tabela 7.13 mostra o índice ponderado com os coeficientes de adaptação de espectro entre parênteses (C ; C_{tr}).

Tabela 7.13 - Incertezas expandidas de D_{nT} para os dois métodos.

Frequência [Hz]	$U(D_{nT})_{clássico}$ [dB]	$U(D_{nT})_{função\ de\ transferência}$ [dB]
100	2,7	1,3
125	3,2	1,7
160	3,0	1,2
200	4,2	1,0
250	3,5	0,9
315	2,7	1,0
400	2,6	1,0
500	2,9	1,0
630	2,9	1,0
800	2,8	0,9
1000	2,8	1,0
1250	3,4	1,0
1600	3,6	1,1
2000	4,1	1,1
2500	4,3	1,2
3150	4,5	1,1
$U_w(D_{nT})$	4 (0; -1)	1 (0;0)

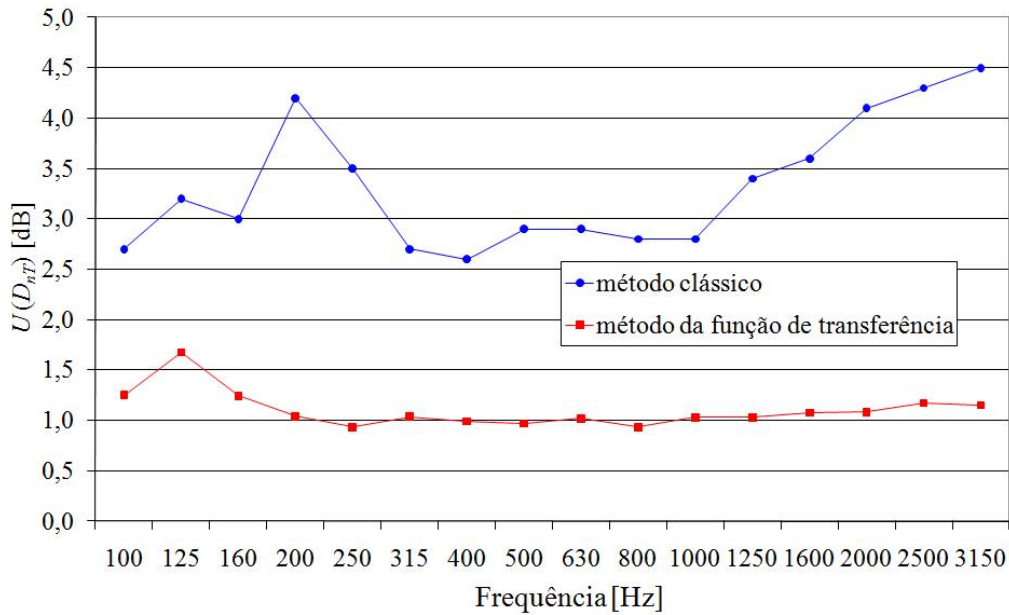


Figura 7.7 - Incertezas expandidas de D_{nT} para os dois métodos.

Para o método clássico, além de maiores valores nas baixas frequências, a incerteza expandida é ainda maior nas altas frequências. Isso se deve aos altos valores dos desvios-padrão nessas frequências como visto na Tabela 7.3 e na Figura 7.3, para o local 1. Valores maiores de desvios-padrão nas baixas frequências são esperados, mas não nas altas, o que pode significar algum problema no procedimento de medição. O valor ponderado da incerteza expandida obtido de acordo com a ISO 717-1 [9] foi 4 dB pois o procedimento descrito na norma sofre influência principalmente do aumento dos valores nas altas frequências. Já com o método da função de transferência, apesar do aumento nas baixas frequências e uma pequena elevação nas altas, a incerteza expandida é aproximadamente 1 dB em toda a faixa de frequência, daí seu valor ponderado ser igual a 1 dB.

A Figura 7.8 apresenta as estimativas das incertezas expandidas para os cinco locais de medição, em função da frequência, e os valores únicos estão na Tabela 7.14.

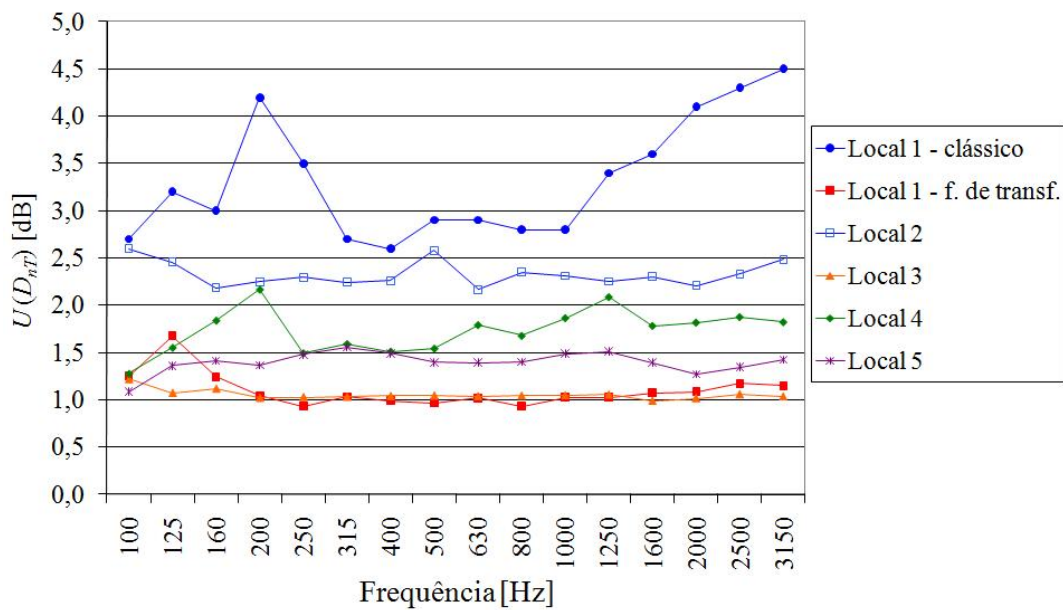


Figura 7.8 - Incertezas expandidas de D_{nT} para os cinco locais de teste.

Tabela 7.14 - Valores ponderados das incertezas expandidas de D_{nT} , $U_w(D_{nT})$, em dB, para os cinco locais de teste.

Local 1 - clássico	Local 1 - função de transferência	Local 2	Local 3	Local 4	Local 5
4 (0; -1)	1 (0; 0)	3 (-1; -1)	1 (0; 0)	2 (0; 0)	2 (-1; -1)

O método clássico apresentou a maior incerteza de medição, enquanto as incertezas das medições realizadas com o método da função de transferência apresentaram valores entre 1 dB e 2 dB, exceto para o local 2 cujo valor foi 3 dB. Entretanto, vale notar que esse valor ponderado de 3 dB para o local 2 por muito pouco não foi igual a 2 dB. Isso foi observado ao se aplicar o procedimento da ISO 717-1 [9] para obter o valor ponderado.

As Tabelas 7.15 e 7.16 são exemplos de outro tipo de balanço de incerteza contendo várias informações sobre a avaliação da incerteza de medição, desde as grandezas de entrada e suas fontes de incerteza até a incerteza expandida. Os valores informados são para a banda de terço de oitava centrada em 500 Hz para as medições realizadas no local 1 com os métodos clássico e o da função de transferência, respectivamente.

Tabela 7.15 - Balanço de incerteza para o método clássico na banda de terço de oitava de 500 Hz.

grandezas de entrada x_i	valor estimado de x_i	fontes de incerteza	valor estimado das fontes de incerteza	incerteza-padrão das fontes de incerteza	distribuição de probabilidade das fontes de incerteza	tipo de avaliação da incerteza	estimativa da incerteza-padrão das fontes de entrada	incerteza-padrão relativa às grandezas de entrada $u(x_i)$	estimativa da incerteza-padrão $u(x_i)$	coeficiente de sensibilidade	componente de incerteza
L_E	82,68 dB	$L_{E \text{ med.}}$	82,68 dB	$u(L_{E \text{ med.}})$	normal	A	0,875 dB	$u(L_E)$	0,922 dB	1	0,922 dB
		$\delta L_{E \text{ cj. med}}$	0 dB	$u(\delta L_{E \text{ cj. med}})$	retangular	B	0,289 dB				
		$\delta L_{E \text{ arred.}}$	0 dB	$u(\delta L_{E \text{ arred.}})$	retangular	B	0,029 dB				
L_R	51,76 dB	$L_{R \text{ med.}}$	51,76 dB	$u(L_{R \text{ med.}})$	normal	A	0,994 dB	$u(L_R)$	1,036 dB	1	1,036 dB
		$\delta L_{R \text{ cj. med}}$	0 dB	$u(\delta L_{R \text{ cj. med}})$	retangular	B	0,289 dB				
		$\delta L_{R \text{ arred.}}$	0 dB	$u(\delta L_{R \text{ arred.}})$	retangular	B	0,029 dB				
T	1,32 s	$T_{\text{med.}}$	1,32 s	$u(T_{\text{med.}})$	normal	A	0,033 s	$u(T)$	0,044 s	3,283	0,144 dB
		$\delta T_{\text{arred.}}$	0 s	$u(\delta T_{\text{arred.}})$	retangular	B	0,029 s				
D_{nT}	35,14 dB									$u_c(D_{nT}) = 1,394 \text{ dB}$	
										$\nu_{ef} = 18$	$k_{95\%} = 2,10$
										$U(D_{nT}) = 2,93 \text{ dB}$	

Tabela 7.16 - Balanço de incerteza para o método da função de transferência na banda de terço de oitava de 500 Hz.

grandezas de entrada x_i	valor estimado de x_i	fontes de incerteza	valor estimado das fontes de incerteza	incerteza-padrão das fontes de incerteza	distribuição de probabilidade das fontes de incerteza	tipo de avaliação da incerteza	estimativa da incerteza-padrão das fontes de entrada	incerteza-padrão relativa às grandezas de entrada $u(x_i)$	estimativa da incerteza-padrão $u(x_i)$	coeficiente de sensibilidade	componente de incerteza
H_E	-73,02 dB	$H_{E \text{ med.}}$	-73,02 dB	$u(H_{E \text{ med.}})$	normal	A	0,122 dB	$u(H_E)$	0,315 dB	1	0,315 dB
		$\delta H_{E \text{ cj. med}}$	0 dB	$u(\delta H_{E \text{ cj. med}})$	retangular	B	0,289 dB				
		$\delta H_{E \text{ arred.}}$	0 dB	$u(\delta H_{E \text{ arred.}})$	retangular	B	0,029 dB				
H_R	-103,09 dB	$H_{R \text{ med.}}$	-103,09 dB	$u(H_{R \text{ med.}})$	normal	A	0,092 dB	$u(H_R)$	0,304 dB	1	0,304 dB
		$\delta H_{R \text{ cj. med}}$	0 dB	$u(\delta H_{R \text{ cj. med}})$	retangular	B	0,289 dB				
		$\delta H_{R \text{ arred.}}$	0 dB	$u(\delta H_{R \text{ arred.}})$	retangular	B	0,029 dB				
T	1,17 s	$T_{\text{med.}}$	1,17 s	$u(T_{\text{med.}})$	normal	A	0,034 s	$u(T)$	0,044 s	3,725	0,166 dB
		$\delta T_{\text{arred.}}$	0 s	$u(\delta T_{\text{arred.}})$	retangular	B	0,029 s				
D_{nT}	33,75 dB									$u_c(D_{nT}) = 0,468 \text{ dB}$	
										$\nu_{ef} = 23$	$k_{95\%} = 2,07$
										$U(D_{nT}) = 0,97 \text{ dB}$	

7.8. Estimativa da incerteza de medição de D_{nT} pela “lei de propagação da distribuição”

O método de simulação de Monte Carlo foi aplicado para a avaliação da incerteza de medição de D_{nT} como alternativa às limitações do GUM [11] e com a vantagem de não ser necessário calcular os coeficientes de sensibilidade e os graus de liberdade efetivos. Dois *softwares* foram utilizados para os cálculos: o *Microsoft Excel* e um *software* dedicado chamado “*Crystal Ball*” [87], uma ferramenta comercial que utiliza planilhas e simulação de Monte Carlo para fazer análises estatísticas, prever o comportamento de resultados esperados, medir a confiança em decisões, etc.

As etapas da estimativa da incerteza, listadas abaixo, seguiram aquelas descritas no item 4.8, sendo as três primeiras iguais às do método de propagação de incertezas:

- 1) Definição do mensurando
- 2) Elaboração do diagrama causa-efeito
- 3) Estimativas das incertezas das grandezas de entrada
- 4) Identificação das funções densidade de probabilidade para cada fonte de incerteza:

Foram atribuídas distribuições de probabilidade a cada fonte de incerteza, a partir do conhecimento prévio das mesmas, conforme a Tabela 7.17. Uma probabilidade de abrangência de 95% foi adotada.

Tabela 7.17 - Distribuições de probabilidade atribuídas às fontes de incerteza das grandezas de entrada para os métodos clássico e da função de transferência.

grandezas de entrada x_i	fonte de incerteza	incerteza-padrão da fonte de incerteza	distribuição de probabilidade da fonte de incerteza
L_E ou H_E	repetitividade	$u(L_{E \text{ med.}})$ ou $u(H_{E \text{ med.}})$	<i>normal</i>
	conjunto de medição	$u(\delta L_{E \text{ cj. med.}})$ ou $u(\delta H_{E \text{ cj. med.}})$	<i>retangular</i>
	arredondamento	$u(\delta L_{E \text{ arred.}})$ ou $u(\delta H_{E \text{ arred.}})$	<i>retangular</i>
L_R ou H_R	repetitividade	$u(L_{R \text{ med.}})$ ou $u(H_{R \text{ med.}})$	<i>normal</i>
	conjunto de medição	$u(\delta L_{R \text{ cj. med.}})$ ou $u(\delta H_{R \text{ cj. med.}})$	<i>retangular</i>
	arredondamento	$u(\delta L_{R \text{ arred.}})$ ou $u(\delta H_{R \text{ arred.}})$	<i>retangular</i>
T	repetitividade	$u(T_{\text{med.}})$	<i>normal</i>
	arredondamento	$u(\delta T_{\text{arred.}})$	<i>retangular</i>

5) Seleção do número M de iterações de Monte Carlo e simulação:

Foram utilizados $M = 10.000$ números aleatórios e feitas M simulações, ou seja, 10.000 simulações das amostras $\{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iM}\}$ de cada fonte de incerteza de cada grandeza de entrada x_i .

6) Cálculo dos M resultados e obtenção da função densidade de probabilidade:

Com as 10.000 amostras de cada fonte de incerteza, foram calculados 10.000 resultados do mensurando $\{D_{nT1}, D_{nT2}, \dots, D_{nTM}\}$ através das equações que definem o mensurando D_{nT} , para os dois métodos de medição utilizados. Com esses resultados, foi obtida a função densidade de probabilidade da grandeza de saída.

7) Estimativa da incerteza expandida:

A partir da distribuição de probabilidade da grandeza de saída, foram extraídas as informações desejadas: o valor médio da grandeza de saída, seu desvio-padrão e sua incerteza expandida. A Tabela 7.18 apresenta os valores estimados das incertezas expandidas para os dois métodos de medição no local de teste 1, em função da frequência, e seus índices ponderados estão na última linha.

Tabela 7.18 - Incertezas expandidas de D_{nT} estimadas pelo Método de Monte Carlo.

Frequência [Hz]	$U(D_{nT})_{\text{clássico}}$ [dB]	$U(D_{nT})_{\text{função de transferência}}$ [dB]
100	2,7	1,2
125	3,2	1,6
160	3,0	1,2
200	4,2	1,0
250	3,4	0,9
315	2,7	1,0
400	2,5	1,0
500	2,9	1,0
630	2,9	1,0
800	2,7	0,9
1000	2,8	1,0
1250	3,4	1,0
1600	3,5	1,0
2000	4,0	1,1
2500	4,3	1,1
3150	4,4	1,1
$U_w(D_{nT})$	4 (-1; -1)	1 (0;0)

A Figura 7.9 mostra as incertezas expandidas estimadas pelo Método de Monte Carlo para as medições realizadas nos cinco locais de teste. Seus valores ponderados com os coeficientes de adaptação de espectro são apresentados na Tabela 7.19.

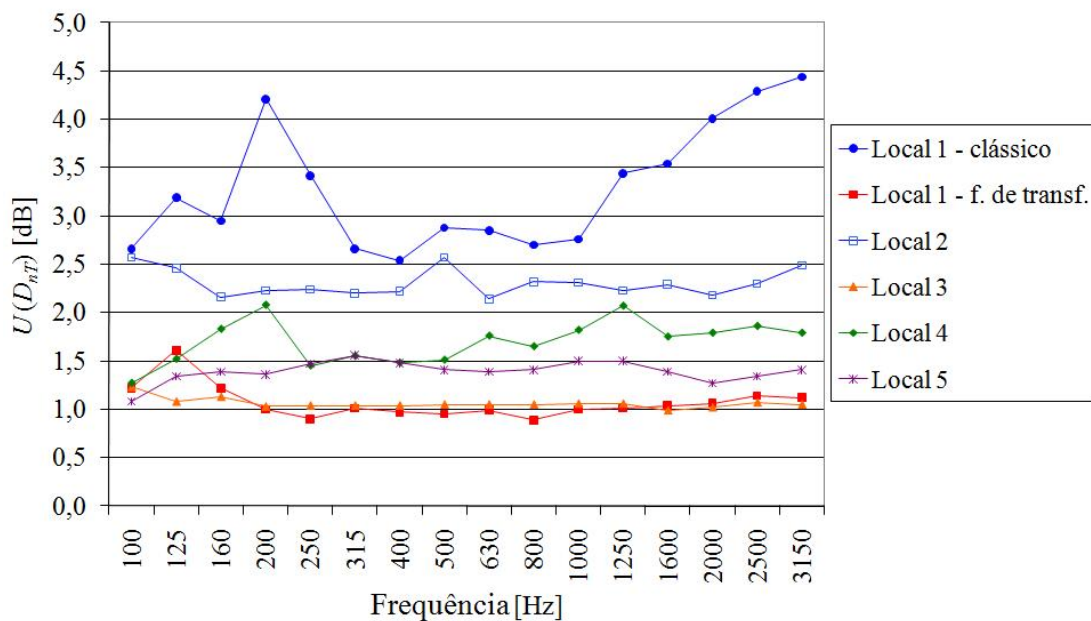


Figura 7.9 - Incertezas expandidas de D_{nT} estimadas pelo Método de Monte Carlo para os cinco locais de teste.

Tabela 7.19 - Valores ponderados das incertezas expandidas de D_{nT} , $U_w(D_{nT})$, em dB, estimadas pelo Método de Monte Carlo, para os cinco locais de teste.

Local 1 - clássico	Local 1 - função de transferência	Local 2	Local 3	Local 4	Local 5
4 (-1; -1)	1 (0; 0)	2 (0; 0)	1 (0; 0)	2 (0; 0)	2 (-1; -1)

7.9. Comparação dos resultados obtidos pela “lei de propagação da incerteza” e pela “lei de propagação da distribuição”

As incertezas expandidas obtidas pelos dois procedimentos diferentes foram comparadas inicialmente para as medições realizadas no local 1 com os métodos clássico e da função de transferência. A comparação é ilustrada no gráfico da Figura 7.10 que mostra as incertezas expandidas de D_{nT} estimadas tanto pela propagação de incertezas (GUM) como pela simulação de Monte Carlo (MC), para os dois métodos de medição. As incertezas obtidas pelos dois procedimentos são quase iguais, com diferenças menores que 0,1 dB entre os dois métodos.

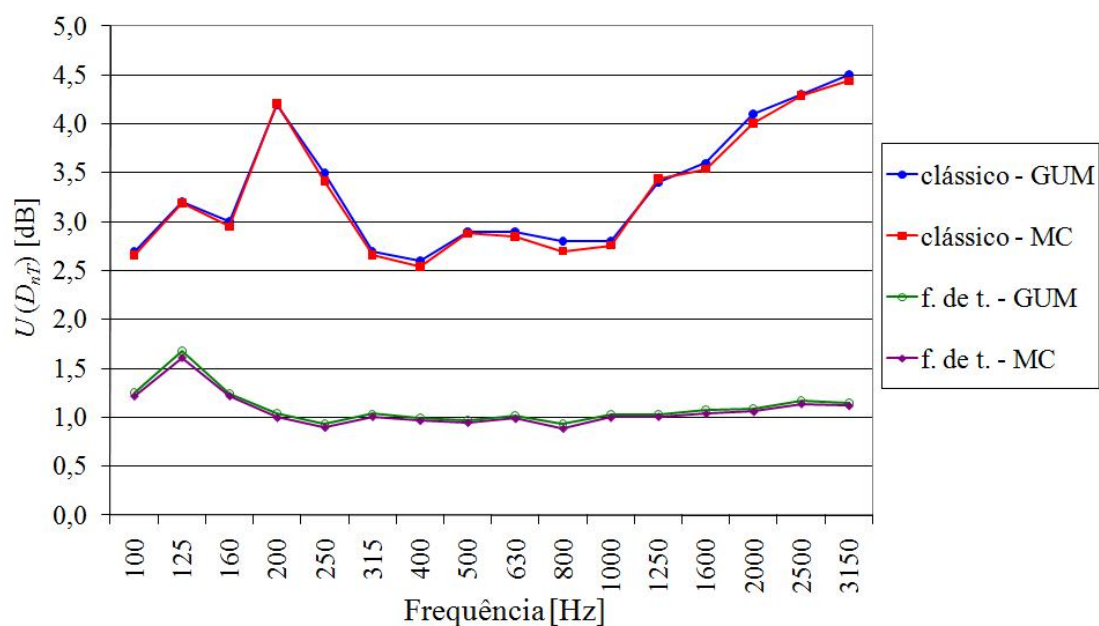


Figura 7.10 - Incertezas expandidas de D_{nT} , para os dois métodos de medição utilizados no local 1, obtidas pelas duas metodologias aplicadas.

A Figura 7.11 compara os dois procedimentos para as medições realizadas nos outros locais de teste e as diferenças entre ambos são menores ainda.

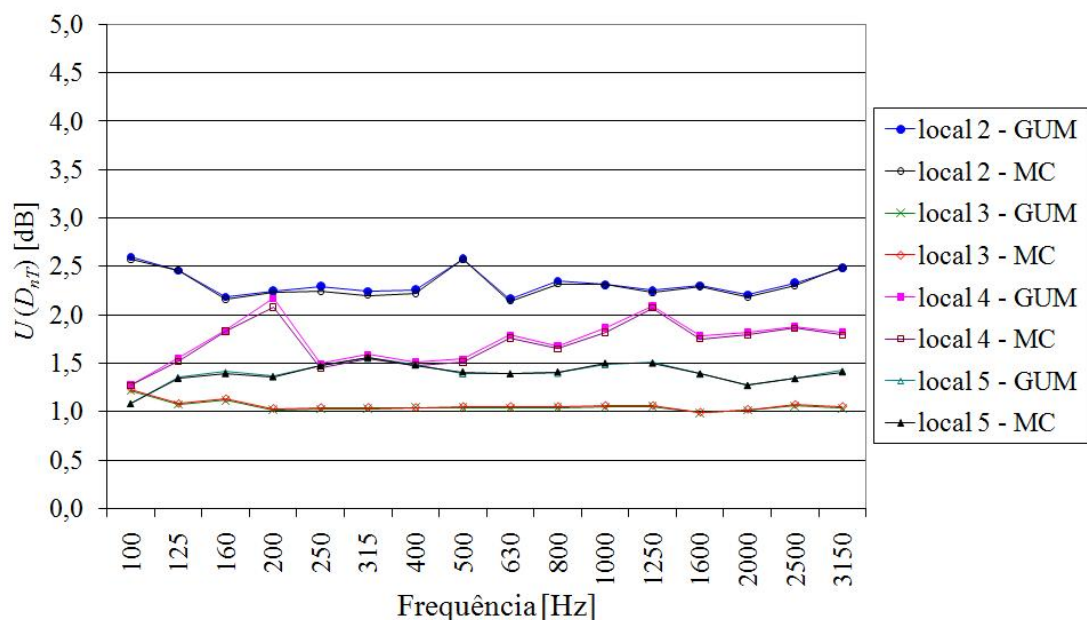


Figura 7.11 - Incertezas expandidas de D_{nT} , para os outros quatro locais de teste, obtidas pelas duas metodologias aplicadas.

Os valores ponderados das incertezas expandidas obtidas com as duas metodologias propostas são idênticos (ver Tabelas 7.14 e 7.19), exceto para o local 2, como explicado anteriormente, e para o coeficiente de adaptação de espectro das medições no local 1 com o método clássico.

Duas abordagens para a estimativa das incertezas das medições foram usadas e comparadas: propagação de distribuições (simulação de Monte Carlo) e propagação de incertezas. Como os resultados das duas foram similares, a propagação de incertezas pode ser usada para problemas similares, conforme recomendado no suplemento do GUM [14]. Entretanto, se os métodos dessem resultados diferentes, o método de Monte Carlo deveria ser tomado como referência.

No caso das medições avaliadas, como as grandezas e fontes de incerteza são bem definidas e possuem distribuições simples (normal e retangular), é esperado que as duas metodologias apresentem resultados parecidos. Ao utilizar as duas metodologias e compará-las, foi possível confirmar que o método de propagação de incertezas (GUM) foi aplicado de maneira adequada, ou seja, que os coeficientes de sensibilidade e os graus de liberdade efetivos foram devidamente calculados.

O próximo passo é aplicar a metodologia proposta para os resultados das medições de isolamento sonoro aéreo de fachadas.

CAPÍTULO 8

ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA ISOLAMENTO SONORO DE FACHADAS

8.1 Introdução

O mensurando escolhido para análise dos resultados de isolamento sonoro de fachadas e estimativa da incerteza foi a diferença padronizada de nível das fachadas, $D_{ls,2m,nT}$, obtido pelo método global com ruído de alto-falante, pois é o parâmetro considerado nas normas de desempenho brasileiras para medições em campo de isolamento sonoro aéreo de fachadas.

A mesma análise apresentada no capítulo anterior para os resultados das medições de isolamento sonoro aéreo entre salas foi aplicada para os resultados das medições de isolamento sonoro aéreo de fachadas e é a seguir descrita, com exceção da precisão das medições de acordo com a parte 2 da norma ISO 140 [13], pois esta não apresenta valores para medições de isolamento sonoro de fachadas.

Foram validados apenas os resultados obtidos com o método da função de transferência nos locais 2, 3 e 4, utilizando os valores das seis medições realizadas nesses locais sob condições de repetitividade. No local 1, as medições foram interrompidas e não houve quantidade suficiente de repetições para estimar a incerteza das medições. O Apêndice L apresenta os valores obtidos de $D_{ls,2m,nT}$ nos quatro locais de medição.

8.2 Estudo da distribuição dos conjuntos de repetições de medições

O teste de Shapiro-Wilk foi aplicado a cada conjunto de medições para verificar a distribuição dos conjuntos de medições, de acordo com a metodologia descrita no item 4.3. Para os locais 2, 3 e 4, todos os valores da estatística-teste $W_{calculado}$ na faixa de

frequência considerada eram maiores do que os valores W_{tabelado} , portanto, pode-se considerar que as medições de $D_{ls,2m,nT}$ seguem uma distribuição normal.

8.3 Aplicação de critérios de rejeição

Crítérios de rejeição foram aplicados aos valores medidos de $D_{ls,2m,nT}$ e a Tabela 8.1 lista o número de valores rejeitados pelo critério de Grubbs para cada conjunto de medições nos locais de teste, informando qual é a banda de frequência e o número da medição do valor rejeitado.

Tabela 8.1 - Número de valores de $D_{ls,2m,nT}$ rejeitados.

Local de medição	Método de medição	Número de valores rejeitados
1	clássico	0
1	função de transferência	7 (medição 02 - 500, 630 e 3150 Hz - medição 06 - 100, 160 e 800 Hz - medição 04 - 160 Hz)
2	função de transferência	0
3	função de transferência	0
4	função de transferência	2 (medição 01 - 500 Hz - e medição 04 - 315 Hz)

8.4 Compatibilidade entre os desvios-padrão de cada conjunto de repetições

O teste estatístico de Fisher foi aplicado, combinando-se as medições, para verificar a homogeneidade entre as variâncias das $D_{ls,2m,nT}$ medidas. A análise estatística evidenciou que as variâncias de cada conjunto de repetições de medições são homogêneas entre si para uma probabilidade de 95% e foram calculados os desvios-padrão combinados das medições, s_p , de acordo com a equação (4.11), para as combinações de todas as medições nos quatro ambientes de testes, apresentados na Tabela 8.2. Deve-se lembrar, entretanto, que para o local 1 apenas três medições foram realizadas e portanto o desvio-padrão combinado é relativo a somente essas três medições.

Tabela 8.2 - Valores obtidos para s_p de $D_{ls,2m,nT}$ para os quatro locais ensaiados.

Frequência [Hz]	Local 1		Local 2	Local 3	Local 4
	s_{p1} [dB] função de transferência	s_{p1} [dB] clássico	s_{p2} [dB]	s_{p3} [dB]	s_{p4} [dB]
100	0,63	0,37	0,06	0,21	0,18
125	0,23	0,55	0,16	0,57	0,17
160	0,11	0,28	0,25	0,39	0,17
200	0,49	0,61	0,19	0,24	0,04
250	0,36	0,29	0,28	0,24	0,16
315	0,85	0,74	0,34	0,33	0,08
400	1,31	1,59	0,42	0,35	0,16
500	3,78	2,92	0,16	0,37	0,04
630	3,10	1,98	0,26	0,21	0,23
800	0,33	0,36	0,39	0,50	0,18
1000	1,43	1,36	0,36	0,33	0,13
1250	0,63	0,55	0,42	0,74	0,10
1600	0,80	1,06	0,21	0,39	0,17
2000	1,16	0,90	0,31	0,32	0,22
2500	1,02	1,24	0,22	0,42	0,07
3150	4,63	5,06	0,55	0,28	0,19

A Figura 8.1 apresenta os desvios-padrão combinados dos quatro locais para as combinações das medições realizadas, na banda de terço de oitava centrada em 500 Hz. Combinação 1 equivale ao conjunto “medição 01 + medição 02 + medição 03”, combinação 2, ao conjunto “medição 01 + medição 02 + medição 03 + medição 04”, e assim por diante. Para o local 1, há apenas 1 ponto no gráfico relativo às três medições e não é possível tirar conclusões. Para os locais 2, 3 e 4, nota-se que os valores estabilizam com a adição de novas medições, evidenciando a homogeneidade entre os desvios-padrão.

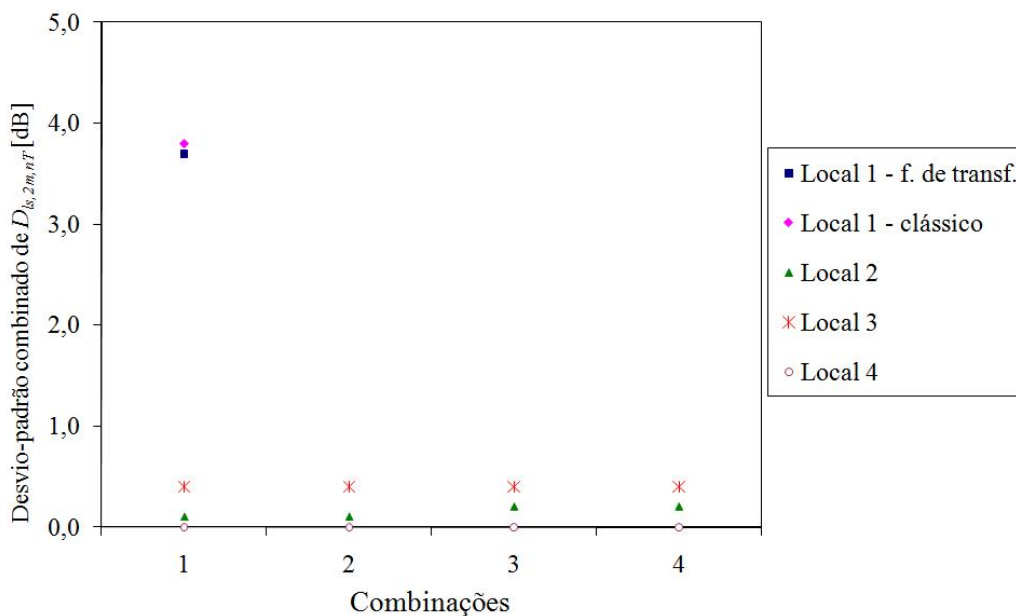


Figura 8.1 - Desvios-padrão combinados s_p de $D_{ls,2m,nT}$ na banda de 1/3 de oitava de 500 Hz.

8.5 Estudo da compatibilidade entre as médias de cada conjunto de repetições

O teste de homogeneidade entre as médias de cada conjunto de repetições de medições foi aplicado e pode-se constatar a homogeneidade entre as médias das medições de $D_{ls,2m,nT}$ para os cinco conjuntos com uma probabilidade de 95%. A Figura 8.2 mostra as médias para as combinações das medições dos cinco locais de testes na banda de terço de oitava centrada em 500 Hz. Combinação 1 equivale a “medição 01 + medição 02”, combinação 2 a “medição 01 + medição 02 + medição 03”, e assim por diante.

Para o local 1, há apenas 2 valores no gráfico e as médias não estão sob controle, já nos outros locais (2, 3 e 4), os valores se mantêm constantes com a adição de novas medições e pode-se concluir que as médias estão sob controle. Observa-se também que, na banda de frequência de 500 Hz, o local 3 possui o menor valor de $D_{ls,2m,nT}$.

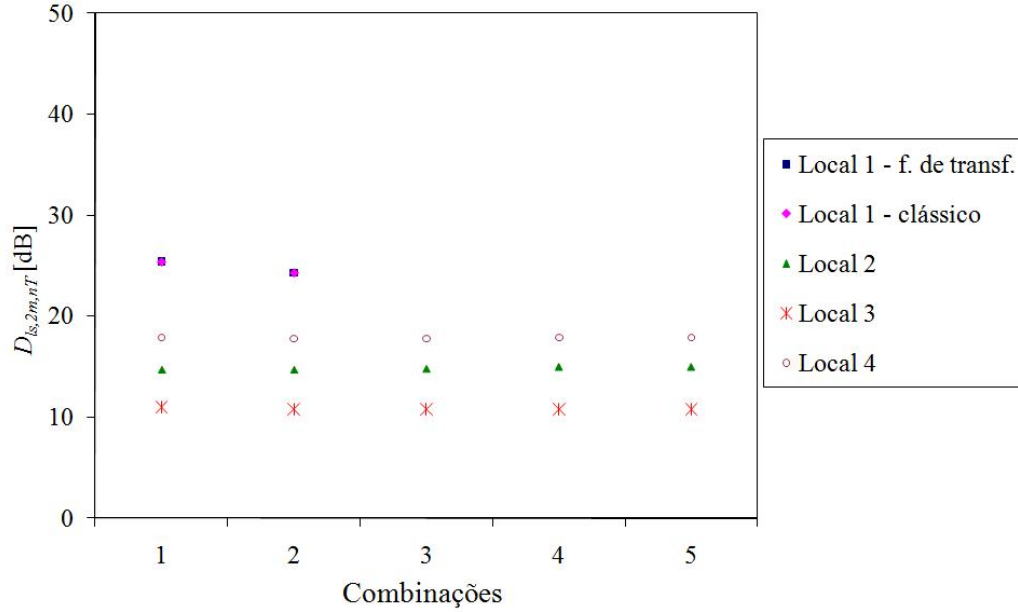


Figura 8.2 - Médias combinadas de $D_{ls,2m,nT}$ na banda de 1/3 de oitava de 500 Hz.

8.6 Estimativa da incerteza de medição de $D_{ls,2m,nT}$ segundo o GUM

8.6.1 Definição do mensurando

O mensurando diferença padronizada de nível, $D_{ls,2m,nT}$, é expresso para o método clássico, para cada banda de frequência, por:

$$D_{ls,2m,nT} \Big|_{\text{clássico}} = L_{1,2m} - L_2 + 10 \log \left(\frac{T}{T_0} \right), \quad (8.1)$$

onde $L_{1,2m}$, L_2 , T e T_0 são as grandezas de entrada, sendo T_0 uma constante igual a 0,5 s.

Para o método da função de transferência, as grandezas de entrada são $H_{1,2m}$, H_2 , T e T_0 , e a equação é escrita, para cada banda de frequência, como:

$$D_{ls,2m,nT} \Big|_{\text{função de transferência}} = H_{1,2m} - H_2 + 10 \log \left(\frac{T}{T_0} \right). \quad (8.2)$$

8.6.2 Elaboração do diagrama causa-efeito

O diagrama causa-efeito para as estimativas da incerteza de medição de $D_{ls,2m,nT}$ é ilustrado na Figura 8.3 e é similar ao apresentado no capítulo anterior (Figura 7.4) para medições de isolamento sonoro entre salas.

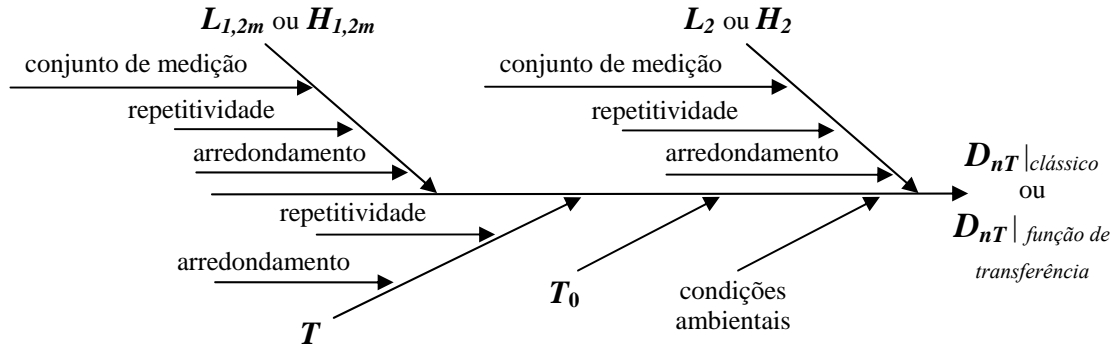


Figura 8.3 - Diagrama causa-efeito do mensurando $D_{ls,2m,nT}$ para os dois métodos.

8.6.3 Estimativas das incertezas-padrão das grandezas de entrada

As incertezas-padrão das fontes de entrada foram avaliadas para todas as bandas de frequência consideradas. Os valores apresentados a seguir são para as medições realizadas com o método da função de transferência no local de teste 2. O Apêndice M apresenta os valores para os ambientes de teste 3 e 4.

8.6.3.1 Incerteza referente às grandezas de entrada $L_{1,2m}$ e L_2 e $H_{1,2m}$ e H_2

As estimativas de incerteza referentes às grandezas de entrada níveis de pressão sonora médios, $L_{1,2m}$ e L_2 , e funções de transferência acústica médias, $H_{1,2m}$ e H_2 , seguiram o mesmo procedimento descrito abaixo, onde os subscritos $_{1,2m}$ e $_2$, relativos ao lado de fora 2 metros em frente à fachada e à sala receptora, não aparecem. Três fontes de incerteza foram consideradas para cada grandeza de entrada, como ilustrado no diagrama causa-efeito da Figura 8.3.

A grandeza L pode ser expressa por:

$$L(f) = L_{med}(f) + \delta L_{cj.med}(f) + \delta L_{arred}(f) , \quad (8.3)$$

onde $L_{med}(f)$ é o nível de pressão sonora médio obtido pelo conjunto de medições, $\delta L_{cj. med}(f)$ é a contribuição da incerteza de L devida ao conjunto de medição e $\delta L_{arred}(f)$ é a contribuição da incerteza de L devida ao arredondamento do equipamento.

Da mesma maneira, a grandeza H pode ser expressa por:

$$H(f) = H_{med}(f) + \delta H_{cj. med}(f) + \delta H_{arred}(f) , \quad (8.4)$$

onde $H_{med}(f)$ é a função de transferência acústica média obtida pelo conjunto de medições, $\delta H_{cj. med}(f)$ é a contribuição da incerteza de H devida ao conjunto de medição e $\delta H_{arred}(f)$ é a contribuição da incerteza de H devida ao arredondamento do equipamento.

As grandezas $\delta L_{cj. med}(f)$ e $\delta L_{arred}(f)$ possuem valor nulo, mas suas incertezas associadas, $u(\delta L_{cj. med}(f))$ e $u(\delta L_{arred}(f))$, podem não ser nulas. O mesmo ocorre para as grandezas do método da função de transferência: $\delta H_{cj. med}(f) = \delta H_{arred}(f) = 0$, mas $u(\delta H_{cj. med}(f))$ e $u(\delta H_{arred}(f))$ podem não ser nulas.

Considerando as grandezas não-correlacionadas, as incertezas-padrão combinadas das incertezas de L e H são obtidas pela “lei de propagação da incerteza” pelas equações (8.5) e (8.6), para os métodos clássico e da função de transferência, respectivamente,

$$u_c(L(f)) = \sqrt{u(L_{med}(f))^2 + u(\delta L_{cj. med}(f))^2 + u(\delta L_{arred}(f))^2} , \quad (8.5)$$

$$u_c(H(f)) = \sqrt{u(H_{med}(f))^2 + u(\delta H_{cj. med}(f))^2 + u(\delta H_{arred}(f))^2} . \quad (8.6)$$

1) Incerteza relativa ao conjunto de repetições:

A avaliação da incerteza-padrão relativa ao conjunto de repetições é do Tipo A, e como os dados foram tratados estatisticamente, a incerteza-padrão é definida pelo desvio-padrão experimental da média, dado pela equação (4.18).

A Tabela 8.3 apresenta os valores das incertezas-padrão relativas à repetitividade obtidas no local 2 para as bandas de frequência consideradas. Para a banda de terço de oitava com frequência central de 500 Hz, por exemplo, as incertezas relativas à repetitividade obtidas para $H_{1,2m}$ e H_2 são, respectivamente:

$$u(H_{1,2m_{med}}(500 \text{ Hz})) = \frac{s(H_{1,2m_{med}})}{\sqrt{n}} = \frac{0,16}{\sqrt{6}} = 0,07 \text{ dB} \quad \text{e} \quad u(H_{2_{med}}(500 \text{ Hz})) = \frac{0,84}{\sqrt{6}} = 0,34 \text{ dB}.$$

Tabela 8.3 - Incertezas-padrão de $H_{1,2m}$ e H_2 , relativas à repetitividade.

Frequência [Hz]	Método da função de transferência	
	$u(H_{1,2m_{med}})$ [dB]	$u(H_{2_{med}})$ [dB]
100	0,01	0,82
125	0,03	0,79
160	0,03	1,32
200	0,03	0,98
250	0,03	1,30
315	0,07	0,92
400	0,07	0,66
500	0,07	0,34
630	0,06	0,38
800	0,04	0,61
1000	0,06	0,59
1250	0,06	0,79
1600	0,08	0,47
2000	0,09	0,33
2500	0,11	0,42
3150	0,09	0,46

2) Incerteza relativa ao conjunto de medição:

A avaliação da incerteza relativa ao conjunto de medição é do Tipo B, assumindo-se uma distribuição retangular num intervalo de $\pm 0,5$ dB em toda a faixa de frequência, considerando contribuições conhecidas da instrumentação usada. A incerteza-padrão nesse caso é dada por:

$$u(\delta L_{cj. med}) = u(\delta H_{cj. med}) = \frac{0,5}{\sqrt{3}} = 0,29 \text{ dB} . \quad (8.7)$$

3) Incerteza relativa ao arredondamento do equipamento:

A avaliação da incerteza relativa à resolução estipulada do equipamento é do Tipo B para uma distribuição retangular, considerando um arredondamento de 0,1 dB para toda a faixa de frequência, e a incerteza-padrão será:

$$u(\delta L_{arred}) = u(\delta H_{arred}) = \frac{0,1/2}{\sqrt{3}} = 0,029 \text{ dB} . \quad (8.8)$$

4) Combinando as incertezas-padrão, pode-se reescrever a equação (8.6) para o cálculo da estimativa da incerteza-padrão combinada de H como:

$$u_c(H(f)) = \sqrt{\left(\frac{s_p(H(f))}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(\frac{0,5}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0,1/2}{\sqrt{3}}\right)^2}. \quad (8.9)$$

A Tabela 8.4 lista os valores obtidos para $u_c(H_{1,2m})$ e $u_c(H_2)$ em função da frequência para as medições realizadas no local de teste 2.

Tabela 8.4 - Incertezas-padrão combinadas de $H_{1,2m}$ e H_2 .

Frequência [Hz]	Método da função de transferência	
	$u_c(H_{1,2m})$ [dB]	$u_c(H_2)$ [dB]
100	0,29	0,87
125	0,29	0,84
160	0,29	1,35
200	0,29	1,02
250	0,29	1,33
315	0,30	0,97
400	0,30	0,72
500	0,30	0,45
630	0,30	0,48
800	0,29	0,68
1000	0,30	0,65
1250	0,30	0,84
1600	0,30	0,56
2000	0,30	0,44
2500	0,31	0,51
3150	0,30	0,54

8.6.3.2 Incerteza referente ao tempo de reverberação na sala receptora T

Duas fontes de incerteza foram consideradas para o tempo de reverberação, como ilustrado na Figura 8.3. A incerteza-padrão combinada das incertezas de T é dada por:

$$u_c(T(f)) = \sqrt{u(T_{med}(f))^2 + u(\delta T_{arred}(f))^2}. \quad (8.10)$$

1) Incerteza relativa ao conjunto de repetições:

A avaliação da incerteza relativa ao conjunto de medição é do Tipo A e a incerteza-padrão é definida pelo desvio-padrão experimental da média:

$$u(T_{med}(f)) = \frac{s_p(T(f))}{\sqrt{n}} \quad (8.11)$$

A Tabela 8.5 apresenta os valores obtidos para as incertezas relativas à repetitividade, $u(T_{med})$, em função da frequência. Para a banda de terço de oitava de 500 Hz, por exemplo:

$$u(T_{med}(500 \text{ Hz})) \Big|_{\text{função de transferência}} = \frac{0,045}{\sqrt{6}} = 0,018 \text{ s.}$$

Tabela 8.5 - Incertezas-padrão de T relativas à repetitividade.

Frequência [Hz]	$u(T_{med}) \Big _{\text{função de transferência}}$ [s]
100	0,057
125	0,058
160	0,045
200	0,039
250	0,038
315	0,038
400	0,027
500	0,018
630	0,021
800	0,024
1000	0,025
1250	0,018
1600	0,018
2000	0,016
2500	0,013
3150	0,010

2) Incerteza relativa ao arredondamento do equipamento:

A avaliação será do Tipo B, assumindo-se uma distribuição retangular para o arredondamento de 0,1 s na faixa de frequência considerada, com incerteza-padrão:

$$u(\delta T_{arred}) = \frac{0,1/2}{\sqrt{3}} = 0,029 \text{ s.} \quad (8.12)$$

A equação (8.10) pode ser reescrita como:

$$u_c(T(f)) = \sqrt{\left(\frac{s_p(T(f))}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(\frac{0,1/2}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (8.13)$$

A Tabela 8.6 apresenta os valores obtidos para $u_c(T)$ em função da frequência em bandas de terço de oitava.

Tabela 8.6 - Incertezas-padrão combinadas de T .

Frequência [Hz]	$u_c(T)_{\text{função de transferência}}$ [s]
100	0,064
125	0,065
160	0,053
200	0,048
250	0,048
315	0,048
400	0,040
500	0,034
630	0,036
800	0,038
1000	0,038
1250	0,034
1600	0,034
2000	0,033
2500	0,032
3150	0,031

8.6.3.3 Incerteza referente às condições ambientais

As contribuições das condições ambientais para a estimativa das incertezas de medição são muito pequenas e não foram consideradas.

8.6.4 Cálculo dos coeficientes de sensibilidade

A Tabela 8.7 apresenta os coeficientes de sensibilidade do mensurando $D_{ls,2m,nT}$ para os dois métodos de medição utilizados.

Tabela 8.7 - Coeficientes de sensibilidade para os métodos utilizados.

Método clássico		Método da função de transferência	
grandezas de entrada	coeficientes de sensibilidade	grandezas de entrada	coeficientes de sensibilidade
$L_{1,2m}$	$\frac{\partial D_{ls,2m,nT}}{\partial L_{1,2m}} = 1$	$H_{1,2m}$	$\frac{\partial D_{ls,2m,nT}}{\partial H_{1,2m}} = 1$
L_2	$\frac{\partial D_{ls,2m,nT}}{\partial L_2} = -1$	H_2	$\frac{\partial D_{ls,2m,nT}}{\partial H_2} = -1$
T	$\frac{\partial D_{ls,2m,nT}}{\partial T} = \frac{10 \log(e)}{T} = \frac{4,34}{T}$	T	$\frac{\partial D_{ls,2m,nT}}{\partial T} = \frac{10 \log(e)}{T} = \frac{4,34}{T}$

8.6.5 Determinação dos componentes de incerteza

Os componentes de incerteza das grandezas de entrada são mostrados na Tabela 8.8.

Tabela 8.8 - Componentes de incerteza para os métodos utilizados.

Método clássico		Método da função de transferência	
grandezas de entrada	componentes de incerteza	grandezas de entrada	componentes de incerteza
$L_{1,2m}$	$\frac{\partial D_{ls,2m,nT}}{\partial L_{1,2m}} \cdot u(L_{1,2m}) = 1 \cdot u(L_{1,2m})$	$H_{1,2m}$	$\frac{\partial D_{ls,2m,nT}}{\partial H_{1,2m}} \cdot u(H_{1,2m}) = 1 \cdot u(H_{1,2m})$
L_1	$\frac{\partial D_{ls,2m,nT}}{\partial L_2} \cdot u(L_2) = -1 \cdot u(L_2)$	H_2	$\frac{\partial D_{ls,2m,nT}}{\partial H_2} \cdot u(H_2) = -1 \cdot u(H_2)$
T	$\frac{\partial D_{ls,2m,nT}}{\partial T} \cdot u(T) = \frac{4,34}{T} \cdot u(T)$	T	$\frac{\partial D_{ls,2m,nT}}{\partial T} \cdot u(T) = \frac{4,34}{T} \cdot u(T)$

8.6.6 Combinação dos componentes para cálculo da incerteza-padrão combinada

A incerteza-padrão combinada do mensurando, $u_c(D_{ls,2m,nT})$, obtida pela “lei de propagação da incerteza”, considerando as grandezas de entrada não-correlacionadas, é expressa para os dois métodos por:

$$u_c(D_{ls,2m,nT})|_{\text{clássico}} = \sqrt{\left(\frac{\partial D_{ls,2m,nT}}{\partial L_{1,2m}}\right)^2 u^2(L_{1,2m}) + \left(\frac{\partial D_{ls,2m,nT}}{\partial L_2}\right)^2 u^2(L_2) + \left(\frac{\partial D_{ls,2m,nT}}{\partial T}\right)^2 u^2(T)}, \quad (8.14)$$

$$u_c(D_{ls,2m,nT})|_{\text{função de transf.}} = \sqrt{\left(\frac{\partial D_{ls,2m,nT}}{\partial H_{1,2m}}\right)^2 u^2(H_{1,2m}) + \left(\frac{\partial D_{ls,2m,nT}}{\partial H_2}\right)^2 u^2(H_2) + \left(\frac{\partial D_{ls,2m,nT}}{\partial T}\right)^2 u^2(T)}. \quad (8.15)$$

Os resultados de $D_{ls,2m,nT}$ medidos no local 2 e da estimativa de sua incerteza-padrão combinada estão apresentados na Tabela 8.9 em função da frequência.

A Figura 8.4 mostra o balanço de incerteza na medição de $D_{ls,2m,nT}$ para a banda de terço de oitava centrada em 500 Hz, com os valores da incerteza-padrão combinada $u_c(D_{ls,2m,nT})$ e os valores dos componentes de incerteza das três grandezas de entrada.

Tabela 8.9 - $D_{ls,2m,nT}$ e estimativa de sua incerteza-padrão combinada.

Frequência [Hz]	$D_{ls,2m,nT}$ função de [dB] transf.	$u_c(D_{ls,2m,nT})$ função [dB] de transf.
100	19,8	1,0
125	12,0	1,0
160	21,1	1,4
200	13,6	1,2
250	19,3	1,4
315	18,0	1,1
400	14,7	0,9
500	15,0	0,7
630	17,4	0,7
800	20,5	0,8
1000	21,0	0,8
1250	20,1	0,9
1600	17,6	0,7
2000	19,0	0,6
2500	19,5	0,7
3150	20,6	0,7

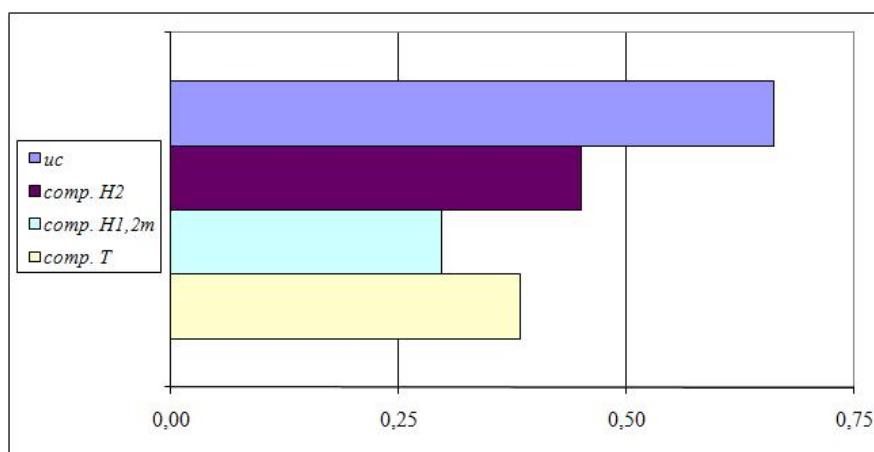


Figura 8.4 - Balanço de incerteza para o método da função de transferência em 500 Hz.

Nesse caso, as fontes de incerteza de H_2 e T predominam, gerando as maiores contribuições para a incerteza-padrão combinada e, portanto, as condições dos campos sonoros na sala receptora têm influência determinante na incerteza de medição. Esse comportamento ocorre em toda a faixa de frequência considerada.

Os desvios-padrão de $H_{1,2m}$ obtidos nas medições com o método da função de transferência foram bastante pequenos e, dessa forma, a incerteza-padrão combinada foi influenciada pela incerteza referente ao conjunto de medição (0,29 dB).

8.6.7. Cálculo dos graus de liberdade efetivos

A Tabela 8.10 apresenta os valores dos graus de liberdade efetivos v_{ef} .

Tabela 8.10 - Graus de liberdade efetivos.

Frequência [Hz]	v_{ef} função de transferência
100	9
125	10
160	6
200	8
250	7
315	8
400	9
500	14
630	13
800	10
1000	10
1250	8
1600	11
2000	13
2500	11
3150	11

8.6.8. Determinação do fator de abrangência

A Tabela 8.11 lista os fatores de abrangência k determinados a partir dos valores obtidos de v_{ef} e da distribuição t de *Student* para a probabilidade de abrangência de 95%.

Tabela 8.11 - Fatores de abrangência.

Frequência [Hz]	k função de transferência
100	2,26
125	2,23
160	2,45
200	2,31
250	2,36
315	2,31
400	2,26
500	2,14
630	2,16
800	2,23
1000	2,23
1250	2,31
1600	2,20
2000	2,16
2500	2,20
3150	2,20

8.6.9. Estimativa da incerteza expandida

A Tabela 8.12 lista as incertezas expandidas em função da frequência obtidas por:

$$U(D_{ls,2m,nT}) = k \cdot u_c(D_{ls,2m,nT}) \quad (8.16)$$

e a última linha da tabela mostra os índices ponderados e os coeficientes de adaptação de espectro.

Tabela 8.12 - Incertezas expandidas de $D_{ls,2m,nT}$.

Frequência [Hz]	$U(D_{ls,2m,nT})$ função de transferência [dB]
100	2,3
125	2,3
160	3,5
200	2,7
250	3,4
315	2,6
400	1,9
500	1,4
630	1,5
800	1,8
1000	1,8
1250	2,2
1600	1,5
2000	1,3
2500	1,5
3150	1,5
$U_w(D_{ls,2m,nT})$	2 (0; 0)

A Figura 8.5 apresenta as estimativas das incertezas expandidas para os locais de medição 2, 3 e 4, em função da frequência, e seus valores únicos estão na Tabela 8.13. Nas baixas frequências, os valores da incerteza expandida são maiores, como esperado, devido aos maiores valores dos desvios-padrão nessas frequências.

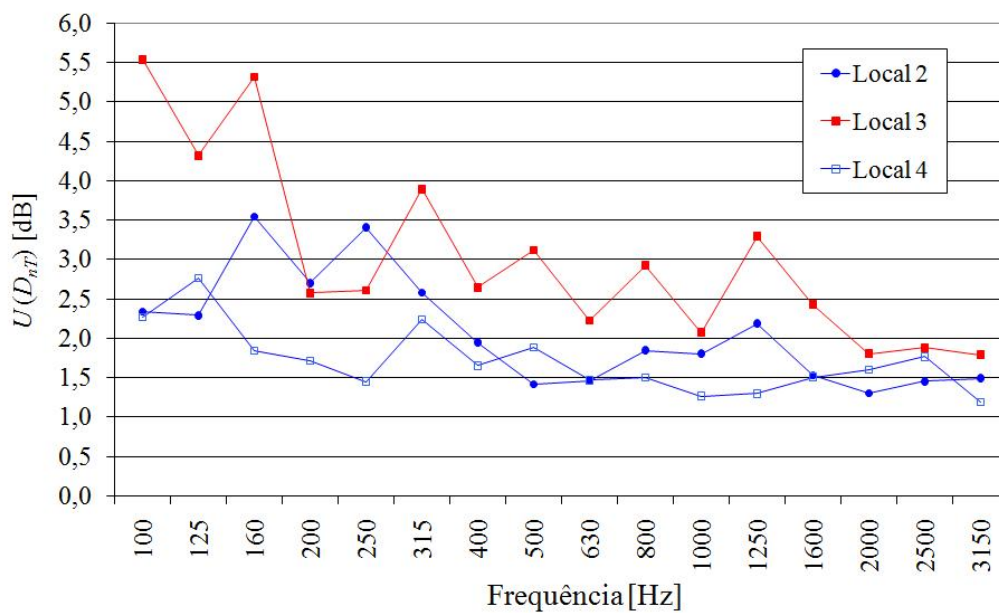


Figura 8.5 - Incertezas expandidas de $D_{ls,2m,nT}$ para três locais de teste.

Tabela 8.13 - Valores ponderados das incertezas expandidas de $D_{ls,2m,nT}$, $U_w(D_{ls,2m,nT})$, em dB, para três locais de teste.

Local 2	Local 3	Local 4
2 (0; 0)	3 (-1; 0)	2 (-1; 0)

A Tabela 8.14 fornece um balanço de incerteza para as medições realizadas no local 2 através do método da função de transferência, com valores informados para a banda de terço de oitava centrada em 500 Hz.

Tabela 8.14 - Balanço de incerteza para o método da função de transferência na banda de terço de oitava de 500 Hz.

grandezas de entrada x_i	valor estimado de x_i	fontes de incerteza	valor estimado das fontes de incerteza	incerteza-padrão das fontes de incerteza	distribuição de probabilidade das fontes de incerteza	tipo de avaliação da incerteza	estimativa da incerteza-padrão das fontes de entrada	incerteza-padrão relativa às grandezas de entrada $u(x_i)$	estimativa da incerteza-padrão $u(x_i)$	coeficiente de sensibilidade	componente de incerteza
$H_{1,2m}$	-22,07 dB	$H_{1,2m \text{ med.}}$	-22,07 dB	$u(H_{1,2m \text{ med.}})$	normal	A	0,066 dB	$u(H_{1,2m})$	0,297 dB	1	0,297 dB
		$\delta H_{1,2m \text{ cj. med}}$	0 dB	$u(\delta H_{1,2m \text{ cj. med}})$	retangular	B	0,289 dB				
		$\delta H_{1,2m \text{ arred.}}$	0 dB	$u(\delta H_{1,2m \text{ arred.}})$	retangular	B	0,029 dB				
H_2	-38,20 dB	$H_2 \text{ med.}$	-38,20 dB	$u(H_2 \text{ med.})$	normal	A	0,344 dB	$u(H_2)$	0,450 dB	1	0,450 dB
		$\delta H_2 \text{ cj. med}$	0 dB	$u(\delta H_2 \text{ cj. med})$	retangular	B	0,289 dB				
		$\delta H_2 \text{ arred.}$	0 dB	$u(\delta H_2 \text{ arred.})$	retangular	B	0,029 dB				
T	1,17 s	$T_{\text{med.}}$	1,17 s	$u(T_{\text{med.}})$	normal	A	0,018 s	$u(T)$	0,034 s	11,200	0,383 s
		$\delta T_{\text{arred.}}$	0 s	$u(\delta T_{\text{arred.}})$	retangular	B	0,029 s				
$D_{ls,2m,nT}$	15,03 dB									$u_c(D_{ls,2m,nT}) = 0,661 \text{ dB}$	
										$\nu_{ef} = 14$	$k_{95\%} = 2,14$
										$U(D_{ls,2m,nT}) = 1,42 \text{ dB}$	

8.7 Estimativa da incerteza de medição de $D_{ls,2m,nT}$ pela “lei de propagação da distribuição”

O método de simulação de Monte Carlo foi aplicado para a avaliação da incerteza de medição de $D_{ls,2m,nT}$ com as etapas listadas abaixo, sendo as três primeiras iguais às do método de propagação de incertezas:

- 1) Definição do mensurando
- 2) Elaboração do diagrama causa-efeito
- 3) Estimativas das incertezas das grandezas de entrada
- 4) Atribuição de funções densidade de probabilidade para cada fonte de incerteza, conforme a Tabela 8.15, para uma probabilidade de abrangência de 95%.

Tabela 8.15 - Distribuições de probabilidade atribuídas às fontes de incerteza das grandezas de entrada para os métodos clássico e da função de transferência.

grandezas de entrada x_i	fonte de incerteza	incerteza-padrão da fonte de incerteza	distribuição de probabilidade da fonte de incerteza
$L_{1,2m}$ ou $H_{1,2m}$	repetitividade	$u(L_{1,2m \text{ med.}})$ ou $u(H_{1,2m \text{ med.}})$	<i>normal</i>
	conjunto de medição	$u(\delta L_{1,2m \text{ cj. med.}})$ ou $u(\delta H_{1,2m \text{ cj. med.}})$	<i>retangular</i>
	arredondamento	$u(\delta L_{1,2m \text{ arred.}})$ ou $u(\delta H_{1,2m \text{ arred.}})$	<i>retangular</i>
L_2 ou H_2	repetitividade	$u(L_2 \text{ med.})$ ou $u(H_2 \text{ med.})$	<i>normal</i>
	conjunto de medição	$u(\delta L_2 \text{ cj. med.})$ ou $u(\delta H_2 \text{ cj. med.})$	<i>retangular</i>
	arredondamento	$u(\delta L_2 \text{ arred.})$ ou $u(\delta H_2 \text{ arred.})$	<i>retangular</i>
T	repetitividade	$u(T_{\text{med.}})$	<i>normal</i>
	arredondamento	$u(\delta T_{\text{arred.}})$	<i>retangular</i>

- 5) Seleção do número M de iterações de Monte Carlo ($M = 10.000$) e M simulações.
- 6) Cálculo dos M resultados e obtenção da função densidade de probabilidade da grandeza de saída
- 7) Estimativa da incerteza expandida, a partir da distribuição de probabilidade da grandeza de saída. Os valores da incerteza expandida são apresentados na Tabela 8.16 para as medições realizadas no local de teste 2, em função da frequência, e seus índices ponderados estão na última linha.

Tabela 8.16 - Incertezas expandidas de $D_{ls,2m,nT}$ estimadas pelo Método de Monte Carlo.

Frequência [Hz]	$U(D_{ls,2m,nT})_{função\ de\ transferência}$ [dB]
100	2,2
125	2,2
160	3,0
200	2,5
250	3,1
315	2,4
400	1,9
500	1,4
630	1,5
800	1,8
1000	1,8
1250	2,0
1600	1,5
2000	1,3
2500	1,4
3150	1,5
$U_w(D_{ls,2m,nT})$	2 (0; 0)

A Figura 8.6 mostra as incertezas expandidas estimadas pelo Método de Monte Carlo para as medições realizadas nos locais de teste 2, 3 e 4. A Tabela 8.17 lista os valores ponderados.

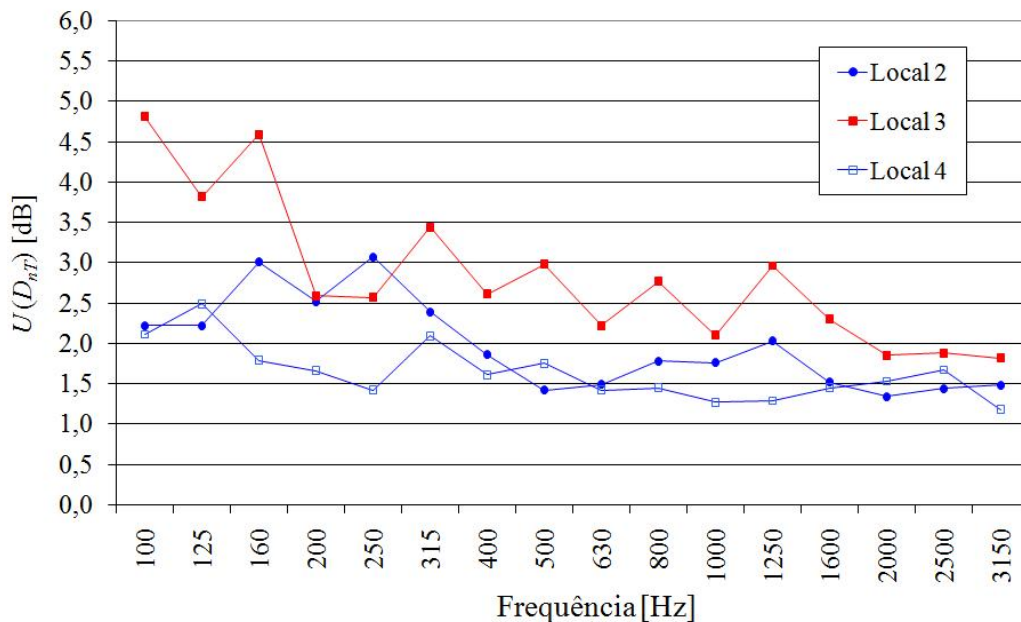


Figura 8.6 - Incertezas expandidas de $D_{ls,2m,nT}$ estimadas pelo Método de Monte Carlo em função da frequência para três locais de teste.

Tabela 8.17 - Valores ponderados das incertezas expandidas de $D_{ls,2m,nT}$, $U_w(D_{ls,2m,nT})$, em dB, estimadas pelo Método de Monte Carlo, para três locais de teste.

Local 2	Local 3	Local 4
2 (0; 0)	3 (-1; 0)	2 (-1; 0)

Comparando as incertezas expandidas obtidas pelos dois procedimentos diferentes, propagação de incertezas e simulação de Monte Carlo, observou-se que os valores são praticamente os mesmos, com diferenças menores que 0,2 dB entre os dois. Nota-se também que os valores ponderados das incertezas expandidas obtidas com as duas metodologias propostas são idênticos (ver Tabelas 8.13 e 8.17).

Após a estimativa das incertezas para os dois tipos de medições de isolamento sonoro aéreo realizadas (entre salas e de fachadas), é possível observar que as incertezas expandidas estão em torno de 2 dB e algum valor de incerteza ou tolerância aos valores estabelecidos de desempenho deveria ser considerado nas normas de edificações ABNT NBR 15575 [4].

Diante dos resultados avaliados, sugere-se o valor de 2 dB como aceitável para incertezas relativas a medições tanto de $D_{nT,w}$ como de $D_{2m,nT,w}$.

CAPÍTULO 9

CONCLUSÕES

Diante do conjunto de normas brasileiras de desempenho de edifícios de até cinco pavimentos, ABNT NBR 15575 [4], que passa a ser válido a partir de março de 2012, surge uma demanda por medições de isolamento sonoro em campo. Estas serão realizadas por diferentes profissionais e seus resultados serão comparados não somente com os valores dos níveis de desempenho acústico mínimo, intermediário e superior estabelecidos nas normas como também com resultados obtidos por outros profissionais. Para que seja possível uma comparação entre resultados de medições, estes devem ser expressos com suas respectivas incertezas, apesar de ainda não ser prática comum em acústica, e principalmente em acústica de edificações.

Como notado anteriormente, a estimativa da incerteza não é um procedimento simples: além da dificuldade de identificar todas as fontes de incerteza relativas ao mensurando, uma metodologia para evidenciar a confiança metrológica dos resultados deve ser aplicada antes de estimar a incerteza.

A presente pesquisa consistiu em estabelecer uma metodologia para a estimativa da incerteza dos resultados de conjuntos de medições independentes de isolamento sonoro aéreo em campo entre salas e de fachadas.

9.1 Medições de isolamento sonoro aéreo entre salas e de fachadas

A primeira etapa do trabalho se refere às medições iniciais para testar duas técnicas de medições acústicas de isolamento sonoro aéreo entre salas em campo, onde as condições são mais difíceis de serem controladas do que em laboratório: o método clássico, amplamente utilizado de acordo com a ISO 140-4 [15] e o método da função de transferência, um método mais novo e menos utilizado, conforme a ISO 18233 [7].

Em seguida, vários conjuntos de medições foram realizados sob condições de repetitividade em cinco ambientes de testes diferentes de forma a fornecer dados para a

análise estatística. As medições foram apresentadas no Capítulo 6. Foram então aplicados os conceitos e testes estatísticos descritos no Capítulo 4 aos resultados das séries de medições de isolamento sonoro aéreo realizadas, a fim de evidenciar a confiabilidade metrológica das medições, para então estimar sua incerteza.

Após as medições e validação dos resultados, foram aplicados os conceitos da ISO 140-2 [13] descritos no Capítulo 5 para verificar os valores de repetitividade obtidos. Esses valores foram considerados adequados, com exceção dos obtidos para o método clássico nas frequências mais altas.

A etapa seguinte foi estimar as incertezas dos conjuntos de medições através de dois procedimentos diferentes: propagação de incertezas, com o método do GUM (ISO/IEC GUIDE 98 [11]), e propagação de distribuições, com o método de simulação de Monte Carlo (Suplemento 1 do ISO/IEC GUIDE 98 [14]).

O parâmetro de isolamento sonoro entre salas cuja incerteza foi estimada foi a diferença padronizada de nível entre dois cômodos, D_{nT} , apresentada no Capítulo 6, nas Figuras 6.26 e 6.29 a 6.33, para os cinco ambientes. Foram consideradas medições com o método clássico entre salas adjacentes no local 1 e medições com o método da função de transferência, no mesmo local e em outros quatro ambientes. As diferenças padronizadas de nível ponderadas, $D_{nT,w}$, e seus coeficientes de adaptação de espectro foram determinados de acordo com o procedimento descrito na ISO 717-1 [9] e estão listados na segunda coluna da Tabela 9.1. Os valores obtidos foram tratados estatisticamente e verificou-se a confiabilidade das medições.

O isolamento sonoro no local 1 foi o maior medido, mas seu valor obtido pelo método da função de transferência (39 dB) não atende ao nível de desempenho acústico mínimo estabelecido na parte 4 da norma brasileira de desempenho de edificações, ABNT NBR 15575-4 [32], que é de 40 a 44 dB para $D_{nT,w}$ para ensaio em campo de paredes entre unidades habitacionais autônomas. Já o valor obtido pelo método clássico no local 1 (40 dB) corresponde ao nível de desempenho mínimo. Os resultados das medições de isolamento sonoro dos outros locais apresentam valores ainda menores que os do local 1, estando todos abaixo do nível de desempenho mínimo estabelecido. Entretanto, essa comparação direta entre os valores medidos e os estabelecidos não é confiável metrologicamente se a incerteza dos resultados medidos não for informada.

Na estimativa da incerteza, verificou-se que os campos sonoros nas salas emissora e receptora têm influência determinante na incerteza final de medição para toda a faixa

de frequência considerada. Isto é observado pelas variações dos níveis de pressão sonora dentro das salas e seus altos desvios-padrão.

Os valores únicos das incertezas expandidas das diferenças padronizadas de nível, $U_w (D_{nT})$, estimados tanto pelo método descrito no GUM [11] como pelo método de simulação de Monte Carlo [14], também foram determinados de acordo com a norma internacional ISO 717-1. Os resultados foram apresentados nas Tabelas 7.14 e 7.19 e são reproduzidos na Tabela 9.1. O método clássico apresentou a maior incerteza de medição. Os valores ponderados das incertezas expandidas obtidas com as duas metodologias propostas são idênticos, exceto para o local 2.

Tabela 9.1 - $D_{nT,w}$ e $U_w (D_{nT})$, em dB, para os cinco locais de teste.

Local	Método	$D_{nT,w}$ [dB]	$U_w (D_{nT})$ [dB] GUM	$U_w (D_{nT})$ [dB] Monte Carlo
1	clássico	40 (-2; -5)	4 (0; -1)	4 (-1; -1)
1	função de transferência	39 (-1; -5)	1 (0; 0)	1 (0; 0)
2	função de transferência	22 (-1; -3)	3 (-1; -1)	2 (0; 0)
3	função de transferência	26 (-1; -2)	1 (0; 0)	1 (0; 0)
4	função de transferência	26 (0; -1)	2 (0; 0)	2 (0; 0)
5	função de transferência	30 (-1; -3)	2 (-1; -1)	2 (-1; -1)

Também foi medido o isolamento sonoro aéreo global em campo de uma fachada com o método clássico, de acordo com a ISO 140-5 [16], e com o método da função de transferência, usando um alto-falante como fonte sonora, e os resultados foram comparados. Em seguida, aumentou-se o número de medições de isolamento sonoro para três fachadas diferentes, em condições de repetitividade, como feito no caso de isolamento sonoro aéreo entre salas, com o objetivo de estimar sua incerteza de medição e verificar se os resultados também eram satisfatórios, o que foi pela análise.

O parâmetro de isolamento sonoro de fachadas considerado para os resultados e estimativa da incerteza foi a diferença padronizada de nível das fachadas, $D_{ls,2m,nT}$, obtida pelo método global com ruído de alto-falante e apresentada no Capítulo 6, nas Figuras 6.49 e 6.52 a 6.54, para os quatro ambientes de teste.

A mesma análise apresentada para os resultados das medições de isolamento sonoro aéreo entre salas foi aplicada para os resultados das medições de isolamento sonoro aéreo de fachadas, com exceção da precisão das medições de acordo com a parte 2 da norma ISO 140 [13], pois esta não apresenta valores para medições de isolamento sonoro de fachadas.

Foram considerados os resultados obtidos com o método da função de transferência nos locais 2, 3 e 4, utilizando-se os valores das seis medições realizadas nesses locais em condições de repetitividade. No local 1, as medições tiveram que ser interrompidas e não houve quantidade suficiente de repetições para estimar a incerteza das medições. Os valores ponderados de $D_{ls,2m,nT,w}$ e as incertezas expandidas estimadas pelo método do GUM e pelo método de simulação de Monte Carlo foram apresentados nas Tabelas 8.13 e 8.17 e são reproduzidos na Tabela 9.2 abaixo.

Tabela 9.2 - $D_{ls,2m,nT,w}$ e $U_w(D_{ls,2m,nT,w})$, em dB, para os quatro locais de teste.

Local	Método	$D_{ls,2m,nT,w}$ [dB]	$U_w(D_{ls,2m,nT,w})$ [dB] GUM	$U_w(D_{ls,2m,nT,w})$ [dB] Monte Carlo
1	clássico	31 (-1; -2)	-	-
1	função de transferência	31 (-1; -3)	-	-
2	função de transferência	19 (-1; -1)	2 (0; 0)	2 (0; 0)
3	função de transferência	17 (0; -1)	3 (-1; 0)	3 (-1; 0)
4	função de transferência	22 (0; -2)	2 (-1; 0)	2 (-1; 0)

No local 1, os valores obtidos para o isolamento sonoro de fachada são iguais para os dois métodos com uma diferença de 1 dB nos coeficientes de adaptação de espectro de ruído de trânsito, C_{tr} . Os valores recomendados pela ABNT NBR 15575-4 [32] para o nível de desempenho acústico mínimo para $D_{2m,nT,w}$ de vedação externa para ensaio em campo são de 25 a 29 dB e para o nível intermediário, de 30 a 34 dB. Nesse caso, a fachada apresenta desempenho acústico considerado intermediário. Já os locais 2, 3 e 4 não atendem ao nível de desempenho mínimo estabelecido na norma brasileira. Mas a incerteza das medições é necessária para que as comparações sejam confiáveis.

Verificou-se, como no caso anterior, que as variações dos campos sonoros na sala receptora têm influência determinante na incerteza de medição em toda a faixa de frequência considerada.

Nota-se também que os valores ponderados das incertezas expandidas obtidas pelos dois procedimentos, propagação de incertezas e simulação de Monte Carlo, são idênticos.

Deve-se lembrar que o resultado de medições com o método global e ruído de alto-falante não pode ser comparado com o de medições em laboratório. Portanto, um projetista ou consultor deve tomar cuidado ao utilizar dados de elementos construtivos obtidos em laboratórios para projetar o isolamento sonoro global, devendo considerar as possíveis diferenças entre medições em laboratório e em campo.

9.2 Valor de incerteza sugerido para as normas de desempenho brasileiras

Um ponto em aberto na ABNT NBR 15575 [4] é em relação a limites de tolerância ou incertezas nas medições. No projeto de norma [36] enviado à consulta pública havia notas com valores admissíveis de incertezas relativas às medições, mas essas recomendações foram retiradas da versão publicada da norma, que não fornece nenhum valor relativo à incerteza de medição para os parâmetros acústicos considerados nos diferentes critérios de desempenho.

Apesar do emprego de incertezas de medição ainda ser pouco usual e não estar difundido em todas as áreas de conhecimento consideradas na norma de desempenho, valores de incerteza ou limites de tolerância deveriam ser informados na versão publicada da norma.

Após a estimativa das incertezas para os dois tipos de medições de isolamento sonoro aéreo realizadas (entre salas e de fachadas), é possível observar que as incertezas expandidas estão em torno de 2 dB. Sugere-se que este valor seja considerado como a tolerância para os valores de desempenho estabelecidos nas normas de edificações brasileiras, tanto para medições de $D_{nT,w}$ como de $D_{2m,nT,w}$.

9.3 Considerações finais e sugestões para trabalhos futuros

Deve-se notar que os resultados das medições podem ser afetados por vários fatores, como o equipamento utilizado, as posições da fonte e dos microfones, o grau de difusão do campo sonoro nas salas, as dimensões e materiais dos elementos de separação, as dimensões e materiais das salas, e até erros nos ajustes das medições. Portanto, novas fontes de incerteza podem ser consideradas e, dessa maneira, a incerteza-padrão combinada final dos resultados poderá ser maior do que os valores obtidos. Uma observação importante é que os resultados obtidos são para situações específicas de campo em construções específicas; e, portanto, mais investigações poderão ser realizadas em condições diferentes. As influências das condições ambientais, como temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica e velocidade do vento, também podem ser consideradas.

No decorrer da pesquisa, constatou-se ser recomendável uma revisão da norma ISO 140-2 [13], passando a considerar os aspectos tratados nesta pesquisa em relação às

incertezas de medição, ao invés de apenas os valores de repetitividade e de reprodutibilidade até então abordados. Atualmente, a norma já está em processo de revisão pela ISO e espera-se que o presente trabalho possa servir de contribuição para esta revisão.

Outro aspecto que poderia ser considerado nas normas ISO 140 é a utilização de alturas diferentes para diferentes posições dos microfones nas salas, de forma que não fiquem todos no mesmo plano. A viabilidade de se utilizar menos posições de microfones e de fonte sonora ao realizar medições com o método da função de transferência também pode vir a ser investigada.

Sugere-se que futuramente o Laboratório de Ensaios Acústicos do Inmetro e o Laboratório de Acústica e Vibrações da COPPE/UFRJ participem de testes de comparação com medições de isolamento sonoro aéreo em campo a fim de comparar os resultados com os de outros laboratórios. E também que profissionais venham a ser capacitados para realizar medições de isolamento sonoro através de algum órgão competente, como por exemplo, que o profissional seja acreditado pelo Inmetro.

Pode-se concluir que muita atenção deve ser dada ao se avaliar a incerteza de medição e que estudos detalhados são necessários para se estabelecer melhor a estimativa das incertezas em acústica de edificações, especialmente com métodos mais novos e modernos de medição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NBR 10151, *Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimento*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, junho de 2000.
- [2] NBR 10152, *Acústica – Níveis de ruído para conforto acústico*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, dezembro de 1987.
- [3] GERGES, S. N. Y., *Ruído: Fundamentos e Controle*, Segunda Edição, NR Editora, 2000.
- [4] ABNT NBR 15575, *Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho*, parte 1 a 6, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.
- [5] ISO 140, *Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements*, International Organization for Standardization.
- [6] ISO 10052, *Acoustics – Field measurements of airborne and impact sound insulation and of equipment sound - Survey method*, International Organization for Standardization, 2004.
- [7] ISO 18233, *Acoustics – Application of new measurement methods in building and room acoustics*, International Organization for Standardization, 2006.
- [8] ISO 15186, *Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements using sound intensity*, International Organization for Standardization.
- [9] ISO 717-1, *Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements - Part 1: Airborne sound insulation*, International Organization for Standardization, 1996.
- [10] ISO 717-2, *Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of buildings elements - Part 2: Impact sound insulation*, International Organization for Standardization, 1996.
- [11] ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*, 2008.

- [12] *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição*, Terceira Edição Brasileira do *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, Rio de Janeiro: ABNT, INMETRO. Edição Revisada, agosto de 2003.
- [13] ISO 140-2, *Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 2: Determination, verification and application of precision data*, International Organization for Standardization, 1991.
- [14] ISO/IEC Guide 98-3 / Suppl.1, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995) - Supplement 1: Propagation of distribution using the Monte Carlo method*, International Organization for Standardization, 2008.
- [15] ISO 140-4, *Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 4: Field measurements of airborne sound insulation between rooms*, International Organization for Standardization, 1998.
- [16] ISO 140-5, *Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 5: Field measurements of airborne sound insulation of façade elements and façades*, International Organization for Standardization, 1998.
- [17] JCGM 200: 2008, *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*, 2008.
- [18] MASSARANI, P., NABUCO, M., VENEGAS, R., *Level adjustment for multi-channel impulse response measurements in building acoustics*, Proceedings of the 34th Internoise, Rio de Janeiro, 2005.
- [19] VENEGAS, R., NABUCO, M. e MASSARANI, P., *Sound Insulation Evaluation Using Transfer Function Measurements*, Journal of Building Acoustics, Vol. 13, No. 1, pp. 23-31, 2006.
- [20] ISO 354, *Acoustics – Measurements of sound absorption in a reverberation room*, International Organization for Standardization, 2003.
- [21] ANSAY, S., ZANNIN, P., *Determinação dos índices de redução sonora aparente e aparente ponderado – Estudo comparativo entre o método tradicional e o método da intensidade sonora*.
- [22] ISO 140-14, *Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 14: Guidelines for special situations in the field*, International Organization for Standardization, 2004.
- [23] ISO 3382, *Acoustics – Measurement of room acoustic parameters*, International Organization for Standardization.

- [24] MÜLLER, S., MASSARANI, P., *Transfer-Function Measurements with Sweeps*, Journal of Audio Engineering Society, vol. 49 (6), p. 443-471, 2001.
- [25] VENEGAS, R., UNDURRAGA, J., *Evaluación In Situ de Aislación Acústica Mediante Medición de Funciones de Transferência*, Proceedings of V Congreso Iberoamericano de Acústica, Santiago, Chile, 2006.
- [26] VENEGAS, R., NABUCO, M., MASSARANI, P., *Sound insulation evaluation using Transfer Function Measurements*, Proc. 34th Internoise, Rio de Janeiro, 2005.
- [27] SCHROEDER, M. R., *New Method of Measuring Reverberation Time*, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 37, pp 409-412, 1965.
- [28] ISO 717-1: 1996/Amd.1:2006, Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements - Part 1: Airborne sound insulation, AMENDMENT 1: Rounding rules related to single number ratings and single number quantities, International Organization for Standardization, 1996.
- [29] BARRY, P. J., apostila do mini-curso *Desempenho Acústico em Edifícios Habitacionais*, XXII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica (SOBRAC), Belo Horizonte, Minas Gerais, 26 a 29 de novembro de 2008.
- [30] ABNT NBR 15575, *Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho*, Parte 2: Requisitos para sistemas estruturais, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.
- [31] ABNT NBR 15575, *Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho*, Parte 3: Requisitos para sistemas de pisos internos, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.
- [32] ABNT NBR 15575, *Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho*, Parte 4: Requisitos para sistemas de vedações verticais internas e externas, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.
- [33] ABNT NBR 15575, *Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho*, Parte 5: Requisitos para sistemas de coberturas, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.
- [34] ABNT NBR 15575, *Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho*, Parte 6: Requisitos para sistemas hidrossanitários, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.
- [35] ABNT NBR 15575, *Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho*, Parte 1: Requisitos gerais, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.

- [36] ABNT/CB 02 PROJETO 02:136.01-001, *Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho*, Associação Brasileira de Normas Técnicas e Comitê Brasileiro de Construção Civil, 2006.
- [37] ISO 140-3, *Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 3: Laboratory measurements of airborne sound insulation between rooms*, International Organization for Standardization, 1995.
- [38] ISO 140-7, *Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 7: Field measurements of impact sound insulation of floors*, International Organization for Standardization, 2006.
- [39] COUTO, Paulo, *Estimativa da incerteza da massa específica da gasolina pelo ISO GUM 95 e Método de Monte Carlo e seu impacto na transferência de custódia*, Dissertação de Mestrado, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, dezembro de 2006.
- [40] ISO 5725, *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results*, International Organization for Standardization, 1994.
- [41] CIENFUEGOS, Freddy, *Estatística aplicada ao laboratório*, Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2005.
- [42] ISO GUIDE 99: 1993, *International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology (VIM)*, International Organization for Standardization, 1993.
- [43] ISO/IEC Guide 98, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)*, International Organization for Standardization, 1995.
- [44] EURACHEM/CITAC GUIDE CG 4., *Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement, English Edition*, Second Edition, 126p, ISBN 0-948926-15-5, 2000.
- [45] ISO/TC 43 N 1061 corr., *Business Plan ISO/TC 43, Acoustics*, International Organization for Standardization, maio de 2006.
- [46] NASCIMENTO, Ranny L. X.; FERREIRA, Daiana; NABUCO, Marco, *Uncertainties Investigation in Field Measurements of Sound Insulation*, 19th International Congress on Acoustics (19th ICA), Revista de Acústica, vol. 38, 3-4, [ISBN: 84-87985-12-2], Sociedad Española de Acústica, Madrid, Espanha, 2 a 7 de setembro de 2007.
- [47] MICHALSKI, Ranny L. X. N., FERREIRA, Daiana P. F., NABUCO, Marco, MASSARANI, Paulo, *Uncertainty evaluation in field measurements of airborne sound insulation*, Proceedings of Acoustics' 08, [ISBN: 978-2-9521105-4-9 – EAN:

- 9782952110544007-4012], 4007-4012, Paris, França, 29 de junho a 4 de julho de 2008.
- [48] MICHALSKI, Ranny L. X. N., FERREIRA, Daiana P. F., NABUCO, Marco, *Medições de Isolamento Sonoro Aéreo entre Salas – Método Clássico e Método da Resposta Impulsiva*, V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (V CONEM), Salvador, Bahia, 25 a 28 de agosto de 2008.
- [49] MICHALSKI, Ranny L. X. N., FERREIRA, Daiana P.F., NABUCO, Marco, *Incerteza em Medição em Campo de Isolamento Sonoro Aéreo*, XXII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica (SOBRAC), Belo Horizonte, Minas Gerais, 26 a 29 de novembro de 2008.
- [50] MICHALSKI, R. L. X. N., NABUCO, M., RIPPER, G., *Uncertainty investigation of field measurements of airborne sound insulation*, XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology, Lisboa, Portugal, 6 a 11 de setembro de 2009.
- [51] MICHALSKI, R. L. X. N., FERREIRA, D. P. F., NABUCO, M., *O uso do GUM para obtenção da Incerteza em Medição de Isolamento Sonoro Aéreo*, V CONGRESSO BRASILEIRO DE METROLOGIA, Salvador, Bahia, 9 a 13 de novembro de 2009.
- [52] WEISE, W., *Measurement Uncertainties for Sound Field Levels in Rooms*, Journal of Building Acoustics, Vol. 10, No. 4, pp. 281-287, 2003.
- [53] GOYDKE, H., SIEBERT, B.R.L., SCHOLL, W., *Considerations on the evaluation of uncertainty values of building acoustic single-number quantities*, Proceedings of EuroNoise03, CDROM, Nápoles, Itália, 2003.
- [54] ANTUNES, Sónia, *Medição do isolamento sonoro a sons de condução aérea e de percussão. Ensaio de comparação laboratorial*, TecniAcustica, Terrasa, Espanha, 2005.
- [55] ANTUNES, Sónia, *Determinação do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea e de percussão. Análise das fontes de incerteza de medição e determinação da incerteza de medição expandida*, TecniAcustica, Terrasa, Espanha, 2005.
- [56] ANTUNES, Sónia Monteiro, *Uncertainties in building acoustic single number quantities. How apply uncertainty calculation in the scope of the Portuguese regulation*, 19th International Congress on Acoustics (19th ICA), Revista de Acústica, vol. 38, 3-4, [ISBN: 84-87985-12-2], Sociedad Española de Acústica, Madrid, Espanha, 2 a 7 de setembro de 2007.

- [57] SIMMONS, Christian, *Uncertainty of measured and calculated sound insulation in buildings – results of a Round Robin Test*, Proceedings of the Symposium Managing Uncertainty in Noise Measurement and Prediction, INCE-EUROPE, Le Mans, França, 27 a 29 de junho de 2005.
- [58] SIMMONS, Christian, *Uncertainty of measured and calculated sound insulation in buildings – Results of a Round Robin Test*, Proceedings of Forum Acusticum 2005, 2341-2346, Budapeste, Hungria, 2005.
- [59] GERRETSEN, Eddy, *Interpretation of uncertainties in acoustic measurements in buildings*, Proceedings of the Symposium Managing Uncertainty in Noise Measurement and Prediction, INCE-EUROPE, Le Mans, França, 27 a 29 de junho de 2005.
- [60] WITTSTOCK, Volker, *Uncertainties in building acoustics*, Proceedings of Forum Acusticum 2005, Budapest, 2005.
- [61] IZEWSKA, A., CZYZEWSKI, K., *Measurement Uncertainty of Sound Insulation and Sound Absorption*, 19th International Congress on Acoustics (19th ICA), Revista de Acústica, vol. 38, 3-4, [ISBN: 84-87985-12-2], Sociedad Española de Acústica Madrid, Espanha, 2 a 7 de setembro de 2007.
- [62] CID, J. Castillo, SEOANE, M. A. Sobreira, *Uncertainty evaluation for airborne noise acoustic insulation measurements*, 19th International Congress on Acoustics (19th ICA), Revista de Acústica, vol. 38, 3-4, [ISBN: 84-87985-12-2], Sociedad Española de Acústica, Madrid, Espanha, 2 a 7 de setembro de 2007.
- [63] INGO B. W., PASCAL, D., *Assessment of the uncertainty in room acoustical measurements*, 19th International Congress on Acoustics (19th ICA), Revista de Acústica, vol. 38, 3-4, [ISBN: 84-87985-12-2], Sociedad Española de Acústica Madrid, Espanha, 2 a 7 de setembro de 2007.
- [64] ALBA, J., RAMIS, J., ESCUDER, E. e BERTO, L., *Technical Note: Airborne Sound Insulation of Hollow Brickwork*, Journal of Building Acoustics, Vol. 14, No. 3, pp. 231-267, 2007.
- [65] WITTSTOCK, V., *On the Uncertainty of Single-Number Quantities for Rating Airborne Sound Insulation*, Acta Acustica united with Acustica 93, 375-386, 2007.
- [66] REHFELD, M., *Handling of uncertainties for CE marking concerning Sound Transmission Loss of glazings*, Proceedings of Acoustics' 08, [ISBN: 978-2-9521105-4-9 – EAN: 9782952110544007-4012], 4013-4018, Paris, França, 29 de junho a 4 de julho de 2008.

- [67] WSZOLEK, T., *Uncertainty of airborne sound insulation index measurement in laboratory conditions*, Proceedings of Acoustics' 08, [ISBN: 978-2-9521105-4-9 – EAN: 9782952110544007-4012], 4483-4487, Paris, França, 29 de junho a 4 de julho de 2008.
- [68] IZEWSKA, A., *Measurement uncertainty of the sound absorption coefficient*, Proceedings of Acoustics' 08, [ISBN: 978-2-9521105-4-9 – EAN: 9782952110544007-4012], 3977-3981, Paris, França, 29 de junho a 4 de julho de 2008.
- [69] WITHFIELD, W. A., GIBBS, B. M., *Causes of variation in field measurement of airborne sound insulation*, Proceedings of Internoise 2010, Lisboa, Portugal, 13 a 16 de junho de 2010.
- [70] WITHFIELD, W. A., GIBBS, B. M., *Methods of quantifying uncertainty in field measurement of airborne sound insulation*, Proceedings of the 17th International Congress on Sound and Vibration (ICSV 17), Cairo, Egito, 18 a 22 de julho de 2010.
- [71] SEDDEQ, H. S., *Evaluated uncertainties for measurements of airborne sound attenuation between rooms in buildings*, Proceedings of the 17th International Congress on Sound and Vibration (ICSV 17), Cairo, Egito, 18 a 22 de julho de 2010.
- [72] BERARDI, U.; CIRILLO, E.; MARTELLOTTA, F., *Measuring Sound Insulation of Building Façades: Interference Effects and Reproducibility*, Proceedings of Internoise 2010, Lisboa, Portugal, 13 a 16 de junho de 2010.
- [73] MONTGOMERY, Douglas C. e RUNGER, George C., *Applied Statistics and Probability for Engineers*, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [74] DECOURSEY, W.J., *Statistics and Probability for Engineering Applications with Microsoft® Excel*, Newness, Elsevier Science, 2003.
- [75] COSTA, S. F., *Introdução Ilustrada à Estatística*, Editora Harbra, Quarta Edição.
- [76] SPIEGEL, Murray Ralph, *Estatística*, Coleção Schaum, Editora McGraw-Hill do Brasil.
- [77] SHAPIRO, S.S.; WILK, M .B., *An Analysis of Variance Test for Normality*, *Biometrika*, 52, 1965, 591-611, 1965.
- [78] NATRELA, M.G., *Experimental Statistics*, National Bureau of Standards Handbook 91, 1963.

- [79] MASSART, D.L.; VANDEGINSTE, B. M. G.; BUYDENS, L. M. C.; JONG, S.; LEWI, P. J.; SMEYERS-VERBEKE, J., *Handbook of Chemometrics and Qualimetrics*, Part A, Volume 20A, Elsevier Science B.V., 1997.
- [80] OLIVEIRA, E. C., *Comparação das diferentes técnicas para a exclusão de “outliers”*, ENQUALAB 2008, São Paulo, 09 a 12 de junho de 2008.
- [81] HOLMAN, J. P., *Experimental methods for engineers*, 7th edition, McGraw-Hill Book, Nova York, Estados Unidos, 2001.
- [82] MOSCATI, Giorgio *et al*, *Incerteza de medição pelo método de Monte Carlo, no contexto do “Suplemento 1” do GUM*, ENQUALAB 2004, São Paulo, 1 a 3 de junho de 2004.
- [83] COX, M. G.; HARRIS, P. M., *Measurement Uncertainty and the Propagation of Distributions*, 10th International Metrology Congress, Saint-Louis, França, 22 a 25 de outubro de 2001.
- [84] SOUSA, J. A. e RIBEIRO A. S., *Vantagens da Utilização do Método de Monte Carlo na Avaliação das Incertezas de Medição*, 2^o Encontro Nacional da Sociedade Portuguesa de Metrologia, Lisboa, Portugal, 17 de Novembro de 2006.
- [85] RIBEIRO A. S., *Método de Monte Carlo: abordagem alternativa ao GUM?*, 2^o Encontro Nacional da Sociedade Portuguesa de Metrologia, Lisboa, Portugal, 17 de novembro de 2006.
- [86] ISO 15712, *Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements*, International Organization for Standardization, 2005.
- [87] <http://www.oracle.com/crystalball/index.html>

APÊNDICE A

ISOLAMENTO DE RUÍDO DE IMPACTO EM PISO DE ACORDO COM A NORMA ABNT NBR 15575

A.1. Métodos de avaliação

O método de avaliação de ruído de impacto em piso considera medições executadas em todos os entrespisos, com portas e janelas fechadas, e permite optar por um dos métodos a seguir para determinar os valores de nível de pressão sonora de impacto padronizado, L'_{nT} :

1) método de engenharia realizado em campo, conforme a ISO 140-7 [38], que prevê a obtenção de valores em bandas de terço de oitava entre 100 Hz e 3150 Hz ou em bandas de oitava entre 125 Hz e 2000 Hz. Esse método determina, de forma rigorosa, o isolamento de ruído de impacto global entre ambientes, caracterizando diretamente o comportamento acústico do sistema, e seu resultado se restringe somente a esse sistema.

2) método simplificado realizado em campo, conforme a ISO 10052 [6], obtendo-se valores em bandas de oitava entre 125 Hz e 2000 Hz. Esse método permite obter uma estimativa do isolamento de ruído de impacto em campo em situações onde não se dispõe de instrumentação necessária para medir o tempo de reverberação ou quando as condições de ruído de fundo não permitem obter esse parâmetro.

A escolha do método deve ser feita levando-se em conta as necessidades e características de cada um. O procedimento descrito na ISO 717-2 [10] é utilizado para determinar o valor do nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado entre os ambientes, $L'_{nT,w}$, a partir do conjunto de valores de nível de pressão sonora de impacto padronizado, L'_{nT} .

A.2. Critério de desempenho - Ruído de impacto aéreo para ensaio de campo

A ABNT NBR 15575-3 [31] fornece a Tabela A.1 com os valores para os níveis de desempenho do nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado proporcionado pelo entrespiso entre os ambientes, $L'_{nT,w}$, medidos em campo, onde o

valor mínimo exigido corresponde a valores representativos de ensaios realizados em pisos de concreto maciço, com espessura de 10 cm a 12 cm, sem acabamento.

Tabela A.1 - $L'_{nT,w}$ para ensaio em campo [31].

Elemento	$L'_{nT,w}$ [dB]	Nível de desempenho
Laje, ou outro elemento portante, com ou sem contrapiso, sem tratamento acústico	< 80	<i>M</i>
Laje, ou outro elemento portante, com ou sem contrapiso, com tratamento acústico	55 a 65	<i>I</i>
	< 55	<i>S</i>

A.3. Critério de desempenho - Isolação de ruídos de impactos em coberturas acessíveis de uso coletivo

A Tabela A.2, com valores de níveis de desempenho para o nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado para coberturas de uso coletivo, $L'_{nT,w}$, para ensaio em campo, é fornecida na ABNT NBR 15575-5 [33].

Tabela A.2 - $L'_{nT,w}$ para ensaio em campo [33].

Elemento (Sistema)	$L'_{nT,w}$ [dB]	Nível de desempenho
Cobertura acessível, de uso coletivo	56 a 65	<i>M</i>
	46 a 55	<i>I</i>
	≤ 45	<i>S</i>

A.4. Valores de isolamento estabelecidos por outros países

A Tabela A.13 apresenta exemplos de critérios de alguns países para o isolamento sonoro de ruído de impacto em pisos.

Tabela A.3 - Critérios internacionais para o nível de ruído de impacto em pisos [29].

País	Tipo de regulamentação	Critério máximo de ruído de impacto
África do Sul	Regulamentação específica	–
Alemanha	Norma DIN 4109	$L'_{n,w} = 53$ dB
Argentina	Norma IRAM 4044	–
Austrália	Código de edificação	$L'_{nT,w} + C_i = 62$ dB
Canadá	Código de edificação	$FIIC = 55$ dB
Estados Unidos	Diversas regulamentações	$IIC = 50$ dB ou $FIIC = 45$ dB
França	Regulamentação específica	$L'_{nT,w} = 58$ dB
Holanda	Norma NEN 1070	$L'_{nT,w} + C_i = 48$ a 53 dB
Itália	Regulamentação específica	$L'_{n,w} = 63$ dB
Noruega	Norma NS 8175	$L'_{n,w} = 53$ dB
Nova Zelândia	Código de edificação	$L'_{nT,w} + C_i = 55$ dB
Portugal	Regulamentação específica	$L'_{n,w} = 60$ dB
Reino Unido	Regulamentação específica	$L'_{nT,w} = 62$ dB

APÊNDICE B

DEFINIÇÕES E CONSIDERAÇÕES DE ACORDO COM O VIM E COM O GUM

B.1. Definições de alguns termos de metrologia

Grandeza (*quantity*) – A última edição do VIM [17] define grandeza como uma “propriedade de um fenômeno, de um corpo ou de uma substância, que pode ser expressa quantitativamente sob a forma de um número e de uma referência”. O conjunto formado por um número e por uma referência, que constitui a expressão quantitativa de uma grandeza, é denominado ‘valor de uma grandeza’.

Já a última edição do GUM [11] define grandeza como uma “propriedade de um fenômeno, de um corpo ou de uma substância, que pode ser distinguida qualitativamente e determinada quantitativamente”.

A tendência é que essas diferenças entre as definições dadas no VIM e no GUM sejam minimizadas nas próximas revisões desses documentos. As Figuras B.1 e B.2 apresentam esquemas que relacionam alguns conceitos definidos nesse apêndice.

Mensurando – “Grandeza que se pretende medir” ou “grandeza específica submetida à medição”, ou seja, equivale ao objeto da medição.

Modelo de medição – “Relação matemática entre todas as grandezas que, sabidamente, estão envolvidas numa medição”.

Grandeza de entrada (num modelo de medição) – Grandeza que deve ser medida, ou grandeza cujo valor pode ser obtido de outro modo, para calcular um valor medido de um mensurando.

Grandeza de saída (num modelo de medição) – Grandeza cujo valor medido é calculado utilizando-se os valores das grandezas de entrada num modelo de medição.

Função de medição – “Função de grandezas cujo valor, quando calculado a partir de valores conhecidos das grandezas de entrada no modelo de medição, é um valor medido da grandeza de saída no modelo de medição.”

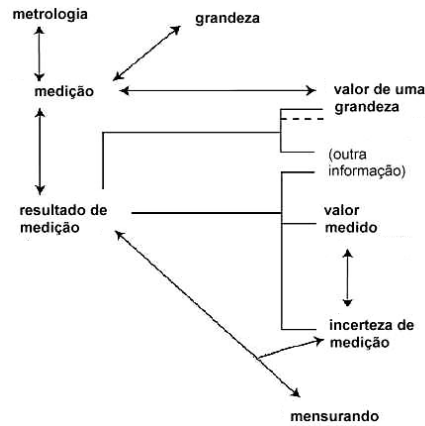


Figura B.1 - Esquema com alguns dos termos definidos [17].

Grandeza de influência – A última edição do VIM [17] define grandeza de influência como a “grandeza que, numa medição direta, não afeta a grandeza efetivamente medida (mensurando), mas afeta a relação entre a indicação e o resultado de medição”. Por exemplo, a temperatura de um micrômetro usado na medição do comprimento de uma haste, mas não a temperatura da própria haste que pode fazer parte da definição do mensurando.

No GUM [11], o conceito é o mesmo da penúltima edição do VIM [42]: “grandeza que não é o mensurando, mas que afeta o resultado da medição”, ou seja, o conceito não está limitado a medições diretas e considera além das grandezas que afetam o sistema de medição, aquelas que afetam as grandezas efetivamente medidas.

Valor verdadeiro (de uma grandeza) – “Valor de uma grandeza compatível com a definição da grandeza”. É um valor que seria obtido por uma medição perfeita; portanto, é desconhecido na prática; com exceção do caso particular de uma constante fundamental, para a qual se considera que a grandeza possui um valor verdadeiro único.

Valor convencional (de uma grandeza) – “Valor atribuído a uma grandeza por um acordo, para um dado propósito”. Por exemplo, o valor convencional da aceleração da

gravidade, $g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2$. Considera-se que um valor convencional está associado a uma incerteza de medição convenientemente baixa, que pode ser nula.

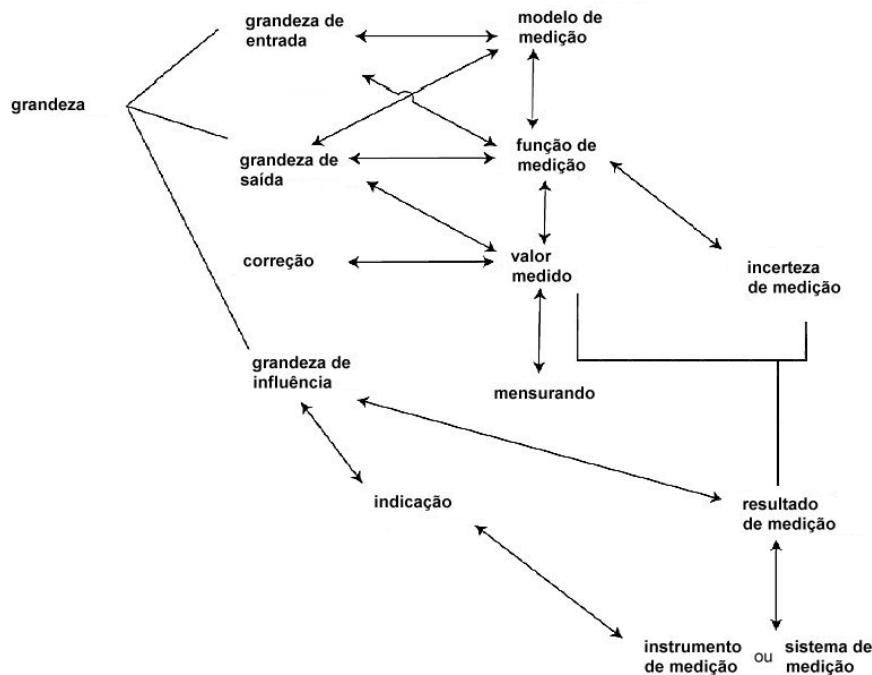


Figura B.2 - Esquema com o conceito de grandeza e outros [17].

Resultado de medição – “Conjunto de valores atribuídos a um mensurando, completado por todas as outras informações pertinentes disponíveis” [17]. Como é impossível conhecer o valor verdadeiro de um mensurando, uma expressão completa do resultado de uma medição deve incluir sempre informações sobre a sua incerteza de medição, ou seja, um resultado de medição é expresso por um único valor medido e uma incerteza de medição.

No GUM [11] e na penúltima edição do VIM [42], resultado de medição era definido como um “valor atribuído a um mensurando, obtido por medição, que poderia ser representado por uma indicação, ou um resultado não corrigido, ou um resultado corrigido, de acordo com o contexto”. No GUM, os termos ‘resultado de medição’ e ‘estimativa do valor do mensurando’ ou apenas ‘estimativa do mensurando’ são utilizados para ‘valor medido’ e o resultado de medição corresponde à melhor estimativa do valor do mensurando, que só é completa quando acompanhada pela declaração da incerteza dessa estimativa.

Erro de medição – “Diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência”, segundo o VIM [17], que considera que o conceito de ‘erro de medição’ pode ser utilizado quando existe um único valor de referência ou caso se suponha que um mensurando é representado por um único valor verdadeiro ou por um conjunto de valores verdadeiros de amplitude desprezível. No primeiro caso, se existir um único valor de referência, o erro de medição é conhecido e pode ocorrer se uma calibração for realizada por meio de um padrão que tenha incerteza de medição desprezível ou se um valor convencional for fornecido. No segundo caso, se o mensurando é representado por um único valor verdadeiro ou por um conjunto de valores verdadeiros de amplitude desprezível, como existe a impossibilidade do conhecimento do valor verdadeiro, o erro de medição é desconhecido”. Esse é o caso do GUM [11], que define erro como o “resultado de uma medição menos o valor verdadeiro do mensurando”.

Conforme o VIM [17], o objetivo da medição na Abordagem de Erro (ou Abordagem Tradicional) é determinar uma estimativa do valor verdadeiro que esteja tão próxima quanto possível desse valor verdadeiro único. O desvio do valor verdadeiro, ou o erro, é composto de erros aleatórios e sistemáticos, como ilustrado na Figura B.3. Os dois tipos de erros, supostos como sendo sempre distinguíveis, devem ser tratados de maneira diferente e nenhuma regra pode ser estabelecida quanto à combinação dos dois para se chegar ao erro total de um resultado de medição.

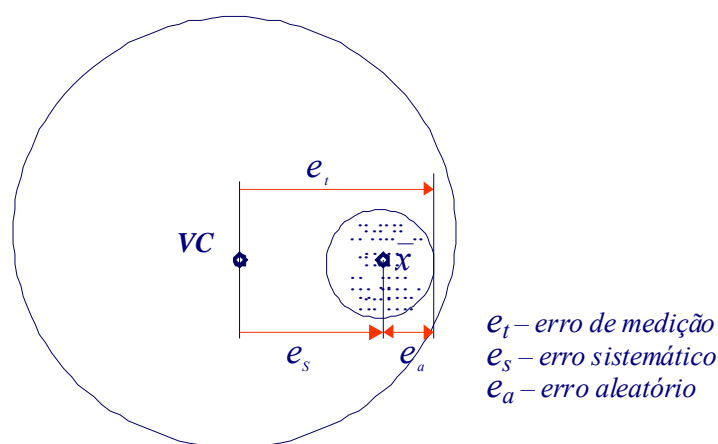


Figura B.3 - Desenho esquemático de um resultado de medição, com a representação do erro de medição (e_t), erro sistemático (e_s) e erro aleatório (e_a) [39].

Erro sistemático – “Componente do erro de medição que, em medições repetidas, permanece constante ou varia de maneira previsível” [17]. O erro sistemático, assim

como o erro aleatório, não pode ser eliminado, mas pode geralmente ser reduzido e suas causas podem ser conhecidas ou não.

Se o erro sistemático se origina de um efeito reconhecido de uma grandeza de influência no resultado de medição, seu efeito pode ser quantificado e pode ser aplicada uma correção ou fator de correção para compensar esse efeito sistemático conhecido, conforme ilustrado na Figura B.4. Entretanto, como o erro sistemático não pode ser perfeitamente conhecido, a compensação pode não ser perfeita ou completa [43].

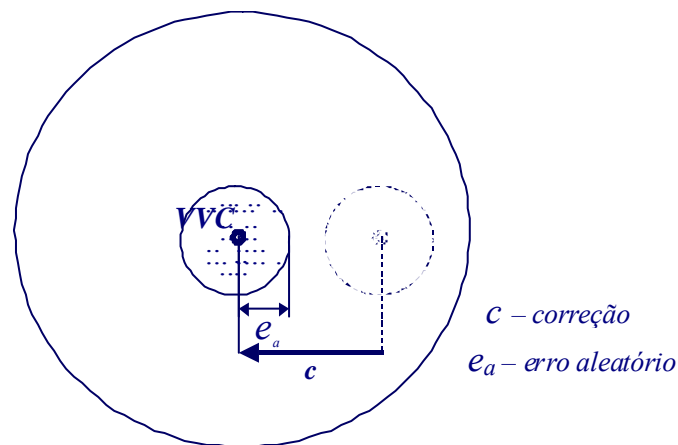


Figura B.4 - Desenho esquemático representando a obtenção do resultado de medição corrigido [39].

Tendência (*measurement bias*) – Estimativa de um erro sistemático.

Erro aleatório – “Componente do erro de medição que, em medições repetidas, varia de maneira imprevisível” [17].

É igual à diferença entre o erro de medição e o erro sistemático.

Os erros aleatórios se originam de variações imprevisíveis de grandezas de influência e seus efeitos levam a variações em medições repetidas do mensurando. Apesar de não poder ser compensado, pode geralmente ser reduzido aumentando-se o número de medições e sendo avaliado por uma medida de dispersão. Ainda assim, ele sempre permanecerá.

Exatidão de medição (*measurement accuracy*) – “Grau de concordância entre um valor medido (resultado de uma medição) e um valor verdadeiro de um mensurando”. A definição é a mesma nas últimas edições do VIM [17] e do GUM [11]. Exatidão de

medição é um conceito qualitativo, não é uma grandeza e não lhe é atribuído um valor numérico. Uma medição é dita mais exata quando é caracterizada por um erro de medição menor.

O termo ‘exatidão de medição’ não deve ser usado no lugar de ‘veracidade’ e vice-versa, assim como o termo ‘precisão de medição’ não deve ser usado para expressar ‘exatidão de medição’, o qual, entretanto, está relacionado a ambos os conceitos. A ISO 5725 [40] de 1994, por exemplo, usa o termo geral ‘exatidão’ para se referir tanto à ‘veracidade’ quanto à ‘precisão’. A Figura B.5 mostra um esquema com esses conceitos.

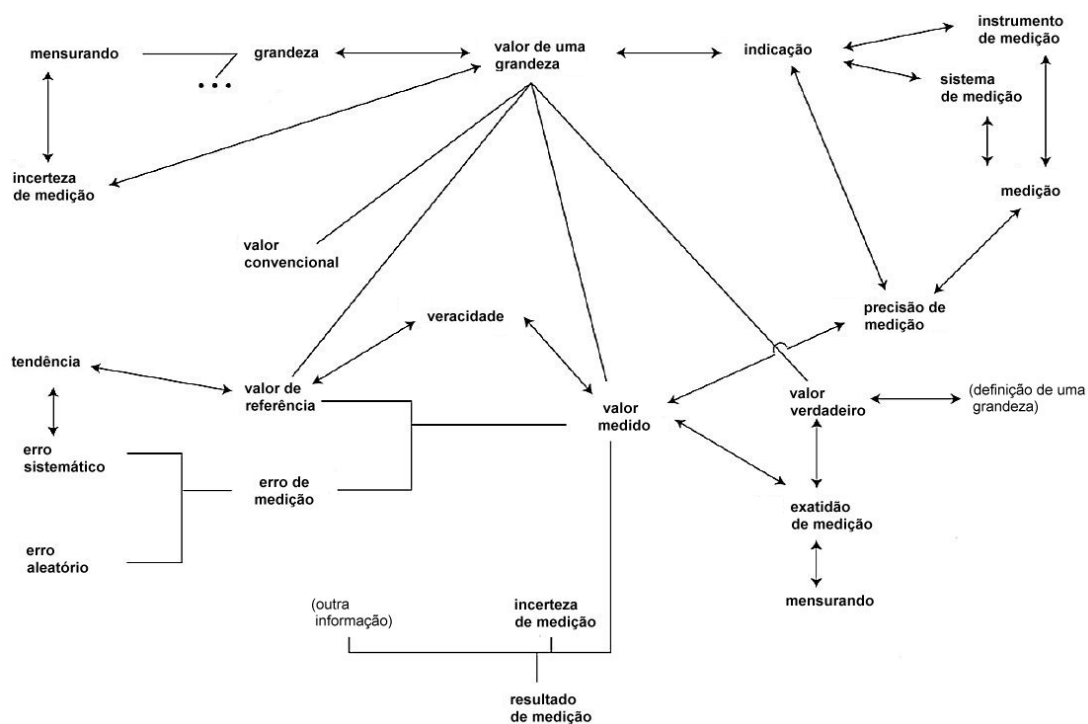


Figura B.5 - Esquema com conceitos definidos [17].

Veracidade de medição (*measurement trueness*) – “Grau de concordância entre a média de um número infinito de valores medidos repetidos e um valor de referência”. A veracidade está inversamente relacionada ao erro sistemático, mas não está relacionada ao erro aleatório. Não é uma grandeza e, portanto, não pode ser expressa numericamente, embora a ISO 5725 [40] apresente medidas para o grau de concordância.

Precisão de medição (*measurement precision*) – “Grau de concordância entre indicações ou valores medidos, obtidos por medições repetidas, no mesmo objeto ou em objetos similares, sob condições especificadas”. O termo é utilizado ao definir repetitividade de medição e reprodutibilidade de medição e é geralmente expresso na forma numérica por meio de medidas de dispersão, como o desvio-padrão e a variância.

Repetitividade de medição – “Precisão de medição sob um conjunto de condições de repetitividade, as quais compreendem: o mesmo procedimento de medição; os mesmos operadores; o mesmo sistema de medição; as mesmas condições de operação; o mesmo local; e medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares durante um curto período de tempo.”

Reprodutibilidade de medição – “Precisão de medição sob um conjunto de condições variadas de medição, chamadas condições de reprodutibilidade, as quais podem compreender: diferentes locais; diferentes operadores; diferentes sistemas de medição (procedimentos, métodos, instrumentos, entre outros); ou medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares.” Devem ser especificadas as condições que mudaram e aquelas que não.

As partes 1 e 2 da norma internacional ISO 5725 [40] apresentam termos estatísticos pertinentes à reprodutibilidade de medição.

Incerteza de medição – Definida pelo VIM [17] como um “parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas”. Já o GUM [11] define como um “parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando”.

A incerteza de medição compreende muitos componentes, devidos a efeitos sistemáticos, tais como componentes associados a correções e valores designados a padrões, assim como a incerteza definicional. Alguns dos componentes podem ser estimados por uma avaliação do Tipo A da incerteza de medição e outros por uma avaliação do Tipo B. Como a incerteza de medição está associada a um determinado valor atribuído ao mensurando, uma modificação desse valor resulta numa modificação da incerteza associada.

Incerteza definicional – “Componente da incerteza de medição que resulta da quantidade finita de detalhes na definição de um mensurando”. É a incerteza mínima que se pode obter, na prática, em qualquer medição de um determinado mensurando e qualquer modificação nos detalhes descritivos leva a uma outra incerteza definicional. Na última edição do GUM [11], o conceito ‘incerteza definicional’ é denominado ‘incerteza intrínseca’.

Incerteza-padrão – Incerteza do resultado de uma medição expressa na forma de um desvio-padrão.

Incerteza-padrão combinada u_c – Incerteza-padrão obtida ao se utilizarem incertezas-padrão individuais associadas às grandezas de entrada em um modelo de medição [17], ou seja, incerteza-padrão do resultado de uma medição, quando esse resultado é obtido a partir de valores de várias outras grandezas [11].

Incerteza-padrão relativa – Incerteza-padrão dividida pelo valor absoluto do valor medido.

Incerteza-alvo (ou incerteza de medição pretendida) – Incerteza de medição especificada como um limite superior e escolhida de acordo com o uso pretendido dos resultados de medição.

Incerteza de medição expandida U – Segundo o VIM [17], é o “produto de uma incerteza-padrão combinada por um fator maior do que o número um”, chamado fator de abrangência, que depende do tipo de distribuição de probabilidade da grandeza de saída e da probabilidade de abrangência escolhida.

O GUM [11] define ‘incerteza expandida’ como uma “grandeza que define um intervalo em torno do resultado de uma medição com o qual se espera abranger uma grande fração da distribuição dos valores que possam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando”. Essa fração pode ser vista como a probabilidade de abrangência do intervalo. A incerteza expandida é chamada de ‘incerteza global’ no parágrafo 5 da Recomendação INC-1 de 1980 e simplesmente ‘incerteza’ nos documentos IEC.

Intervalo de abrangência – “Intervalo, baseado na informação disponível, que contém o conjunto de valores verdadeiros de um mensurando com uma probabilidade determinada”. Esse intervalo pode ser derivado de uma incerteza de medição expandida.

Probabilidade de abrangência – “Probabilidade de que o conjunto de valores verdadeiros de um mensurando esteja contido num intervalo de abrangência especificado”. A probabilidade de abrangência é também chamada de ‘nível da confiança’ no GUM, mas no presente trabalho o termo utilizado é probabilidade de abrangência.

Fator de abrangência k – O VIM [17] define como um “número maior do que um pelo qual uma incerteza-padrão combinada é multiplicada para se obter uma incerteza de medição expandida”, enquanto o GUM [11] define como um “fator numérico utilizado como um multiplicador da incerteza-padrão combinada de modo a se obter uma incerteza expandida” e considera que seu valor está tipicamente na faixa de 2 a 3. A Figura B.6 apresenta relações entre os conceitos definidos.

Incerteza de medição instrumental – “Componente da incerteza de medição proveniente do instrumento de medição ou do sistema de medição utilizado. É obtida por meio da calibração do instrumento de medição ou do sistema de medição, exceto para um padrão primário, para o qual são utilizados outros meios” [17]. É utilizada na avaliação do Tipo B da incerteza de medição e suas informações podem ser fornecidas nas especificações do instrumento.

Rastreabilidade metrológica – “Propriedade de um resultado de medição pela qual tal resultado pode ser relacionado a uma referência através de uma cadeia ininterrupta e documentada de calibrações, cada uma contribuindo para a incerteza de medição” [17].

A rastreabilidade metrológica requer uma hierarquia de calibração estabelecida. Para medições com mais de uma grandeza de entrada no modelo de medição, cada valor de entrada deve ter sua própria rastreabilidade e a hierarquia de calibração envolvida pode formar uma estrutura ramificada ou uma rede. O esforço envolvido no estabelecimento da rastreabilidade metrológica para cada valor da grandeza de entrada deve ser proporcional à sua contribuição relativa para o resultado da medição.

Entretanto, a rastreabilidade metrológica de um resultado de medição não assegura que a incerteza de medição seja adequada para um dado objetivo ou que não haja erros.

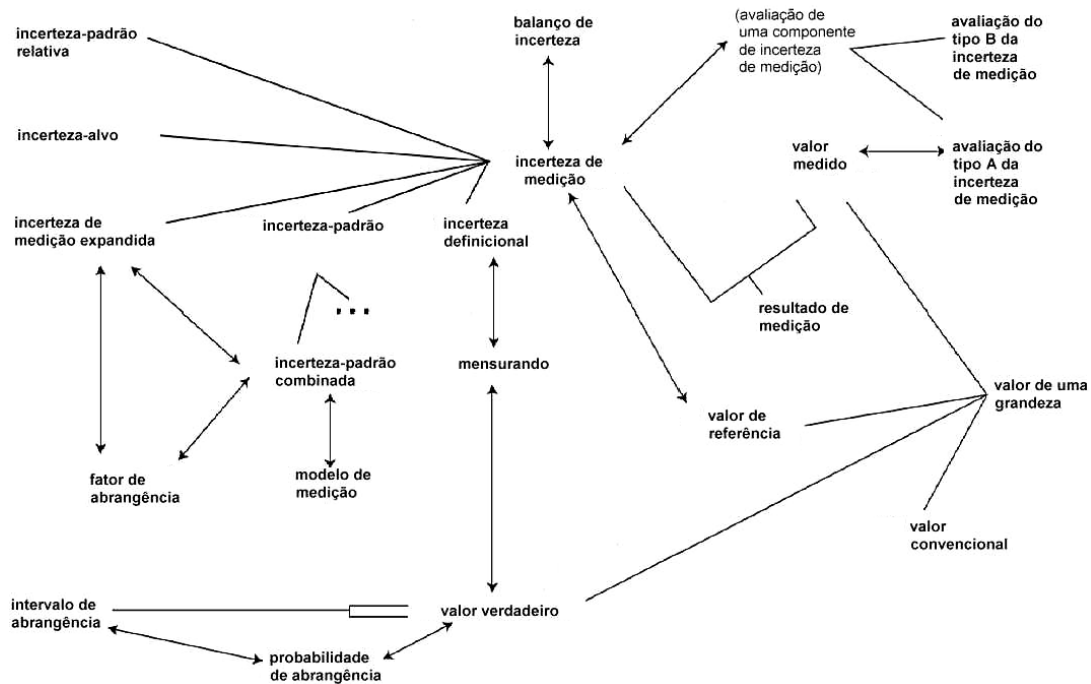


Figura B.6 - Esquema com conceitos definidos [17].

B.2. Incerteza x Erro

A palavra ‘incerteza’ significa ‘dúvida’ e, nesse sentido, o GUM [11] apresenta o termo ‘incerteza de medição’ como uma dúvida sobre a validade do resultado de uma medição, ou seja, uma dúvida de quão corretamente o resultado de uma medição representa o valor da grandeza que está sendo medida.

O conceito de incerteza como um atributo quantificável é relativamente novo na história das medições, apesar de erro e análise de erro fazerem parte da metrologia há muito tempo. Entretanto, o conceito de incerteza adotado no GUM [11] é baseado no resultado de medição e em sua incerteza avaliada, e não em grandezas desconhecidas como ‘valor verdadeiro’ e ‘erro’. O GUM apresenta em seu anexo D uma discussão sobre valor verdadeiro, erro e incerteza, lembrando que seu foco é em incerteza e não no erro.

O GUM também fornece outras duas definições de incerteza consistentes com a definição principal. Tais definições são: “uma medida do possível erro no valor estimado do mensurando, tal como proporcionado pelo resultado de uma medição”; ou

ainda “uma estimativa caracterizando a faixa de valores na qual o valor verdadeiro de um mensurando se encontra”, de acordo com a primeira edição do VIM de 1984. Apesar dessas duas definições tradicionais serem válidas como ideais, elas envolvem grandezas desconhecidas: o erro do resultado de uma medição e o valor verdadeiro do mensurando, respectivamente.

O termo ‘valor verdadeiro’ é evitado no GUM, que considera redundante a palavra ‘verdadeiro’, já que o valor verdadeiro de uma grandeza seria simplesmente o valor da própria grandeza; adicionalmente, considera um valor verdadeiro único como sendo um conceito idealizado, pois o valor de uma grandeza não pode ser conhecido exatamente, o que pode ser conhecido é apenas seu valor estimado.

‘Erro’ e ‘incerteza’ são, portanto, conceitos completamente diferentes. Erro é um conceito idealizado, definido como a diferença entre o resultado da medição e o valor verdadeiro do mensurando. Uma vez que o valor verdadeiro é uma quantidade desconhecida, resulta que o erro de medição também é uma quantidade desconhecida.

Ao contrário dos valores exatos das contribuições do erro de um resultado de medição, que são desconhecidos, as incertezas associadas aos efeitos aleatórios e sistemáticos que dão origem ao erro podem ser avaliadas. Mas, mesmo que as incertezas avaliadas sejam pequenas, não há ainda nenhuma garantia de que o erro no resultado de medição seja pequeno. Portanto, a incerteza do resultado de uma medição não é necessariamente uma indicação de quão próximo o resultado de medição está do valor do mensurando, ela é simplesmente uma estimativa do grau de aproximação ao melhor valor que é compatível com o conhecimento disponível no momento.

Outro caso também pode ocorrer: o resultado de uma medição pode ser desconhecidamente muito próximo ao valor do mensurando (e então possuir um erro desprezível), mesmo tendo uma grande incerteza. Por fim, o GUM [11] informa que sua abordagem operacional torna qualquer menção a erro totalmente desnecessária e que, felizmente, “*em muitas situações práticas de medição, muito da discussão apresentada em seu anexo D não se aplica*”.

APÊNDICE C

TESTE DE SHAPIRO-WILK PARA A NORMALIDADE

A Tabela C.1 apresenta valores dos coeficientes a_{n-i+1} do teste de Shapiro-Wilk para a normalidade, utilizados no estudo da distribuição.

Tabela C.1 - Coeficientes (a_{n-i+1}) do teste W para a normalidade [77].

i	n								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,7071	0,7071	0,6872	0,6646	0,6431	0,6233	0,6052	0,5888	0,5739
2	-	0,0000	0,1677	0,2413	0,2806	0,3031	0,3164	0,3244	0,3291
3	-	-	-	0,0000	0,0875	0,1401	0,1743	0,1976	0,2141
4	-	-	-	-	-	0,0000	0,0561	0,0947	0,1224
5	-	-	-	-	-	-	-	0,0000	0,0399

i	n									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0,5601	0,5475	0,5359	0,5251	0,5150	0,5056	0,4968	0,4886	0,4808	0,4734
2	0,3315	0,3325	0,3325	0,3318	0,3306	0,3290	0,3273	0,3253	0,3232	0,3211
3	0,2260	0,2347	0,2412	0,2460	0,2495	0,2521	0,2540	0,2553	0,2561	0,2565
4	0,1429	0,1586	0,1707	0,1802	0,1878	0,1939	0,1988	0,2027	0,2059	0,2085
5	0,0695	0,0922	0,2099	0,1240	0,1353	0,1447	0,1524	0,1587	0,1641	0,1686
6	0,0000	0,0303	0,0539	0,0727	0,0880	0,1005	0,1109	0,1197	0,1271	0,1334
7			0,0000	0,0240	0,0433	0,0593	0,0725	0,0837	0,0932	0,1013
8					0,0000	0,0196	0,0359	0,0496	0,0612	0,0711
9							0,0000	0,0163	0,0303	0,0422
10								-	0,0000	0,0140

i	n									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	0,4643	0,4590	0,4542	0,4493	0,4500	0,4407	0,4366	0,4328	0,4291	0,4254
2	0,3185	0,3156	0,3126	0,3098	0,3069	0,3047	0,3018	0,2992	0,2968	0,2944
3	0,2578	0,2571	0,2563	0,2554	0,2543	0,2533	0,2522	0,2510	0,2499	0,2487
4	0,2119	0,2131	0,2138	0,2145	0,2148	0,2151	0,2152	0,2151	0,2450	0,2148
5	0,1736	0,1764	0,1787	0,1807	0,1822	0,0184	0,1848	0,1857	0,1864	0,1870
6	0,1399	0,1443	0,1480	0,1512	0,1539	0,1563	0,1584	0,1601	0,1616	0,1630
7	0,1092	0,1150	0,1201	0,1245	0,1283	0,1316	0,1346	0,1372	0,1395	0,1415
8	0,0804	0,0878	0,0941	0,0997	0,1046	0,1089	0,1128	0,1162	0,1192	0,1219
9	0,0530	0,0618	0,0696	0,0764	0,0823	0,0876	0,0923	0,965	0,1002	0,1036
10	0,0263	0,0368	0,0459	0,0539	0,0610	0,0672	0,0728	0,0778	0,0822	0,0862
11	0,0000	0,0122	0,0228	0,0321	0,0403	0,0476	0,0540	0,0598	0,0650	0,0697
12			0,0000	0,0107	0,0200	0,0284	0,0358	0,0424	0,0483	0,0537
13					0,0000	0,0094	0,0178	0,0253	0,0320	0,0381
14							0,0000	0,0084	0,0159	0,0227
15									0,0000	0,0076

Tabela C.1 (continuação) - Coeficientes (a_{n-i+1}) do teste W para a normalidade [77].

i	n									
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
1	0,4220	0,4188	0,4156	0,4127	0,4096	0,4068	0,4040	0,4015	0,3989	0,3964
2	0,2921	0,2898	0,2876	0,2854	0,2834	0,2813	0,2794	0,2774	0,2755	0,2737
3	0,2475	0,2463	0,2451	0,2439	0,2427	0,2415	0,2403	0,2391	0,2380	0,2368
4	0,2145	0,2141	0,2137	0,2132	0,2127	0,2121	0,2116	0,2110	0,2104	0,2098
5	0,1874	0,1878	0,1880	0,1882	0,1883	0,1883	0,1883	0,1881	0,1880	0,1878
6	0,1641	0,1651	0,1660	0,1667	0,1673	0,1678	0,1683	0,1686	0,1689	0,1691
7	0,1433	0,1449	0,1463	0,1475	0,1487	0,1496	0,1510	0,1513	0,1520	0,1526
8	0,1243	0,1265	0,1284	0,1301	0,1317	0,1331	0,1344	0,1356	0,1366	0,1376
9	0,1066	0,1093	0,1118	0,1140	0,1160	0,1179	0,1196	0,1211	0,1225	0,1237
10	0,0899	0,0931	0,0961	0,0988	0,1013	0,1036	0,1056	0,1075	0,1092	0,1108
11	0,0739	0,0777	0,0812	0,0844	0,0873	0,0900	0,0924	0,0947	0,0967	0,0986
12	0,0585	0,0629	0,0669	0,0706	0,0739	0,0770	0,0798	0,0824	0,0848	0,0870
13	0,0435	0,0485	0,0530	0,0572	0,0610	0,0645	0,0677	0,0706	0,0733	0,0759
14	0,0289	0,0344	0,0395	0,0441	0,0484	0,0404	0,0559	0,0592	0,0622	0,0651
15	0,0144	0,0206	0,0262	0,0314	0,0361	0,0287	0,0444	0,0481	0,0515	0,0546
16	0,0000	0,0068	0,0131	0,0187	0,0239	0,0172	0,0331	0,0372	0,0409	0,0444
17			0,0000	0,0062	0,0119	0,0057	0,0220	0,0264	0,0305	0,0343
18					0,0000		0,0110	0,0158	0,0203	0,0244
19							0,0000	0,0053	0,0101	0,0146
20									0,0000	0,0049

i	n									
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
1	0,3940	0,3917	0,3894	0,3872	0,3850	0,3830	0,3808	0,3789	0,3770	0,3751
2	0,2719	0,2701	0,2684	0,2667	0,2651	0,2635	0,2620	0,2604	0,2589	0,2574
3	0,2357	0,2345	0,2334	0,2323	0,2313	0,2302	0,2291	0,2281	0,2271	0,2260
4	0,2091	0,2085	0,2078	0,2072	0,2065	0,2058	0,2052	0,2045	0,2038	0,2032
5	0,1876	0,1874	0,1871	0,1868	0,1865	0,1862	0,1859	0,1855	0,1851	0,1847
6	0,1693	0,1694	0,1695	0,1695	0,1695	0,1695	0,1695	0,1693	0,1692	0,1691
7	0,1531	0,1535	0,1539	0,1542	0,1514	0,1548	0,1550	0,1551	0,1553	0,1554
8	0,1384	0,1392	0,1398	0,1405	0,1410	0,1514	0,1420	0,1423	0,1427	0,1430
9	0,1249	0,1259	0,1269	0,1278	0,1286	0,1293	0,1300	0,1306	0,1312	0,1317
10	0,1123	0,1136	0,1149	0,1160	0,1170	0,1180	0,1189	0,1197	0,1205	0,1212
11	0,1004	0,1020	0,1035	0,1049	0,1062	0,1073	0,1085	0,1095	0,1105	0,1113
12	0,0891	0,0909	0,0927	0,0943	0,0959	0,0972	0,0986	0,0998	0,1010	0,1020
13	0,0782	0,0804	0,0824	0,0842	0,0860	0,0876	0,0892	0,0906	0,0919	0,0932
14	0,0677	0,0701	0,0724	0,0745	0,0765	0,0783	0,0801	0,0817	0,0832	0,0846
15	0,0575	0,0602	0,0628	0,0651	0,0673	0,0694	0,0713	0,0731	0,0748	0,0764
16	0,0476	0,0506	0,0534	0,0560	0,0584	0,0607	0,0628	0,0648	0,0667	0,0685
17	0,0379	0,0411	0,0442	0,0471	0,0497	0,0522	0,0546	0,0568	0,0588	0,0608
18	0,0283	0,0318	0,0352	0,0383	0,0412	0,0439	0,0465	0,0489	0,0511	0,0532
19	0,0188	0,0227	0,0263	0,0296	0,0328	0,0357	0,0385	0,0411	0,0436	0,0459
20	0,0094	0,0136	0,0175	0,0211	0,0245	0,0277	0,0307	0,0335	0,0361	0,0386
21	0,0000	0,0045	0,0087	0,0126	0,0163	0,0197	0,0229	0,0259	0,0288	0,0314
22			0,0000	0,0042	0,0081	0,0118	0,0153	0,0185	0,0215	0,0244
23					0,0000	0,0039	0,0076	0,0111	0,0143	0,0174
24							0,0000	0,0037	0,0071	0,0104
25									0,0000	0,0035

A Tabela C.2 apresenta valores dos pontos percentuais do teste de Shapiro-Wilk.

Tabela C.2 - Pontos percentuais do ensaio *W*.

N	Nível (probabilidade de abrangência)								
	0,01	0,02	0,05	0,10	0,50	0,90	0,95	0,98	0,99
3	0,753	0,756	0,767	0,789	0,959	0,998	0,999	1,000	1,000
4	0,687	0,707	0,748	0,792	0,935	0,987	0,992	0,996	0,997
5	0,686	0,715	0,762	0,806	0,927	0,979	0,986	0,991	0,993
6	0,713	0,743	0,788	0,826	0,927	0,974	0,981	0,986	0,989
7	0,730	0,760	0,803	0,838	0,928	0,972	0,979	0,985	0,988
8	0,749	0,778	0,818	0,851	0,932	0,972	0,978	0,984	0,987
9	0,764	0,791	0,829	0,859	0,935	0,972	0,978	0,984	0,986
10	0,781	0,806	0,842	0,869	0,938	0,972	0,978	0,983	0,986
11	0,792	0,817	0,850	0,876	0,940	0,973	0,979	0,984	0,986
12	0,805	0,828	0,859	0,883	0,943	0,973	0,979	0,984	0,986
13	0,815	0,837	0,866	0,889	0,945	0,974	0,979	0,984	0,986
14	0,825	0,846	0,874	0,895	0,945	0,975	0,980	0,984	0,986
15	0,835	0,855	0,881	0,901	0,950	0,975	0,980	0,984	0,987
16	0,844	0,863	0,887	0,906	0,952	0,976	0,981	0,985	0,987
17	0,851	0,869	0,892	0,910	0,954	0,977	0,981	0,985	0,987
18	0,858	0,874	0,897	0,914	0,956	0,978	0,982	0,986	0,988
19	0,863	0,879	0,901	0,917	0,957	0,978	0,982	0,986	0,988
20	0,868	0,884	0,905	0,920	0,959	0,979	0,983	0,986	0,988
21	0,873	0,888	0,908	0,923	0,960	0,980	0,983	0,987	0,989
22	0,878	0,892	0,911	0,926	0,961	0,980	0,984	0,987	0,989
23	0,881	0,895	0,914	0,928	0,962	0,981	0,984	0,987	0,989
24	0,884	0,898	0,916	0,930	0,963	0,981	0,984	0,987	0,989
25	0,888	0,901	0,918	0,931	0,964	0,981	0,985	0,988	0,989
26	0,891	0,904	0,920	0,933	0,965	0,982	0,985	0,988	0,989
27	0,894	0,906	0,923	0,935	0,965	0,982	0,985	0,988	0,990
28	0,896	0,908	0,924	0,936	0,966	0,982	0,985	0,988	0,990
29	0,898	0,910	0,926	0,937	0,966	0,982	0,985	0,988	0,990
30	0,900	0,912	0,927	0,939	0,967	0,983	0,985	0,988	0,990
31	0,902	0,914	0,929	0,940	0,967	0,983	0,986	0,988	0,990
32	0,904	0,915	0,930	0,941	0,968	0,983	0,986	0,988	0,990
33	0,906	0,917	0,931	0,942	0,968	0,983	0,986	0,989	0,990
34	0,908	0,919	0,933	0,943	0,969	0,983	0,986	0,989	0,990
35	0,910	0,920	0,934	0,944	0,969	0,984	0,986	0,989	0,990
36	0,912	0,922	0,935	0,945	0,970	0,984	0,986	0,989	0,990
37	0,914	0,924	0,936	0,946	0,970	0,984	0,987	0,989	0,990
38	0,916	0,925	0,938	0,947	0,971	0,984	0,987	0,989	0,990
39	0,917	0,927	0,939	0,948	0,971	0,984	0,987	0,989	0,991
40	0,919	0,928	0,940	0,949	0,972	0,985	0,987	0,989	0,991
41	0,920	0,929	0,941	0,950	0,972	0,985	0,987	0,989	0,991
42	0,922	0,930	0,942	0,951	0,972	0,985	0,987	0,989	0,991
43	0,923	0,932	0,943	0,951	0,973	0,985	0,987	0,990	0,991
44	0,924	0,933	0,944	0,952	0,973	0,985	0,987	0,990	0,991
45	0,926	0,934	0,945	0,953	0,973	0,985	0,988	0,990	0,991
46	0,927	0,935	0,945	0,953	0,974	0,985	0,988	0,990	0,991
47	0,928	0,936	0,946	0,954	0,974	0,985	0,988	0,990	0,991
48	0,929	0,937	0,947	0,954	0,974	0,985	0,988	0,990	0,991
49	0,929	0,937	0,947	0,955	0,974	0,985	0,988	0,990	0,991
50	0,930	0,938	0,947	0,955	0,974	0,985	0,988	0,990	0,991

APÊNDICE D

COEFICIENTES DE DIXON

A Tabela D.1 apresenta valores dos coeficientes de Dixon, utilizados ao aplicar o critério de rejeição de Dixon, em função do número de observações n e da probabilidade.

Tabela D.1 - Coeficientes de Dixon.

Estatística	Número de observações n	Probabilidade						
		0,70	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99	0,995
r_{10}	3	0,684	0,781	0,886	0,941	0,976	0,988	0,994
	4	0,471	0,560	0,579	0,765	0,846	0,889	0,926
	5	0,373	0,451	0,557	0,642	0,729	0,780	0,821
	6	0,318	0,386	0,482	0,560	0,644	0,698	0,740
	7	0,281	0,344	0,434	0,507	0,586	0,637	0,680
r_{11}	8	0,318	0,385	0,479	0,554	0,631	0,683	0,725
	9	0,288	0,352	0,441	0,512	0,587	0,635	0,677
	10	0,265	0,325	0,409	0,477	0,551	0,587	0,639
r_{21}	11	0,391	0,442	0,517	0,576	0,638	0,679	0,713
	12	0,370	0,419	0,490	0,546	0,605	0,642	0,675
	13	0,351	0,399	0,467	0,521	0,578	0,615	0,649
r_{22}	14	0,370	0,421	0,492	0,546	0,602	0,641	0,674
	15	0,353	0,402	0,472	0,525	0,579	0,616	0,647
	16	0,338	0,386	0,454	0,507	0,559	0,595	0,624
	17	0,352	0,373	0,438	0,490	0,542	0,577	0,605
	18	0,314	0,361	0,424	0,475	0,527	0,581	0,589
	19	0,304	0,350	0,412	0,462	0,514	0,547	0,575
	20	0,295	0,340	0,401	0,450	0,502	0,535	0,562
	21	0,287	0,331	0,391	0,440	0,491	0,524	0,551
	22	0,280	0,323	0,382	0,430	0,481	0,514	0,541
	23	0,274	0,316	0,374	0,421	0,472	0,505	0,532
	24	0,268	0,310	0,367	0,413	0,464	0,497	0,524
	25	0,262	0,304	0,360	0,406	0,457	0,469	0,516

APÊNDICE E

VALORES CRÍTICOS DE C_{tabelado}

A Tabela E.1 apresenta valores críticos de C_{tabelado} , utilizados ao aplicar o critério de rejeição de Cochran, onde p é número de laboratórios e n é o número de resultados de medição, para os níveis de significância de 1% e 5%.

Tabela E.1 - Valores críticos de C_{tabelado} [40].

p	$n = 2$		$n = 3$		$n = 4$		$n = 5$		$n = 6$	
	1 %	5 %	1 %	5 %	1 %	5 %	1 %	5 %	1 %	5 %
2	—	—	0,995	0,975	0,979	0,939	0,959	0,906	0,937	0,877
3	0,993	0,967	0,942	0,871	0,883	0,798	0,834	0,746	0,793	0,707
4	0,968	0,906	0,864	0,768	0,781	0,684	0,721	0,629	0,676	0,590
5	0,928	0,841	0,788	0,684	0,696	0,598	0,633	0,544	0,588	0,506
6	0,883	0,781	0,722	0,616	0,626	0,532	0,564	0,480	0,520	0,445
7	0,838	0,727	0,664	0,561	0,568	0,480	0,508	0,431	0,466	0,397
8	0,794	0,680	0,615	0,516	0,521	0,438	0,463	0,391	0,423	0,360
9	0,754	0,638	0,573	0,478	0,481	0,403	0,425	0,358	0,387	0,329
10	0,718	0,602	0,536	0,445	0,447	0,373	0,393	0,331	0,357	0,303
11	0,684	0,570	0,504	0,417	0,418	0,348	0,366	0,308	0,332	0,281
12	0,653	0,541	0,475	0,392	0,392	0,326	0,343	0,288	0,310	0,262
13	0,624	0,515	0,450	0,371	0,369	0,307	0,322	0,271	0,291	0,243
14	0,599	0,492	0,427	0,352	0,349	0,291	0,304	0,255	0,274	0,232
15	0,575	0,471	0,407	0,335	0,332	0,276	0,288	0,242	0,259	0,220
16	0,553	0,452	0,388	0,319	0,316	0,262	0,274	0,230	0,246	0,208
17	0,532	0,434	0,372	0,305	0,301	0,250	0,261	0,219	0,234	0,198
18	0,514	0,418	0,356	0,293	0,288	0,240	0,249	0,209	0,223	0,189
19	0,496	0,403	0,343	0,281	0,276	0,230	0,238	0,200	0,214	0,181
20	0,480	0,389	0,330	0,270	0,265	0,220	0,229	0,192	0,205	0,174
21	0,465	0,377	0,318	0,261	0,255	0,212	0,220	0,185	0,197	0,167
22	0,450	0,365	0,307	0,252	0,246	0,204	0,212	0,178	0,189	0,160
23	0,437	0,354	0,297	0,243	0,238	0,197	0,204	0,172	0,182	0,155
24	0,425	0,343	0,287	0,235	0,230	0,191	0,197	0,166	0,176	0,149
25	0,413	0,334	0,278	0,228	0,222	0,185	0,190	0,160	0,170	0,144
26	0,402	0,325	0,270	0,221	0,215	0,179	0,184	0,155	0,164	0,140
27	0,391	0,316	0,262	0,215	0,209	0,173	0,179	0,150	0,159	0,135
28	0,382	0,308	0,255	0,209	0,202	0,168	0,173	0,146	0,154	0,131
29	0,372	0,300	0,248	0,203	0,196	0,164	0,168	0,142	0,150	0,127
30	0,363	0,293	0,241	0,198	0,191	0,159	0,164	0,138	0,145	0,124
31	0,355	0,286	0,235	0,193	0,186	0,155	0,159	0,134	0,141	0,120
32	0,347	0,280	0,229	0,188	0,181	0,151	0,155	0,131	0,138	0,117
33	0,339	0,273	0,224	0,184	0,177	0,147	0,151	0,127	0,134	0,114
34	0,332	0,267	0,218	0,179	0,172	0,144	0,147	0,124	0,131	0,111
35	0,325	0,262	0,213	0,175	0,168	0,140	0,144	0,121	0,127	0,108
36	0,318	0,256	0,208	0,172	0,165	0,137	0,140	0,118	0,124	0,106
37	0,312	0,251	0,204	0,168	0,161	0,134	0,137	0,116	0,121	0,103
38	0,306	0,246	0,200	0,164	0,157	0,131	0,134	0,113	0,119	0,101
39	0,300	0,242	0,196	0,161	0,154	0,129	0,131	0,111	0,116	0,099
40	0,294	0,237	0,192	0,158	0,151	0,126	0,128	0,108	0,114	0,097

APÊNDICE F

VALORES CRÍTICOS DE $G_{tabelado}$

As Tabelas F.1 e F.2 apresentam valores críticos de $G_{tabelado}$, utilizados ao aplicar o critério de Grubbs, em função do número de resultados de medição n e do nível de significância.

Tabela F.1 - Valores críticos de $G_{tabelado}$ [80].

n	Um Valor		Dois Valores	
	$1-p$			
	0,05	0,01	0,05	0,01
3	1,155	1,155		
4	1,481	1,496	0,0002	0
5	1,715	1,764	0,009	0,0018
6	1,887	1,973	0,0349	0,0116
7	2,020	2,139	0,0708	0,0308
8	2,126	2,274	0,1101	0,0563
9	2,215	2,387	0,1492	0,0851
10	2,290	2,820	0,1864	0,1150

Tabela F.2 - Valores críticos de $G_{tabelado}$ [40].

n	Um valor		Dois valores	
	0,01	0,05	0,01	0,05
3	1,155	1,155	—	—
4	1,496	1,481	0,000 0	0,000 2
5	1,764	1,715	0,001 8	0,009 0
6	1,973	1,887	0,011 6	0,034 9
7	2,139	2,020	0,030 8	0,070 8
8	2,274	2,126	0,056 3	0,110 1
9	2,387	2,215	0,085 1	0,149 2
10	2,482	2,290	0,115 0	0,186 4
11	2,564	2,355	0,144 8	0,221 3
12	2,636	2,412	0,173 8	0,253 7
13	2,699	2,462	0,201 6	0,283 6
14	2,755	2,507	0,228 0	0,311 2
15	2,806	2,549	0,253 0	0,336 7
16	2,852	2,585	0,276 7	0,360 3
17	2,894	2,620	0,299 0	0,382 2
18	2,932	2,651	0,320 0	0,402 5
19	2,968	2,681	0,339 8	0,421 4
20	3,001	2,709	0,358 5	0,439 1
21	3,031	2,733	0,376 1	0,455 6
22	3,060	2,758	0,392 7	0,471 1
23	3,087	2,781	0,408 5	0,485 7
24	3,112	2,802	0,423 4	0,499 4
25	3,135	2,822	0,437 6	0,512 3
26	3,157	2,841	0,451 0	0,524 5
27	3,178	2,859	0,463 8	0,536 0
28	3,199	2,876	0,475 9	0,547 0
29	3,218	2,893	0,487 5	0,557 4
30	3,236	2,908	0,498 5	0,567 2
31	3,253	2,924	0,509 1	0,576 6
32	3,270	2,938	0,519 2	0,585 6
33	3,286	2,952	0,528 8	0,594 1
34	3,301	2,965	0,538 1	0,602 3
35	3,316	2,979	0,546 9	0,610 1
36	3,330	2,991	0,555 4	0,617 5
37	3,343	3,003	0,563 6	0,624 7
38	3,356	3,014	0,571 4	0,631 6
39	3,369	3,025	0,578 9	0,638 2
40	3,381	3,036	0,586 2	0,644 5

APÊNDICE G

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DE CRITÉRIOS DE REJEIÇÃO

G.1 Exemplo de Aplicação do Critério de Chauvenet

Para os seguintes valores medidos:

Leitura	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x , cm	5,30	5,73	6,77	5,26	4,33	5,45	6,09	5,64	5,81	5,75

1° Passo – Determinar a média aritmética: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 5,613$ cm

2° Passo – Calcular o desvio-padrão: $s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0,627$ cm

3° Passo – Calcular: $DR_i = \frac{|x_i - \bar{x}|}{s}$

Leitura	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DR_i	0,499	0,187	1,845	0,563	2,046	0,260	0,761	0,043	0,314	0,219

4° Passo – Verificar na Tabela 4.1, o valor de DR_0 correspondente ao tamanho da amostra. Para $n = 10$, $DR_0 = 1,96$.

5° Passo – Comparar os valores de DR_i com o valor de referência DR_0 .

Leitura	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$DR_i \times DR_0$	0,499 < 1,96	0,187 < 1,96	1,845 < 1,96	0,563 < 1,96	2,046 > 1,96	0,260 < 1,96	0,761 < 1,96	0,043 < 1,96	0,314 < 1,96	0,219 < 1,96

Com a aplicação do critério, verificou-se na tabela acima, que a leitura nº 5 (com o valor 4,33) é inconsistente. Deve-se então retirar esse valor e repetir os passos 1 a 5.

6° Passo – Como um valor inconsistente foi retirado, calcula-se novamente a média e o desvio-padrão e a razão de desvio-padrão.

$$\bar{x} = 5,756 \text{ cm}$$

$$s(x_i) = 0,462 \text{ cm}$$

Leitura	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DR_i	0,987	0,055	2,198	1,074	Rej	0,662	0,725	0,250	0,118	0,012

7º Passo – Verificar na Tabela 4.1, o valor de DR_0 correspondente ao tamanho da amostra e compará-lo com os valores de DR . Para $n = 9$, $DR_0 = 1,92$.

Leitura	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DR_i x DR₀	0,987<1,92	0,055<1,92	2,198>1,92	1,074<1,92	Rej	0,662<1,92	0,725<1,92	0,250<1,92	0,118<1,92	0,012<1,92

Com a aplicação do critério verificou-se na tabela acima, que a terceira leitura (com o valor 6,77) é inconsistente.

8º Passo – Como um valor inconsistente foi retirado, repetem-se os passos 6 e 7.

$$\bar{x} = 5,629 \text{ cm}$$

$$s(x_i) = 0,279 \text{ cm}$$

Leitura	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DR_i	1,176	0,362	Rej	1,320	Rej	0,640	1,651	0,040	0,649	0,434

Para $n = 8$, $DR_0 = 1,86$ e nenhum valor é considerado inconsistente.

Leitura	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DR_i x DR₀	1,176<1,86	0,362<1,86	Rej	1,320<1,86	Rej	0,640<1,86	1,651<1,86	0,040<1,86	0,649<1,86	0,434<1,86

G.2 Exemplo de Aplicação do Critério de Dixon

Para os seguintes valores medidos:

Leitura	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x, cm	5,30	5,73	6,77	5,26	4,33	5,45	6,09	5,64	5,81	5,75

1º Passo – Ordenar os valores em ordem crescente:

Leitura	5	4	1	6	8	2	10	9	7	3
x, cm	4,33	5,26	5,30	5,45	5,64	5,73	5,75	5,81	6,09	6,77

2º Passo – Determinar uma probabilidade de abrangência: $\alpha = 95\%$ $(1 - \alpha) = 5\%$

3° Passo – A partir do número de medições n , obter o valor de $r_{ij(\text{tabelado})}$, na Tabela do Apêndice D:

$$r_{11\text{-tabelado}} = 0,477$$

$$r_{ij} = r_{11}$$

$$x_n = 6,77 \text{ cm}$$

$$x_{n-1} = 6,09 \text{ cm}$$

$$x_1 = 4,33 \text{ cm}$$

$$x_2 = 5,26 \text{ cm}$$

4° Passo – Calcular r_{11} para x_n e x_1 suspeito:

$$x_n, \text{ suspeito: } r_{ij} = (x_n - x_{n-1}) / (x_n - x_2)$$

$$r_{11} = \frac{(6,77 - 6,09)}{(6,77 - 5,26)} = 0,45$$

$$x_1, \text{ suspeito: } r_{ij} = (x_2 - x_1) / (x_{n-1} - x_1)$$

$$r_{11} = \frac{(5,26 - 4,33)}{(6,09 - 4,33)} = 0,529$$

Como $0,529 > 0,477$ ($r_{11\text{-tabelado}}$), x_1 é rejeitado.

5° Passo – Retirar o valor rejeitado:

Leitura	5	4	1	6	8	2	10	9	7	3
x, cm		5,26	5,30	5,45	5,64	5,73	5,75	5,81	6,09	6,77

6° Passo – Determinar uma probabilidade de abrangência: $\alpha = 95\%$ ($1 - \alpha = 5\%$)

7° Passo – Determinar o valor de r_{ij} , na Tabela do Apêndice D, de acordo com o número de medições n .

$$r_{11\text{-tabelado}} = 0,512$$

$$r_{ij} = r_{11}$$

$$x_n = 6,77 \text{ cm}$$

$$x_{n-1} = 6,09 \text{ cm}$$

$$x_1 = 5,26 \text{ cm}$$

$$x_2 = 5,30 \text{ cm}$$

8° Passo – Calcular r_{11} para x_n e x_1 suspeito.

$$x_n, \text{ suspeito: } r_{ij} = (x_n - x_{n-1}) / (x_n - x_2)$$

$$r_{11} = \frac{(6,77 - 6,09)}{(6,77 - 5,30)} = 0,46$$

x_1 , suspeito: $r_{ij} = (x_2 - x_1) / (x_{n-1} - x_1)$

$$r_{11} = \frac{(5,30 - 5,26)}{(6,09 - 5,26)} = 0,048$$

Como $0,048 < 0,512$ (r_{11} -tabelado), x_1 não é mais rejeitado.

G.3 Exemplo de Aplicação do Critério de Grubbs

Para os seguintes valores medidos:

Leitura	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x , cm	5,30	5,73	6,77	5,26	4,33	5,45	6,09	5,64	5,81	5,75

1° Passo – Ordenar os valores em ordem crescente:

Leitura	5	4	1	6	8	2	10	9	7	3
x , cm	4,33	5,26	5,30	5,45	5,64	5,73	5,75	5,81	6,09	6,77

2° Passo – Determinar uma probabilidade de abrangência: $\alpha = 95\%$ ($1 - \alpha = 5\%$)

3° Passo – Supõe-se que o menor valor, x_1 , e o maior valor, x_n , são suspeitos como valores a serem rejeitados. Calcula-se a então a estatística $G_{calculado}$ para o primeiro e o último (x_1) e (x_n) valores.

$$G_1 = \frac{\bar{x} - x_1}{s} = 2,05 \quad \text{e} \quad G_n = \frac{x_n - \bar{x}}{s} = 1,85$$

4° Passo – Determinar o valor de $G_{tabelado}$, na Tabela do Apêndice F, de acordo com o número de medições n e a probabilidade de abrangência.

$$G_{tabelado} = 2,29$$

5° Passo – Comparar os valores G_1 e G_n com $G_{tabelado}$ para $\alpha = 95\%$.

Como $2,05 < 2,29$ ($G_{tabelado}$), x_1 não é rejeitado.

Como $1,85 < 2,29$ ($G_{tabelado}$), x_n também não é rejeitado.

APÊNDICE H

DISTRIBUIÇÃO F DE FISHER

As Tabelas H.1 e H.2 apresentam valores da distribuição F de Fisher, utilizada no estudo da compatibilidade entre os desvios-padrão, para níveis de significância de 1% e 5%, respectivamente, onde **df1** é o número de graus de liberdade para a variância no numerador e **df2** é o número de graus de liberdade para a variância no denominador.

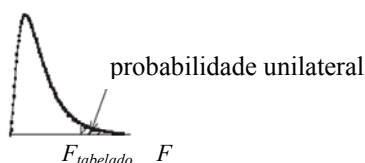


Figura H.1 - Distribuição F de Fisher.

Tabela H.1 - Valores da distribuição F de Fisher para $\alpha = 1\%$ [73].

df1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	27	40	60	∞	
df2																		
1	4052	4999	5404	5624	5764	5859	5928	5981	6022	6056	6107	6157	6209	6249	6286	6313	6366	
2	98.5	99.0	99.2	99.3	99.3	99.3	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.5	99.5	99.5	99.5	
3	34.1	30.8	29.5	28.7	28.2	27.9	27.7	27.5	27.3	27.2	27.1	26.9	26.7	26.5	26.4	26.3	26.1	
4	21.2	18.0	16.7	16.0	15.5	15.2	15.0	14.8	14.7	14.5	14.4	14.2	14.0	13.9	13.7	13.7	13.5	
5	16.3	13.3	12.1	11.4	11.0	10.7	10.5	10.3	10.2	10.1	9.89	9.72	9.55	9.42	9.29	9.20	9.02	
6	13.7	10.9	9.78	9.15	8.75	8.47	8.26	8.10	7.98	7.87	7.72	7.56	7.40	7.27	7.14	7.06	6.88	
7	12.2	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	6.99	6.84	6.72	6.62	6.47	6.31	6.16	6.03	5.91	5.82	5.65	
8	11.3	8.65	7.59	7.01	6.63	6.37	6.18	6.03	5.91	5.81	5.67	5.52	5.36	5.23	5.12	5.03	4.86	
9	10.6	8.02	6.99	6.42	6.06	5.8	5.61	5.47	5.35	5.26	5.11	4.96	4.81	4.68	4.57	4.48	4.31	
10	10.0	7.56	6.55	5.99	5.64	5.39	5.20	5.06	4.94	4.85	4.71	4.56	4.41	4.28	4.17	4.08	3.91	
12	9.33	6.93	5.95	5.41	5.06	4.82	4.64	4.50	4.39	4.30	4.16	4.01	3.86	3.74	3.62	3.54	3.36	
15	8.68	6.36	5.42	4.89	4.56	4.32	4.14	4.00	3.89	3.80	3.67	3.52	3.37	3.25	3.13	3.05	2.87	
20	8.10	5.85	4.94	4.43	4.10	3.87	3.70	3.56	3.46	3.37	3.23	3.09	2.94	2.81	2.69	2.61	2.42	
27	7.68	5.49	4.60	4.11	3.78	3.56	3.39	3.26	3.15	3.06	2.93	2.78	2.63	2.51	2.38	2.29	2.10	
40	7.31	5.18	4.31	3.83	3.51	3.29	3.12	2.99	2.89	2.80	2.66	2.52	2.37	2.24	2.11	2.02	1.80	
60	7.08	4.98	4.13	3.65	3.34	3.12	2.95	2.82	2.72	2.63	2.50	2.35	2.20	2.07	1.94	1.84	1.60	
∞	6.64	4.61	3.78	3.32	3.02	2.80	2.64	2.51	2.41	2.32	2.18	2.04	1.88	1.74	1.59	1.47	1	

Tabela H.2 - Valores da distribuição F de Fisher para $\alpha = 5\%$ [73].

df1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	15	20	27	40	60	∞	
df2																			
1	161	199	216	225	230	234	237	239	241	242	243	244	246	248	250	251	252	254	
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.40	19.41	19.43	19.45	19.46	19.47	19.48	19.50	
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.76	8.74	8.70	8.66	8.63	8.59	8.57	8.53	
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.94	5.91	5.86	5.80	5.76	5.72	5.69	5.63	
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.70	4.68	4.62	4.56	4.51	4.46	4.43	4.37	
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.03	4.00	3.94	3.87	3.82	3.77	3.74	3.67	
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.60	3.57	3.51	3.44	3.39	3.34	3.30	3.23	
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.31	3.28	3.22	3.15	3.10	3.04	3.01	2.93	
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.10	3.07	3.01	2.94	2.88	2.83	2.79	2.71	
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.94	2.91	2.85	2.77	2.72	2.66	2.62	2.54	
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.82	2.79	2.72	2.65	2.59	2.53	2.49	2.41	
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.72	2.69	2.62	2.54	2.48	2.43	2.38	2.30	
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.51	2.48	2.40	2.33	2.27	2.20	2.16	2.07	
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.31	2.28	2.20	2.12	2.06	1.99	1.95	1.84	
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.17	2.13	2.06	1.97	1.90	1.84	1.79	1.67	
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.04	2.00	1.92	1.84	1.77	1.69	1.64	1.51	
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.95	1.92	1.84	1.75	1.67	1.59	1.53	1.39	
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.79	1.75	1.67	1.57	1.49	1.39	1.32	1.01	

A Tabela H.3 apresenta valores da distribuição F de Fisher para nível de significância de 5%, onde φ_1 é o número de graus de liberdade para a variância no numerador e φ_2 é o número de graus de liberdade para a variância no denominador.

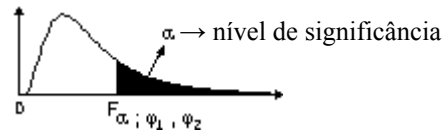


Figura H.2 - Distribuição F de Fisher.

Tabela H.3 - Valores da distribuição F de Fisher para $\alpha = 5\%$.

$\varphi_1 \backslash \varphi_2$		Graus de liberdade para o numerador																					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	15	16	18	20	24	30	40	60	120	∞
Graus de liberdade para o denominador	1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	236,8	238,9	240,5	241,9	243,9	245,4	245,9	246,5	247,3	248,0	249,1	250,1	251,1	252,2	253,3	254,3
	2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40	19,41	19,42	19,43	19,43	19,44	19,45	19,45	19,46	19,47	19,48	19,49	19,50
	3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,74	8,72	8,70	8,69	8,67	8,66	8,64	8,62	8,59	8,57	8,55	8,53
	4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,91	5,87	5,86	5,84	5,82	5,80	5,77	5,75	5,72	5,69	5,66	5,63
	5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,68	4,64	4,62	4,60	4,58	4,56	4,53	4,50	4,46	4,43	4,40	4,36
	6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,00	3,96	3,94	3,92	3,90	3,87	3,84	3,81	3,77	3,74	3,70	3,67
	7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,57	3,53	3,51	3,49	3,47	3,44	3,41	3,38	3,34	3,30	3,27	3,23
	8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,28	3,24	3,22	3,20	3,17	3,15	3,12	3,08	3,04	3,01	2,97	2,93
	9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,07	3,03	3,01	2,99	2,96	2,94	2,90	2,86	2,83	2,79	2,75	2,71
	10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,91	2,87	2,85	2,83	2,80	2,77	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54
	11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,79	2,74	2,72	2,70	2,67	2,65	2,61	2,57	2,53	2,49	2,45	2,40
	12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75	2,69	2,64	2,62	2,60	2,57	2,54	2,51	2,47	2,43	2,38	2,34	2,30
	13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,60	2,55	2,53	2,52	2,48	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,25	2,21
	14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60	2,53	2,48	2,46	2,44	2,41	2,39	2,35	2,31	2,27	2,22	2,18	2,13
	15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,48	2,42	2,40	2,39	2,35	2,33	2,29	2,25	2,20	2,16	2,11	2,07
	16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,42	2,37	2,35	2,33	2,30	2,28	2,24	2,19	2,15	2,11	2,06	2,01
	17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,38	2,34	2,31	2,29	2,26	2,23	2,19	2,15	2,10	2,06	2,01	1,96
	18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,34	2,29	2,27	2,25	2,22	2,19	2,15	2,11	2,06	2,02	1,97	1,92
	19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,31	2,26	2,23	2,22	2,18	2,16	2,11	2,07	2,03	1,98	1,93	1,88
	20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,28	2,22	2,20	2,18	2,15	2,12	2,08	2,04	1,99	1,95	1,90	1,84
	21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,25	2,20	2,18	2,16	2,12	2,10	2,05	2,01	1,96	1,92	1,87	1,81
	22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30	2,23	2,17	2,15	2,13	2,10	2,07	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,78
	23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	2,20	2,15	2,13	2,11	2,08	2,05	2,01	1,96	1,91	1,86	1,81	1,76
	24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25	2,18	2,13	2,11	2,09	2,05	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,79	1,73
	25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24	2,16	2,11	2,09	2,07	2,04	2,01	1,96	1,92	1,87	1,82	1,77	1,71
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	2,15	2,09	2,07	2,05	2,02	1,99	1,95	1,90	1,85	1,80	1,75	1,69	
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20	2,13	2,08	2,06	2,04	2,00	1,97	1,93	1,88	1,84	1,79	1,73	1,67	
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19	2,12	2,06	2,04	2,02	1,99	1,96	1,91	1,87	1,82	1,77	1,71	1,65	
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18	2,10	2,05	2,03	2,01	1,97	1,94	1,90	1,85	1,81	1,75	1,70	1,64	
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	2,09	2,04	2,01	1,99	1,96	1,93	1,89	1,84	1,79	1,74	1,68	1,62	
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08	2,00	1,95	1,92	1,90	1,87	1,84	1,79	1,74	1,69	1,64	1,58	1,51	
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	1,99	1,92	1,86	1,84	1,81	1,78	1,75	1,70	1,65	1,59	1,53	1,47	1,39	
120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,17	2,09	2,02	1,96	1,91	1,83	1,77	1,75	1,72	1,69	1,66	1,61	1,55	1,50	1,43	1,35	1,25	
∞	3,84	3,00	2,60	2,37	2,21	2,10	2,01	1,94	1,88	1,83	1,75	1,69	1,67	1,63	1,60	1,57	1,52	1,46	1,39	1,32	1,22	1,00	

Obs. A função FDIST do Excel fornece a distribuição de probabilidade para F . Os argumentos usados devem ser o valor no qual se avalia a função F , o número de graus de liberdade da variância no numerador e o número de graus de liberdade para a variância no denominador. Então, o Excel fornecerá a probabilidade caudal superior (*upper-tail*) correspondente. De maneira similar, a função INVF do Excel fornece o valor de F para uma probabilidade caudal superior estabelecida. Ao entrar com INVF(probabilidade caudal superior; graus de liberdade para a variância no numerador; graus de liberdade para a variância no denominador), o Excel fornecerá o valor correspondente de F [73].

APÊNDICE I

DISTRIBUIÇÃO *t* de Student

As Tabelas I.1 e I.2 apresentam valores da distribuição *t* de Student, utilizada no estudo da compatibilidade entre as médias, em função dos graus de liberdade e da probabilidade.

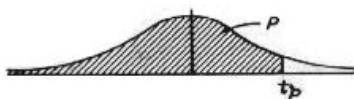


Figura I.1 - Distribuição *t* de Student.

Tabela I.1 - Distribuição *t* de Student, em função dos graus de liberdade ν [79].

ν	$t_{.60}$	$t_{.70}$	$t_{.80}$	$t_{.90}$	$t_{.95}$	$t_{.975}$	$t_{.99}$	$t_{.995}$
1	.325	.727	1.376	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657
2	.289	.617	1.061	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925
3	.277	.584	.978	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841
4	.271	.569	.941	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604
5	.267	.559	.920	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032
6	.265	.553	.906	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707
7	.263	.549	.896	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499
8	.262	.546	.889	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355
9	.261	.543	.883	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250
10	.260	.542	.879	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169
11	.260	.540	.876	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106
12	.259	.539	.873	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055
13	.259	.538	.870	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012
14	.258	.537	.868	1.345	1.761	2.145	2.624	2.9771
15	.258	.536	.866	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947
16	.258	.535	.865	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921
17	.257	.534	.863	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898
18	.257	.534	.862	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878
19	.257	.533	.861	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861
20	.257	.533	.860	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845
21	.257	.532	.859	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831
22	.256	.532	.858	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819
23	.256	.532	.858	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807
24	.256	.531	.857	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797
25	.256	.531	.856	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787
26	.256	.531	.856	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779
27	.256	.531	.855	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771
28	.256	.530	.855	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763
29	.256	.530	.854	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756
30	.256	.530	.854	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750
40	.255	.529	.851	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704
60	.254	.527	.848	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660
120	.254	.526	.845	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617
∞	.253	.524	.842	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576

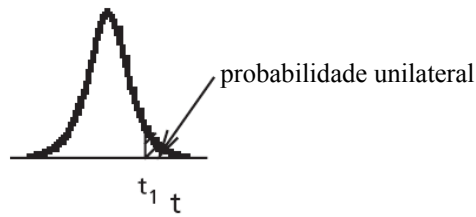


Figura I.2 - Distribuição *t* de *Student*.

Tabela I.2 - Distribuição *t* de *Student*, em função dos graus de liberdade *df*.

df	probabilidade unilateral						df
	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005	0.001	
1	3.078	6.314	12.706	31.821	63.656	318.289	1
2	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.328	2
3	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.214	3
4	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173	4
5	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.894	5
6	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208	6
7	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785	7
8	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501	8
9	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297	9
10	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144	10
11	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025	11
12	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930	12
13	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852	13
14	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787	14
15	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733	15
16	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686	16
17	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646	17
18	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.610	18
19	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579	19
20	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552	20
21	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.527	21
22	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.505	22
23	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.485	23
24	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467	24
25	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.450	25
26	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.435	26
27	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.421	27
28	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.408	28
29	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.396	29
30	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.385	30
40	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.307	40
50	1.299	1.676	2.009	2.403	2.678	3.261	50
60	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.232	60
70	1.294	1.667	1.994	2.381	2.648	3.211	70
80	1.292	1.664	1.990	2.374	2.639	3.195	80
90	1.291	1.662	1.987	2.368	2.632	3.183	90
100	1.290	1.660	1.984	2.364	2.626	3.174	100
110	1.289	1.659	1.982	2.361	2.621	3.166	110
120	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	3.160	120
∞	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.090	∞

APÊNDICE J

VALORES DE D_{nT} MEDIDOS

As tabelas seguintes apresentam os valores medidos de D_{nT} para os seis conjuntos de medições.

Tabela J.1 - Valores de D_{nT} em dB - Local 1 - método clássico.

Frequência [Hz]	Medição 01	Medição 02	Medição 03	Medição 04	Medição 05	Medição 06
100	25,2	25,4	25,5	25,4	25,7	25,3
125	23,5	23,3	24,2	24,1	24,3	24,5
160	23,6	24,6	24,0	23,7	24,7	24,2
200	26,6	26,4	26,8	27,1	27,6	27,6
250	28,3	29,0	28,9	29,3	30,1	29,6
315	32,9	34,1	32,9	33,3	33,6	32,2
400	32,1	34,8	34,8	35,3	35,8	34,8
500	34,1	35,2	36,0	36,5	35,0	35,3
630	35,5	36,1	37,1	37,5	36,3	36,7
800	37,5	39,0	38,0	37,5	38,0	37,1
1000	42,6	43,0	41,8	41,4	42,0	41,4
1250	43,3	44,1	43,5	43,0	42,7	43,3
1600	47,3	47,8	45,7	45,6	44,8	44,9
2000	50,3	49,9	47,2	47,1	46,2	46,6
2500	49,2	48,8	46,4	46,5	45,1	45,5
3150	47,6	47,5	46,3	46,4	44,7	44,7

Tabela J.2 - Valores de D_{nT} em dB - Local 1 - método da função de transferência.

Frequência [Hz]	Medição 01	Medição 02	Medição 03	Medição 04	Medição 05	Medição 06
100	28,2	25,8	25,8	26,6	26,8	25,8
125	25,6	24,1	25,4	25,2	26,3	24,8
160	23,8	22,4	24,1	22,8	24,8	21,8
200	27,0	27,1	27,5	27,0	26,1	26,1
250	28,3	28,1	29,2	28,1	29,1	27,8
315	34,6	32,6	33,0	33,7	33,6	34,2
400	32,9	32,9	33,6	32,9	33,3	33,2
500	33,6	33,5	34,2	33,4	34,7	33,8
630	35,8	34,3	35,3	36,2	36,5	35,0
800	36,6	36,4	36,7	37,4	37,1	37,1
1000	41,7	41,9	42,7	42,8	40,7	43,2
1250	42,9	43,6	42,9	44,0	42,8	42,4
1600	46,5	46,3	47,6	47,2	47,3	47,4
2000	48,6	48,8	50,4	49,5	50,0	49,5
2500	47,1	46,5	49,4	48,5	48,9	47,8
3150	46,0	45,3	47,7	47,8	47,4	47,0

Tabela J.3 - Valores de D_{nT} em dB - Local 2 - método da função de transferência.

Frequência [Hz]	Medição 01	Medição 02	Medição 03	Medição 04	Medição 05	Medição 06
100	7,2	7,4	8,9	6,9	7,6	9,1
125	9,1	9,0	8,9	9,3	8,8	8,5
160	10,9	10,4	10,3	11,2	10,6	10,6
200	13,7	14,2	15,1	15,4	15,1	15,1
250	16,6	15,6	15,8	16,0	15,8	15,6
315	16,9	16,6	15,9	15,2	15,4	15,5
400	17,8	17,9	17,2	17,3	17,3	17,7
500	19,1	18,7	19,1	19,2	19,2	19,6
630	20,2	20,7	20,5	21,2	20,6	20,7
800	21,2	20,6	21,4	21,4	21,6	20,9
1000	22,1	22,4	22,1	22,2	22,3	22,5
1250	24,2	23,9	23,3	22,9	22,8	23,0
1600	23,5	23,3	23,0	22,9	22,8	23,3
2000	24,5	24,5	24,4	23,9	24,1	23,9
2500	25,1	25,3	25,0	24,7	24,7	24,4
3150	27,0	26,8	27,0	26,4	25,8	25,9

Tabela J.4 - Valores de D_{nT} em dB - Local 3 - método da função de transferência.

Frequência [Hz]	Medição 01	Medição 02	Medição 03	Medição 04	Medição 05
100	14,5	14,2	14,1	13,4	14,1
125	13,7	13,2	13,4	13,4	13,0
160	16,1	15,8	16,1	15,8	15,8
200	18,3	18,3	18,2	18,0	18,1
250	20,9	21,2	21,4	21,0	20,6
315	22,0	22,1	21,8	21,9	21,9
400	23,8	24,0	24,0	23,9	23,7
500	24,4	23,8	24,2	23,9	24,0
630	24,7	24,1	24,4	24,4	24,1
800	26,1	26,0	26,3	25,9	25,8
1000	27,5	27,5	27,3	27,6	27,4
1250	27,6	27,3	27,7	27,6	27,3
1600	26,4	26,1	26,2	26,6	26,4
2000	26,7	26,8	26,6	26,6	26,4
2500	27,1	27,0	27,0	26,4	26,3
3150	28,2	28,4	28,1	28,0	27,9

Tabela J.5 - Valores de D_{nT} em dB - Local 4 - método da função de transferência.

Frequência [Hz]	Medição 01	Medição 02	Medição 03	Medição 04	Medição 05	Medição 06
100	28,3	28,3	27,5	28,0	28,3	28,4
125	21,9	23,6	23,5	23,3	24,3	24,0
160	30,4	29,1	29,3	29,5	30,4	29,9
200	26,9	27,7	27,7	28,1	28,8	28,7
250	25,3	24,6	24,5	24,6	24,6	24,3
315	25,1	25,0	25,5	24,8	25,4	25,0
400	25,9	24,8	25,1	25,2	26,1	25,5
500	26,0	25,4	25,8	25,3	25,8	25,3
630	25,0	24,9	24,8	24,6	25,3	25,1
800	24,2	23,4	23,8	23,7	24,0	23,7
1000	22,6	21,6	22,5	22,2	23,0	22,5
1250	24,1	23,4	23,8	23,8	24,3	23,7
1600	26,7	25,9	26,4	26,3	26,5	26,3
2000	29,3	29,2	29,5	29,3	29,5	29,1
2500	29,2	28,9	29,1	28,9	29,1	28,7
3150	29,6	29,5	29,9	29,3	29,9	29,4

Tabela J.6 - Valores de D_{nT} em dB - Local 5 - método da função de transferência.

Frequência [Hz]	Medição 01	Medição 02	Medição 03	Medição 04	Medição 05	Medição 06
100	15,5	15,9	16,5	16,1	16,7	16,5
125	18,3	19,1	19,1	18,9	19,2	19,3
160	16,2	15,4	15,5	14,9	15,1	15,4
200	20,8	21,4	21,2	21,9	21,3	20,7
250	23,3	24,2	24,1	23,7	23,2	23,4
315	24,9	25,0	25,9	25,2	25,6	24,8
400	26,5	25,7	26,3	25,5	26,6	25,7
500	27,8	27,2	26,4	26,7	26,7	26,5
630	29,3	29,2	29,3	29,0	29,4	29,4
800	30,0	30,6	30,2	30,1	30,0	29,9
1000	31,9	31,7	31,9	32,7	31,9	31,5
1250	32,2	31,4	31,9	33,6	31,3	31,6
1600	31,2	30,6	31,0	31,2	30,6	30,7
2000	28,5	29,0	29,5	28,8	29,1	29,4
2500	30,1	30,6	29,3	30,8	30,4	30,4
3150	34,0	34,8	34,4	35,2	34,3	34,5

APÊNDICE K

VALORES DA ESTIMATIVA DA INCERTEZA DE D_{nT}

As tabelas abaixo apresentam valores obtidos durante a estimativa da incerteza de medição de D_{nT} para os seis conjuntos de medições.

Tabela K.1 - Incertezas-padrão combinadas de D_{nT} , em dB.

Frequência [Hz]	Local 1		Local 2	Local 3	Local 4	Local 5
	$u_c(D_{nT})_{clássico}$	$u_c(D_{nT})_{novo}$	$u_c(D_{nT})_{novo}$	$u_c(D_{nT})_{novo}$	$u_c(D_{nT})_{novo}$	$u_c(D_{nT})_{novo}$
100	1,3	0,4	1,2	0,5	0,5	0,3
125	1,6	0,7	1,1	0,3	0,6	0,5
160	1,4	0,4	1,0	0,4	0,8	0,5
200	2,0	0,3	1,0	0,3	0,9	0,5
250	1,7	0,2	1,0	0,3	0,6	0,6
315	1,3	0,3	1,0	0,3	0,6	0,6
400	1,2	0,2	1,0	0,3	0,6	0,6
500	1,4	0,2	1,2	0,3	0,6	0,5
630	1,4	0,3	1,0	0,3	0,7	0,5
800	1,3	0,2	1,0	0,3	0,7	0,5
1000	1,3	0,3	1,0	0,3	0,8	0,6
1250	1,7	0,3	1,0	0,3	0,9	0,6
1600	1,7	0,3	1,0	0,3	0,7	0,5
2000	2,0	0,3	1,0	0,3	0,8	0,5
2500	2,1	0,4	1,0	0,3	0,8	0,5
3150	2,1	0,4	1,1	0,3	0,8	0,5

Tabela K.2 - Graus de liberdade efetivos de D_{nT} para os cinco locais de testes.

Frequência [Hz]	Local 1		Local 2	Local 3	Local 4	Local 5
	$v_{ef\ clássico}$	$v_{ef\ novo}$	$v_{ef\ novo}$	$v_{ef\ novo}$	$v_{ef\ novo}$	$v_{ef\ novo}$
100	10	6	10	14	12	12
125	10	10	10	15	8	12
160	10	11	10	13	10	9
200	10	11	10	14	7	13
250	10	11	10	13	10	13
315	10	11	9	12	8	13
400	10	14	10	11	10	13
500	10	13	10	11	10	14
630	10	12	11	10	10	15
800	10	15	10	11	10	15
1000	10	11	10	10	8	14
1250	10	10	10	10	10	13
1600	10	7	10	10	10	13
2000	10	9	10	11	10	13
2500	10	7	10	10	10	12
3150	10	7	10	10	10	12

Tabela K.3 - Fatores de abrangência de D_{nT} para os cinco locais de testes.

Frequência [Hz]	Local 1		Local 2	Local 3	Local 4	Local 5
	$k_{clássico}$	k_{novo}	k_{novo}	k_{novo}	k_{novo}	k_{novo}
100	2,23	2,36	2,23	2,14	2,18	2,18
125	2,23	2,23	2,23	2,13	2,31	2,18
160	2,23	2,20	2,23	2,16	2,23	2,26
200	2,23	2,20	2,23	2,14	2,36	2,16
250	2,23	2,20	2,23	2,16	2,23	2,16
315	2,23	2,20	2,26	2,18	2,31	2,16
400	2,23	2,14	2,23	2,20	2,23	2,16
500	2,23	2,16	2,23	2,20	2,23	2,14
630	2,23	2,18	2,20	2,23	2,20	2,13
800	2,23	2,14	2,23	2,20	2,23	2,13
1000	2,23	2,20	2,23	2,23	2,31	2,14
1250	2,23	2,23	2,23	2,23	2,23	2,16
1600	2,23	2,36	2,23	2,23	2,23	2,16
2000	2,23	2,26	2,23	2,20	2,23	2,16
2500	2,23	2,36	2,23	2,23	2,23	2,18
3150	2,23	2,36	2,23	2,23	2,23	2,18

Tabela K.4 - Incertezas expandidas de D_{nT} , em dB, para os cinco locais de testes e, na última linha, seus valores ponderados.

Frequência [Hz]	Local 1		Local 2	Local 3	Local 4	Local 5
	$U(D_{nT})_{clássico}$	$U(D_{nT})_{novo}$	$U(D_{nT})_{novo}$	$U(D_{nT})_{novo}$	$U(D_{nT})_{novo}$	$U(D_{nT})_{novo}$
100	2,9	1,0	2,6	1,0	1,0	0,7
125	3,5	1,5	2,5	0,7	1,4	1,1
160	3,2	1,0	2,1	0,8	1,7	1,2
200	4,5	0,6	2,2	0,7	2,2	1,1
250	3,7	0,4	2,3	0,7	1,3	1,3
315	2,9	0,6	2,2	0,7	1,5	1,4
400	2,8	0,5	2,2	0,7	1,3	1,3
500	3,1	0,5	2,6	0,7	1,4	1,2
630	3,1	0,6	2,1	0,7	1,6	1,2
800	2,9	0,4	2,3	0,7	1,5	1,2
1000	3,0	0,6	2,3	0,7	1,8	1,3
1250	3,7	0,6	2,2	0,7	2,0	1,3
1600	3,8	0,7	2,3	0,6	1,7	1,2
2000	4,3	0,7	2,2	0,7	1,7	1,0
2500	4,6	0,9	2,3	0,7	1,8	1,1
3150	4,8	0,9	2,5	0,7	1,7	1,2
$U_w(D_{nT})$	4 (0; -1)	1 (0; 0)	2 (0; 0)	1 (0; 0)	2 (0; 0)	1 (0; 0)

APÊNDICE L

VALORES DE $D_{ls,2m,nT}$ MEDIDOS

As tabelas seguintes apresentam os valores medidos de $D_{ls,2m,nT}$ para os cinco conjuntos de medições.

Tabela L.1 - Valores de $D_{ls,2m,nT}$ em dB - Local 1 - método clássico.

Frequência [Hz]	Medição 01	Medição 02	Medição 03
100	26,1	27,2	26,3
125	20,6	20,9	20,4
160	23,1	23,3	23,4
200	24,5	24,9	25,7
250	26,5	27,1	26,5
315	29,3	27,9	29,2
400	27,4	28,2	25,2
500	25,6	31,5	25,3
630	23,4	28,7	24,5
800	26,2	26,3	25,6
1000	31,8	30,1	33,2
1250	36,6	35,5	36,3
1600	36,4	37,6	36,1
2000	33,1	35,0	34,8
2500	36,6	38,2	36,3
3150	29,5	37,2	30,6

Tabela L.2 - Valores de $D_{ls,2m,nT}$ em dB - Local 1 - método da função de transferência.

Frequência [Hz]	Medição 01	Medição 02	Medição 03
100	26,6	26,7	26,2
125	19,8	20,9	20,6
160	22,6	22,6	22,6
200	24,2	25,0	25,5
250	26,8	27,1	26,5
315	28,9	27,4	28,3
400	26,9	28,7	25,1
500	25,8	31,5	25,2
630	23,5	27,8	23,9
800	26,1	26,4	26,0
1000	31,5	29,9	32,7
1250	37,0	36,0	35,9
1600	36,2	38,6	36,6
2000	33,0	34,9	33,7
2500	36,2	38,9	36,4
3150	28,0	39,4	29,7

Tabela L.3 - Valores de $D_{ls,2m,nT}$ em dB - Local 2 - método da função de transferência.

Frequência [Hz]	Medição 01	Medição 02	Medição 03	Medição 04	Medição 05	Medição 06
100	19,3	19,3	19,4	19,4	19,4	19,6
125	11,7	11,6	11,9	11,5	11,7	11,9
160	20,0	20,5	20,1	20,5	20,4	20,1
200	13,3	13,5	13,1	13,2	12,9	12,8
250	18,1	18,4	18,8	18,6	18,2	18,2
315	18,0	17,6	17,2	17,6	17,4	17,6
400	13,9	14,6	14,9	14,2	14,5	14,7
500	14,8	14,6	14,7	15,0	15,1	15,6
630	17,6	17,6	17,1	17,1	17,2	17,3
800	19,7	20,4	20,2	20,5	20,8	20,2
1000	20,7	20,5	21,3	20,7	20,3	21,0
1250	19,6	19,5	20,3	19,2	19,4	19,5
1600	17,8	17,6	17,3	17,6	17,6	17,4
2000	19,3	19,2	18,8	18,4	19,0	19,2
2500	19,3	19,8	19,4	19,6	19,2	19,0
3150	20,7	20,1	21,3	20,0	20,3	20,5

Tabela L.4 - Valores de $D_{ls,2m,nT}$ em dB - Local 3 - método da função de transferência.

Frequência [Hz]	Medição 01	Medição 02	Medição 03	Medição 04	Medição 05	Medição 06
100	18,1	17,8	18,2	17,8	17,6	17,4
125	11,1	11,3	12,4	11,9	11,8	11,3
160	15,1	15,4	14,5	14,8	15,2	16,0
200	17,0	17,1	16,8	17,4	17,5	17,4
250	16,0	16,2	16,5	16,5	16,4	17,0
315	13,0	12,4	12,4	12,3	12,6	12,7
400	15,0	15,2	14,4	15,3	15,2	14,7
500	11,2	10,8	10,3	10,8	10,5	10,9
630	15,4	15,3	15,2	15,8	15,3	16,1
800	18,7	18,2	19,3	18,6	18,2	18,1
1000	17,9	18,3	18,5	17,7	18,4	18,0
1250	19,3	18,0	17,6	18,5	18,3	18,1
1600	15,8	16,3	16,1	15,2	15,8	15,6
2000	18,9	19,2	18,9	18,7	18,0	18,7
2500	18,5	18,9	19,1	19,6	19,3	19,5
3150	18,4	18,2	17,7	17,9	18,2	18,7

Tabela L.5 - Valores de $D_{ls,2m,nT}$ em dB - Local 4 - método da função de transferência.

Frequência [Hz]	Medição 01	Medição 02	Medição 03	Medição 04	Medição 05	Medição 06
100	20,5	20,8	20,8	20,9	21,0	20,8
125	14,1	14,1	14,5	14,3	14,2	14,2
160	21,0	20,9	21,1	21,3	21,0	21,0
200	19,3	19,4	19,3	19,3	19,4	19,3
250	19,0	19,1	19,0	19,3	19,4	19,4
315	14,5	14,4	14,4	14,0	14,5	14,6
400	16,1	16,4	16,3	16,0	16,3	16,0
500	18,2	17,9	17,9	17,8	17,8	17,9
630	19,8	19,8	20,1	19,9	20,5	20,4
800	22,8	22,8	22,6	22,5	23,0	23,1
1000	20,8	20,8	20,6	20,9	20,9	21,0
1250	24,3	24,4	24,5	24,5	24,3	24,4
1600	24,4	24,4	24,1	24,5	24,1	24,2
2000	23,4	23,2	23,6	23,7	23,5	23,8
2500	26,3	26,4	26,3	26,4	26,2	26,5
3150	23,8	23,6	24,0	23,5	23,8	23,9

APÊNDICE M

VALORES DA ESTIMATIVA DA INCERTEZA DE $D_{ls,2m,nT}$

As tabelas abaixo apresentam valores obtidos durante a estimativa da incerteza de medição de $D_{ls,2m,nT}$ para os seis conjuntos de medições nos locais 2, 3 e 4.

Tabela M.1 - Incertezas-padrão combinadas de $D_{ls,2m,nT}$, $u_c(D_{ls,2m,nT})$, em dB.

Frequência [Hz]	Local 2	Local 3	Local 4
100	1,0	2,3	1,0
125	1,0	1,8	1,2
160	1,4	2,2	0,8
200	1,2	1,2	0,8
250	1,4	1,2	0,6
315	1,1	1,6	1,0
400	0,9	1,2	0,7
500	0,7	1,3	0,8
630	0,7	1,0	0,7
800	0,8	1,2	0,7
1000	0,8	0,9	0,6
1250	0,9	1,3	0,6
1600	0,7	1,1	0,7
2000	0,6	0,8	0,7
2500	0,7	0,8	0,8
3150	0,7	0,8	0,5

Tabela M.2 - Graus de liberdade efetivos ν_{ef} de $D_{ls,2m,nT}$.

Frequência [Hz]	Local 2	Local 3	Local 4
100	9	6	8
125	10	6	7
160	6	6	9
200	8	11	10
250	7	10	10
315	8	6	8
400	9	9	10
500	14	8	8
630	13	10	10
800	10	7	9
1000	10	10	12
1250	8	6	11
1600	11	8	9
2000	13	9	8
2500	11	9	8
3150	11	10	11

Tabela M.3 - Fatores de abrangência k de $D_{ls,2m,nT}$.

Frequência [Hz]	Local 2	Local 3	Local 4
100	2,26	2,45	2,31
125	2,23	2,45	2,36
160	2,45	2,45	2,23
200	2,31	2,20	2,23
250	2,36	2,23	2,23
315	2,31	2,45	2,31
400	2,26	2,26	2,23
500	2,14	2,31	2,31
630	2,16	2,23	2,23
800	2,23	2,36	2,23
1000	2,23	2,23	2,18
1250	2,31	2,45	2,20
1600	2,20	2,31	2,26
2000	2,16	2,23	2,26
2500	2,20	2,26	2,31
3150	2,20	2,23	2,20

Tabela M.4 - Incertezas expandidas de $D_{ls,2m,nT}$, $U(D_{ls,2m,nT})$, em dB, e seus valores ponderados.

Frequência [Hz]	Local 2	Local 3	Local 4
100	2,3	5,5	2,3
125	2,3	4,3	2,8
160	3,5	5,3	1,8
200	2,7	2,6	1,7
250	3,4	2,6	1,4
315	2,6	3,9	2,2
400	1,9	2,6	1,7
500	1,4	3,1	1,9
630	1,5	2,2	1,5
800	1,8	2,9	1,5
1000	1,8	2,1	1,3
1250	2,2	3,3	1,3
1600	1,5	2,4	1,5
2000	1,3	1,8	1,6
2500	1,5	1,9	1,8
3150	1,5	1,8	1,2
$U_w(D_{ls,2m,nT})$	2 (0; 0)	3 (-1; 0)	2 (-1; 0)