

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**Hugo Sampaio Líbero**

**Avaliação de Desempenho Vibroacústico de Unidades  
Residenciais**

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**“AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO VIBROACÚSTICO DE UNIDADES  
RESIDENCIAIS”**

Hugo Sampaio Líbero

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “Mestre em Engenharia de Estruturas”.

Comissão examinadora:

---

Prof. Dr. Max de Castro Magalhães  
DEES – UFMG – (Orientador)

---

Profa. Dra. Sofia Maria Carrato Diniz  
DEES – UFMG – (Coorientadora)

---

Profa. Dra. Maria Lúcia Machado Duarte  
DEMEC – UFMG

---

Prof. Dr. Guilherme de Souza Papini  
DEMEC – UFMG

Belo Horizonte, 12 de julho de 2017

L695a

Líbero, Hugo Sampaio.

Avaliação de desempenho vibroacústico de unidades residenciais  
[manuscrito] / Hugo Sampaio Líbero. – 2017.  
xix, 189 f., enc.: il.

Orientador: Max de Castro Magalhães.

Coorientadora: Sofia Maria Carrato Diniz.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais,  
Escola de Engenharia.

Incluem anexos e apêndices.

Bibliografia: f. 154-160.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Controle de ruído - Teses.  
3. Emissão acústica - Teses. 4. Edificações - Teses. I. Magalhães, Max de  
Castro. II. Diniz, Sofia Maria Carrato. III. Universidade Federal de Minas  
Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 624(043)

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida; por prover sabedoria, discernimento e equilíbrio.

Ao orientador deste trabalho, Professor Max de Castro Magalhães, pelo engajamento e disponibilidade com os quais me conduziu, pelos aconselhamentos pessoais e profissionais que me foram dados, pelos conhecimentos transmitidos e por viabilizar a produção e finalização desta dissertação.

À coorientadora deste trabalho, Professora Sofia Maria Carrato Diniz, pelas reuniões sempre produtivas, pelos ensinamentos e pela notável colaboração para concretização desse projeto.

Aos colegas de pós-graduação, agradeço pela amizade, convívio e cooperação mútua. Em especial, agradeço aos companheiros Rafael Aredes, Dâmia Carina e Daniel Henrique; além dos amigos Cinthia Lana e Billy Badimuena pelo auxílio na construção e manejo de algumas das ilustrações constantes nesta dissertação.

À Rosana Sampaio e ao Oldemar Líbero, meus pais, sem os quais eu jamais teria chegado até aqui. Obrigado pela incansável doação, pelo apoio incondicional, por não medirem esforços em prol da minha educação e por fazerem dos meus sonhos os seus também; poderia, aqui, escrever uma dissertação inteira somente para agradecê-los.

À Renata Sampaio, minha tia, não só pelas revisões, mas por ser a grande incentivadora deste projeto. Obrigado pelo convívio, carinho, companheirismo, aconselhamentos e por sempre me impulsionar em direção aos meus objetivos.

Aos demais professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG, a minha gratidão pela receptividade e acolhimento. Aos órgãos CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo apoio em forma de fomento concedido a pesquisa.

Enfim, meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização dessa conquista.

*“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”*

Albert Einstein

## RESUMO

O ruído de impacto tem sido fonte de constantes incômodos por parte dos usuários de edificações residenciais. No Brasil, o problema ainda é pouco difundido, sendo objeto de muita pesquisa e evolução. Neste trabalho, será realizada uma análise vibroacústica, teórica e experimental, da transmissão do ruído de impacto entre pisos e paredes de duas unidades residenciais adjacentes. Na primeira etapa foram realizados testes experimentais. Os ensaios foram efetuados em conformidade com a Norma ISO 140-7 (1998), de forma a se obter o nível de isolamento acústico do sistema piso/laje da sala e da suíte de dois apartamentos idênticos e sobrepostos. Em seguida, foram realizados ensaios de transmissão de ruído e vibração entre vários pisos, de forma a se avaliar a energia acústico-vibratória transmitida entre as lajes e paredes estruturais. Para tanto, foi utilizada uma máquina de ruído de impacto padronizado sobre o piso do apartamento superior, concomitante a instalação de microfones em recintos receptores e fixação de acelerômetros nas lajes de vários cômodos do apartamento inferior. Finalmente, foram medidas as vibrações de pisos e paredes das interfaces de três cômodos adjacentes, com a máquina de ruído de impacto posicionada sobre o teto de cada um dos cômodos. Os pisos ensaiados foram classificados de acordo com a NBR 15575-3 (2013) em níveis de desempenho pré-estabelecidos. Em uma segunda etapa, foi desenvolvido um modelo teórico baseado no método de *Análise Estatística de Energia* que consiste numa ferramenta importante para avaliação da transmissão vibroacústica entre sistemas estruturais. Por fim, foram sugeridos novos critérios de decisão para avaliação do grau de isolamento de pisos estruturais ao ruído de impacto através de uma análise probabilística dos dados de medição obtidos com o ensaio experimental. Espera-se que este estudo possa contribuir de forma considerável para a quantificação do ruído estrutural, e a consequente tomada de decisão quanto ao desempenho de estruturas relativo à vibração e acústica.

Palavras-chave: Ruído de Impacto; Análise Estatística de Energia; Conforto Acústico; Análise Probabilística.

## ABSTRACT

*Impact noise has been a source of uncomfortable constants on the part of residential building users. In Brazil, the problem is still less widespread, being the object of much research and evolution. In this work, a theoretical and experimental vibroacoustic analysis of the impact noise transmission between floors and walls of two adjacent residential units will be carried out. In the first stage experimental tests were performed. The tests were carried out in accordance with ISO 140-7 (1998), in order to obtain the sound insulation level of the floor / slab system of the room and the suite of two identical and superimposed apartments. Then, noise and vibration transmission tests were performed between several floors in order to evaluate the acoustic-vibration energy transmitted between the slabs and structural walls. For this purpose, a standard impact noise machine was used on the floor of the upper apartment, concomitant with the installation of microphones in reception rooms and fixation of accelerometers in the slabs of several rooms of the lower apartment. Finally, the vibrations of floors and walls of the three adjacent room interfaces were measured, with the impact noise machine positioned on the ceiling of each room. The tested floors were classified according to NBR 15575-3 (2013) at pre-established performance levels. In a second step, a theoretical model was developed based on the Statistical Analysis of Energy method, which is an important tool to evaluate the vibroacoustic transmission between structural systems. Finally, new decision criteria were proposed for evaluating the degree of insulation of structural floors to impact noise through a probabilistic analysis of the measurement data obtained with the experimental test. It is hoped that this study may contribute considerably to the quantification of structural noise, and consequent decision-making regarding the performance of structures related to vibration and acoustics.*

*Keywords: Impact Noise; Statistical Analysis of Energy; Acoustic Comfort; Probabilistic Analysis.*

# SUMÁRIO

|       |                                                                          |    |
|-------|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | INTRODUÇÃO .....                                                         | 1  |
| 1.1   | Considerações Gerais.....                                                | 1  |
| 1.2   | Objetivos .....                                                          | 3  |
| 1.2.1 | Objetivo Geral .....                                                     | 3  |
| 1.2.2 | Objetivos Específicos.....                                               | 4  |
| 1.3   | Justificativa .....                                                      | 4  |
| 1.4   | Metodologia .....                                                        | 5  |
| 1.5   | Estrutura da dissertação .....                                           | 6  |
| 2     | ACÚSTICA DAS EDIFICAÇÕES, RUÍDO/VIBRAÇÃO ESTRUTURAL E NORMALIZAÇÃO ..... | 7  |
| 2.1   | Som e ruído .....                                                        | 7  |
| 2.2   | Acústica das Edificações.....                                            | 10 |
| 2.2.1 | O ruído de impacto.....                                                  | 12 |
| 2.2.2 | Transmissão de ruído aéreo .....                                         | 16 |
| 2.2.3 | Transmissão de ruído estrutural.....                                     | 18 |
| 2.3   | Propagação do ruído/vibração estrutural.....                             | 19 |
| 2.3.1 | Tipos de ondas que se propagam nas estruturas .....                      | 20 |
| 2.3.2 | Radiação sonora.....                                                     | 21 |
| 2.4   | Normalização na área de Acústica.....                                    | 23 |
| 2.4.1 | Norma ISO 140-7 (1998) .....                                             | 23 |
| 2.4.2 | Norma ISO 3382-2 (2008).....                                             | 25 |
| 2.4.3 | Norma ISO 717-2 (2013) .....                                             | 26 |
| 2.4.4 | Norma NBR 15575-3 (2013).....                                            | 27 |
| 3     | ANÁLISE ESTATÍSTICA DE ENERGIA.....                                      | 29 |
| 3.1   | Contexto Geral .....                                                     | 29 |
| 3.2   | Métodos de simulação vibroacústica .....                                 | 30 |
| 3.3   | O surgimento da metodologia SEA .....                                    | 32 |
| 3.4   | Estudo do SEA ao longo dos anos .....                                    | 33 |
| 4     | CONCEITOS ESTATÍSTICOS E TEORIA DA CONFIABILIDADE .....                  | 38 |
| 4.1   | Introdução .....                                                         | 38 |
| 4.2   | Variável aleatória.....                                                  | 39 |
| 4.3   | Descrição probabilística da variável aleatória.....                      | 42 |
| 4.4   | Problema básico da confiabilidade .....                                  | 44 |
| 5     | MEDIÇÃO DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA E ACELERAÇÃO .....                    | 46 |

|       |                                                                                        |     |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1   | Considerações Gerais.....                                                              | 46  |
| 5.2   | Objeto de estudo .....                                                                 | 46  |
| 5.3   | Equipamentos e softwares utilizados .....                                              | 50  |
| 5.4   | Medição do ruído de impacto em cômodos sobrepostos (ensaio 1) .....                    | 52  |
| 5.5   | Medição do ruído de impacto em cômodos adjacentes (ensaio 2) .....                     | 57  |
| 5.6   | Medição da vibração em cômodos adjacentes (ensaio 3) .....                             | 57  |
| 5.7   | Medição da vibração em paredes e tetos (ensaio 4).....                                 | 59  |
| 5.8   | Medição do Tempo de Reverberação (ensaio 5) .....                                      | 62  |
| 6     | ANÁLISE DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA E ACELERAÇÃO/VELOCIDADE .....                       | 67  |
| 6.1   | Considerações iniciais.....                                                            | 67  |
| 6.2   | Ruído de impacto entre cômodos imediatamente sobrepostos .....                         | 67  |
| 6.2.1 | Medição do ruído de impacto na suíte .....                                             | 68  |
| 6.2.2 | Medição do ruído de impacto na sala.....                                               | 72  |
| 6.3   | Ruído de impacto entre cômodos adjacentes .....                                        | 76  |
| 6.3.1 | $L'_{nT,w}$ para cômodos adjacentes .....                                              | 84  |
| 6.4   | Vibração devido ao Ruído de impacto.....                                               | 89  |
| 6.4.1 | Medição no teto/laje de cada cômodo .....                                              | 89  |
| 6.4.2 | Medição em paredes e tetos do sistema sala-banheiro-suíte .....                        | 108 |
| 6.5   | Resumo das informações coletadas .....                                                 | 119 |
| 7     | DESENVOLVIMENTO DE MODELO VIBROACÚSTICO ATRAVÉS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DE ENERGIA..... | 120 |
| 7.1   | Considerações Gerais.....                                                              | 120 |
| 7.2   | Parâmetros utilizados na Análise Estatística de Energia.....                           | 121 |
| 7.3   | Transmissão direta (Estrutural-acústico) .....                                         | 124 |
| 8     | CRITÉRIOS DE DECISÃO PARA DESEMPENHO ACÚSTICO DE PISOS .....                           | 131 |
| 8.1   | Considerações Gerais.....                                                              | 131 |
| 8.2   | Ruído de impacto na suíte .....                                                        | 133 |
| 8.3   | Ruído de impacto na sala .....                                                         | 141 |
| 9     | SUMÁRIO, CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....      | 148 |
| 9.1   | Sumário .....                                                                          | 148 |
| 9.2   | Considerações finais .....                                                             | 149 |
| 9.3   | Conclusões .....                                                                       | 150 |
| 9.4   | Sugestões para trabalhos futuros .....                                                 | 153 |
| 10    | REFERÊNCIAS .....                                                                      | 154 |
|       | APÊNDICE A - EFICIÊNCIA DA CLAUSURA.....                                               | 161 |
|       | A.1 Medição dos Níveis de Pressão Sonora com e sem clausura .....                      | 161 |

|                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| APÊNDICE B - CÁLCULO DA FREQUÊNCIA CRÍTICA E NATURAL DOS PISOS ENSAIADOS .....      | 164 |
| B.1 Introdução .....                                                                | 164 |
| APÊNDICE C - CALIBRAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS .....                                      | 180 |
| C.1 Acelerômetro .....                                                              | 180 |
| APÊNDICE D - DETALHAMENTO DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA REGISTRADO PARA O PISO DA SALA | 182 |
| D.1 Nível de pressão sonora de impacto padronizado detalhado.....                   | 182 |
| ANEXO A - MÁQUINA PADRÃO DE IMPACTO .....                                           | 200 |
| A.1 Introdução .....                                                                | 200 |
| A.2 Especificações .....                                                            | 201 |
| A.3 Certificado de conformidade.....                                                | 202 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 2.1: FONTES DE RUÍDO EM UMA EDIFICAÇÃO.....                                      | 11 |
| FIGURA 2.2: ENERGIA SONORA DOS RUÍDOS DE IMPACTO MAIS FREQUENTES EM EDIFICAÇÕES .....   | 11 |
| FIGURA 2.3: RUÍDO DE IMPACTO .....                                                      | 12 |
| FIGURA 2.4: MECANISMO DE TRANSMISSÃO DO RUÍDO AÉREO .....                               | 16 |
| FIGURA 2.6: CASO UNIDIRECIONAL: MODO SIMÉTRICO E ANTISSIMÉTRICO .....                   | 22 |
| FIGURA 2.5: LADOS E CANTOS COMO FONTE DE RADIAÇÃO .....                                 | 22 |
| FIGURA 2.7: PISO ESTRUTURAL SENDO EXCITADO PELA MÁQUINA DE IMPACTO PADRÃO.....          | 23 |
| FIGURA 2.8: CURVA DE VALORES DE REFERÊNCIA DO RUÍDO DE IMPACTO (1/3 OITAVAS).....       | 27 |
| FIGURA 4.1: MAPEAMENTO DOS EVENTOS DA RETA REAL ATRAVÉS DA VARIÁVEL ALEATÓRIA $X$ ..... | 40 |
| FIGURA 4.2: FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE DE $X$ E DE $Y$ .....                    | 45 |
| FIGURA 5.1: PLANTA BAIXA DOS APARTAMENTOS ENSAIADOS .....                               | 47 |
| FIGURA 5.2: CORTE ‘AA’ .....                                                            | 48 |
| FIGURA 5.3: CORTE ‘BB’ .....                                                            | 48 |
| FIGURA 5.4: MÁQUINA DE IMPACTO PADRÃO.....                                              | 50 |
| FIGURA 5.5: CLAUSURA.....                                                               | 50 |
| FIGURA 5.6: ANALISADOR DE FREQUÊNCIAS .....                                             | 51 |
| FIGURA 5.7: TRIPÉ.....                                                                  | 51 |
| FIGURA 5.8: MARTELO INSTRUMENTADO .....                                                 | 51 |
| FIGURA 5.9: CAIXA ACÚSTICA.....                                                         | 51 |
| FIGURA 5.10: CALIBRADOR .....                                                           | 51 |
| FIGURA 5.11: PLACA DE AQUISIÇÃO .....                                                   | 51 |
| FIGURA 5.12: MICROFONE.....                                                             | 51 |
| FIGURA 5.13: ACELERÔMETRO ANEXADO À PAREDE .....                                        | 52 |
| FIGURA 5.14: POSIÇÕES DE FONTE E DE MEDIÇÃO NAS SUÍTES .....                            | 53 |
| FIGURA 5.15: CORTE ‘B1B1’ DAS SUÍTES .....                                              | 54 |
| FIGURA 5.16: POSIÇÕES DE FONTE E DE MEDIÇÃO NAS SALAS .....                             | 54 |
| FIGURA 5.17: CORTE ‘B2B2’ DAS SALAS .....                                               | 55 |
| FIGURA 5.18: POSIÇÕES DE FONTE E MEDIÇÃO PARA ENSAIO 2 (ACÚSTICO).....                  | 58 |
| FIGURA 5.19: POSIÇÕES DE FONTE E DE MEDIÇÃO PARA O ENSAIO 3 (VIBRAÇÃO) .....            | 58 |
| FIGURA 5.20: POSIÇÕES DE FONTE E DE MEDIÇÃO PARA ENSAIO DE VIBRAÇÃO 4.....              | 60 |
| FIGURA 5.21: CORTES ‘A1A1’ E ‘A2A2’ .....                                               | 60 |
| FIGURA 5.22: MEDIÇÃO COM ACELERÔMETRO .....                                             | 61 |

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 5. 23: POSIÇÕES DE FONTE E MEDIÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO DA COZINHA.....                                       | 62 |
| FIGURA 5. 24: POSIÇÕES DE FONTE E MEDIÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO DOS BANHEIROS 1 E 2                                   | 63 |
| FIGURA 5.25: POSIÇÕES DE FONTE E MEDIÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO DO QUARTO 2.....                                       | 63 |
| FIGURA 5.26: POSIÇÕES DE FONTE E MEDIÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO DO QUARTO 3.....                                       | 64 |
| FIGURA 5.27: POSIÇÕES DE FONTE E MEDIÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO DA SUÍTE .....                                         | 64 |
| FIGURA 5.28: POSIÇÕES DE FONTE E MEDIÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO DA SALA.....                                           | 65 |
| FIGURA 6.1: NPS DAS DEZESSEIS COMBINAÇÕES FONTE-MICROFONE PARA A SUÍTE DO APARTAMENTO<br>RECEPTOR.....                   | 71 |
| FIGURA 6.2: $L_i$ , $L'_{NT}$ E RF PARA A SUÍTE DO APARTAMENTO RECEPTOR .....                                            | 71 |
| FIGURA 6.3: APLICAÇÃO DA NORMA ISO 717-2 (2013) PARA CÁLCULO DO $L'_{NT,W}$ DO PISO DA SUÍTE...                          | 72 |
| FIGURA 6.4: NPS DAS DEZESSEIS COMBINAÇÕES FONTE-MICROFONE PARA A SALA DO APARTAMENTO<br>RECEPTOR.....                    | 75 |
| FIGURA 6.5: $L_i$ , $L'_{NT}$ E RF PARA A SALA DO APARTAMENTO RECEPTOR.....                                              | 75 |
| FIGURA 6.6: APLICAÇÃO DA NORMA ISO 717-2 (2013) PARA CÁLCULO DO $L'_{NT,W}$ DO PISO DA SALA ...                          | 76 |
| FIGURA 6.7: NPS COM A MPI PADRÃO LOCALIZADA NO CENTRO DA SALA EMISSORA .....                                             | 79 |
| FIGURA 6.8: NÍVEIS DE PRESSÃO SONORA COM A MÁQUINA DE IMPACTO PADRÃO LOCALIZADA NA<br>EXTREMIDADE DA SALA EMISSORA ..... | 81 |
| FIGURA 6. 9: NPS EM CÔMODOS ADJACENTES DE UM APARTAMENTO RESIDENCIAL DADO UMA FONTE<br>DE IMPACTO FIXA.....              | 83 |
| FIGURA 6.10: DISTRIBUIÇÃO DE $L'_{NT,W (ADJ.)} / L'_{NT,W}$ .....                                                        | 89 |
| FIGURA 6.11: POSIÇÕES DOS ACELERÔMETROS.....                                                                             | 90 |
| FIGURA 6. 12: VARIAÇÃO DA ACELERAÇÃO COM O TEMPO PARA A POSIÇÃO P1.....                                                  | 91 |
| FIGURA 6.13: NA PARA A POSIÇÃO P1 (BANDAS 1/3 OITAVAS).....                                                              | 91 |
| FIGURA 6.14: VARIAÇÃO DA ACELERAÇÃO COM O TEMPO PARA A POSIÇÃO P2.....                                                   | 92 |
| FIGURA 6.15: NA PARA A POSIÇÃO P2 (BANDAS 1/3 OITAVAS).....                                                              | 92 |
| FIGURA 6.16: VARIAÇÃO DA ACELERAÇÃO COM O TEMPO PARA A POSIÇÃO P3.....                                                   | 93 |
| FIGURA 6.17: NA PARA A POSIÇÃO P3 ((BANDAS 1/3 OITAVAS).....                                                             | 93 |
| FIGURA 6.18: VARIAÇÃO DA ACELERAÇÃO COM O TEMPO PARA A POSIÇÃO P4.....                                                   | 94 |
| FIGURA 6.19: NA PARA A POSIÇÃO P4 (BANDAS 1/3 OITAVAS).....                                                              | 94 |
| FIGURA 6.20: VARIAÇÃO DA ACELERAÇÃO COM O TEMPO PARA A POSIÇÃO P5.....                                                   | 95 |
| FIGURA 6.21: NA PARA A POSIÇÃO P5 (BANDAS 1/3 OITAVAS).....                                                              | 95 |
| FIGURA 6. 22: VARIAÇÃO DA ACELERAÇÃO COM O TEMPO PARA A POSIÇÃO P6.....                                                  | 96 |
| FIGURA 6. 23: NA PARA A POSIÇÃO P6 (BANDAS 1/3 OITAVAS) .....                                                            | 96 |
| FIGURA 6.24: VARIAÇÃO DA ACELERAÇÃO COM O TEMPO PARA A POSIÇÃO P7.....                                                   | 97 |
| FIGURA 6.25: NA PARA A POSIÇÃO P7 (BANDAS 1/3 OITAVAS).....                                                              | 97 |
| FIGURA 6.26: VARIAÇÃO DA ACELERAÇÃO COM O TEMPO PARA A POSIÇÃO P8.....                                                   | 98 |

|                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| FIGURA 6.27: NA PARA A POSIÇÃO P8 (BANDAS 1/3 OITAVAS).....                                                | 98  |
| FIGURA 6.28: VARIAÇÃO DA ACELERAÇÃO COM O TEMPO PARA A POSIÇÃO P9.....                                     | 99  |
| FIGURA 6.29: NA PARA A POSIÇÃO P9 (BANDAS 1/3 OITAVAS).....                                                | 99  |
| FIGURA 6.30: VARIAÇÃO DA ACELERAÇÃO COM O TEMPO PARA A POSIÇÃO P10.....                                    | 100 |
| FIGURA 6.31: NA PARA A POSIÇÃO P10 (BANDAS 1/3 OITAVAS).....                                               | 100 |
| FIGURA 6.32: VARIAÇÃO DA ACELERAÇÃO COM O TEMPO PARA A POSIÇÃO P11.....                                    | 101 |
| FIGURA 6.33: NA PARA A POSIÇÃO P11 (BANDAS 1/3 OITAVAS).....                                               | 101 |
| FIGURA 6.34: VARIAÇÃO DA ACELERAÇÃO COM O TEMPO PARA A POSIÇÃO P12.....                                    | 102 |
| FIGURA 6.35: NA PARA A POSIÇÃO P12 (BANDAS 1/3 OITAVAS).....                                               | 102 |
| FIGURA 6.36: NA EM BANDAS ESTREITAS ( <i>NARROW FREQUENCY</i> ) PARA TODAS AS POSIÇÕES DE<br>MEDIÇÃO ..... | 103 |
| FIGURA 6.37: ACELERAÇÃO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA PARA TODAS AS POSIÇÕES DE MEDIÇÃO ..                      | 103 |
| FIGURA 6.38: POSIÇÕES DA MÁQUINA DE IMPACTO PADRÃO (TM-1 A TM-3) E DOS ACELERÔMETROS<br>(P-1 A P-5).....   | 109 |
| FIGURA 6.39: NA PARA A MPI LOCALIZADA NA SALA EMISSORA (TM-1).....                                         | 113 |
| FIGURA 6.40: NV PARA A MPI LOCALIZADA NA SALA EMISSORA (TM-1).....                                         | 113 |
| FIGURA 6.41: NA PARA A MPI LOCALIZADA NO BANHEIRO 2 EMISSOR (TM-2) .....                                   | 113 |
| FIGURA 6.42: NV PARA A MPI LOCALIZADA NO BANHEIRO 2 EMISSOR (TM-2) .....                                   | 114 |
| FIGURA 6. 43: NA PARA A MPI LOCALIZADA NA SUÍTE EMISSORA (TM-3).....                                       | 114 |
| FIGURA 6.44: NV PARA A MPI LOCALIZADA NA SUÍTE EMISSORA (TM-3).....                                        | 114 |
| FIGURA 6.45: NA PARA O ACELERÔMETRO LOCALIZADO NO TETO DA SALA RECEPTORA.....                              | 115 |
| FIGURA 6.46: NV PARA O ACELERÔMETRO LOCALIZADO NO TETO DA SALA RECEPTORA.....                              | 115 |
| FIGURA 6.47: NA PARA O ACELERÔMETRO LOCALIZADO NA PAREDE SALA/BANHEIRO 2 RECEPTA<br>.....                  | 115 |
| FIGURA 6.48: NV PARA O ACELERÔMETRO LOCALIZADO NA PAREDE SALA/BANHEIRO 2 RECEPTA<br>.....                  | 116 |
| FIGURA 6.49: NA PARA O ACELERÔMETRO LOCALIZADO NO TETO DO BANHEIRO 2 RECEPTOR .....                        | 116 |
| FIGURA 6.50: NV PARA O ACELERÔMETRO LOCALIZADO NO TETO DO BANHEIRO 2 RECEPTOR .....                        | 116 |
| FIGURA 6.51: NA PARA O ACELERÔMETRO LOCALIZADO NA PAREDE BANHEIRO 2/SUÍTE RECEPTOR.....                    | 117 |
| FIGURA 6.52: NV PARA O ACELERÔMETRO LOCALIZADO NA PAREDE BANHEIRO 2/SUÍTE RECEPTOR.....                    | 117 |
| FIGURA 6.53: NA PARA O ACELERÔMETRO LOCALIZADO NO TETO DA SUÍTE RECEPTORA .....                            | 117 |
| FIGURA 6.54: NV PARA O ACELERÔMETRO LOCALIZADO NO TETO DA SUÍTE RECEPTORA .....                            | 118 |
| FIGURA 7.1: MODELO SEA PARA UM PISO EXCITADO POR UMA FONTE DE RADIAÇÃO ESTRUTURAL ..                       | 124 |
| FIGURA 7.2: DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIAS .....                                                                 | 128 |
| FIGURA 7.3: FATOR DE PERDA TOTAL .....                                                                     | 128 |
| FIGURA 7.4: FATORES DE PERDA POR ACOPLAMENTO .....                                                         | 129 |

|                                                                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| FIGURA 7.5: PRODUTO DENSIDADE MODAL X FATOR DE ACOPLAMENTO .....                                                                                                             | 129 |
| FIGURA 8. 1: FLUXOGRAMA PARA OBTENÇÃO DE PARÂMETROS ACÚSTICOS.....                                                                                                           | 132 |
| FIGURA 8.2: NPS AO SE AVALIAR A MÉDIA, MÁXIMO E MÍNIMO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS..                                                                                        | 135 |
| FIGURA 8.3: APLICAÇÃO DA NORMA ISO 717-2 (2013) PARA CÁLCULO DO $L'_{NT,W}$ PARA O PISO DA SUÍTE<br>.....                                                                    | 136 |
| FIGURA 8.4: APLICAÇÃO DA NORMA ISO 717-2 (2013) PARA CÁLCULO DO “NÍVEL DE PRESSÃO<br>SONORA DE IMPACTO PADRONIZADO PONDERADO” DO PISO DA SUÍTE UTILIZANDO NPSI MÁX.<br>..... | 137 |
| FIGURA 8.5: APLICAÇÃO DA NORMA ISO 717-2 (2013) PARA CÁLCULO DO “ $L'_{NT,W}$ ” DO PISO DA SUÍTE<br>UTILIZANDO NPSI MIN.....                                                 | 137 |
| FIGURA 8.6: REPRESENTAÇÃO DO $L'_{NT}$ E DA CURVA DE REFERÊNCIA DESLOCADA CUJO NPS PARA A<br>FREQUÊNCIA DE 500 [Hz] É DE 80 [dB] .....                                       | 138 |
| FIGURA 8.7: REPRESENTAÇÃO DO $L'_{NT}$ E DA CURVA DE REFERÊNCIA DESLOCADA CUJO NPS PARA A<br>FREQUÊNCIA DE 500 [Hz] É DE 66 [dB] .....                                       | 139 |
| FIGURA 8.8: REPRESENTAÇÃO DO $L'_{NT}$ E DA CURVA DE REFERÊNCIA DESLOCADA CUJO NPS PARA A<br>FREQUÊNCIA DE 500 [Hz] É DE 65 [dB] .....                                       | 139 |
| FIGURA 8.9: REPRESENTAÇÃO DO $L'_{NT}$ E DA CURVA DE REFERÊNCIA DESLOCADA CUJO NPS PARA A<br>FREQUÊNCIA DE 500 [Hz] É DE 56 [dB] .....                                       | 139 |
| FIGURA 8.10: REPRESENTAÇÃO DO $L'_{NT}$ E DA CURVA DE REFERÊNCIA DESLOCADA CUJO NPS PARA A<br>FREQUÊNCIA DE 500 [Hz] É DE 55 [dB] .....                                      | 140 |
| FIGURA 8.11: HISTOGRAMA .....                                                                                                                                                | 143 |
| FIGURA 8. 12: GRÁFICO DE FREQUÊNCIAS ACUMULADAS.....                                                                                                                         | 145 |
| FIGURA 8. 13: FUNÇÃO MASSA DE PROBABILIDADE DA VARIÁVEL $L'_{NT,W}$ .....                                                                                                    | 145 |
| FIGURA A. 1: NPS DO RUÍDO ROSA COM/SEM CLAUSURA .....                                                                                                                        | 162 |
| FIGURA A.2: NPS DO RUÍDO DE IMPACTO COM/SEM CLAUSURA .....                                                                                                                   | 163 |
| FIGURA C. 1: RESPOSTA DO ACELERÔMETRO NO DOMÍNIO DO TEMPO .....                                                                                                              | 180 |
| FIGURA C. 2: RESPOSTA DO ACELERÔMETRO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA .....                                                                                                         | 181 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| TABELA 2- 1: NÚMERO MÍNIMO DE POSIÇÕES DE MEDIÇÃO, SEGUNDO A ISO 3382-2 (2008).....                                                         | 26  |
| TABELA 2- 2: CLASSIFICAÇÃO DO NÍVEL DE DESEMPENHO DO ELEMENTO ESTRUTURAL DE ACORDO<br>COM O $L'_{NT,W}$ , SEGUNDO A NBR 15575-3 (2013)..... | 28  |
| TABELA 5- 1: ESPECIFICAÇÕES DO APARTAMENTO ENSAIADO E DE SEUS CÔMODOS.....                                                                  | 49  |
| TABELA 5- 2: ÁREA DAS SUPERFÍCIES DE CADA CÔMODO.....                                                                                       | 65  |
| TABELA 6- 1: NPS EM CADA POSIÇÃO DE MEDIÇÃO NA SUÍTE RECEPTORA .....                                                                        | 69  |
| TABELA 6- 2: TEMPO DE REVERBERAÇÃO NA SUÍTE RECEPTORA .....                                                                                 | 70  |
| TABELA 6- 3: RF PARA QUATRO POSIÇÕES DE MEDIÇÃO NA SUÍTE RECEPTORA .....                                                                    | 70  |
| TABELA 6- 4: PARÂMETROS MEDIDOS NA SUÍTE RECEPTORA .....                                                                                    | 70  |
| TABELA 6- 5: NPS EM CADA POSIÇÃO DE MEDIÇÃO NA SALA RECEPTORA .....                                                                         | 73  |
| TABELA 6- 6: TEMPO DE REVERBERAÇÃO NA SALA RECEPTORA.....                                                                                   | 74  |
| TABELA 6- 7: RF PARA QUATRO POSIÇÕES DE MEDIÇÃO NA SALA RECEPTORA .....                                                                     | 74  |
| TABELA 6- 8: PARÂMETROS MEDIDOS NA SALA RECEPTORA .....                                                                                     | 74  |
| TABELA 6- 9: RF MÉDIO (MPI: CENTRO DA SALA EMISSORA).....                                                                                   | 78  |
| TABELA 6- 10: NPS EM CÔMODOS ADJACENTES DO APARTAMENTO RECEPTOR (MPI: CENTRO DA SALA<br>EMISSORA).....                                      | 78  |
| TABELA 6- 11: RF MÉDIO (MPI: EXTREMIDADE DA SALA EMISSORA).....                                                                             | 80  |
| TABELA 6- 12: NPS EM CÔMODOS ADJACENTES DO APARTAMENTO RECEPTOR (MPI: EXTREMIDADE<br>DA SALA EMISSORA) .....                                | 80  |
| TABELA 6- 13: NPS MÉDIO EM CÔMODOS ADJACENTES DO APARTAMENTO RECEPTOR (POR POSIÇÃO<br>DA MPI) .....                                         | 82  |
| TABELA 6- 14: NPS MÉDIO EM CÔMODOS ADJACENTES DO APARTAMENTO RECEPTOR.....                                                                  | 82  |
| TABELA 6- 15: TEMPO DE REVERBERAÇÃO DO QUARTO 2.....                                                                                        | 85  |
| TABELA 6- 16: TEMPO DE REVERBERAÇÃO DO QUARTO 3.....                                                                                        | 85  |
| TABELA 6- 17: TEMPO DE REVERBERAÇÃO DA COZINHA .....                                                                                        | 86  |
| TABELA 6- 18: TEMPO DE REVERBERAÇÃO DO BANHEIRO 1.....                                                                                      | 86  |
| TABELA 6- 19: TEMPO DE REVERBERAÇÃO DO BANHEIRO 2 .....                                                                                     | 87  |
| TABELA 6- 20: CONJUNTO DE VALORES DE $L'_{NT (ADJ.)}$ PARA CADA CÔMODO.....                                                                 | 87  |
| TABELA 6- 21: VALORES DE $L'_{NT,W (ADJ.)}$ (CÔMODOS ADJACENTE) E DE $L'_{NT,W}$ (CÔMODO SOBREPOSTO).....                                   | 88  |
| TABELA 6- 22: CARACTERÍSTICAS DO SINAL.....                                                                                                 | 90  |
| TABELA 6- 23: NA (RE. $10^{-6}$ [M/S <sup>2</sup> ]) EM CADA POSIÇÃO PARA A MEDIÇÃO DA VIBRAÇÃO EM VÁRIOS<br>CÔMODOS .....                  | 104 |

|                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| TABELA 6- 24: NV (RE. $10^{-9}$ M/S) EM CADA POSIÇÃO PARA A MEDIÇÃO DA VIBRAÇÃO EM VÁRIOS CÔMODOS .....                           | 105 |
| TABELA 6- 25: NA E NV MÉDIOS EM CADA CÔMODO DO APARTAMENTO RECEPTOR .....                                                         | 106 |
| TABELA 6- 26: NA [dB] RE $10^{-6}$ [M/S <sup>2</sup> ] EM BANDAS DE UM TERÇO DE OITAVAS PARA CADA COMBINAÇÃO FONTE-MEDIÇÃO.....   | 110 |
| TABELA 6- 27: NV [dB] RE $10^{-9}$ [M/S] EM BANDAS DE UM TERÇO DE OITAVAS PARA CADA COMBINAÇÃO FONTE-MEDIÇÃO.....                 | 112 |
| TABELA 7- 1: DADOS UTILIZADOS PARA CÁLCULO DO SISTEMA PISO-RECINTO.....                                                           | 126 |
| TABELA 8- 1: NPS EM CADA POSIÇÃO DE MEDIÇÃO NA SUÍTE RECEPTORA .....                                                              | 134 |
| TABELA 8- 2: PARÂMETROS REPRESENTATIVOS DOS DADOS MEDIDOS NA SUÍTE RECEPTORA .....                                                | 135 |
| TABELA 8- 3: DADOS COMPARATIVOS ENTRE A ISO 717-2 (2013) E A NBR 15575-3 (2013) NA SUÍTE RECEPTORA .....                          | 140 |
| TABELA 8- 4: DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS .....                                                                                    | 142 |
| TABELA 8- 5: NÚMERO DE OCORRÊNCIAS PARA $L'_{NT,w}$ IGUAL A 63 E 67 [dB] DE ACORDO À POSIÇÃO DE MEDIÇÃO .....                     | 144 |
| TABELA B- 1: FREQUÊNCIA CRÍTICA E FREQUÊNCIAS NATURAIS PARA OS SISTEMAS ESTRUTURAIS DE ENSAIO .....                               | 179 |
| TABELA D- 1: CONJUNTO DE $L'_{NT}$ [dB] (BANDAS 1/3 DE OITAVAS) E ( $L'_{NT,w}$ ) [dB] PARA A POSIÇÃO (1,1) DO PISO DA SALA ..... | 183 |
| TABELA D- 2: CONJUNTO DE $L'_{NT}$ [dB] (BANDAS 1/3 DE OITAVAS) E ( $L'_{NT,w}$ ) [dB] PARA A POSIÇÃO (1,2) DO PISO DA SALA ..... | 184 |
| TABELA D- 3: CONJUNTO DE $L'_{NT}$ [dB] (BANDAS 1/3 DE OITAVAS) E ( $L'_{NT,w}$ ) [dB] PARA A POSIÇÃO (1,3) DO PISO DA SALA ..... | 185 |
| TABELA D- 4: CONJUNTO DE $L'_{NT}$ [dB] (BANDAS 1/3 DE OITAVAS) E ( $L'_{NT,w}$ ) [dB] PARA A POSIÇÃO (1,4) DO PISO DA SALA ..... | 186 |
| TABELA D- 5: CONJUNTO DE $L'_{NT}$ [dB] (BANDAS 1/3 DE OITAVAS) E ( $L'_{NT,w}$ ) [dB] PARA A POSIÇÃO (2,1) DO PISO DA SALA ..... | 187 |
| TABELA D- 6: CONJUNTO DE $L'_{NT}$ [dB] (BANDAS 1/3 DE OITAVAS) E ( $L'_{NT,w}$ ) [dB] PARA A POSIÇÃO (2,2) DO PISO DA SALA ..... | 188 |
| TABELA D- 7: CONJUNTO DE $L'_{NT}$ [dB] (BANDAS 1/3 DE OITAVAS) E ( $L'_{NT,w}$ ) [dB] PARA A POSIÇÃO (2,3) DO PISO DA SALA ..... | 189 |
| TABELA D- 8: CONJUNTO DE $L'_{NT}$ [dB] (BANDAS 1/3 DE OITAVAS) E ( $L'_{NT,w}$ ) [dB] PARA A POSIÇÃO (2,4) DO PISO DA SALA ..... | 190 |
| TABELA D- 9: CONJUNTO DE $L'_{NT}$ [dB] (BANDAS 1/3 DE OITAVAS) E ( $L'_{NT,w}$ ) [dB] PARA A POSIÇÃO (3,1) DO PISO DA SALA ..... | 191 |

|                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| TABELA D- 10: CONJUNTO DE $L'_{NT}$ [DB] (BANDAS 1/3 DE OITAVAS) E $(L'_{NT,w})$ [DB] PARA A POSIÇÃO<br>(3,2) DO PISO DA SALA .....   | 192 |
| TABELA D- 11: CONJUNTO DE $L'_{NT}$ [DB] (BANDAS 1/3 DE OITAVAS) E $(L'_{NT,w})$ [DB] PARA A POSIÇÃO<br>(3,3) DO PISO DA SALA .....   | 193 |
| TABELA D- 12: CONJUNTO DE $L'_{NT}$ [DB] (BANDAS 1/3 DE OITAVAS) E $(L'_{NT,w})$ [DB] PARA A POSIÇÃO<br>(3,4) DO PISO DA SALA .....   | 194 |
| TABELA D- 13: CONJUNTO DE $L'_{NT}$ [DB] (BANDAS 1/3 DE OITAVAS) E $(L'_{NT,w})$ [DB] PARA A POSIÇÃO<br>(4,1) DO PISO DA SALA .....   | 195 |
| TABELA D- 14: CONJUNTO DE $L'_{NT}$ [DB] (BANDAS 1/3 DE OITAVAS) E $(L'_{NT,w})$ [DB] PARA A POSIÇÃO<br>(4,2) DO PISO DA SALA .....   | 196 |
| TABELA D- 15: CONJUNTO DE $L'_{NT}$ [DB] (BANDAS 1/3 DE OITAVAS) E $(L'_{NT,w})$ [DB] PARA A POSIÇÃO<br>(4,3) DO PISO DA SALA .....   | 197 |
| TABELA D- 16: CONJUNTO DE $L'_{NT}$ [DB] (BANDAS 1/3 DE OITAVAS) E $(L'_{NT,w})$ [DB] PARA A POSIÇÃO<br>(4,4) DO PISO DA SALA .....   | 198 |
| TABELA D- 17: CONJUNTO DE $L'_{NT}$ [DB] (BANDAS 1/3 DE OITAVAS) E $(L'_{NT,w})$ [DB] PARA A OS NÍVEIS<br>EXTREMOS EM CADA BANDA..... | 199 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$  – Área das superfícies

$A_0$  – Área de absorção de referência

$B$  – Rigidez à flexão

$C$  – Velocidade do som no meio

$C_0$  – Velocidade do som no ar

$C_B$  – Velocidade de uma onda de flexão

$C_S$  – Velocidade de propagação de uma onda transversal

$C_L$  – Velocidade de propagação de uma onda longitudinal

$cov$  – Coeficiente de variação

$cor$  – Coeficiente de correlação

$D$  – rigidez longitudinal do material

$E$  - Evento

$E$  – Energia

$E$  – Módulo de elasticidade longitudinal

$E(X)$  – Média da variável aleatória  $X$

$E[g(X)]$  – Esperança matemática da função  $g(X)$

$F$  – Força RMS

$f$  – Frequência [Hz]

$f_c$  – Frequência crítica [Hz]

$f_X$  – Função densidade de probabilidade da variável aleatória  $X$

$f_Y$  – Função densidade de probabilidade da variável aleatória  $Y$

$F_X$  – Função de distribuição acumulada da variável aleatória  $X$

$F_Y$  – Função de distribuição acumulada da variável aleatória  $Y$

$F_i$  – Frequência absoluta

$F_{ri}$  – Frequência relativa

$F_{pi}$  – Frequência percentual

$F_s$  – Frequência amostral

$F_n$  – Frequência natural

$G$  – Rigidez transversal do material

$h$  – espessura

$H$  – Dimensão do vetor tempo

$i$  – Coordenada referente à posição de fonte

$j$  – Coordenada referente à posição de medição

$k$  – Número de onda

$K$  – Constante

$L_i$  – Nível de pressão sonora de impacto médio

$L'_{nT}$  – Nível de pressão sonora de impacto padronizado

$L'_n$  – Nível de pressão sonora de impacto normalizado

$L'_{nT(adj.)}$  – Nível de pressão sonora de impacto padronizado para cômodos adjacentes

$L'_{nT,w (adj.)}$  – Nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado para cômodos adjacentes

$L_e$  – Nível de energia ([dB] re  $10^{-12}$  [J])

$L_v$  – Nível de velocidade ([dB] re  $10^{-9}$  [m/s])

$L'_{n,w}$  – Nível de pressão sonora de impacto normalizado ponderado

$L'_{nT,w}$  – Nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado

$m$  – Massa

$m'$  – Massa por unidade de área

$p$  – Pressão sonora

$\bar{p}^2$  – Pressão quadrática média

$p_X$  – Função massa de probabilidade da variável aleatória  $X$

$p_{eficaz}$  – Pressão sonora eficaz

$p_{ref}$  – Pressão sonora de referência

$p_f$  – Probabilidade de falha

$P(E)$  – Probabilidade de ocorrência do evento “E”

$S$  – Sensação

$t$  – Temperatura [°C]

$T$  – Período

$T_0$  – Tempo de reverberação de referência

$T_{30}$  – Método para cálculo do tempo de reverberação

$T_{60}$  – Tempo de reverberação

$U$  – Estímulo

$U_0$  – Valor mínimo do estímulo

$V$  – Volume

$v$  – Velocidade

$Var$  – Variância

$\omega$  – Frequência [Rad/s]

$\omega_c$  – Frequência crítica [Rad/s]

$x_m$  – Mediana

$\bar{x}$  – Moda

$X$  – Variável aleatória

$x$  – Valor assumido pela variável aleatória  $X$

$y$  – Valor assumido pela variável aleatória  $Y$

$Y$  – Variável aleatória

$Y$  – Mobilidade

$Z$  – Impedância

**Letras Gregas**

$\sigma$  – Eficiência de radiação

$\Phi$  – Ângulo de irradiação sonora

$\rho_s$  – Densidade superficial

$\rho_0$  – Densidade do ar

$\mu$  – Coeficiente de Poisson

$\mu_X$  – Média da variável aleatória  $X$

$\sigma_X$  – Desvio Padrão de  $X$

$\lambda$  – Comprimento de onda

$\rho$  – Densidade do material

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BEM – *Boundary Element Method*

CLF – *Coupling Loss Factor*

EVA – Etil Vinil Acetato

FRF – Função de Resposta em Frequência

ISO – *International Organization for Standardization*

MEF – Método dos Elementos Finitos

MPI – Máquina Padrão de Impacto

NA – Nível de Aceleração

NBR – Norma Brasileira

NPS – Nível de Pressão Sonora

NV – Nível de Velocidade

OMS – Organização Mundial da Saúde

RF – Ruído de Fundo

RMS – *Root Mean Square*

SEA – *Statistical Energy Analysis*

SEM – *Spectral Element Method*

VA – Variável Aleatória

# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 Considerações Gerais

A qualidade de vida, segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), é definida como a “Percepção do indivíduo em relação a sua posição na vida dentro do contexto cultural e do sistema de valores nos quais se vive relativo aos seus objetivos, expectativas, padrões e preocupações” (OMS, 1998). É um conceito complexo e bastante extenso que envolve a saúde física, o estado psicológico, o grau de independência, as relações sociais, as crenças pessoais e a relação com as características do ambiente no qual se está inserido. Dessa forma, tal condição pode ser alcançada nas diferentes dimensões da pessoa e do meio, que se compensam e se harmonizam entre si.

Segundo o art. 225 da Constituição Brasileira, “Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações” (BRASIL, 1988). Não obstante, é válido afirmar que as características do meio são importantes para a caracterização do bem-estar pessoal e exercem influência significativa na representação do termo *qualidade de vida*. Em específico, a poluição sonora e o excesso de ruído/vibração tem se tornado aspecto cotidiano no dia a dia da sociedade, fator que contribui para a deterioração da saúde e bem-estar da população.

Conceitualmente, o termo ‘*acústica*’ tem por definição o ramo da física que estuda os sons, as ondas sonoras e os fenômenos que lhe são pertinentes (WEISZFLOG, 2015). O termo *som*, por sua vez, se refere não somente ao fenômeno de propagação de ondas acústicas no ar responsável pela sensação de audição, mas também a tudo aquilo que é governado por princípio físico análogo, conferindo-lhe um caráter mais amplo. Quando excessivo ou

indesejado, o som é tido como um ruído, provocando, muitas vezes, uma sensação de desconforto à pessoa que se encontra submetida a tal fenômeno (BISTAFA, 2006).

Com a crescente expansão territorial e urbana registrada nos últimos tempos, a verticalização dos sistemas estruturais tornou-se comum, principalmente por melhor aproveitar o espaço físico disponível. Com isso, surgem os problemas advindos do excesso de barulho gerado entre sistemas residenciais adjacentes.

Ao passo que os estudos acústicos se dividem em diversos setores e subáreas distintas, o ruído de impacto proveniente de sistemas estruturais tem recebido atenção especial, principalmente por estar diretamente relacionado a conjuntos residenciais no qual o conforto e a qualidade de vida são fatores essenciais. Para tanto, torna-se fundamental o desenvolvimento de técnicas construtivas que proporcionem melhores condições de isolamento acústico entre ambientes, elevando a qualidade de vida de usuários dos sistemas residenciais de forma geral. No Brasil, este tema ainda é pouco explorado. Entretanto, vem sendo objeto de estudo de diversas instituições de ensino/pesquisa e empresas privadas no intuito de gerar conhecimento que proporcione aplicações efetivas no ramo da construção civil.

O ruído a níveis elevados pode gerar, além de incômodos, interferência no desempenho das tarefas do dia a dia, na inteligibilidade da fala e no sono. Quando a exposição ao ruído é feita de forma intermitente e prolongada, como aqueles encontrados em edificações de múltiplos pavimentos (ruídos hidráulicos ou ruído de impacto em pisos, por exemplo), aumenta-se a possibilidade do mesmo em causar efeitos psicofisiológicos nos indivíduos, tais como estresse, hipertensão, falta de concentração e baixa produtividade, deteriorando a qualidade de vida e reduzindo as oportunidades de repouso. Sendo assim, o termo *saúde*, diretamente relacionado ao conceito de qualidade de vida, é representado por um completo estado de bem-estar físico e social, e não somente a ausência de enfermidades (OMS, 1998).

Segundo Neto (2009), a sensação de conforto extrapola o grau de desempenho dos sistemas estruturais residenciais, mais do que isso, envolve privacidade e conceitos intimamente subjetivos. Verificou-se que o conforto acústico em uma edificação está profundamente ligado à inteligibilidade da fala e características do ambiente de recepção, e não somente ao isolamento objetivo da partição.

O patamar de isolamento acústico entre ambientes deve levar em consideração a redução do ruído no interior da edificação a níveis aceitáveis, uma vez que é praticamente impossível – e economicamente inviável – eliminá-lo completamente. Além disso, a completa eliminação do ruído é indesejável. Qualquer indivíduo que permanecer certo tempo numa câmara anecóica saberá que um ambiente com silêncio total pode ser tão perturbador quanto um ambiente ruidoso.

O ruído de impacto, como o próprio nome sugere, é produzido através de impactos nos elementos estruturais da edificação (pisos, paredes, lajes, coberturas, dentre outros). Esses impactos geram vibrações nos elementos do edifício que, por sua vez, irradiam som para os diversos espaços que compõem a edificação. Quando uma pessoa caminha sobre um piso ou deixa cair um objeto sobre o chão, o ruído de impacto é gerado, podendo causar incômodo às pessoas dos ambientes adjacentes. Dessa forma, torna-se de suma importância o seu isolamento em pisos de edificações, uma vez que as condições de salubridade e conforto acústico em ambientes residenciais são almejadas.

Nesse trabalho, será apresentada uma revisão bibliográfica a respeito da Acústica das Edificações, Ruído e Vibração Estrutural, Análise Estatística de Energia, Teoria da Confiabilidade e Estatística, bem como da normalização que se refere à Acústica Ambiental e ao Ruído de Impacto gerado em sistemas residenciais de múltiplos pavimentos. Na sequência, serão detalhados os procedimentos experimentais adotados para se analisar a influência vibroacústica do ruído de impacto sobre pisos e paredes de duas unidades residenciais adjacentes. De posse dos dados coletados, os resultados serão exibidos, seguidas das suas respectivas análises. Demais particularidades serão apresentadas ao longo dos capítulos desse projeto.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Realizar um estudo teórico-experimental para análise vibroacústica entre duas unidades residenciais adjacentes.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar ensaios *in-situ* para medição do ruído de impacto em pisos de dois apartamentos, idênticos e sobrepostos, de um edifício residencial em conformidade com as normas ISO 140-7 (1998) e ISO 3382-2 (2008);
- Verificar o atendimento à norma NBR 15575-3 (2013), identificando o nível de desempenho do piso ensaiado;
- Identificação de parâmetros únicos de nível de pressão sonora de seis cômodos do apartamento inferior devido geração de ruído estrutural (utilizando máquina de impacto padrão) no apartamento superior;
- Avaliação da transmissão de energia sonora e da vibração em cômodos do apartamento receptor;
- Implementação de modelo vibroacústico simples para análise da transmissão direta de energia vibroacústica entre dois subsistemas utilizando Análise Estatística de Energia;
- Avaliação dos critérios utilizados para classificação do nível de pressão sonora de pisos através de uma análise probabilística dos dados coletados via ensaio experimental.
- Obter, de maneira geral, um critério de avaliação de sistemas estruturais residenciais tanto na fase de projeto e construção quanto na fase de conservação e restauração da edificação habitada.

### 1.3 Justificativa

A análise do ruído de impacto/estrutural é tema de importantes trabalhos desenvolvidos no Brasil, tais como o de Rezende (2014), Neubauer (2009), Cornacchia (2009) Ferraz (2008), Pereyron (2008), Pedroso (2007) e Machado (2003). No entanto, há a necessidade de desenvolvimento de uma metodologia para realização de um tratamento estatístico adequado para melhor caracterização de pisos estruturais quanto a sua classe desempenho, baseando-se na norma NBR 15575-3 (2013). Além disso, busca-se uma correlação entre a energia acústica e estrutural geradas pelo ruído de impacto para caracterização do meio quanto às condições de bem estar e conforto.

O estudo da acústica e vibração de sistemas estruturais residenciais é relevante para identificação de zonas suscetíveis a condições extremas, ou seja, pressões sonoras e

acelerações máximas e mínimas dadas uma mesma fonte de excitação. Dessa forma, é possível utilizar técnicas adequadas para minimizar os efeitos do ruído e das vibrações excessivas quando as mesmas incidem sobre o corpo humano, aumentando-se o nível qualidade de vida (no que diz respeito, estritamente, aos parâmetros aqui avaliados).

O estudo aqui apresentado pode ser considerado como uma importante fonte de consulta para profissionais ligados à acústica e vibração, auxiliando-os no melhor dimensionamento dos parâmetros e posicionamento dos materiais envolvidos na manutenção e principalmente na construção de sistemas residenciais adjacentes.

## 1.4 Metodologia

Para atingir os objetivos propostos neste trabalho, as seguintes etapas foram cumpridas:

- 1) Estudo do comportamento de sistemas estruturais quando submetidos a uma excitação de impacto padronizada;
- 2) Revisão bibliográfica sobre a acústica das edificações, ruído/vibração estrutural e normalizações utilizadas;
- 3) Revisão bibliográfica a respeito da análise estatística de energia, conceitos estatísticos e teoria da confiabilidade;
- 4) Realização de ensaios *in-situ*, a partir de medição de níveis de pressão sonora e tempo de reverberação de recintos e aceleração de sistemas estruturais de dois apartamentos idênticos e sobrepostos quando uma fonte de excitação de impacto padronizada é aplicada. Procedimento realizado em cinco etapas: i) medição, em conformidade com a norma ISO 140-7 (1998), do nível de pressão sonora de uma sala e de uma suíte, dada uma fonte de impacto localizada no cômodo imediatamente superior; ii) medição do nível de pressão sonora e iii) medição da vibração pisos de seis cômodos de um apartamento receptor a partir de uma fonte de excitação localizada na sala emissora; iv) medição das vibrações de pisos e paredes das interfaces de três cômodos do apartamento receptor; v) medição do tempo de reverberação dos cômodos de ensaio.

- 5) Avaliação e processamento dos dados obtidos;
- 6) Desenvolvimento de modelo teórico simples de *Análise Estatística de Energia* para predição de fatores de acoplamento entre subsistemas;
- 7) Proposição de novos critérios de avaliação da classificação de pisos estruturais quanto à sua capacidade de isolamento do ruído de impacto, baseados em conceitos estatísticos e na teoria da confiabilidade, visando o conforto acústico dos usuários de sistemas residenciais.

### **1.5 Estrutura da dissertação**

Esse trabalho encontra-se dividido em nove capítulos. O Capítulo 1 aborda uma introdução a respeito da acústica/vibração estrutural em edificações de múltiplos pavimentos e suas consequências para a sensação de conforto acústico dos usuários de tais sistemas construtivos. Tal Capítulo inclui objetivos, justificativa e breve descrição da metodologia aplicada. Os Capítulos 2, 3 e 4 referem-se à revisão bibliográfica, nos quais, abordam-se, respectivamente: acústica das edificações, ruído/vibração estrutural e normalização, análise estatística de energia e teoria da confiabilidade. O Capítulo 5 apresenta o procedimento experimental de forma detalhada, enquanto o Capítulo 6 realiza a análise dos resultados obtidos. O desenvolvimento de um modelo vibroacústico simples é mostrado no Capítulo 7, seguido da proposição de novos critérios para classificação de pisos estruturais quanto ao ruído de impacto dado no Capítulo 8. Por fim, no Capítulo 9 é apresentado o sumário, as conclusões da dissertação e proposições para trabalhos futuros.

# 2

## ACÚSTICA DAS EDIFICAÇÕES, RUÍDO/VIBRAÇÃO ESTRUTURAL E NORMALIZAÇÃO

### 2.1 Som e ruído

Define-se o fenômeno sonoro como sendo a propagação da onda acústica que se dá em um meio físico, seja ele sólido, líquido ou gasoso. Segundo Brandão (2016), tal fenômeno sonoro pode ser compreendido por um evento físico e ser representado através de um modelo físico-matemático.

Gerges (1992) define o som como variações de pressão em um determinado meio elástico ou compressível, dentro de determinadas faixas de valores e frequências de repetição, que ao atingirem as orelhas, produzem a sensação de som. Para os seres humanos, a faixa de valores de frequência audível é a de 20 [Hz] até 20.000 [Hz].

Quando se atribui um caráter negativo ao som, o mesmo passa a ser chamado de ruído. Souza *et al.* (2006) o definem como qualquer som indesejável à atividade humana, influenciando nas finalidades para as quais os espaços foram construídos, uma vez que a função do ambiente é prejudicada. Obviamente, a quantificação do incômodo gerado pelo ruído dependerá de diversas características, tais como: tempo de exposição, amplitude e frequência do sinal, faixa etária do receptor, grau de recorrência, estado psicológico, estado de saúde momentâneo, etc.. Dessa forma, segundo Pedroso (2007), destaca-se o caráter subjetivo da concepção de ruído, estando ligado não só as características físicas do sinal acústico, mas também ao aspecto emocional, psicológico e até mesmo social de quem o recebe.

Sob uma nova ótica, Noceti e Dalcastagné (2002) *apud* Paixão (2004) classificam os ruídos como sendo aqueles sinais que são responsáveis pela redução na inteligibilidade de uma determinada informação, seja ela transmitida via som, imagem ou através de dados. Sendo

assim, qualquer som que prejudica a comunicação entre indivíduos pode ser classificado como sendo um ruído.

Dado que a classificação do som como ruído é de natureza subjetiva, é interessante estabelecer uma relação entre o estímulo acústico e a sua percepção pelo homem. Segundo Bistafa (2006), a *lei de Fechner-Weber* quantifica a sensação humana a determinados estímulos físicos. Ernst Heinrich Weber, um dos primeiros a estudar quantitativamente a resposta humana a estímulos físicos, percebeu, em um dos seus experimentos, que a resposta do indivíduo a um determinado estímulo físico era proporcional à variação do mesmo estímulo. Tal comportamento pode ser descrito pela seguinte equação:

$$dS = K \frac{dU}{U} \quad (2.1)$$

no qual  $dS$  representa o incremento infinitesimal da sensação, enquanto  $dU$ , o incremento infinitesimal do estímulo físico  $U$  em certo instante de tempo;  $K$  representa uma constante determinada experimentalmente. A solução da equação diferencial (equação 2.1) é dada por:

$$S = k \cdot \log \frac{U}{U_0} \quad (2.2)$$

no qual  $U_0$  representa o valor mínimo do estímulo. Depreende-se que a relação entre estímulo e a sensação nos seres humanos provocada por ele é de natureza logarítmica, ou seja, grandes variações do estímulo físico levam a pequenas variações na sensação subjetiva.

Originalmente, a *lei de Fechner-Weber* foi idealizada para a sensação de peso. Entretanto, ela pode ser expandida para sensação de luminosidade e sensação sonora, podendo ser, portanto, regida pela equação 2.1, dentro de certos limites, para representar matematicamente a percepção humana a determinados estímulos físicos.

Fisicamente, som e ruído são tratados da mesma maneira, apesar de, subjetivamente, eles apresentarem diferenças. O estímulo físico que mais se correlaciona com a sensação de som/ruído é a pressão sonora, dada em Pascal [Pa]. A pressão sonora é uma variável flutuante e, sendo assim, é interessante mensurá-la como um valor médio ao longo do tempo.

Conhecida a expressão analítica da pressão sonora  $p(t)$ , a pressão quadrática média ( $\overline{p^2}$ ) é dada por:

$$\overline{p^2} = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} p^2(t) dt \quad [Pa^2] \quad (2.3)$$

Nota-se que  $p^2(t)$  é uma função com intervalo de integração  $T$ . Para um sinal estacionário, esta função converge para um valor estável à medida que  $T$  aumenta. A raiz da pressão quadrática média é equivalente a  $p_{eficaz} = \sqrt{\overline{p^2}}$ . Para tons puros, a pressão média quadrática resulta em:

$$p_{eficaz} = \frac{A}{\sqrt{2}} \quad (2.4)$$

no qual  $A$  representa a amplitude máxima (ou valor de pico) da pressão sonora descrita por  $p(t)$ . De acordo com Bistafa (2006), o valor eficaz é o número único mais utilizado para descrever um sinal acústico, uma vez que tal valor relaciona-se diretamente com a energia transportada pela onda sonora. Para sons nos quais não se conhecem a expressão analítica da forma de onda, a pressão sonora eficaz pode ser estimada através da coleta suficiente de amostras das pressões médias quadráticas, tal que:

$$p_{eficaz} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N p_i^2\right)/N} \quad (2.5)$$

onde,  $N$  denota o número de registros do nível de pressão sonora  $p_i$  em cada instante de tempo.

A medida usual para representação de grandezas acústicas é denominada *Bel* [ $B$ ], em homenagem a Alexander Graham Bell, cientista escocês que patenteou o telefone, em 1876. É frequente, porém, a utilização do submúltiplo *decibel* [ $dB$ ], equivalentente a um décimo do *bel*. A definição geral de decibel é:  $Nível = 10 \log_{10}(\text{variável}/\text{valor de referência})^2$ . No qual, tem-se que: *Nível* equivale à quantidade de decibéis, *variável* pode ser qualquer parâmetro e *valor de referência* normalmente é um valor padrão. Para pressão sonora, o valor de referência é igual a  $2 \times 10^{-5}$  [Pa], denominado de limiar da audibilidade, representando a menor

pressão sonora detectável pelo sistema auditivo. Dessa forma, o nível de pressão sonora (NPS) é dado por:

$$NPS = 10 \log_{10} \left( \frac{\bar{p}^2}{p_{ref}^2} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{p_{rms}}{p_{ref}} \right) \quad (2.5)$$

onde,  $p_{ref}$  equivale ao valor de referência igual a  $2 \times 10^{-5}$  [Pa]. Logo, se escreve: [dB] re  $2 \times 10^{-5}$  [Pa]. Para valores instantâneos de NPS,  $p_{rms}$  deve ser substituído por  $p(t)$ . De forma análoga, tem-se que:

$$p(t) = p_{ref} 10^{NPS/20} \quad (2.6)$$

no qual encontra-se a pressão sonora  $p$  correspondente ao seu respectivo nível de pressão sonora.

As unidades mencionadas nesta dissertação serão apresentadas entre colchetes. Embora o bel/decibel não corresponda propriamente uma unidade, mas sim, uma escala logarítmica, optou-se por tratá-lo da mesma maneira.

## 2.2 Acústica das Edificações

Na vida cotidiana da sociedade, as pessoas estão submetidas a diversos tipos de sons e ruídos, a todo instante. Para usuários de edificações de múltiplos pavimentos não seria diferente. As fontes de ruído em edificações podem ter as mais variadas fontes, sendo classificadas como sendo de origem aérea e/ou estrutural (Figura 2.1). O som gerado por instrumentos musicais, equipamentos, tráfego urbano, buzina de carros e latido de cachorros são exemplos de ruídos aéreos. Em contrapartida, o impacto de um objeto sobre o chão ou sendo arrastado sobre ele, o trepidar de uma máquina de lavar sobre o piso e o ruído hidráulico são exemplos de ruídos estruturais.

Para obtenção de parâmetros de desempenho acústico de edificações, tanto objetivos quanto subjetivos, é necessário a caracterização do sistema estrutural, frequentemente representado por pisos. Zhou *et al.* (2016) realizaram testes de campo e análises teóricas para o sistema de piso de concreto armado reforçado com cabo pré-esforçado, obtendo as características dinâmicas do piso, incluindo frequências naturais, formas dos modos, taxas de amortecimento e resposta de aceleração. Já Chen *et al.* (2014) apresentaram um espectro de resposta de

aceleração orientado ao projeto para calcular a resposta de um piso, considerando as características modais do piso e um nível de confiança especificado.

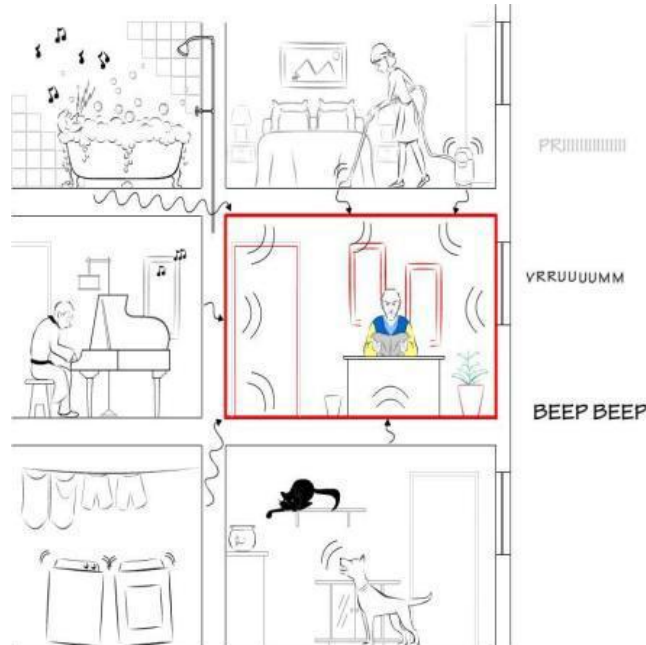


Figura 2.1: Fontes de ruído em uma edificação  
Fonte: Anima Acústica (2012)

Ao analisar o desempenho estrutural, Gerretsen (1976) exhibe os espectros de ruídos mais comuns encontrados por ele (Figura 2.2), comparando-os com o ruído gerado pela máquina padrão de impacto. Observa-se que o ruído gerado por pisadas é a fonte mais frequente e que o caminhar das mulheres com sapatos de salto alto, dentre os sons de passos observados, é aquele que produz os níveis mais elevados de pressão sonora nas faixas de frequência de 1000 a 2000 [Hz] entre as pisadas.

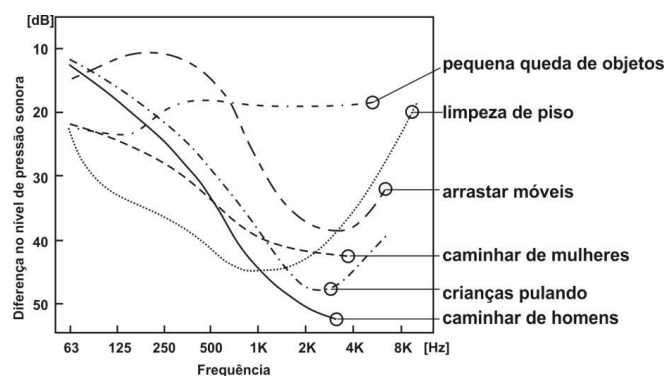


Figura 2.2: Energia sonora dos ruídos de impacto mais frequentes em edificações  
Fonte: adaptado de GERRETSEN (1976)

### 2.2.1 O ruído de impacto

Segundo Bistafa (2006), uma das mais importantes e incômodas fontes de ruído em edificações é as geradas pelo impacto (Figura 2.3). Os sons gerados pelo impacto de objetos no chão, por exemplo, produzem um grande desconforto aos usuários dos apartamentos adjacentes, principalmente no apartamento imediatamente inferior. Trata-se de uma excelente fonte de contato, no qual a laje se torna um radiador de energia sonora em ampla faixa de frequência em virtude do comportamento vibratório gerado pela excitação localizada.

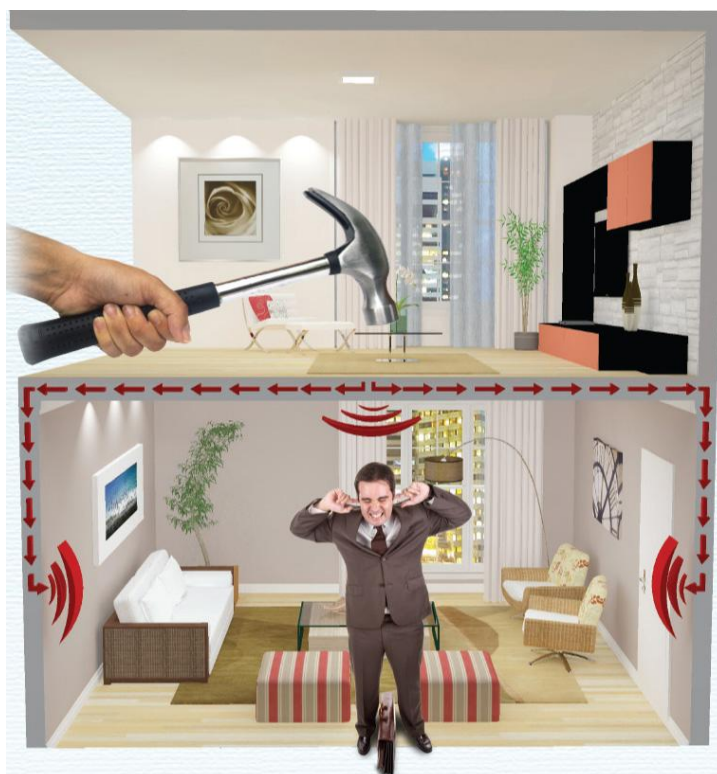


Figura 2.3: Ruído de impacto

Fonte: <<http://www.opereincartongessobergamo.it/>>. Acesso em 10/12/2016

Para classificação do desempenho de pisos estruturais, é comum utilizar a máquina padrão de impacto como fonte geradora normalizada de ruído de impacto. Desde 1938, o ruído de impacto foi um dos primeiros fenômenos a ter um método de medida normatizado, o qual sofreu alterações ao longo dos anos. Nos dias atuais, a metodologia é representada através da norma ISO 140-7 (1998), utilizada neste trabalho, e que será descrita mais adiante. A máquina padrão de impacto normalizada é descrita e caracterizada no Anexo A.

Para avaliar o isolamento ao ruído de impacto, há procedimentos simplificados, tais como o descrito por Pereira *et al.* (2014). Tais autores adotaram uma metodologia no qual utilizou-se lajes de tamanho reduzido para determinar a redução de ruído de impacto proporcionada por diferentes tipos de revestimentos de pisos, seguindo o procedimento descrito pelo documento técnico ISO/CD 16251-1.

No Brasil, há importantes trabalhos referentes ao desempenho de pisos estruturais quanto ao ruído de impacto, tais como o de Rezende (2014), Neubauer (2009), Cornnachia (2009), Ferraz (2008), Pereyron (2008), Pedroso (2007) e Machado (2003).

Rezende (2014) comparou os resultados de avaliação de pisos quanto ao ruído de impacto obtidos através de ensaios *in-situ* com a avaliação subjetiva dos mesmos pelos usuários de tais sistemas residenciais. A partir do desenvolvimento de um questionário relativo à percepção do incômodo originado pelo ruído de impacto de piso em edificações residenciais na cidade de Belo Horizonte, a autora pôde analisar objetiva e subjetivamente o desempenho de pisos quanto ao ruído de impacto, constatando um grande número de insatisfeitos e, dessa forma, propondo um novo critério de avaliação.

Neubauer (2009) analisou e comparou distintas composições de sistemas de pisos flutuantes de madeira natural quando expostos ao ruído de impacto. A partir de ensaios em laboratório, constatou-se que pisos com contrapiso, em geral, eram mais eficientes do que os pisos sem contrapiso no que diz respeito ao isolamento ao ruído de impacto. Dentre as técnicas tradicionais de construção (pisos não flutuantes), o revestimento de taco de madeira foi o que apresentou o pior desempenho quanto ao isolamento. Observou-se que, de modo geral, a utilização da técnica de piso flutuante traz grandes benefícios para os usuários de sistemas residenciais, uma vez que permitem elevar a eficiência do isolamento de pisos ao ruído de impacto.

Cornnachia (2009) realizou uma avaliação do nível de isolamento ao ruído de impacto do sistema laje/piso de unidades residenciais, avaliando três tipos de lajes: maciça, nervurada e pré-moldada. Reforçou-se a influência do revestimento no desempenho de pisos, ao passo que os melhores resultados foram obtidos, em ordem, para: carpete, laminado em madeira, lajes no contrapiso e cerâmico. Observou-se que o desempenho das construções brasileiras está muito aquém dos padrões internacionais, uma vez que não se atende aos critérios

mínimos previstos pelas mesmas. A maior parte das lajes ensaiadas foi classificada com o pior desempenho, segundo a norma brasileira NBR 15575-3 (2008).

Ferraz (2008) efetuou ensaios de campo em dezesseis pisos para a determinação das propriedades acústicas de isolamento do ruído de impacto em sistemas de pisos flutuantes completos, com preenchimento de material resiliente sobre todo o piso, e reduzidos, com preenchimento de material resiliente apenas de uma porção específica de área submetida à excitação de impacto. Destacou-se a relevância do material lã de vidro dentre os materiais resilientes utilizados nos pisos. Revelaram-se semelhanças no desempenho geral entre pisos flutuantes completos e reduzidos, apesar de, em seus valores espectrais, haver divergências. Constatou-se que a NBR 15575-3 (2008) apresentava valores bem menos restritivos quando comparadas às normas de outros países.

Pereyron (2008) analisou tipologias de lajes (em “osso”) do tipo maciça, nervurada, pré-moldada convencional e pré-moldada treliçada quanto ao isolamento do ruído de impacto. A laje pré-moldada convencional foi a que apresentou o pior desempenho que foi atribuído à baixa massa que o sistema estrutural apresenta. O sistema estrutural que se mostrou com melhor desempenho quanto ao isolamento acústico foi a laje maciça. Tal desempenho, segundo o autor, foi atribuído ao fato da mesma apresentar uma armadura em cruz que recebe maior quantidade de ferragem e uma espessura maciça de 12 [cm] de concreto, assegurando, dessa forma, maior quantidade de massa e uma maior rigidez, aumentando a eficiência do isolamento acústico quanto ao ruído de impacto.

Pedroso (2007) mediu e comparou o desempenho de diferentes materiais isolantes para composição de pisos flutuantes, hierarquizando-os quanto ao seu grau de isolamento acústico ao ruído de impacto em laboratório e determinando a vantagem relativa no critério custo/benefício. Dentre os sistemas com revestimentos de porcelanato e laminado melamínico de madeira, lã de vidro, mantas de borracha reciclada (resíduos de E.V.A.), isopor de alta densidade e manta de polietileno como materiais resilientes, a lã de vidro com revestimento em porcelanato foi a composição que apresentou melhores resultados.

Machado (2003) estudou diversas composições de pisos flutuantes com materiais resilientes de polietileno com espessuras de 5, 10 e 20 [mm], relacionando os valores experimentais aos obtidos via expressões analítico-experimentais presentes na literatura. Investigou-se, também,

o comportamento do sistema de piso *slim floor* sob a influência de excitação do caminhar, apresentando respostas satisfatórias em relação aos critérios de conforto de vibração definidos pelas normas consideradas.

Gerretsen (1976) e Shi *et al.* (1997) criticaram a forma de avaliação do ruído de impacto e a utilização da máquina padrão de impacto como fonte normalizada, respectivamente. Gerretsen (1976) observou que a avaliação do isolamento do ruído de impacto através da máquina padrão de impacto era insuficiente para caracterizá-lo, uma vez que as diferenças no espectro do ruído emitido pela máquina e os ruídos de impacto reais eram notórios. Dessa forma, o autor propôs um novo modelo no qual o ajuste dos valores reais com os obtidos pela máquina foi realizado. Já Shi *et al.* (1997) examinaram a forma de onda e os espectros da pisada humana, de sacos de areia, de bolas de areia, de pneus caindo e da máquina padrão de impacto. A partir dos resultados obtidos, observou-se que a fonte de excitação representada pela bola de areia foi a que teve maior relação com o som de passos real, sendo esta a que reproduziria de forma fiel o ruído de impacto simulado, ao invés da máquina padrão de impacto.

Há vários trabalhos que examinam a utilização da máquina padrão de impacto para geração de ruído de impacto, assim como há outros que sugerem novos instrumentos e métodos para geração e avaliação do ruído de impacto padrão. Loverde e Dong (2014) sugerem uma avaliação de impacto de baixa frequência, uma nova métrica para quantificar e avaliar o ruído de impacto de baixa frequência. A nova métrica proposta, chamada de LIR (*Low-Frequency Impact Rating*), pode ser encontrada simultaneamente com as métricas existentes; o LIR resulta num parâmetro eficaz para melhor avaliar o desempenho acústico de pisos, relacionando-o à satisfação de seus ocupantes. Araújo *et al.* (2016) apresentaram diferenças nos resultados de isolamento do ruído de impacto quando se utilizou fontes normalizadas e não normalizadas de impacto. Em seu trabalho, Scholl (2001) concluiu que se o objetivo da máquina padrão de impacto é o de caracterizar o piso, simulando o ruído de caminhar, deve-se fazer com que a mesma se comporte tal como um indivíduo caminhando sobre o piso. Isso significa que a máquina e o ruído de passos devem ter a mesma impedância de origem e, para tanto, sugeriu-se pequenas modificações da máquina padrão de impacto. Testes subsequentes revelaram que os resultados gerados pela máquina padrão de impacto modificada eram muito mais próximos do ruído de passos do que os resultados utilizando a máquina de impacto padrão. Já Dodd e Yen (2014) propuseram uma nova metodologia como opção para a

medição do nível de pressão sonora de impacto de pisos, tornando os testes de campo de edifícios mais fáceis e atraentes. Mojolla (2015) construiu a sua própria máquina de impacto, segundo especificações do anexo A da norma ISO 140-7 (1998). O protótipo construído foi validado ao se comparar os níveis de pressão sonora obtidos pela máquina construída e pela máquina padrão de impacto disponível em mercado. Além disso, incorporou-se inovações ao protótipo, como a inclusão de rolamentos lineares como guias para a queda dos martelos e a adição de peças resilientes sobre os contatos de elevação dos martelos, reduzindo a emissão de ruído aéreo gerado pelo funcionamento.

Embora alvo de críticas, a máquina padrão de impacto ainda é a fonte normalizada, utilizada na geração de ruídos de impacto, internacionalmente aceita pela comunidade científica e recomendada por normas tanto nacionais quanto internacionais.

### 2.2.2 Transmissão de ruído aéreo

O ruído aéreo é propagado pelo ar em forma de ondas esféricas a partir da sua origem, decorrente da produção de uma pressão sonora. Quando incidido em uma parede, por exemplo, o ruído aéreo sofre três processos: reflexão, absorção e transmissão (Figura 2.4); ou seja, parte da energia sonora é refletida, outra parte é absorvida e outra transmitida (PEDROSO, 2007).

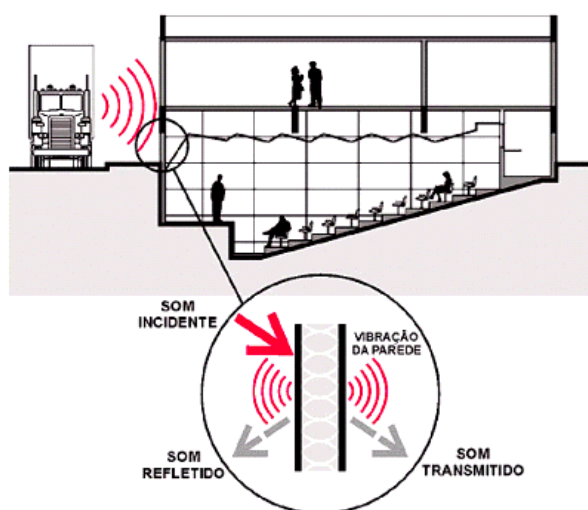


Figura 2.4: Mecanismo de transmissão do ruído aéreo  
Fonte: Arch-tec – Acústica Arquitetônica (adaptado)

Paredes, painéis e clausuras utilizam o princípio da reflexão para minimizar o som transmitido. Os materiais absorvedores aplicados, geralmente em paredes de salas, utilizam o princípio da dissipação para minimizar o som refletido. As duas mais importantes propriedades que descrevem o desempenho acústico do som no interior dos materiais absorvedores são: resistividade ao fluxo de ar e porosidade. Nos materiais porosos, a energia acústica incidente entra pelos poros e se dissipa através das múltiplas reflexões e do atrito viscoso, transformando-se em energia térmica. Já para os materiais fibrosos, a energia acústica incidente entra pelos poros das fibras, fazendo-as vibrar junto com o ar e, dessa forma, se dissipando através da transformação da energia acústica em energia térmica.

O ruído aéreo pode ser transmitido das seguintes maneiras: diretamente, através de uma parede/painel; ou indiretamente, via difração acústica (através de frestas ou fendas existentes) pelas estruturas adjacentes como pilares, vigas, paredes confluentes, janelas, portas, dutos de ar e de água, eletrodutos, entreforros e entrepisos (SILVA, 2002).

Segundo Simons e Waters (2004), diversas são as rotas de propagação que a transmissão do ruído por difração acústica pode perfazer, até mesmo todas as partes que compõem a estrutura do edifício. As vibrações acústicas originadas em outros elementos podem ser transmitidas para os demais dentro do edifício, dado que, uma vez que tais vibrações entram em contato com a estrutura, podem emergir como som em qualquer outra parte do edifício.

Quando elementos da edificação como paredes ou janelas são submetidos a uma variação de pressão sonora, os mesmos vibram e, genericamente, esta vibração é controlada principalmente pela massa da superfície (SOUZA *et al.*, 2006).

Há importantes trabalhos que possuem como objetivo de análise o ruído aéreo, desde a sua origem até a sua percepção. Rodrigues (2009) caracterizou o ruído no ambiente de um galpão industrial, relacionando o ruído proveniente dos equipamentos ruidosos com os níveis de pressão sonora nos postos de trabalho. Observou-se que é mais viável o tratamento acústico dos equipamentos da linha de produção da fábrica do que investir no tratamento das superfícies do ambiente.

Já Navarro (2004) realizou um diagnóstico das condições acústicas nas áreas de praças de alimentação de *shopping centers*, através da utilização de fórmulas analíticas e medições *in-*

*situ*, buscando identificar os parâmetros mais importantes para o problema e suas interrelações.

Há, também, outros aspectos que influenciam na percepção do ruído aéreo pela população. Hirashima e Assis (2017) realizaram estudo no qual investigaram as respostas dos usuários de espaços urbanos abertos, quando se diz respeito à percepção do volume sonoro e à avaliação de conforto acústico. Os resultados mostraram que os indivíduos tendem a ser mais tolerantes na praça que possui a melhor ambiência e as melhores condições de conforto térmico, tanto no que se refere à percepção do volume sonoro como no que tange à discussão a respeito do conforto acústico. Tal estudo foi realizado na cidade de Belo Horizonte/MG.

### **2.2.3 Transmissão de ruído estrutural**

O ruído estrutural é originado através de vibrações geradas por impactos e/ou excitações dinâmicas de diversas naturezas em componentes da edificação, tais como pisos, paredes, coberturas, dentre outros. As superfícies dos elementos de edificações funcionam como amplificadores dos sons gerados por vibração (METHA *et al.*, 1999).

As ondas elásticas, quando incidem sobre uma estrutura, podem se propagar com pouca perda de energia. Sendo assim, a atenuação do fenômeno sonoro em sólidos geralmente é bem menor do que a atenuação de tal fenômeno transmitido em meios líquidos ou gasosos (MACHADO, 2003).

De acordo com Magalhães (2013), o conhecimento do fenômeno da transmissão do ruído estrutural é de suma importância para se determinar a contribuição desta ‘fonte’ de ruído em relação ao ruído global gerado no interior de um ambiente fechado. Segundo esse mesmo autor, a transmissão do ruído estrutural é influenciada pelos seguintes fatores:

- Interposição de material flexível entre a fonte e o receptor;
- Rigidez dinâmica do material flexível;
- Rigidez da estrutura vibrante e de sua frequência crítica.

De maneira geral, o isolamento do ruído estrutural é o conjunto de ações que visam à interrupção ou redução do fluxo de energia sonora de uma estrutura para o ar ou para outro

componente estrutural. Quando submetido a uma excitação, o piso/laje estrutural de uma determinada edificação pode vibrar e irradiar energia para o andar imediatamente inferior. Dessa forma, o mesmo piso pode não somente irradiar energia sonora para aquele pavimento, mas também transmitir energia sonora para os componentes ligados a ele, ou seja, para as paredes e demais componentes estruturais, passando as mesmas a vibrar e irradiar energia sonora. O isolamento ao ruído estrutural se torna mais eficiente se a quantidade de ruído transmitido para o ar ou outro componente estrutural for reduzida com o mínimo de ‘esforço’ (MAGALHÃES, 2013).

Em edificações, o isolamento ao ruído de impacto é obtido através das seguintes práticas:

- Utilização de forro falso no recinto de recepção do ruído;
- Utilização de tapetes espessos e carpetes no piso onde ocorre o ruído;
- Interposição de material flexível (resiliente) entre o contrapiso e a laje estrutural (“Método do piso flutuante”).

## **2.3 Propagação do ruído/vibração estrutural**

Diversos são os autores que estudaram a propagação de ruído e vibração em estruturas, especialmente em componentes estruturais de edificações. Vale destacar que o ruído e a vibração são fenômenos físicos que se relacionam, uma vez que a excitação localizada gera a vibração da estrutura, irradiando energia sonora para os diversos espaços adjacentes.

Jeon *et al.* (2004) avaliaram os sistemas de isolamento acústico por impacto de piso em construções de concreto armado, a partir de fontes de excitações localizadas. O ruído e a vibração das fontes de impacto foram analisados e a relação entre os níveis sonoros e as respostas subjetivas foi investigada. Observou-se que existe uma relação linear entre o som de impacto do piso e a vibração.

Já Kim *et al.* (2015) identificaram um nível de transmissão de vibração e ruído para casas adjacentes no momento em que fontes de excitação de impacto são geradas. Os resultados das medições mostraram que 54,9~58,9% da energia foi transferida para casas abaixo, enquanto 9,7~9,9% da energia foi entregue às casas acima.

Jeon *et al.* (2015) investigaram o caminho de transferência do ruído e vibração em edifícios de vários andares. Com base nos resultados das medições, a análise do caminho de transferência foi conduzida em termos das respostas de frequência. A contribuição do ruído estrutural e da vibração dos componentes da sala para o ruído de impacto do piso foi discutida com base na análise do caminho de transferência.

Por vezes, o ruído transmitido via estruturas irradia-se para os ambientes adjacentes, na forma de ondas acústicas. Um dos fatores que determinam a irradiação de energia acústica é o acoplamento fluido-estrutura. Nos fluidos (gases e líquidos) há somente a ocorrência de ondas longitudinais. Já nos sólidos, são três os principais tipos de ondas passíveis de ocorrer em um determinado componente estrutural: ondas quase-longitudinais, ondas transversais e ondas de flexão. Em edificações, o meio no qual se tem a propagação das ondas vibratórias pode ser os pilares, vigas, e/ou lajes (MAGALHÃES, 2013).

### **2.3.1 Tipos de ondas que se propagam nas estruturas**

#### **2.3.1.1 Ondas Quase-Longitudinais**

As ondas quase-longitudinais são aquelas em que a direção do deslocamento das partículas sólidas se dá na mesma direção de propagação da onda. Elas podem ocorrer somente em sólidos cujas dimensões em uma ou duas direções sejam muito menores do que o comprimento da onda. Assim, este tipo de onda é comum em estruturas de edifícios em geral, já que, pelo menos, uma das dimensões dos componentes estruturais (vigas ou lajes) é bem menor do que o comprimento de onda em determinadas faixas de frequência comuns em acústica de edificações. A velocidade de propagação de uma onda longitudinal é igual a  $C_L = \sqrt{D/\rho}$ , onde  $D$  é a rigidez longitudinal do material e  $\rho$  sua densidade.

#### **2.3.1.2 Ondas Transversais**

Ondas transversais se referem a outro tipo de onda que podem ser encontradas em sistemas estruturais, especialmente em estruturas de edifícios. Na ocasião, o deslocamento da partícula será perpendicular à direção de propagação da onda. A velocidade de uma onda transversal é igual a  $C_S = \sqrt{G/\rho}$ , no qual  $G$  é a rigidez transversal do material - denominada módulo transversal de elasticidade - e  $\rho$  sua densidade.

### 2.3.1.3 Ondas de Flexão

As ondas de flexão são as mais importantes para a radiação sonora, uma vez que as deflexões laterais são relevantes e as deformações e tensões que dominam a energia potencial atuam na direção longitudinal. A velocidade de uma onda de flexão, denotada por  $C_B$ , é dada por  $\sqrt[4]{B/m'} \sqrt[2]{\omega}$ , no qual  $m'$  representa a massa por unidade de área,  $B$  é a rigidez a flexão e  $\omega$  é a frequência em [rad/s].

### 2.3.2 Radiação sonora

A radiação sonora é o fenômeno no qual ondas acústicas são geradas devido a uma fonte de excitação; a princípio, quanto maior a potência da força excitadora, maior será a energia irradiada para o meio que a circunda.

O isolamento do ruído e a radiação sonora são grandezas correlacionadas. Faz-se necessário reduzir a eficiência de radiação com intuito de atingir um bom desempenho quanto ao isolamento do ruído e da vibração de uma estrutura. Para Fahy (1987), pode-se reduzir a energia sonora irradiada por uma estrutura diminuindo-se a velocidade da fonte sonora, a área de superfície, o comprimento de onda de flexão através da utilização de placas mais finas e removendo-se enrijecedores (apoios ou restrições) para reduzir o comprimento do contorno. Na prática, os efeitos adversos dos enrijecedores podem ser minimizados através do aumento do amortecimento da estrutura.

Quando a frequência de propagação da onda de flexão em um determinado painel coincide com a frequência de propagação da onda acústica ( $\omega$ ), este valor de frequência é denominado como frequência crítica ou menor frequência de coincidência ( $\omega_c$ ). Sendo assim, o comportamento do painel é dividido em duas situações:  $\omega < \omega_c$  e  $\omega > \omega_c$ .

Em baixas frequências, quando a frequência de vibração de uma placa é menor que a frequência crítica (frequência na qual a velocidade de propagação da onda sonora no ar coincide com o valor de velocidade de propagação da onda de flexão no material),  $\omega < \omega_c$ , a radiação sonora tende a zero ( $\sigma \ll 1$ ) em se tratando de placas infinitas com uma onda de flexão livre (FAHY, 1987). Já em placas finitas, os lados e cantos resultam em fontes de radiação sonora (Figura 2.5).

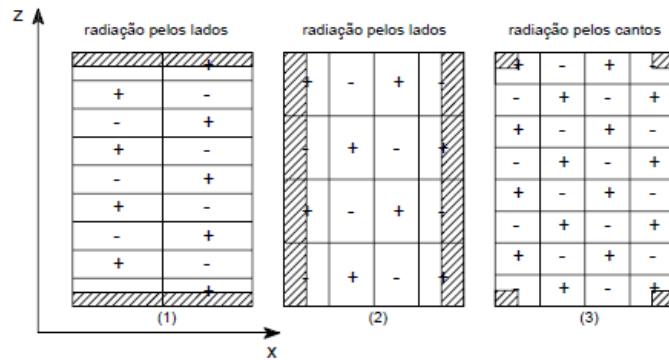


Figura 2.5: Lados e cantos como fonte de radiação (FAHY, 1987)

Segundo Fahy (1987), a eficiência da radiação em todos os modos de vibração de um painel (para baixas frequências) será menor ou igual à vibração de uma célula isolada. Além do mais, será mais eficiente em modos ímpares com o mesmo comprimento de onda e inversamente proporcional à área do painel em questão.

Na Figura 2.6, observa-se o processo de cancelamento para o caso unidimensional. O campo de radiação deve estar simetricamente em fase ou antissimetricamente em fase em relação ao centro do painel. Se as células das extremidades estiverem fora de fase, ocorrerá o cancelamento para os modos pares e a soma para os modos ímpares (FAHY, 1987).

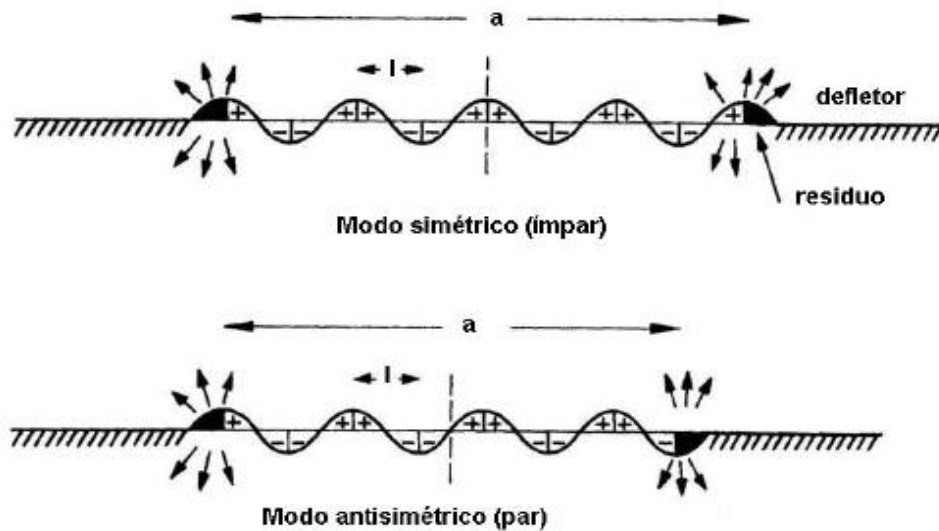


Figura 2.6: Caso unidirecional: modo simétrico e antissimétrico (FAHY, 1987)

Em altas frequências, quando a frequência natural de uma placa é maior que a frequência de coincidência ( $\omega > \omega_c$ ), a radiação tende a 1 ( $\sigma \rightarrow 1$ ). Dessa forma, o som é irradiado em um

ângulo  $\Phi$  com a placa ou  $\lambda_{ar} = \lambda_B \sin \Phi$  ou  $k_B = k_{ar} \sin \Phi$ , sendo  $k$  o número de onda ou frequência espacial ( $\omega/c$ );  $\lambda_{ar}$  é o comprimento da onda sonora no ar e  $\lambda_B$  o comprimento da onda sonora no material da placa. Na frequência crítica,  $\sin \Phi = 1$ ; ou seja, o som é irradiado de forma paralela (FAHY, 1987).

## 2.4 Normalização na área de Acústica

Nesta seção, será realizada uma breve apresentação das normas referenciadas nesta dissertação.

### 2.4.1 Norma ISO 140-7 (1998)

A Organização Internacional de Padronização/Normalização prevê a aplicação da norma ISO 140-7, intitulada como: “*Measurement of sound insulation in buildings and of buildings elements; part VII: Field measurements of impact sound insulation of floors*” ou “Medição de isolamento sonoro em edificações e elementos de edificações; parte VII: Medição em campo do isolamento sonoro de pisos” para proceder quanto à medição sonora do ruído de impacto através da máquina de impacto padrão – do inglês *tapping machine* (Figura 2.7). Os ensaios permitem determinar o nível de pressão sonora de impacto ( $L_i$ ), bem como o nível de pressão sonora de impacto normalizado ( $L'_{nT}$ ) e o nível de pressão sonora de impacto padronizado ( $L'_{nT}$ ).

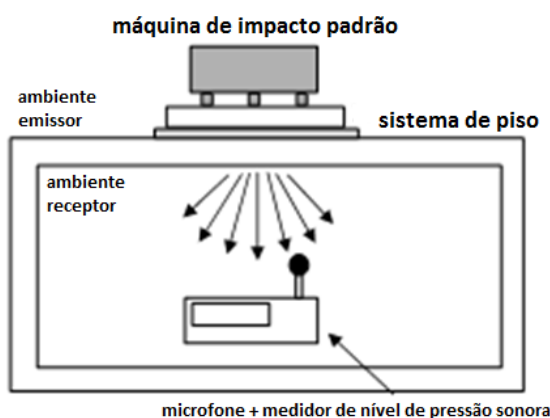


Figura 2.7: Piso estrutural sendo excitado pela máquina de impacto padrão  
Fonte: <http://www.ocn.org.au/> (adaptado)

O nível de pressão sonora de impacto ( $L_i$ ) representa a média do nível de pressão sonora medido no ambiente receptor e gerado por uma fonte padrão, sendo denotado por:

$$L = 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{L_j/10} \right) [dB] \quad (2.7)$$

onde,  $L_j$  denotam os níveis de pressão sonora de  $L_1$  à  $L_n$  em  $n$  posições diferentes no ambiente.

Quando se tem por objetivo determinar as características de isolamento ao ruído de impacto entre dois ambientes distintos, o nível de pressão sonora de impacto normalizado ( $L'_n$ ) deve ser utilizado. O valor de  $L'_n$  é descrito pela seguinte equação:

$$L'_n = L_i + 10 \log \frac{A}{A_0} [dB] \quad (2.8)$$

onde,  $L_i$  denota o nível de pressão sonora de impacto,  $A$  é a área de absorção da sala receptora e  $A_0$  é a área de absorção de referência, sendo dada por 10 [m<sup>2</sup>] sabine. O conhecimento do valor da área de absorção da sala receptora requer a aplicação da norma ISO 3382-2 (2008) para determinação do tempo de reverberação de um recinto. O procedimento para obtenção do tempo de reverberação será visto na próxima subseção. A relação entre tempo de reverberação ( $T_{60}$ ) e área de absorção ( $A$ ) é dado por:

$$T_{60} = \frac{0,161V}{A} \quad (2.9)$$

onde,  $V$  representa o volume do ambiente receptor em metros cúbicos. De posse de todos os parâmetros, calcula-se o nível de pressão sonora de impacto normalizado, o  $L'_n$ , representado por um gráfico que contém a energia sonora presente em cada banda de frequência.

Por outro lado, quando se deseja determinar a proteção conferida aos ocupantes do estabelecimento residencial, o nível de pressão sonora de impacto padronizado,  $L'_{nT}$ , é o parâmetro mais apropriado. Tal parâmetro é dado por:

$$L'_{nT} = L_i - 10 \log \frac{T}{T_0} [dB] \quad (2.10)$$

no qual,  $L_i$  é o nível de pressão sonora de impacto,  $T$  é o tempo de reverberação no compartimento e  $T_0$  é o tempo de reverberação de referência (0,5 [s], para habitações).

A norma ISO 140-7 (1998) prevê o estabelecimento de, no mínimo, quatro posições diferentes tanto para a máquina de impacto padrão quanto para o microfone. A máquina de impacto padrão deve estar localizada no ambiente emissor (pavimento superior) e o microfone deve estar localizado no ambiente receptor (pavimento inferior). Entende-se por ambiente emissor o recinto superior no qual são gerados os ruídos de impacto e ambiente receptor o recinto inferior no qual são medidos os níveis de pressão sonora. A distância da máquina de impacto para as extremidades do recinto deve ser de pelo menos 0,5 [m]. A máquina de impacto padrão deve ser posicionada a 45° em relação às paredes do ambiente. Tal posicionamento tem por finalidade evitar que a excitação mecânica dos martelos da máquina venha a atingir uma eventual viga na laje/piso de ensaio.

As posições do microfone na sala receptora devem ser de, no mínimo: 0,7 [m] entre si, 0,5 [m] entre qualquer posição do microfone e os envoltórios do recinto e 1,0 [m] entre qualquer posição do microfone e o piso superior que está sendo excitado pela máquina de impacto padrão. O número mínimo de medições usando posições fixas de microfone é de seis.

Para realização dos ensaios, faz-se necessário efetuar as vedações de janelas e portas, de modo a garantir o isolamento de ruído aéreo, assegurando, assim, a qualidade dos resultados dos ensaios do ruído de impacto em pisos.

A faixa de frequência mínima é de 100 a 3150 [Hz]. Para cada posição do microfone, o tempo mínimo de aquisição dos níveis sonoros de ruído de impacto é de 6 [s].

#### **2.4.2 Norma ISO 3382-2 (2008)**

A norma ISO 3382 trata da medição de parâmetros acústicos. A parte 2 de tal norma, em especial, aborda a metodologia utilizada para o cálculo do tempo de reverberação em salas comuns. Essa norma especifica três níveis de exatidão do procedimento para medição: pesquisa, engenharia e precisão; diferem-se, basicamente, quanto ao número de posições de medida. Ao aplicar tal norma no presente trabalho, será utilizado o nível de engenharia. A Tabela 2-1 a seguir, prevê o número mínimo de posições de medição.

Tabela 2- 1: Número mínimo de posições de medição, segundo a ISO 3382-2 (2008)

|                                   | Pesquisa | Engenharia | Precisão |
|-----------------------------------|----------|------------|----------|
| Combinações fonte-microfone       | 2        | 6          | 12       |
| Posições de fonte                 | $\geq 1$ | $\geq 2$   | $\geq 2$ |
| Posições de microfone             | $\geq 2$ | $\geq 2$   | $\geq 3$ |
| Nº de decaimentos em cada posição | 1        | 2          | 3        |

Há vários motivos por meio dos quais se faz necessário conhecer o tempo de reverberação de um determinado ambiente. O primeiro deles se dá por meio dos fatores: nível de pressão sonora de fontes de ruído, inteligibilidade da fala e percepção da sensação de privacidade de um quarto; no qual se encontram fortemente interligados com o tempo de reverberação. Em segundo, o conhecimento do tempo de reverberação de um ambiente reflete na quantificação de uma variável para se determinar o termo de correção, relacionado ao fator de absorção, de um ambiente presente em muitas medições acústicas.

Durante a realização das medições, o número de pessoas presentes no ambiente deverá ser o mesmo de quando houver a medição com a máquina de impacto padrão. Tal medida tem por meta melhor representar o estado desocupado do quarto e estabelecer um processo de medição que seja coerente, afinal, pessoas também representam superfícies absorvedoras que poderão influenciar diretamente nos resultados.

### 2.4.3 Norma ISO 717-2 (2013)

A Norma ISO 717 é intitulada como “Classificação de isolamento sonoro em edificações e elementos de edificações” – do inglês “*Rating of sound insulation in buildings and building elements*”. Especificamente, sua segunda parte refere-se ao isolamento ao ruído de impacto. Tal norma tem por objetivo transformar os valores experimentais de  $L_i$  (níveis de pressão sonora) cuja representação se dá por um gráfico (energia sonora *versus* frequência), em um único parâmetro. Esse parâmetro é chamado de Nível de Pressão Sonora Normalizado Ponderado de Impacto ( $L'_{n,w}$ ) ou o Nível de Pressão Sonora Padronizado Ponderado de Impacto ( $L'_{nT,w}$ ).

Conhecidas os conjuntos de valores  $L'_n$  e  $L'_{nT}$  através da aplicação das equações 2.7 e 2.9, o valor de  $L'_{nT,w}$  é obtido através da comparação de cada valor de  $L'_n$  e  $L'_{nT}$  com valores de referência (Figura 2.8). A curva de valores de referência, obtida pela ISO 717-2 (2013), é dada em bandas de frequência de um terço de oitavas. Uma vez que os valores de  $L_i$

representam um gráfico com a distribuição de energia sonora por faixa de frequência, os valores de  $L'_{nT}$  e  $L'_{nT}$  também o serão. A curva dos valores de referência deve ser movida verticalmente em direção à curva de valores medidos até o ponto em que a soma das contribuições da curva dos valores medidos acima da curva dos valores de referência seja menor e mais próximo de 32 [dB]. Feito isso, o valor na ordenada cuja abscissa é de 500 [Hz] será o valor  $L_{nT,w}$ .

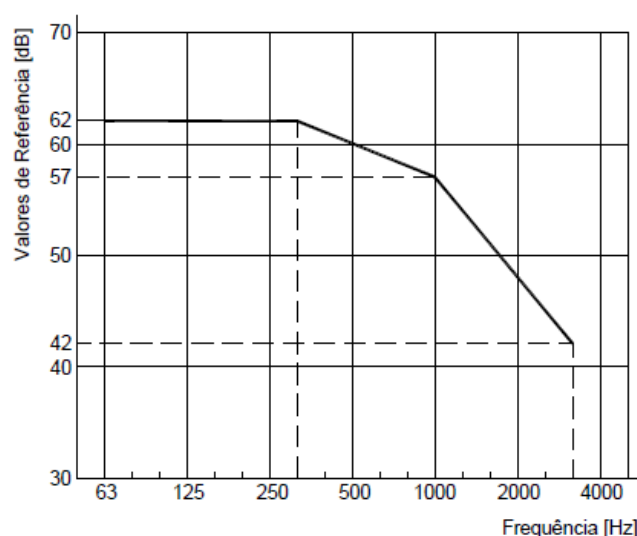


Figura 2.8: Curva de valores de referência do ruído de impacto (1/3 oitavas)  
Fonte: Norma ISO 717-2 (2013)

O valor de  $L'_{nT,w}$  é representado por um único número que identifica o isolamento sonoro de pisos estruturais, sendo importante pois representa o parâmetro utilizado para comparação e classificação do ruído de impacto na maioria das normas atuais, tanto nacionais quanto internacionais, de acordo com níveis mínimos permitidos.

#### 2.4.4 Norma NBR 15575-3 (2013)

A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) prevê a NBR 15575-3 (*Edificações habitacionais – Desempenho; Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos*) que estabelece os requisitos e critérios de desempenho nos quais se aplicam aos sistemas de pisos de edificações habitacionais. Os níveis de desempenho são mostrados na Tabela 2-2, de acordo com o nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado ( $L'_{nT,w}$ ) apresentado pelo sistema estrutural.

Tabela 2- 2: Classificação do nível de desempenho do elemento estrutural de acordo com o  $L'_{nT,w}$ , segundo a NBR 15575-3 (2013)

| Elemento                                                                                                                                                                                                                                                       | $L'_{nT,w}$ [dB] | Nível de desempenho |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------|
| Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas posicionadas em pavimentos distintos                                                                                                                                                                | 66 a 80          | M                   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                | 56 a 65          | I                   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                | $\leq 55$        | S                   |
| Sistema de piso de áreas de uso coletivo (atividades de lazer e esportivas, como home theater, salas de ginástica, salão de festas, salão de jogos, banheiros e vestiários coletivos, cozinhas e lavanderias coletivas) sobre unidades habitacionais autônomas | 51 a 55          | M                   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                | 46 a 50          | I                   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                | $\leq 45$        | S                   |

Na Tabela 2-2 a notação M, I e S representam os desempenhos mínimo, intermediário e superior, respectivamente. Os limites superiores máximo recomendados pela NBR 15575-3 são de 80 e 55 [dB] para as duas categorias de elementos estruturais listados acima, ou seja, para valores acima dos máximo recomendados, o elemento não atende aos requisitos mínimos previstos pela norma.

Yeon *et al.* (2017) analisaram a correlação entre o parâmetro acústico único e o nível de ruído devido à fonte de impacto real (atividade humana), a fim de analisar a aplicabilidade de tal parâmetro único para avaliar o desempenho da estrutura de piso. O resultado da análise mostrou que a correlação entre o desempenho da estrutura do solo avaliada através da quantidade de número simples e nível de ruído ocorrido devido à atividade humana real não foi significativamente alta. Segundo os autores, isso se deve a vários fatores. Primeiro, a força de impacto devido às atividades humanas não poderia aplicar uma excitação constante em todos os instantes. Mesmo que a mesma pessoa seja usada, sua atividade varia devido à limitação causada por diferentes circunstâncias e condições físicas no momento da medição. Em segundo, a condição de retenção dos pisos avaliados, como várias mudanças na constituição que formam uma estrutura de piso e diferença no material de revestimento, pode ser diferente. Por último, uma força de impacto e um nível pressão sonora de impacto padrão que avalia uma estrutura de piso pode ser diferente das características físicas reveladas como resultado de atividades humanas.

# 3

## ANÁLISE ESTATÍSTICA DE ENERGIA

### 3.1 Contexto Geral

A Análise Estatística de Energia, ou simplesmente SEA (*Statistical Energy Analysis*), representa uma metodologia utilizada na área de acústica/vibrações para solucionar determinados tipos de problemas que apresentem uma ou mais fontes de excitação e várias trajetórias de ruído. Enquadram-se, nesse contexto, transmissões via ar, água ou mesmo estrutural.

A metodologia pode ser utilizada tanto para problemas simples (estimativa do ruído em um ambiente dada uma fonte sonora, por exemplo), quanto para problemas mais complexos, como avaliação do desempenho global de uma edificação.

No seu trabalho, Lyon e DeJong (1995) afirmam que a denominação SEA surgiu em meados dos anos sessenta, sendo conhecido por uma área de estudo e análise de sistemas dinâmicos. Dessa forma, pode-se explicar a denominação SEA de acordo com cada termo que a compõe. Assim sendo, tem-se que:

**Análise:** significa que SEA é uma metodologia de estudo, uma abordagem que extrapola um método específico de cálculo, podendo ser aplicada das mais variadas formas, segundo as especificidades de cada sistema.

**Estatística:** Diferentemente de métodos determinísticos, no qual há a necessidade de centenas/milhares de medições ao longo do subsistema para se determinar uma resposta precisa, SEA preocupa-se com o desempenho médio das partículas que compõem o subsistema. Sendo assim, os objetos de estudo são retirados aleatoriamente de populações

com sistemas estruturais similares, de forma a garantir que são amostras que reproduzem o sistema com um todo.

**Energia:** representa a variável primária da metodologia, no qual fornece condição suficiente para se determinar outras variáveis dinâmicas do sistema, tais como pressão, aceleração, etc., permitindo a análise de sistemas estruturais ou acústicos, por exemplo.

Pressupõe-se que o sistema em estudo está inserido em um conjunto de construções similares e, sendo assim, um modelo SEA representa o comportamento médio de um grande conjunto de sistemas físicos, ao considerar as frequências e formas dos modos naturais do sistema como variáveis aleatórias.

Em SEA, um sistema é dividido em subsistemas, no intuito de representar a energia modal local média para apenas uma parte de um sistema complexo global. Cada um desses subsistemas representa um mecanismo de armazenamento de energia. O fluxo de potência entre um par de subsistemas é proporcional aos fatores de perda por acoplamento e à diferença entre as energias modais médias. A potência dissipada é proporcional ao nível de energia de um subsistema e ao fator de perda por amortecimento. Potências de entrada em um modelo de SEA podem ocorrer através de fontes sonoras e estruturais ou excitação por fronteiras turbulentas, dentre outros. Assim, obtém-se um sistema de equações lineares produzidas a partir do balanço de energia entre os subsistemas, no qual é frequente a utilização do nível de energia de tais subsistemas como representação da variável aleatória desconhecida.

### 3.2 Métodos de simulação vibroacústica

Dentre os métodos de simulações vibroacústicas conhecidos, os mais utilizados são: o Método dos Elementos Finitos (*Finite Element Method – FEM*), o Método de Elementos de Contorno (*Boundary Element Method – BEM*), o Método dos Elementos Espectrais (*Spectral Element Method – SEM*), o Método de Análise Estatística de Energia (*Statistical Energy Analysis – SEA*), dentre outros procedimentos. A escolha de um método em detrimento do outro está intrinsecamente relacionada à faixa de frequência de interesse.

Para as baixas frequências, uma das alternativas é a utilização do Método dos Elementos Finitos (FEM) ou o Método de Elementos de Contorno (BEM). Nesses métodos, ocorre a discretização da estrutura em diversos elementos, utilizando-se seis elementos por meio comprimento de onda. Tal delimitação acontece em virtude do método encontrar dificuldades relacionadas à capacidade computacional necessária ao processamento e armazenamento dos resultados em frequências mais altas, tornando-se assim, a análise inviável (ARAÚJO JÚNIOR, 2014).

O Método dos Elementos Espectrais (SEM) é um processo de modelagem de estruturas em altas frequências, baseado na solução exata da equação da onda. O SEM fundamenta-se na construção das matrizes de rigidez dinâmica que relacionam as forças aplicadas a uma estrutura com seus respectivos deslocamentos resultantes. Neste método, a estrutura é dividida em um número de elementos estruturais que depende das descontinuidades existentes na estrutura. Assim sendo, cada um destes elementos estruturais é modelado apenas com um elemento espectral para cada tipo de onda.

A Análise Estatística de Energia (SEA) é o mais conhecido método para análise de sistemas vibroacústicos. É baseado no princípio de conservação de energia, no qual é largamente utilizado na predição de vibração em médias e altas frequências. Na metodologia SEA, o sistema é dividido em subsistemas linearmente acoplados, no qual a troca de energia é apoiada nos modos de ressonância vibracional. Em geral, os subsistemas são representados por elementos estruturais geométricos. A quantidade de energia introduzida no subsistema, advindo de uma excitação externa ou provinda do acoplamento com outros subsistemas é igual à energia dissipada no mesmo. Como já anunciado por Antoine Lavoisier em 1773: “Na natureza, nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”; e, seguindo esse princípio, em modelos SEA, a soma das potências de entrada será igual a soma das potências de saída para cada subsistema, uma vez que o fluxo energético parte do princípio da transformação de um tipo de energia em outra.

Modelos de SEA são utilizados para prever, dentro de bandas de frequências, níveis médios de resposta no espaço e no tempo. Estes modelos podem, também, analisar e comparar as trajetórias de transmissão de ruído, estudando o efeito das mudanças efetuadas no projeto inicial, a partir dos níveis médios de resposta. A aplicabilidade do SEA se faz presente em modelos que possuem várias fontes e trajetórias de ruídos, como por exemplo, em aeronaves,

automóveis, navios e em edificações. O método requer o conhecimento de vários parâmetros, os quais se associam as características dinâmicas de componentes estruturais e suas conexões e interconexões. São exemplos de tais componentes a densidade modal, o fator de perda de amortecimento e também o fator de perda de acoplamento.

### **3.3 O surgimento da metodologia SEA**

Ao longo dos anos, o SEA se consolidou como uma importante ferramenta de análise vibroacústica de sistemas. O primeiro estudo conhecido a respeito do método foi realizado por Lyon e Smith Jr (1959), no qual foi calculado o fluxo de energia entre dois subsistemas levemente acoplados, dada uma fonte de ruído branco. Verificou-se que o fluxo de energia era proporcional à diferença das energias desacopladas dos sistemas ressonantes. Foi constatado que o mesmo fluxo dava-se através do sistema de maior para o de menor energia. Neste mesmo trabalho, observou-se a existência de um limite ao se aumentar o amortecimento de radiação até atingir o amortecimento interno. Logo, quando um ressonador é excitado por um ruído de banda larga e o mesmo tem o seu amortecimento interno reduzido à zero, uma divergência da resposta é gerada, tendendo-a ao infinito. O limite observado por Lyon e Smith Jr (1959) ocorria em virtude à reação do próprio campo de som no ressonador, no qual se adotou chamá-lo de amortecimento de radiação.

Como complemento do trabalho de Lyon e Smith Jr, Lyon e Maydanik (1962) mostrou a importância dos parâmetros básicos do SEA (densidade modal e fator de perda por amortecimento/acoplamento) para a predição de resposta, através da análise do fluxo de energia entre sistemas multimodais.

O cálculo da variância para interações estrutura-estrutura, no qual relativamente poucos modos envolvem-se no processo de troca de energia foi incluído pela primeira vez por Lyon e Eichler (1964).

Uma extensão importante da teoria para dois sistemas foi feita por Eichler (1964), que desenvolveu previsões para a distribuição de energia para o sistema de conexão em T.

Os primeiros trabalhos sobre transmissão de vibração no sistema estrutura-estrutura mostravam preocupação com a inserção do aparato eletrônico e sua influência no resultado

final do experimento. Um artigo escrito acerca deste tópico tratava a interação de uma placa com uma viga, e com duas chapas ligadas entre si (EICHLER, 1965). Um trabalho posterior realizado em um sistema de três elementos chapa-viga, Lyon e Scharton (1965) expandiram ainda mais as possibilidades de utilização da metodologia SEA.

A teoria básica do SEA foi praticamente direcionada à aplicação a estes novos sistemas de vigas e chapas. O grande problema foi à avaliação das densidades modais de subsistemas e fatores de perda de acoplamento para várias junções que interagem entre os elementos. Por exemplo, a radiação de som por meio de placas reforçadas foi avaliada por Maidanik (1962), e um estudo semelhante da radiação por meio de cilindros foi realizado por Manning e Maidanik (1964). Estes, juntamente com trabalhos anteriores, no cálculo de força e de momentos, impedâncias de vigas e placas permitiram o conhecimento de uma ampla variedade de fatores de perda de acoplamento estrutural. Uma série de avaliações de impedância solo-fundação por Kursweil (1971) permite aplicar SEA a certos problemas de vibração estrutura do solo.

A densidade modal de espaços acústicos tem sido estudada por um longo período de tempo. Além disso, a densidade modal de algumas estruturas de painel, planas e curvas, precede o SEA. No entanto, a partir do surgimento do SEA, um esforço considerável na avaliação da densidade modal foi notado. Por exemplo, a densidade modal de cilindros tem sido estudada por Heckl (1962), Manning *et al.* (1966), Chandiramani *et al.* (1966) e Miller e Hart (1967). A densidade modal de cones e painéis sanduíche foi calculada por Wilkinson (1968). A previsão de densidade modal não é tão difícil como o cálculo dos fatores de perda de acoplamento.

Além da utilização do SEA em edifícios, particularmente na área de acústica estrutural, tal método é também bastante utilizado para predição de ruídos em navios, veículos espaciais e automóveis. Destaca-se o avanço do estudo do ruído estrutural nos últimos anos.

### **3.4 Estudo do SEA ao longo dos anos**

Desde a sua criação, a metodologia passou por avanços tanto na sua formulação quanto na sua aplicação em diferentes tipos de sistemas.

Em Churchill e Hopkins (2016), desenvolveram-se modelos de previsão usando a Análise Estatística de Energia (SEA) para calcular o isolamento de som de um piso composto de madeira e concreto.

Já em Araújo Junior (2014), foi avaliado e calculado o ruído estrutural em sistemas oceânicos através da análise estatística de energia. Para tanto, desenvolveu-se o programa intitulado AR<sup>3</sup> utilizado para o desenvolvimento dos conceitos e formulações do SEA, representando uma maneira eficiente para a predição de ruído em estruturas oceânicas em fase de projeto. A utilização do SEA para aplicação em problemas de vibroacústica em altas frequências se mostrou bastante eficiente num primeiro momento, apesar de ainda necessitar de maior precisão no que tange, principalmente, ao cálculo dos fatores de perda.

O trabalho de Azevedo Filho (2004) destaca a utilização da técnica de análise estatística de energia para ruído na faixa de alta frequência para estimar o nível de ruído interno de uma aeronave. Para auxiliar a execução do trabalho, utilizou-se a ferramenta computacional baseada na teoria da técnica SEA para simulação de sistemas dinâmicos. Aplicou-se a teoria do SEA para previsão dos níveis de pressão sonora na cavidade interna de uma aeronave. Esta teoria é utilizada, uma vez que as análises de sistemas aeronáuticos devem ser realizadas para a investigação, considerando os modos de altas ordens. Dessa forma, utilizando-se de técnicas estatísticas, podem-se obter respostas dinâmicas num espectro de frequência mais largo, com consideráveis níveis de aceitação, sem as limitações impostas por métodos determinísticos. Neste trabalho, são construídos modelos da seção de uma fuselagem onde ocorre a fixação asa/fuselagem, para uma análise de sensibilidade da influência da localização de fontes de ruído e da rigidez da estrutura. Desta forma, podem-se comparar as respostas acústicas na cavidade da cabine para os casos de estudo. Foram realizados três grupos de simulação. O primeiro visou analisar a importância da localização das fontes excitadoras no modelo. O segundo grupo teve como objetivo verificar a influência das fontes excitadoras. Já o terceiro estudou diferentes estruturas para verificar a influência da rigidez no nível de pressão sonora do interior da cabine.

A metodologia SEA também é bastante aplicável no setor aeromobilístico. Rodrigues (2003) tem por meta em sua dissertação a análise do campo sonoro interno de um protótipo de segmento de aeronave e sua relação com as propriedades vibroacústicas do sistema cavidade/casca, quando este é excitado externamente por ruído de banda larga. Inicia-se este

estudo apresentando-se os fundamentos da Análise Estatística de Energia, histórico e aplicações possíveis de tal metodologia. Os parâmetros de SEA, densidade modal e fatores de perda, são descritos e determinados experimentalmente. Os resultados para um cilindro de alumínio são comparados com a teoria e resultados de simulação. O balanço de potência entre os subsistemas e a modelagem dos mesmos constitui a segunda parte da dissertação, sendo então apresentados os modelos utilizados na simulação por SEA. Através da comparação de valores de perda de transmissão e valores de nível de vibração da casca cilíndrica realiza-se a validação do modelo. Apontam-se as vantagens da modelagem híbrida utilizando-se dados analíticos e experimentais na construção do modelo. O estudo de elementos finitos (FEM) análise modal e iteração fluido/estrutura, e os estudos de elementos de contorno (BEM), ruído irradiado, são realizados. Explicam-se quais parâmetros de SEA podem ser extraídos em fases iniciais do projeto. Sendo assim, mostra-se que a integração das metodologias de simulação FEM, BEM, SEA, conjugada à inserção de dados experimentais no modelo contribuem para previsões de alta precisão.

Smith (2011) publicou um artigo no qual há o estudo da radiação sonora gerada por superfícies, ocorrendo a aplicação direta do método de análise estatística de energia (SEA), para o problema de ruído estrutural. O tratamento da radiação sonora gerada por superfícies deve levar em consideração a magnitude da vibração estrutural e sua transmissão e distribuição em relação à audibilidade do som, que é irradiado para a envoltória da superfície. Para prever a radiação sonora é necessário saber a amplitude da vibração em função da frequência e sua distribuição no espaço. O fator de perda de radiação  $\eta_{\text{rad}}$  indica a magnitude do amortecimento da radiação acústica e raramente excede  $10^{-3}$  em estruturas de engenharia vibrando no ar. Conclui-se que, para alcançar um bom desempenho no isolamento do ruído e da vibração de uma estrutura, é necessário reduzir a eficiência de radiação.

Em sua tese, Keane (1988) analisa as equações fundamentais da teoria da Análise Estatística de Energia (SEA). A investigação descrita está limitada ao estudo de um sistema composto por dois subsistemas, que formam a base para a maior parte da teoria aceita neste campo. É dada especial atenção ao desenvolvimento de soluções exatas para problemas clássicos, que podem ser comparados às abordagens simplificadas. Estas comparações apontam para deficiências nas formulações usuais do SEA em três áreas. Para acoplamento forte, amortecimento forte entre subsistemas e para sistemas com distribuições de frequência naturais não uniformes. Estas áreas são estudadas utilizando modelos haste com vibração

axial que clarificam grande parte da análise, sem perda significativa de generalidade. O principal exemplo estudado é baseado em parte da estrutura de um barco de guerra. Ele ilustra as simplificações inerentes aos modelos adotados aqui, mas revela também as melhorias que podem ser feitas em relação às técnicas tradicionais do SEA.

Em Borello (2010), o método SEA virtual é introduzido para obter benefício de uma síntese modal determinística e abordagens do SEA para construir um modelo totalmente preditivo na faixa de médias frequências. A análise do SEA Virtual funciona em um modelo original de elementos finitos in-vacuo (MEF). O modelo estrutural é identificado na faixa de MF para um modelo SEA numérico de quais parâmetros são extraídos da MEF. Inicialmente, a dinâmica da estrutura do navio de guerra é reduzida a uma matriz (entre conjuntos de nós de observação) FRF (função de resposta em frequência) estatística. A divisão em subsistemas é calculada a partir desta matriz FRF por um algoritmo atrativo que reordena os nós para obter acoplamento entre os subsistemas. Então, a matriz FRF calculada entre todos os nós é comprimida seguindo o esquema de partição do modelo original. Finalmente, usando métodos inversos, os vários parâmetros dos subsistemas do SEA (densidade modal, massa e fatores de perda de acoplamento) são identificados a partir da FRF comprimida. O modelo paramétrico SEA fornecido por este processo encapsula a dinâmica MEF na faixa de MF. Este modelo SEA é então analiticamente acoplado ao fluido externo para prever a potência irradiada na água. No final do modelo SEA virtual pode prever potência irradiada no fluido sob carga mecânica na faixa de frequência desejada.

Em Tratch Junior (1985), utiliza-se a análise estatística de energia para estudar a transmissão de vibrações através de um modelo desenvolvido em quatro etapas (duas, quatro, sete e doze modelos de placa), simulando a estrutura afetada pelas máquinas presentes na praça de máquinas. Dois modelos analíticos são investigados. Um modelo assume que a transmissão de vibrações está associada a movimentos de flexão apenas. No segundo modelo, estão incluídos que a transferência de energia pode acontecer por flexão, cisalhamento e torção.

Alcantara (2010) e Paixão (2002) aplicam a metodologia SEA em abordagens específicas de sistemas estruturais presentes em edificações.

Alcantara (2010) discutiu os principais aspectos relacionados à transmissão sonora, a partir da metodologia de Análise Estatística de Energia. O trabalho apresenta os resultados obtidos

através de medições *in situ* em residências populares e faz a comparação destes valores com os resultados obtidos utilizando o modelo computacional Free SEA. Constatou-se que, nas residências avaliadas, os índices de redução sonora entre os cômodos analisados apresentaram valores abaixo dos aceitáveis. Também se verificou não haver diferença significativa entre os coeficientes de isolamento sonoro medidos nas residências com os medidos através da simulação com o Free SEA.

Já em Paixão (2002) estudaram-se questões conceituais referentes ao isolamento acústico, buscando-se adaptá-las às especificidades das edificações. Empregou-se a abordagem SEA, através da simulação numérica das Câmaras Reverberantes e da parede construída para as atividades experimentais. Os resultados experimentais, além de serem comparados com as simulações, foram comprovados por cálculos analíticos. É sugerido um novo gráfico relacionando frequência e nível de pressão sonora para o estudo do isolamento acústico de uma parede simples similar às utilizadas nas edificações.

A Análise Estatística de Energia será uma das ferramentas utilizadas para análise da transmissão vibroacústica direta entre dois subsistemas a partir de uma fonte excitadora dada pela máquina padrão de impacto. Demais particularidades serão abordadas no capítulo 7.

# 4

## CONCEITOS ESTATÍSTICOS E TEORIA DA CONFIABILIDADE

### 4.1 Introdução

Inerentemente, ao se realizar ensaios experimentais para estimativa de grandezas físicas, tais como pressão sonora e aceleração, é imperativo reconhecer a presença de incertezas e a consequente variabilidade dos dados gerados pelas medições de campo.

As incertezas existentes em procedimentos *in situ* refletem a falta de conhecimento exato do valor no qual está sendo medido (mensurado). Dessa maneira, o valor resultante é tão somente uma mera estimativa da grandeza em análise, transparecendo diversas fontes de incertezas que estão implícitas no processo. Segundo Haldar e Mahadevan (2000), as fontes de incerteza podem ser classificadas em não cognitivas (quantitativas) ou cognitivas (qualitativas).

As fontes quantitativas podem ser de três tipos. A primeira se deve a aleatoriedade das observações, ou seja, medições repetidas da mesma quantidade física não produzem o mesmo valor devido a numerosas flutuações no ambiente, procedimento de teste, instrumentos, observadores, etc. Tenta-se minimizar essa fonte de incerteza ao se coletar grande quantidade de dados, fornecendo boas informações sobre a variabilidade da quantidade medida e aumentando a confiança no valor utilizado no projeto. Todavia, o número de observações que podem ser coletadas é limitada pela disponibilidade de recursos, tais como dinheiro e tempo. Tal fator ocasiona a segunda fonte de incerteza, conhecida como incerteza estatística, no qual não existe informação precisa sobre a variabilidade da quantidade física de interesse devido a limitação de dados. A informação sobre a variabilidade dependerá do número de amostras. O terceiro tipo de incerteza quantitativa se refere à incerteza na modelagem. Os modelos de análise de sistemas são apenas representações aproximadas do seu comportamento. Dessa forma, durante o processo de modelagem, alguns parâmetros ou determinantes de menor grau relativos ao comportamento dos sistemas são ignorados, levando a diferenças entre o

comportamento real e o que foi modelado. Para se determinar o nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado de um piso estrutural, por exemplo, deve-se realizar seguidas medições de nível de pressão sonora, em quantidades limitadas, a partir de repetições que resultam em valores diferentes devido à flutuações dos fatores ambientais. Em seguida, utiliza-se uma metodologia descrita pela ISO 717-2 (2013) para aproximar, de forma artificial, valores reais em inteiros. Percebe-se, ao longo do processo descrito, a geração e acúmulo de incertezas que nem sempre estão representadas no modelo.

As fontes cognitivas ou qualitativas de incerteza estão relacionadas à imprecisão do problema em virtude das abstrações intelectuais da realidade. Podem ser decorrentes da imprecisão de definição de certos parâmetros, definições das interrelações entre os parâmetros do problema, habilidade e experiência de trabalhadores e engenheiros da construção civil, dentre outros fatores humanos.

Cada uma dessas possíveis fontes de incertezas contribui para indeterminação do valor final de acordo com o grau de influência que esses fatores exercem dado um procedimento experimental específico, ou seja, em função da maior ou menor sensibilidade do mensurando em relação a cada uma das grandezas de entrada.

## **4.2 Variável aleatória**

Em engenharia e em ciências físicas, muitos dos fenômenos aleatórios de interesse estão associados com os resultados numéricos de quantidades físicas (ANG e TANG, 1975). Formalmente, define-se variável aleatória como uma regra que mapeia eventos de um espaço amostral para a reta real, de acordo com a Figura 4.1.

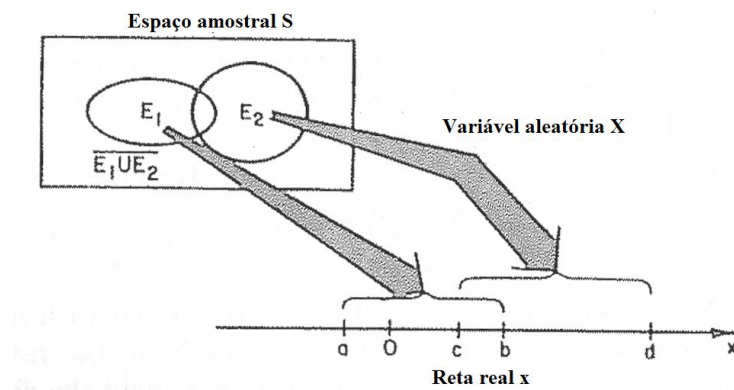


Figura 4.1: Mapeamento dos eventos da reta real através da variável aleatória  $X$  (adaptado ANG E TANG, 1975)

Uma variável aleatória ( $X$ , por exemplo) pode ser discreta ou contínua. Sendo assim,  $X$  representa o conjunto de valores associados a variável aleatória (V.A.) de interesse:

$$X \rightarrow V.A. \quad (4.1)$$

A distribuição de probabilidade pode ser representada pela função de distribuição acumulada:

$$F_X(x) = P(X \leq x) \quad (4.2)$$

Para  $X$  discreta,  $x_i$  assume apenas valores discretos, resultando na função massa de probabilidade. Para  $X$  contínua,  $x$  assume qualquer valor real, resultando na função densidade de probabilidade.

Se  $X$  discreta, a distribuição de probabilidade também pode ser descrita em termos da função massa de probabilidade:

$$F_X(x) = \sum_{\text{todo } x_i \leq x} p_x(x_i) \quad (4.3)$$

no qual  $p_x$  é a função massa de probabilidade descrita por:

$$p_x(x_i) = P(X = x_i) \quad (4.4)$$

no qual  $x_i$  representa os valores assumidos pela variável aleatória discreta.

Em contrapartida, a variável aleatória  $X$  pode ser contínua. Se  $f_X(x)$  é a função densidade de probabilidade de  $X$ , a probabilidade de  $X$  estar no intervalo  $(a, b]$  é:

$$P(a < X \leq b) = \int_a^b f_X(x) dx \quad (4.5)$$

Por consequência, função de distribuição acumulada resulta em:

$$F_X(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f_X(\xi) d\xi \quad (4.6)$$

Se a função de distribuição acumulada possui derivada primeira, a mesma resulta na função densidade de probabilidade, como se segue:

$$f_X(x) = \frac{dF_X(x)}{dx} \quad (4.7)$$

A função  $f_X(x)$  não representa uma probabilidade; todavia,  $f_X(x)dx = P(x < X \leq x + dx)$  representa a probabilidade dos valores de  $X$  estarem contidos no intervalo  $(x, x + dx]$ .

Logo, têm-se as seguintes propriedades:

$$F_X(-\infty) = P(X \leq -\infty) = 0 \quad (4.8)$$

$$F_X(\infty) = P(X \leq \infty) = 1 \quad (4.9)$$

$$F_X(x) \geq 0 \text{ e não decrescente com } x \quad (4.10)$$

Logo, para variáveis aleatórias contínuas e variáveis aleatórias discretas, têm-se as seguintes relações, respectivamente:

$$P(a < X \leq b) = \int_{-\infty}^b f_X(x) dx - \int_{-\infty}^a f_X(x) dx = F_X(b) - F_X(a) \quad (4.11)$$

$$P(a < X \leq b) = \sum_{x_i \leq b} p_x(x_i) - \sum_{x_i \leq a} p_x(x_i) = F_X(b) - F_X(a) \quad (4.12)$$

### 4.3 Descrição probabilística da variável aleatória

Segundo Ang e Tang (1975), a média ou valor esperado de variáveis aleatórias discretas e contínuas são dados, respectivamente:

$$E(x) = \sum_{\text{todo } x_i} x_i p_X(x_i) \quad (4.13)$$

$$E(x) = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx \quad (4.14)$$

A noção de uma média ponderada ou valor esperado pode ser generalizado para uma determinada função da variável aleatória  $X$ . Dada uma função  $g(X)$ , o seu respectivo valor esperado  $E[g(X)]$  é obtido através da generalização da equação:

$$E[g(X)] = \sum_{\text{todo } x_i} g(x_i) p_X(x_i) \quad (4.15)$$

$$E[g(X)] = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) f_X(x) dx \quad (4.16)$$

No qual  $E[g(x)]$  é conhecido como a esperança matemática de  $g(x)$ .

Outros valores utilizados para caracterizar uma tendência central ou de posição são a moda e a mediana. A moda ( $\bar{x}$ ) é número assumido por  $X$  que possui o maior valor de massa ou densidade de probabilidade. Já a mediana ( $x_m$ ) é o valor da variável aleatória que divide a função de distribuição acumulada em duas metades iguais, tal que:

$$F_X(x_m) = 0,5 \quad (4.17)$$

Em geral, a média, mediana e moda de uma variável aleatória são diferentes, especialmente se a função densidade de probabilidade não for simétrica. Entretanto, se a função densidade de probabilidade for simétrica e unimodal (apresentar apenas uma moda), essas três quantidades irão coincidir.

Para caracterizar uma determinada variável aleatória, além das medidas de tendência central ou de posição, como já abordado, há, também, as medidas de dispersão ou de variabilidade. Tais medidas refletem o quão os valores assumidos pela variável aleatória estão distribuídos em torno da medida de tendência central. Se os desvios forem tomados em relação ao valor médio da variável aleatória, então uma medida de dispersão adequada é a variância. Para valores discretos e contínuos, a variância é representada, respectivamente, por:

$$Var(X) = \sum_{\text{todo } x_i} (x_i - \mu_x)^2 p_X(x_i) \quad (4.18)$$

$$Var(X) = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu_x)^2 f_X(x) dx \quad (4.19)$$

É usual o cálculo da variância em termos do valor médio quadrático de  $E(X^2)$ , tal como:

$$Var(X) = E(X^2) - \mu_x^2 \quad (4.20)$$

O desvio padrão ( $\sigma_X$ ) é representado como a raiz quadrada da variância:

$$\sigma_X = \sqrt{Var(X)} \quad (4.21)$$

Torna-se difícil afirmar apenas com base na variância ou desvio padrão se a dispersão é grande ou pequena. Dessa forma, evidencia-se a importância em representar a quantidade de desvios relativos à média, como mostrado pelo coeficiente de variação:

$$\delta_x = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \quad (4.22)$$

O coeficiente de variação representa o quão distribuído os valores assumidos pela variável aleatória estão em torno da média.

A covariância entre as variáveis aleatórias  $X$  e  $Y$  indica a variabilidade conjunta destas variáveis aleatórias, sendo que seu sinal mostra a tendência na relação linear entre as variáveis. Segundo Ang e Tang (1975), a covariância é representada por:

$$\text{cov}(X, Y) = E(XY) - \mu_X \mu_Y \quad (4.23)$$

Se  $X$  e  $Y$  forem estatisticamente independentes, tem-se:

$$E(X)E(Y) - \mu_X \mu_Y = 0 \quad (4.24)$$

A covariância entre duas variáveis aleatórias representa o grau de dependência linear entre elas. Se a covariância é normalizada, obtém-se o coeficiente de correlação ( $cor$ ):

$$\text{cor} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (4.25)$$

onde  $cor$  é definido no intervalo  $[-1, 1]$ . Quanto mais próximos aos extremos, maior será a correlação entre as duas variáveis aleatórias. Em contrapartida, um coeficiente de correlação próximo à origem indica uma fraca correlação.

#### 4.4 Problema básico da confiabilidade

O problema básico da confiabilidade consiste na hipótese no qual o suprimento  $X$  seja maior do que a demanda  $Y$  para a situação modelada. Para um problema do tipo *resistência (suprimento) versus solicitação (demanda)*,  $P(X > Y)$ , probabilidade do suprimento ser maior que a demanda, representaria a confiabilidade da estrutura. Em contrapartida,  $P(X < Y)$  simboliza a falha da estrutura, não implicando, necessariamente, em ruína.

Assume-se que  $X$  e  $Y$  sejam variáveis aleatórias e que tenham distribuições de probabilidade conhecidas. Para  $X$  e  $Y$  discretos e correlacionados, tem-se a probabilidade de falha:

$$P_f = P(X < Y) = \sum_{\text{todo } y} P(X < Y|Y = y)P(Y = y) \quad (4.26)$$

Se  $X$  e  $Y$  forem estatisticamente independentes, a probabilidade de falha é dada por:

$$P_f = \sum_{\text{todo } y} P(X < y)P(Y = y) \quad (4.27)$$

Para  $X$  e  $Y$  contínuas e estatisticamente independentes:

$$P_f = \int_0^{\infty} F_X(y)f_Y(y)dy \quad (4.28)$$

De acordo com a Figura 4.2, a probabilidade de falha ( $P_f$ ) está associada à região de sobreposição das curvas  $f_X(x)$  e  $f_Y(y)$ . Dessa forma, observa-se que tal região de sobreposição depende das posições relativas das distribuições de  $f_X(x)$  e  $f_Y(y)$ ; fixando as posições das médias e aumentando a dispersão ou mantendo as dispersões e aproximando as médias, elevam-se as probabilidades de falha.

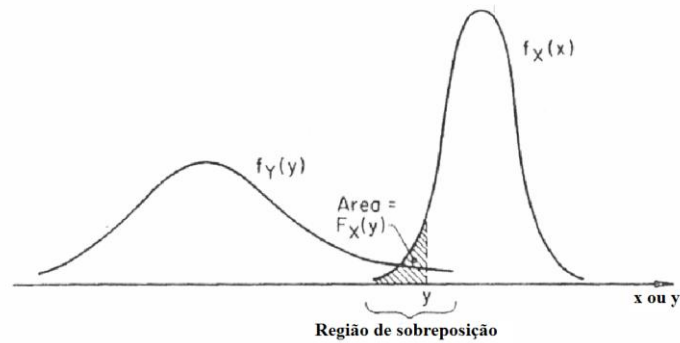


Figura 4.2: Funções densidade de probabilidade de  $X$  e de  $Y$  (adaptado ANG e TANG, 1990)

# 5

## **MEDIÇÃO DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA E ACELERAÇÃO**

### **5.1 Considerações Gerais**

Neste capítulo serão apresentados a metodologia empregada e o desenvolvimento de experimentos com vistas à medição do nível de pressão sonora e aceleração em piso de edificação residencial de múltiplos pavimentos. A realização dos experimentos para a avaliação do isolamento sonoro de um piso estrutural seguiu as Normas ISO 140-7 (1998) e ISO 3382-2 (2008). A primeira se refere à metodologia de medição em campo do ruído de impacto de pisos estruturais, enquanto a segunda faz referência à medição do tempo de reverberação em recintos.

Nas seções seguintes, encontram-se detalhados o objeto de estudo (seção 5.2), bem como os equipamentos utilizados nas medições (seção 5.3). A metodologia para medição dos parâmetros foi dividida em cinco etapas, resultando nos ensaios 1, 2, 3, 4 e 5. O ruído de impacto em pisos de cômodos sobrepostos é apresentado na seção 5.4, representando o primeiro ensaio. Os ensaios 2 (acústico) e 3 (de vibração), descritos nas seções 5.5 e 5.6, respectivamente, apresentam metodologia para medição de parâmetros em pisos de cômodos adjacentes. O quarto ensaio (seção 5.7) é utilizado para medição da vibração em paredes e pisos da interface de três cômodos. Por fim, no ensaio de número 5 descreveu-se o procedimento empregado para medição do tempo de reverberação nos ambientes de ensaio (seção 5.8). Demais particularidades serão apresentadas no conteúdo de cada seção.

### **5.2 Objeto de estudo**

Como objeto de ensaio deste trabalho, tem-se uma dupla de apartamentos idênticos e sobrepostos (101 e 201) localizados na região da Pampulha, na cidade de Belo Horizonte/MG. Cada apartamento contém 1 (uma) sala, 1 (uma) cozinha, 1 (uma) suíte, 1 (uma) área de

serviço, 2 (dois) banheiros, 3 (três) quartos e 1 (um) depósito. A planta do apartamento encontra-se detalhada na Figura 5.1 e seus cortes ‘AA’ e ‘BB’ são mostrados nas Figuras 5.2 e 5.3, respectivamente. Nessas três figuras, as unidades são dadas em centímetros.

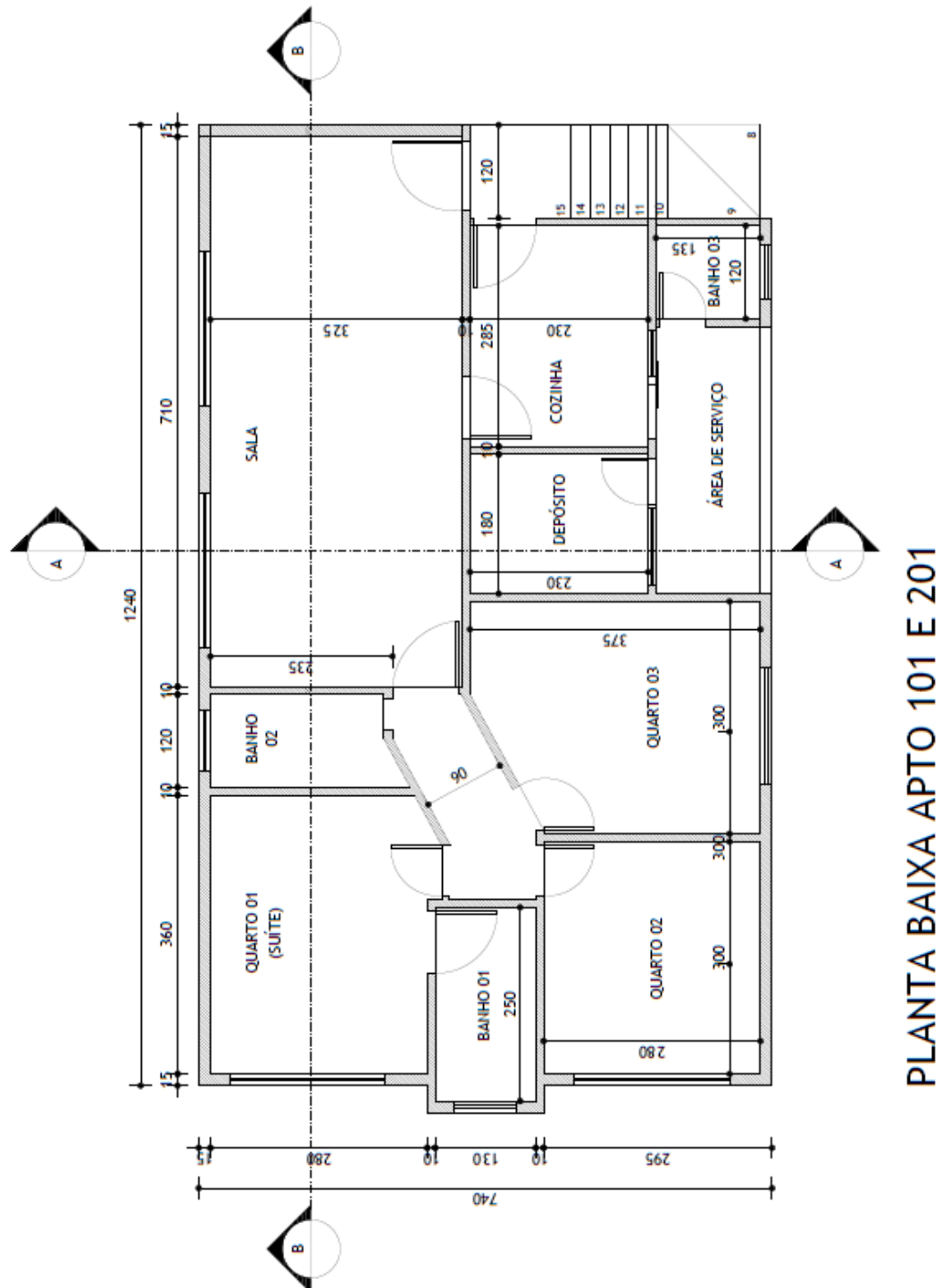


Figura 5.1: Planta Baixa dos apartamentos ensaiados

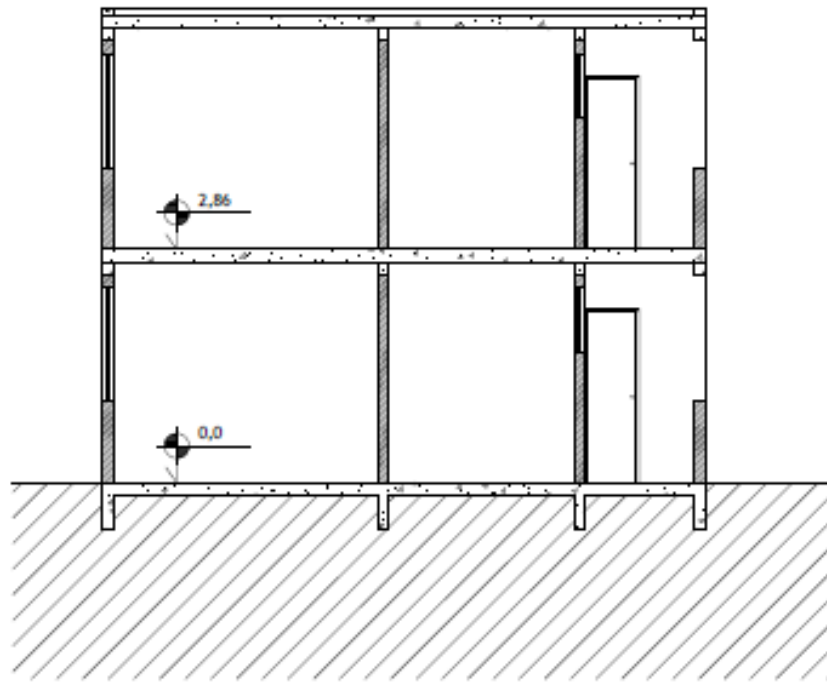


Figura 5.2: Corte 'AA'

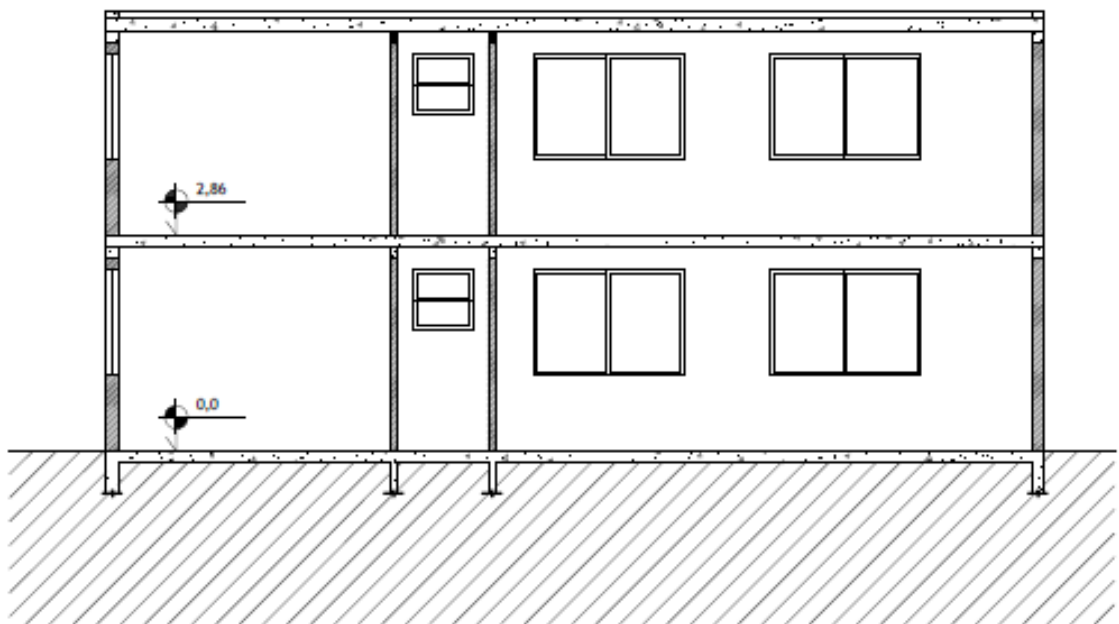


Figura 5.3: Corte 'BB'

As especificações das áreas, volumes e dos materiais (concreto e alvenaria) de cada apartamento e de suas subdivisões (cômodos) são dadas na Tabela 5-1 abaixo. Cabe ressaltar que ambos os apartamentos, tanto o emissor quanto o receptor, encontravam-se vazios, ou seja, sem qualquer tipo de mobília.

Tabela 5- 1: Especificações do apartamento ensaiado e de seus cômodos

| <b>Características do sistema estrutural</b> |                                         |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Constituição do piso                         | Laje maciça convencional de concreto    |
| Densidade do concreto                        | 2500 [kg/m <sup>3</sup> ]               |
| Módulo de Elast. - concreto                  | 20 [GPa]                                |
| Módulo de Elast. - alvenaria                 | 3 [GPa]                                 |
| Espessura total                              | 16 [cm] (piso, contrapiso e acabamento) |
| Tipo de acabamento                           | Cerâmica                                |
| Pé direito                                   | 2,70 [m]                                |
| Área do piso (suíte)                         | 10,08 [m <sup>2</sup> ]                 |
| Área do piso (banheiro 1)                    | 3,25 [m <sup>2</sup> ]                  |
| Área do piso (sala)                          | 23,075 [m <sup>2</sup> ]                |
| Área do piso (banheiro 2)                    | 2,82 [m <sup>2</sup> ]                  |
| Área do piso (quarto 2)                      | 8,85 [m <sup>2</sup> ]                  |
| Área do piso (quarto 3)                      | 10,35 [m <sup>2</sup> ]                 |
| Área do piso (quarto 4)                      | 4,14 [m <sup>2</sup> ]                  |
| Área do piso (cozinha)                       | 6,555 [m <sup>2</sup> ]                 |
| Volume (suíte)                               | 27,216 [m <sup>3</sup> ]                |
| Volume (banheiro 1)                          | 8,775 [m <sup>3</sup> ]                 |
| Volume (sala)                                | 62,3025 [m <sup>3</sup> ]               |
| Volume (banheiro 2)                          | 7,614 [m <sup>3</sup> ]                 |
| Volume (quarto 2)                            | 23,895 [m <sup>3</sup> ]                |
| Volume (quarto 3)                            | 27,945 [m <sup>3</sup> ]                |
| Volume (quarto 4)                            | 11,178 [m <sup>3</sup> ]                |
| Volume (cozinha)                             | 17,6985 [m <sup>3</sup> ]               |

### 5.3 Equipamentos e softwares utilizados

Para proceder com os ensaios experimentais, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Máquina de impacto padrão do fabricante 01 dB ACOEM, modelo LS0x (Figura 5.4);
- Microfone M2230, tipo 1, do fabricante NTi (Figura 5.6);
- Microfone 378B20 do fabricante PCB *Piezotronics* (Figura 5.12);
- Analisador de frequência NTi XL2 do fabricante NTi (Figura 5.6);
- Caixa Acústica modelo Rokit do fabricante KRK SYSTEM (Figura 5.9);
- Clausura fabricada com chapas de aço e revestida internamente com material absorvedor (Figura 5.5);
- Tripé (Figura 5.7);
- Acelerômetro modelo 3056 (*Iepe Accelerometer*) do fabricante DYTRAN INSTRUMENTS, INC. (USA) (Figura 5.13);
- Martelo instrumentado modelo 5803 *12-Pound Impulse Hammer* do fabricante DYTRAN INSTRUMENTS, Inc. (USA) (Figura 5.8);
- Calibrador de Acelerômetro *PCB Model 394C06 Handheld Shaker* (Figura 5.10);
- Placa de aquisição do fabricante *National Instruments* NI 9233 (Figura 5.11);
- Software MATLAB 2010a versão 64 bits;
- Software WinMLS 2004;
- Software AutoCAD 2013.

Todos os equipamentos utilizados nas medições se encontravam com certificados de calibração com validade em vigor.



Figura 5.4: Máquina de Impacto Padrão



Figura 5.5: Clausura



Figura 5.6: Microfone e Analisador de Frequências



Figura 5.7: Tripé



Figura 5.8: Martelo Instrumentado



Figura 5.9: Caixa Acústica



Figura 5.10: Calibrador



Figura 5.11: Placa de aquisição



Figura 5.12: Microfone



Figura 5.13: Acelerômetro anexado à parede

Para captação do som gerado pelos ensaios acústicos, foram utilizados o Microfone 378B20 do fabricante PCB *Piezotronics* (Figura 5.12) e Microfone M2230, tipo 1, do fabricante NTi (Figura 5.6). O primeiro foi utilizado para medição do tempo de reverberação e o segundo usado nas demais medições acústicas. O tempo de reverberação medido pelo equipamento da NTi e processado pelo analisador de frequências NTi-XL2, apresenta-se, apenas, em bandas de oitava. Como se optou por representar os parâmetros acústicos em bandas de um terço de oitava, por exigência da norma ISO 3382-2 (2008), houve a necessidade de se utilizar a placa NI 9233 e um microfone da PCB *Piezotronics* para captação do sinal utilizando o software *MATLAB* e em seguida o seu processamento no software *WinMLS*. Sendo assim, o tempo de reverberação também foi registrado em bandas de um terço de oitavas, assim como o registro de nível de pressão sonora.

#### 5.4 Medição do ruído de impacto em cômodos sobrepostos (ensaio 1)

Para medição do ruído de impacto utilizou-se a Norma ISO 140-7 (1998), sendo aplicada para avaliar o nível de isolamento do ruído de impacto dos pisos da sala e da suíte. A máquina de impacto padrão, neste tipo de ensaio, encontra-se posicionada no cômodo imediatamente superior (emissor) ao cômodo no qual são realizadas as medições (receptor). A suíte foi escolhida como local de ensaio por se tratar de um ambiente nobre do apartamento, no qual o conforto e descanso são características desejadas para os usuários de sistemas residenciais. Além disso, com o avanço de técnicas construtivas e arquitetônicas, os dormitórios têm se tornado, também, ambientes de trabalho no qual a concentração é um aspecto necessário e de grande relevância. Por outro lado, a sala foi o outro recinto escolhido para ensaio pelo fato de

ser um ambiente de uso coletivo no qual vários ruídos estruturais de sistemas verticais de habitação são gerados.

Tanto para determinação do grau de isolamento ao ruído de impacto do piso da sala quanto para o piso da suíte, foram utilizados quatro pontos de fonte e quatro pontos de medição, totalizando dezesseis medições para cada ambiente ensaiado. O microfone foi fixado no tripé a uma altura de 1,20 [m] do chão. O tempo de duração de cada medição (*set*) foi de 30 [s]. Para representação dos dados, utilizaram-se faixas de frequência de 100 a 3150 [Hz], divididos em bandas de um terço de oitavas, conforme previsto em norma. Efetuaram-se as vedações de janelas e portas, de modo a garantir o isolamento de ruído aéreo, assegurando, assim, a qualidade dos resultados dos ensaios do ruído de impacto em pisos.

As posições da máquina padrão de impacto e de medição são mostradas na Figura 5.14, para as suítes (emissora e receptora), e na Figura 5.16, para as salas (emissora e receptora). Já os cortes ‘BB’ tanto das suítes quanto das salas são ilustrados, nesta ordem, nas Figuras 5.15 e 5.17. Nesses cortes são exibidas as vistas frontais das salas e das suítes, tanto as emissoras quanto as receptoras. Todas as medidas são dadas em centímetros e foram desenhadas com o auxílio do software AUTOCAD 2013.

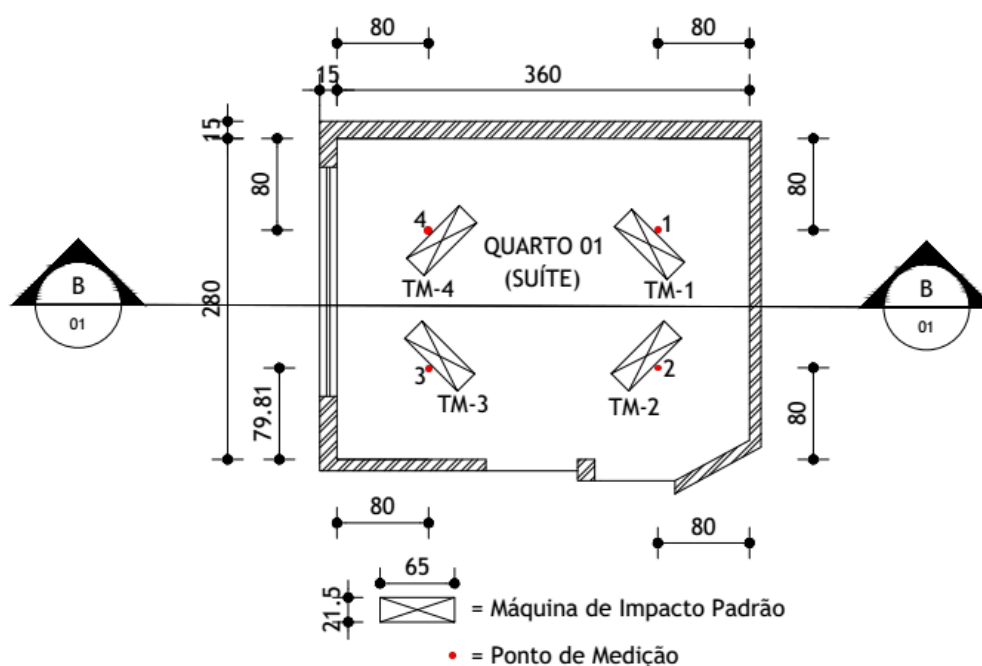


Figura 5.14: Posições de fonte e de medição nas suítes

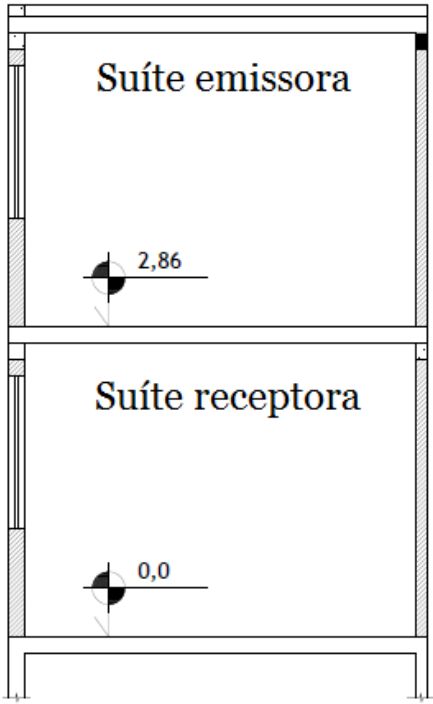


Figura 5.15: Corte ‘B1B1’ das suítes

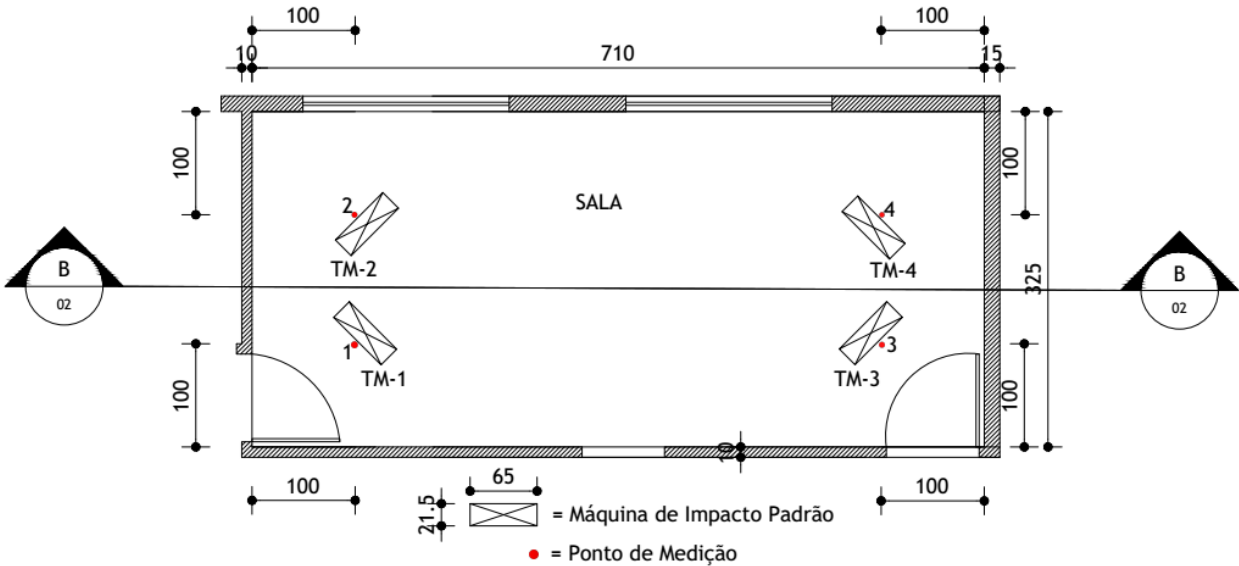


Figura 5.16: Posições de fonte e de medição nas salas

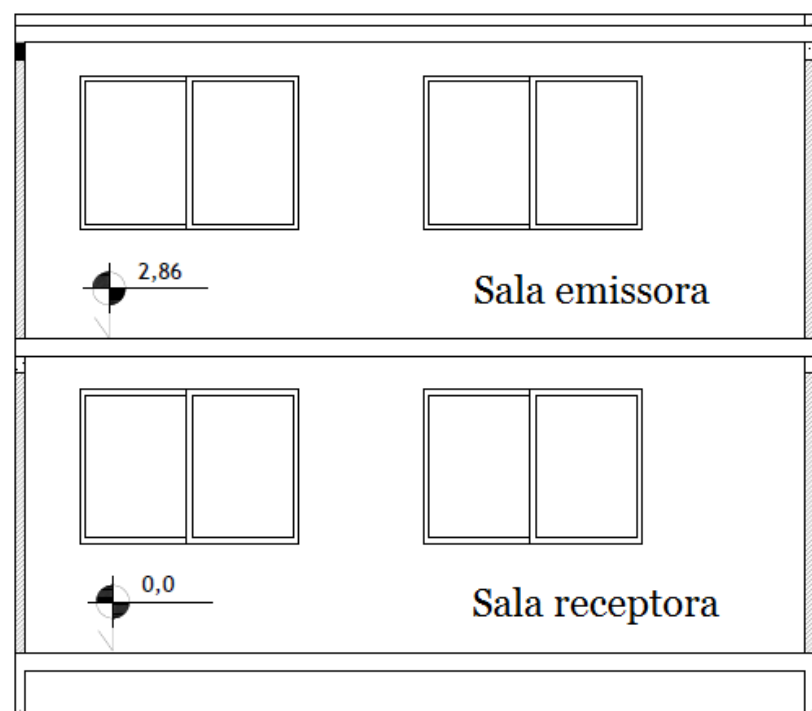


Figura 5.17: Corte 'B2B2' das salas

O ruído de fundo foi medido de forma intercalada com as medições de ruído de impacto. Ou seja, para cada posição de medição de ruído de impacto, tem-se um ruído de fundo correspondente medido num instante imediatamente anterior. As leituras dos ruídos de fundo refletem um fator de grande importância no cálculo do nível de ruído de impacto, uma vez que é utilizado como fator de correção das medições, minimizando a influência dos ruídos externos existentes quando é de interesse o registro do ruído de impacto, somente. O fato dos dois ruídos serem medidos em sequência traz maior representatividade ao ensaio uma vez que há maior fidelidade entre o ruído real e o seu respectivo gráfico de nível de pressão sonora registrado. De acordo com Cornacchia (2009), é interessante ilustrar com exemplos para tornar mais claro tal questão. Imaginam-se dois distintos cenários. No primeiro, um ensaio hipotético ocorrido em um determinado dia no qual um dos apartamentos do prédio esteja em reforma durante o horário comercial, gerando considerável ruído em todos os apartamentos do prédio, de maneira geral. Neste dia, a medição de ruído de fundo ocorreu por volta das 14 horas e a medição de níveis de ruído de impacto por volta das 20 horas. As medições dos níveis de ruído de impacto ocorreram em um horário no qual, possivelmente, os ruídos advindos dos apartamentos adjacentes (principalmente aquele que está em reforma, gerando um ruído excessivo) foram detectados de forma concomitante com os níveis advindos da máquina de impacto. Sendo assim, como a leitura dos níveis de ruído de fundo ocorreu em um

horário no qual, provavelmente, o ruído advindo dos apartamentos externos foi menos significativo do que aquele que seria registrado durante o dia, o fator de correção não foi adequadamente realizado, uma vez que o real ruído que interferiu na leitura de ruído de impacto não foi apurado. No segundo cenário, imaginam-se as medições sendo realizadas sob as mesmas condições (com considerável ruído externo advindo do apartamento adjacente em reforma), porém com a medição de impacto ocorrendo às 14 horas de forma intercalada com a leitura dos níveis de ruído de fundo, ou às 20 horas também com as medições de ruído de impacto e de fundo sendo medidos de forma alternada. Em ambas as situações do segundo cenário, o fator de correção será de fato efetivo, uma vez que a leitura de seus níveis ocorreu quase que ao mesmo tempo com que eram feitas as leituras dos níveis advindos do piso.

É importante ressaltar que todas as medições de ruído de fundo foram realizadas nas mesmas posições das medições de ruído de impacto.

Procedeu-se de acordo com a norma ISO 140-7 (1998) para avaliar o nível de ruído de impacto na sala receptora proveniente de uma excitação 'estrutural' do piso através da máquina de impacto padrão. No entanto, não se sabe ao certo a influência do ruído aéreo gerado e transmitido para o pavimento inferior devido ao funcionamento da máquina de impacto padrão. Mojolla (2015), por exemplo, ao construir a sua própria máquina padrão de impacto, inseriu peças resilientes sobre os contatos de elevação dos martelos, reduzindo a emissão de ruído aéreo gerado pelo funcionamento. Sendo assim, foi desenvolvida uma clausura (Figura 5.5) de material metálico revestida internamente com material absorvedor e, nas bordas, com material emborrachado. Tal estrutura foi desenvolvida para ser utilizada como envoltório da máquina de impacto padrão no intuito de minimizar os efeitos do ruído aéreo na mensuração do ruído estrutural. A fim de se avaliar a eficiência do revestimento, realizaram-se ensaios através da medição de ruído rosa gerado por uma caixa acústica nos ambientes emissor e receptor, com e sem clausura. Os resultados para avaliação da eficiência da clausura são mostrados no Apêndice A.

## **5.5 Medição do ruído de impacto em cômodos adjacentes (ensaio 2)**

Alternativamente, além da aplicação da metodologia descrita pela norma ISO 140-7 (1998) (utilizada somente para cômodos sobrepostos) para a avaliação do isolamento de ruído de impacto de pisos estruturais, realizou-se, também, a medição do nível de pressão sonora nos demais cômodos do apartamento utilizando uma metodologia específica. Na ocasião, fixou-se a máquina de impacto padrão na sala, medindo-se o nível de pressão sonora em outros seis ambientes de interesse: dois banheiros, três quartos e uma cozinha. Adotou-se a sala como cômodo de referência de fonte de ruído de impacto por dois motivos: i) ser um espaço de entretenimento, no qual muito dos vários ruídos de impacto são gerados; ii) por ser o primeiro cômodo do apartamento, logo após a porta de entrada, servindo de meio de passagem ao interior de todos os outros espaços. Dessa forma, acreditou-se que a sala seria o ambiente que melhor simulasse a geração de ruídos de impactos quando comparados ao uso cotidiano dos usuários de unidades residenciais.

Foram utilizados dois pontos de fontes de ruído de impacto: um no centro e outro na extremidade da sala. Da mesma forma, foram utilizados dois pontos de medição em cada cômodo: um no centro e outro na extremidade. Ao todo, realizaram-se 24 medições; 12 com a máquina de ruído de impacto no centro da sala e 12 com ela na extremidade. As posições de fonte (apartamento emissor) e medição (apartamento receptor) são mostradas na Figura 5.18.

Todos os ensaios foram feitos com portas e janelas fechadas. Por se tratar de um ambiente aberto, não foi realizada nenhuma medição na área de serviço.

## **5.6 Medição da vibração em cômodos adjacentes (ensaio 3)**

Concomitantemente aos ensaios de medição de ruído de impacto, mensurou-se também a vibração da laje a partir da instalação de acelerômetros – instrumento que mede vibração - em vários pontos desse componente estrutural, com o objetivo de tentar estabelecer uma correlação entre os níveis de ruído estrutural e níveis de vibração dos pisos. O tempo de medição com o acelerômetro foi de 10 [s]. Na Figura 5.19 a seguir, têm-se representados o ponto de fonte (sala emissora) e os pontos de medição (cômodos receptores), no qual se encontravam instalados os acelerômetros.

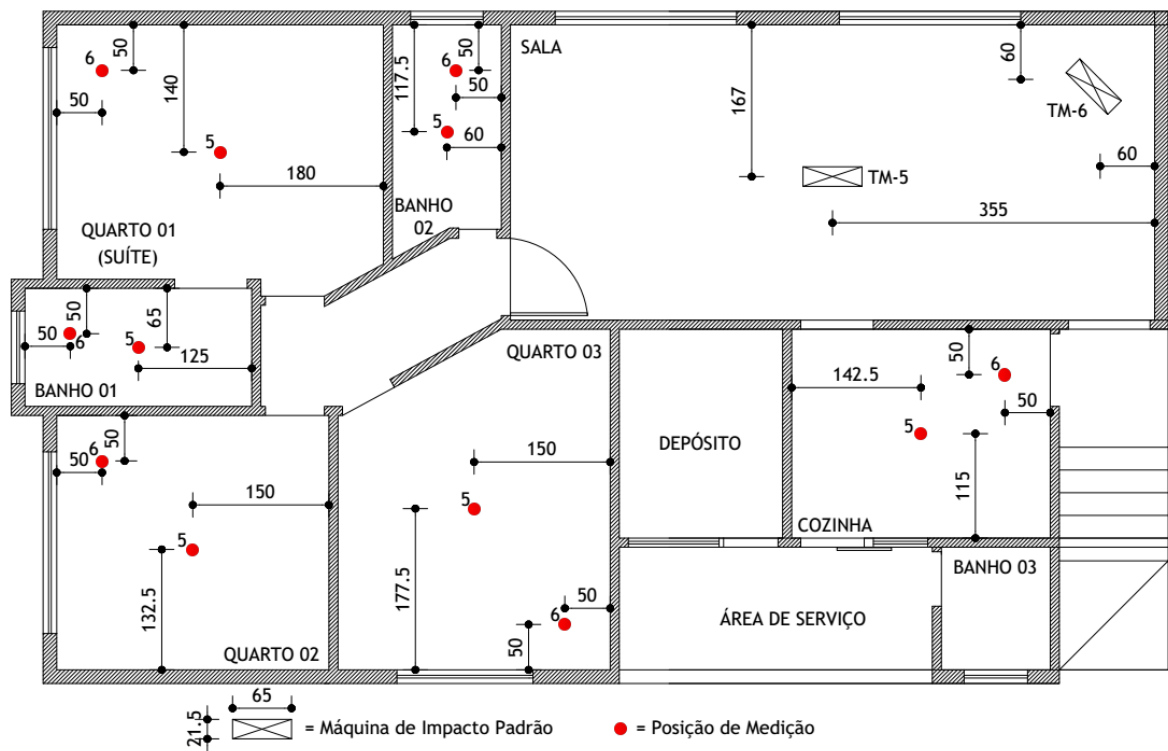


Figura 5.18: Posições de fonte e medição para ensaio 2 (acústico)

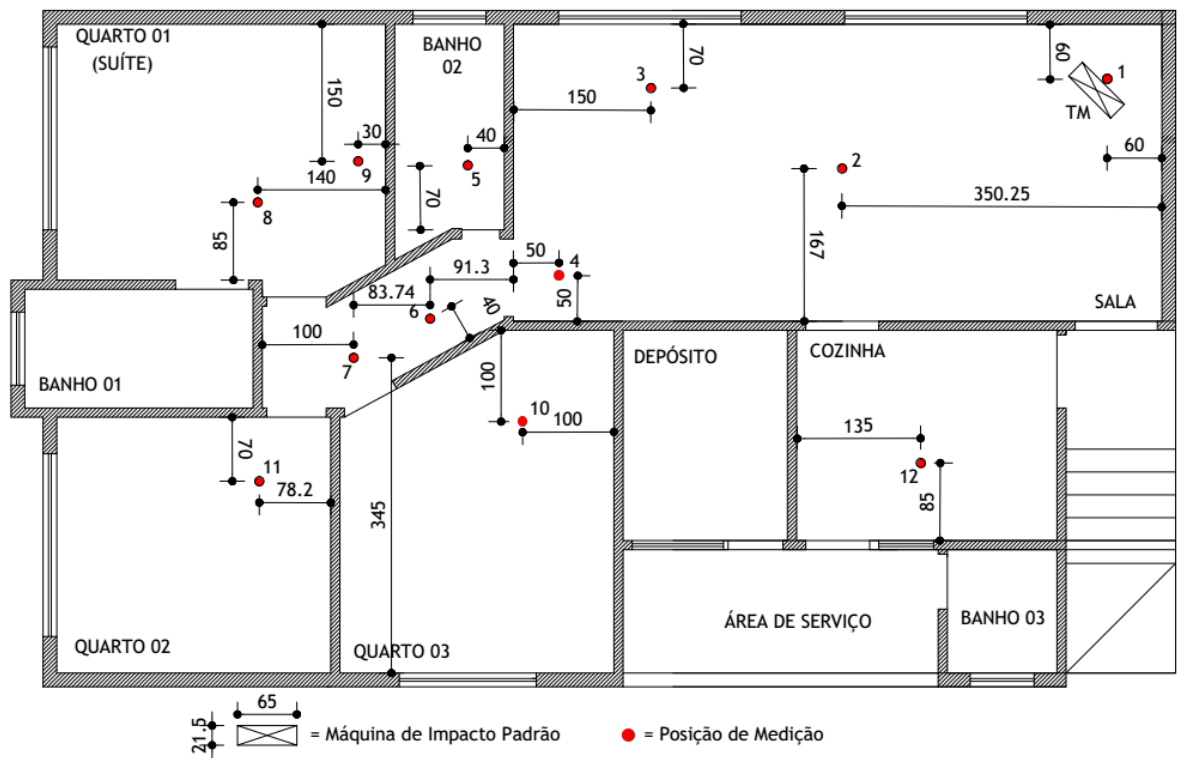


Figura 5.19: Posições de fonte e de medição para o ensaio 3 (vibração)

Um dos objetivos do ensaio foi o de representar os ruídos estruturais provenientes do andar superior segundo o uso cotidiano dos usuários de sistemas residenciais, mensurando-os de acordo o seu uso comum, de forma que afetem tais usuários. Sendo assim, no depósito e banheiro 3 não foram realizadas medições de acústica e vibração, pelo fato de seu usos serem bastante restritos.

Na ocasião, as vibrações do sistema piso/teto foram medidas em ponto (s) pré-definido (s) para cada cômodo, estando a máquina de impacto padrão localizada na extremidade da sala.

Os gráficos referentes à calibração do acelerômetro são mostrados no Apêndice C.

### **5.7 Medição da vibração em paredes e tetos (ensaio 4)**

Com o objetivo de avaliar a influência do ruído de impacto na suíte quando o mesmo é gerado na sala, faz-se necessário a medição da trajetória de vibração da sala até chegar ao ambiente de interesse. Sendo assim, com o auxílio do acelerômetro, foi medido a vibração nas paredes de alvenaria e lajes/pisos de concreto dos ambientes sala, banheiro 2 e suíte. Como já citado, a suíte (ou quarto 1) foi escolhida como ambiente de referência por se tratar de uma área nobre do apartamento, no qual o conforto acústico, descanso e concentração são necessidades importantes para o usuário.

As posições de fonte e medição para ensaio de vibração de pisos e paredes da interface de três cômodos adjacentes são dadas na Figura 5.20. Os cortes ‘A2A2’ e ‘A1A1’ são ilustrados na Figura 5.21, detalhando-se as localizações das posições de medição P-2 e P-4, respectivamente, na parede da sala.

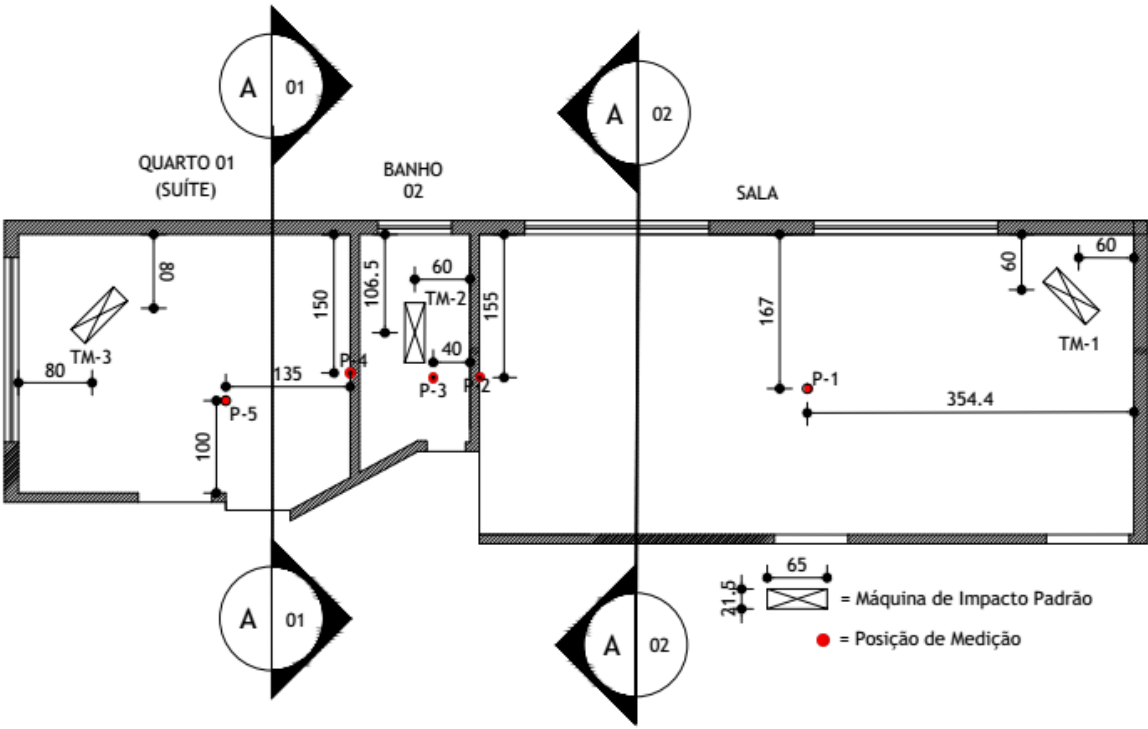


Figura 5.20: Posições de fonte e de medição para ensaio de vibração 4

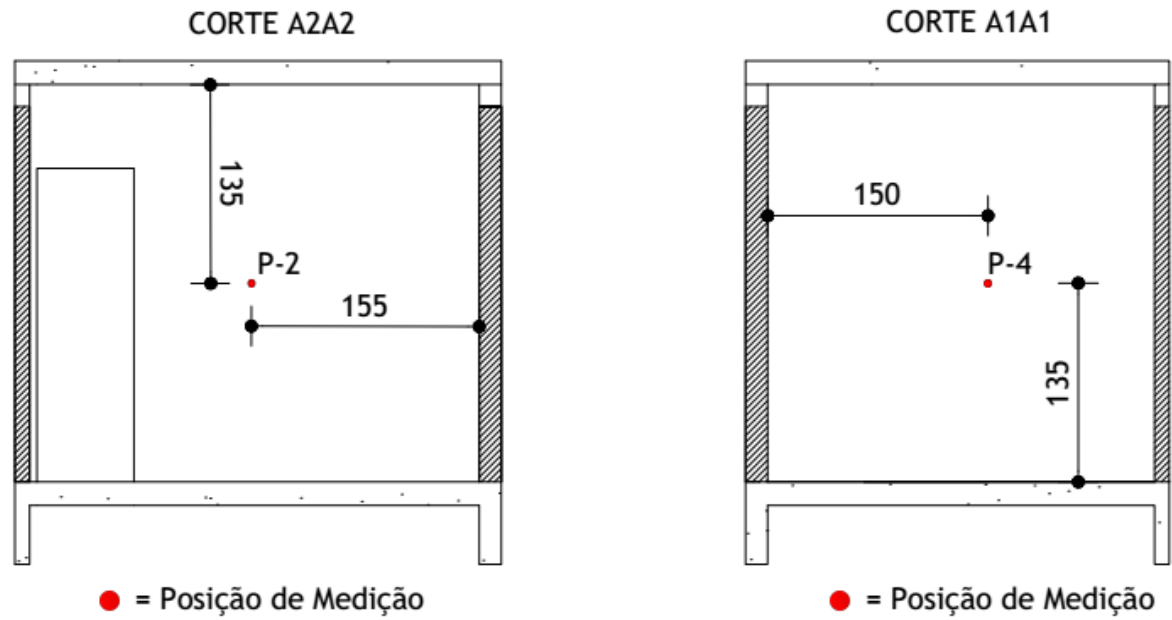


Figura 5.21: Cortes ‘A1A1’ e ‘A2A2’

Para todos os ensaios de vibração, foram medidas as vibrações dos sistemas estruturais na presença de fonte de excitação, representada pela máquina padrão de impacto. Tal procedimento foi feito de forma concomitante ao ensaio acústico. Também foram registrados os amortecimentos de todos os sistemas estruturais através de excitação gerada pelo martelo instrumentado. Os resultados serão mostrados no próximo capítulo.

A Figura 5.22 a seguir exemplifica o procedimento de medição de vibração realizado a partir da fixação de acelerômetros em tetos e paredes de sistemas estruturais, uma vez que a excitação é gerada pelo martelo instrumentado.

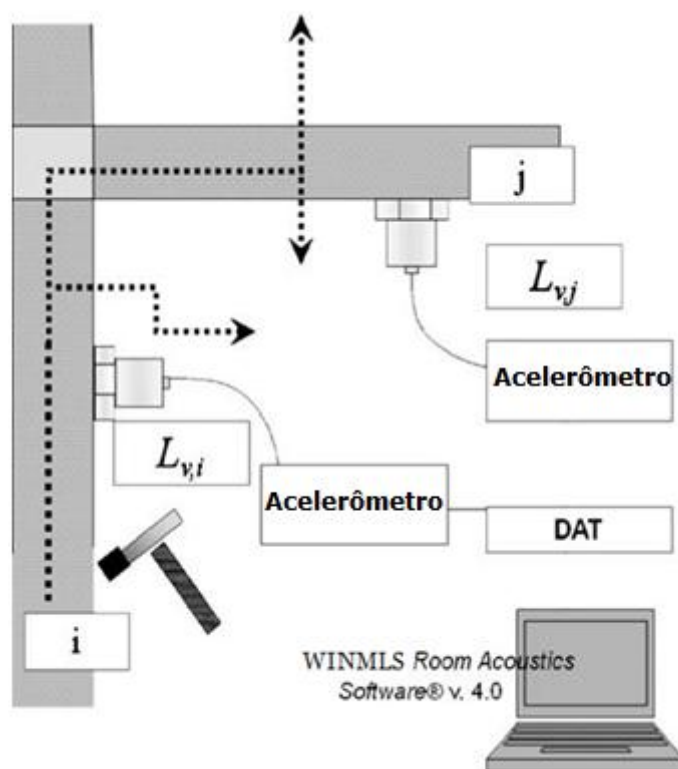


Figura 5.22: Medição com Acelerômetro  
Fonte: adaptado Schiavi e Astolfi (2010)

## 5.8 Medição do Tempo de Reverberação (ensaio 5)

Para medição do Tempo de Reverberação dos cômodos ensaiados, foi utilizada a Norma ISO 3382-2 (2008). A Norma ISO 3382 trata da medição de parâmetros acústicos. A parte 2, em especial, aborda a metodologia utilizada para o cálculo do tempo de reverberação em salas comuns. Essa norma especifica três níveis de exatidão do procedimento para medição: pesquisa, engenharia e precisão; diferem-se, basicamente, quanto ao número de posições de medida. Ao aplicar tal norma no presente trabalho, será utilizado o nível de engenharia.

Foram utilizadas seis combinações de fonte e microfone: três posições de fonte e duas posições de microfone, cumprindo com o requisito mínimo previsto pela norma de dois decaimentos em cada posição. Foi empregado o método do ruído interrompido, ou seja, utilização do estouro de um balão como fonte sonora. Jambrosic *et al.* (2007) mostraram que os resultados utilizando o método do ruído interrompido e a fonte omnidirecional são bem semelhantes, podendo ser utilizada uma em detrimento da outra mantendo o mesmo nível de satisfação nos resultados.

Nas Figuras a seguir (5.23 a 5.28), são dadas as posições de medição (P) e fonte (F) para medição dos tempos de reverberação nos sete cômodos receptores ensaiados.

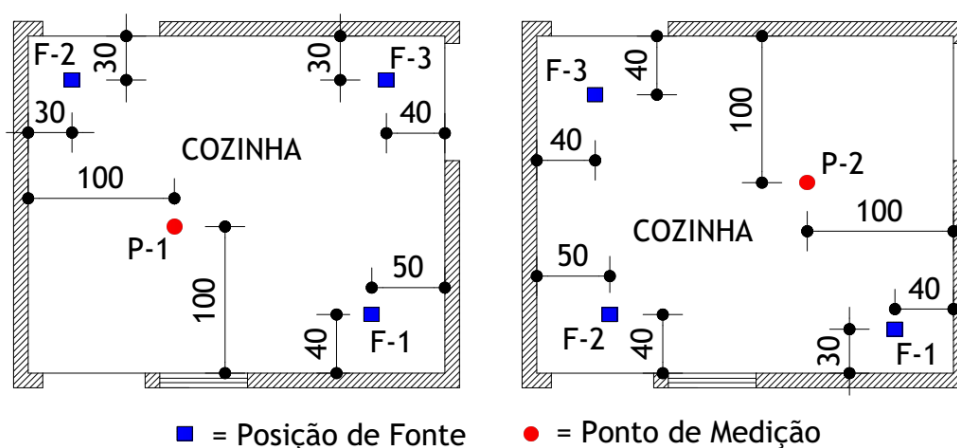


Figura 5. 23: Posições de fonte e medição do tempo de reverberação da Cozinha

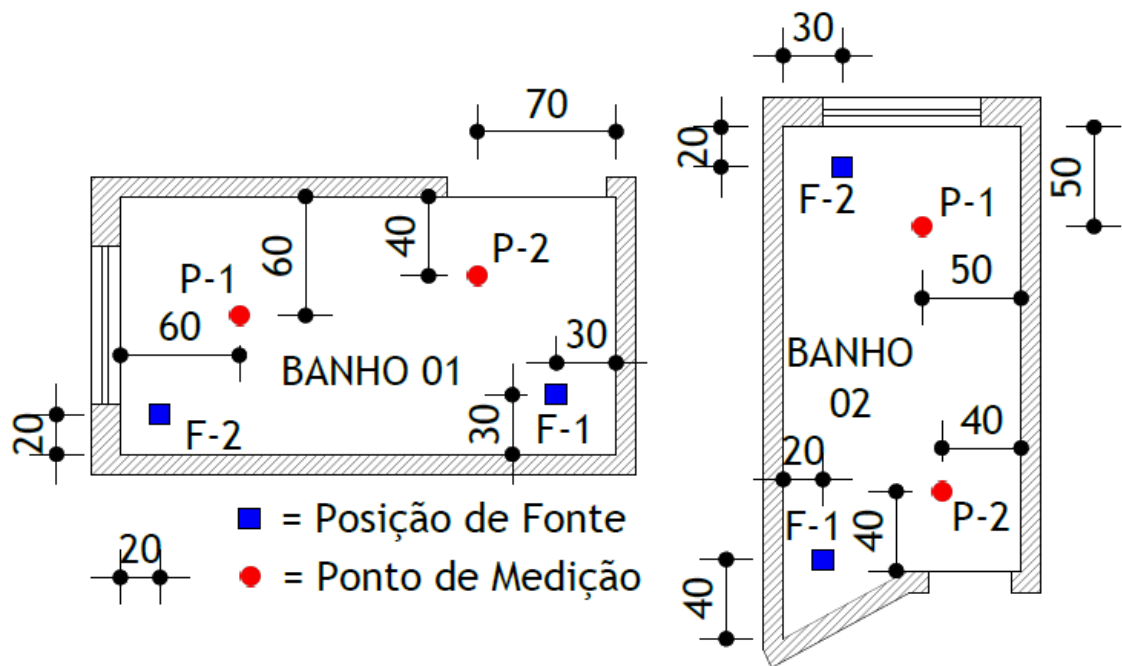


Figura 5. 24: Posições de fonte e medição do tempo de reverberação dos Banheiros 1 e 2

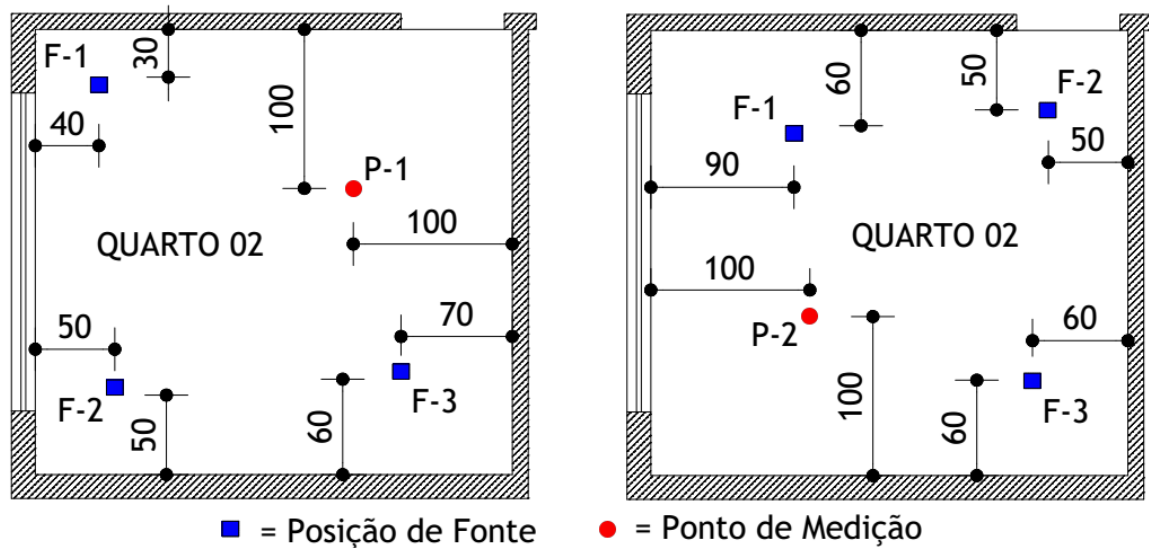


Figura 5.25: Posições de fonte e medição do tempo de reverberação do Quarto 2

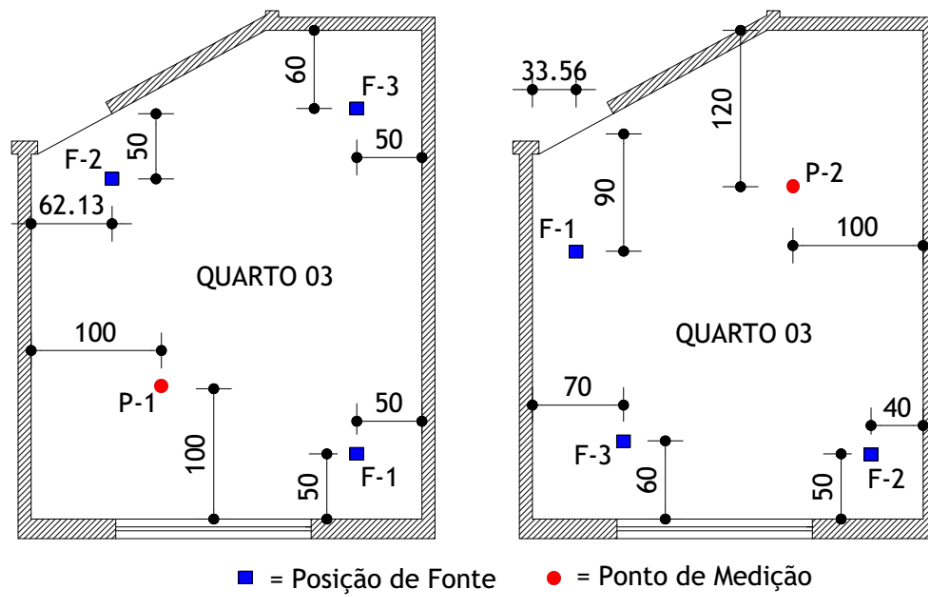


Figura 5.26: Posições de fonte e medição do tempo de reverberação do Quarto 3

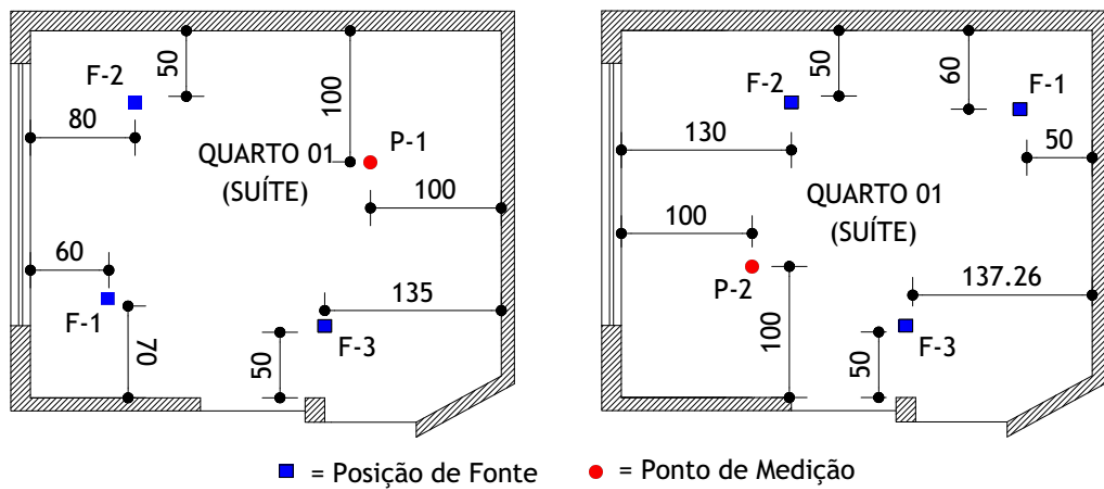


Figura 5.27: Posições de fonte e medição do tempo de reverberação da suíte

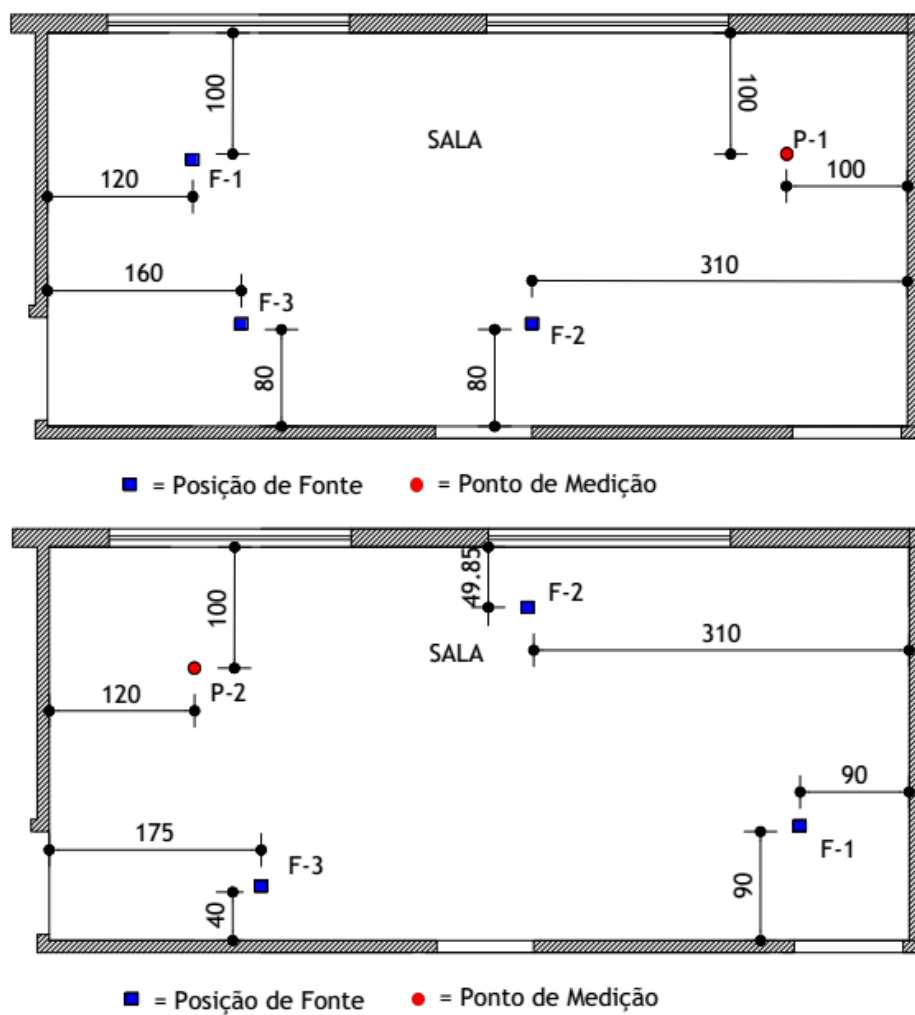


Figura 5.28: Posições de fonte e medição do tempo de reverberação da sala

Na Tabela 5-2, encontra-se o levantamento realizado em relação à área das superfícies dos cômodos ensaiados.

Tabela 5- 2: Área das superfícies de cada cômodo

| Área das superfícies |                          |
|----------------------|--------------------------|
| Suíte                | 54,72 [m <sup>2</sup> ]  |
| Banheiro 1           | 27,02 [m <sup>2</sup> ]  |
| Sala                 | 102,04 [m <sup>2</sup> ] |
| Banheiro 2           | 24,81 [m <sup>2</sup> ]  |
| Quarto 2             | 49,83 [m <sup>2</sup> ]  |
| Quarto 3             | 57,15 [m <sup>2</sup> ]  |
| Cozinha              | 40,92 [m <sup>2</sup> ]  |

Mediu-se o tempo de reverberação da suíte em acordo à norma ISO 3382-2 (2008). Durante as medições, o número de pessoas presentes no cômodo foi o mesmo de quando ocorreram as medições com a máquina padrão de impacto. Como já mencionado, foi utilizada a placa de aquisição NI 9233 e um microfone da PCB *Piezotronics* para captação do sinal gerado pela fonte sonora impulsiva (estouro do balão), utilizando como auxílio o software *MATLAB*. Em sequência, houve o processamento dos dados utilizando o software *WinMLS*, utilizado para cálculo do tempo de reverberação a partir da análise da taxa de decaimento do nível de pressão sonora no ambiente. Os resultados serão mostrados no próximo capítulo.

# 6

## ANÁLISE DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA E ACELERAÇÃO/VELOCIDADE

### 6.1 Considerações iniciais

Neste capítulo, serão apresentados os resultados das medições de nível de pressão sonora (NPS) e aceleração/velocidade realizada entre cômodos de duas unidades residenciais adjacentes, dado a geração do ruído estrutural pela máquina padrão de impacto. A partir da análise da distribuição vibroacústica e tratamento dos dados obtidos, conjuntos de níveis de pressão sonora e parâmetros de interesse serão encontrados.

Serão abordados os níveis de pressão sonora devido ao ruído de impacto entre cômodos imediatamente sobrepostos e entre cômodos adjacentes (seções 6.2 e 6.3, respectivamente). Em sequência, será quantificada a vibração em determinados sistemas estruturais devido ao mesmo ruído de impacto (seção 6.4). Por fim, foi realizado um breve resumo a respeito das informações obtidas em cada procedimento experimental realizado (seção 6.6).

### 6.2 Ruído de impacto entre cômodos imediatamente sobrepostos

Serão exibidos, nesta seção, os resultados referentes às medições realizadas *in situ* para avaliação do ruído de impacto entre cômodos idênticos e sobrepostos. Por motivos já citados no capítulo anterior, a sala e a suíte foram os ambientes escolhidos para a realização dos ensaios, cuja metodologia adotada está prevista nas normas ISO 140-7 (1998), ISO 3382-2 (2008) e ISO 717-2 (2013). Tais normas abordam os procedimentos para a medição do ruído de impacto, tempo de reverberação e cálculo do nível de pressão sonora padronizado ponderado, respectivamente. De forma complementar, a Norma Brasileira NBR 15575-3 (2013) também foi utilizada para a classificação dos pisos ensaiados quanto à sua capacidade de isolamento ao ruído de impacto.

### 6.2.1 Medição do ruído de impacto na suíte

A seguir, são mostrados os resultados referentes às medições realizadas *in situ*. A figura 6.1 apresenta dezesseis curvas de nível de pressão sonora na suíte do apartamento receptor resultantes das dezesseis combinações de posições fonte-microfone cujos valores são apresentados na Tabela 6-1. Tomando-se a média logarítmica dessas dezesseis curvas, tem-se o nível de pressão sonora médio de impacto ( $L_i$ ) (Figura 6.2) expresso juntamente com o ruído de fundo (RF) médio do ambiente e o nível de pressão sonora de impacto padronizado ( $L'_{nT}$ ). Tais parâmetros são expressos na Tabela 6-4 em bandas de um terço de oitava, juntamente com o tempo de reverberação médio. O tempo de reverberação e o ruído de fundo em cada posição de medição são dados pelas Tabelas 6-2 e 6-3, respectivamente.

O tempo de reverberação ( $T_{60}$ ) foi calculado através da média aritmética de todas as posições de fonte (estouro do balão) e microfone, de acordo com a norma ISO 3382-2 (2008), e foi expresso em segundos por banda de frequência de um terço de oitavas. O resultado é mostrado na Tabela 6-3. Para estimativa do tempo de reverberação, utilizou-se o método  $T_{30}$ .

Para cada posição de medição da máquina padrão de impacto (ambiente emissor), registrou-se o seu respectivo nível de pressão sonora para o ruído de fundo no ambiente receptor. Essa medição foi feita segundos antes a cada série de registros de ruído de impacto com o objetivo de melhor correlacionar o nível de pressão sonora medido com seu respectivo gráfico de ruído de fundo. Graficamente, o ruído de fundo será representado como a média de todas as posições de medição para tal parâmetro.

As coordenadas  $i$  e  $j$  do nível de pressão sonora (NPS ( $i, j$ )) mostradas na Tabela 6-1 indicam a posição da máquina padrão de impacto no ambiente emissor e a posição do microfone no ambiente receptor respectivamente. Exemplo: NPS (1, 2) indica o nível de pressão sonora na suíte receptora para a máquina de impacto padrão e microfone localizados nas posições 1 (suíte emissora) e 2 (suíte receptora), respectivamente.

Tabela 6- 1: NPS em cada posição de medição na suíte receptora

| NPS (i, j) [dB]/Freq. [Hz] | 100  | 125  | 160  | 200  | 250  | 315  | 400  | 500  | 630  | 800  | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| NPS (1, 1)                 | 60,4 | 70,2 | 71,9 | 72,6 | 74,8 | 74,2 | 73,5 | 75,0 | 74,1 | 74,4 | 75,7 | 73,6 | 71,0 | 69,2 | 67,1 | 65,7 |
| NPS (1, 2)                 | 60,2 | 71,9 | 70,7 | 71,7 | 73,7 | 74,5 | 74,0 | 75,6 | 74,6 | 75,0 | 75,5 | 73,5 | 70,6 | 68,8 | 67,5 | 66,1 |
| NPS (1, 3)                 | 61,4 | 71,3 | 70,5 | 73,1 | 73,9 | 71,1 | 73,1 | 74,6 | 74,8 | 75,6 | 75,3 | 73,5 | 70,8 | 68,5 | 67,2 | 66,0 |
| NPS (1, 4)                 | 63,4 | 72,0 | 72,3 | 71,9 | 74,7 | 73,2 | 74,8 | 75,2 | 74,9 | 75,5 | 75,4 | 73,3 | 71,2 | 68,8 | 67,5 | 66,1 |
| NPS (2, 1)                 | 59,3 | 69,5 | 70,0 | 72,8 | 73,6 | 72,4 | 70,7 | 70,3 | 69,2 | 69,8 | 70,8 | 67,2 | 64,8 | 64,3 | 62,3 | 59,3 |
| NPS (2, 2)                 | 59,7 | 67,8 | 69,2 | 70,0 | 73,8 | 72,9 | 70,2 | 71,7 | 68,9 | 69,0 | 70,2 | 67,5 | 64,6 | 63,8 | 62,8 | 58,9 |
| NPS (2, 3)                 | 56,7 | 67,0 | 67,4 | 72,6 | 72,4 | 70,3 | 69,8 | 70,0 | 69,2 | 69,8 | 70,8 | 67,8 | 66,3 | 64,0 | 62,3 | 59,4 |
| NPS (2, 4)                 | 61,1 | 65,9 | 68,8 | 71,5 | 72,4 | 70,6 | 69,7 | 69,8 | 69,0 | 69,2 | 69,9 | 66,9 | 63,7 | 63,6 | 62,3 | 58,8 |
| NPS (3, 1)                 | 62,7 | 69,7 | 70,9 | 78,0 | 75,7 | 74,4 | 75,2 | 74,4 | 74,3 | 73,8 | 73,5 | 71,6 | 70,0 | 68,1 | 65,2 | 63,8 |
| NPS (3, 2)                 | 57,5 | 70,6 | 71,8 | 76,6 | 76,2 | 74,6 | 76,0 | 74,5 | 73,6 | 74,1 | 73,6 | 72,1 | 69,7 | 68,0 | 64,6 | 64,1 |
| NPS (3, 3)                 | 63,6 | 71,1 | 72,3 | 77,6 | 79,3 | 75,6 | 77,2 | 74,7 | 73,7 | 74,1 | 73,5 | 72,4 | 70,0 | 68,5 | 65,9 | 64,2 |
| NPS (3, 4)                 | 63,6 | 71,8 | 73,7 | 78,7 | 77,3 | 76,1 | 75,7 | 75,3 | 72,9 | 73,7 | 73,8 | 72,3 | 70,3 | 67,7 | 65,8 | 64,2 |
| NPS (4, 1)                 | 58,0 | 68,2 | 65,6 | 69,4 | 71,8 | 73,4 | 73,3 | 73,9 | 72,1 | 73,3 | 72,9 | 70,5 | 69,5 | 67,4 | 64,7 | 63,2 |
| NPS (4, 2)                 | 60,6 | 69,8 | 66,1 | 67,2 | 72,3 | 73,3 | 73,4 | 75,0 | 72,0 | 74,1 | 72,4 | 70,6 | 68,5 | 66,8 | 64,5 | 63,6 |
| NPS (4, 3)                 | 59,0 | 69,7 | 64,6 | 70,5 | 73,6 | 71,8 | 74,9 | 74,3 | 73,5 | 74,2 | 72,1 | 70,2 | 69,2 | 66,9 | 64,7 | 63,6 |
| NPS (4, 4)                 | 60,3 | 70,7 | 65,6 | 70,5 | 72,3 | 72,9 | 74,2 | 75,3 | 73,4 | 73,4 | 72,0 | 70,6 | 68,9 | 67,1 | 64,2 | 63,0 |
| <b>Média</b>               | 60,9 | 70,1 | 70,2 | 74,1 | 74,8 | 73,5 | 74,0 | 74,1 | 73,0 | 73,5 | 73,4 | 71,4 | 69,2 | 67,3 | 65,3 | 63,8 |
| <b>Variância</b>           | 4,5  | 3,2  | 8,0  | 11,0 | 4,2  | 2,8  | 5,3  | 4,14 | 4,9  | 5,1  | 3,7  | 5,6  | 6,0  | 3,8  | 3,4  | 6,8  |
| <b>Desvio Padrão</b>       | 2,1  | 1,8  | 2,8  | 3,3  | 2,1  | 1,7  | 2,3  | 2,0  | 2,2  | 2,3  | 1,9  | 2,4  | 2,5  | 2,0  | 1,8  | 2,6  |

Tabela 6- 2: Tempo de reverberação na suíte receptora

| Frequência [Hz]                  | 100  | 125  | 160  | 200  | 250  | 315  | 400  | 500  | 630  | 800  | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Tempo de reverberação [s] – F1P1 | 1,5  | 1,8  | 2,3  | 1,7  | 1,7  | 1,4  | 1,4  | 1,3  | 1,1  | 1,1  | 1,0  | 0,9  | 0,8  | 0,8  | 0,8  | 0,7  |
| Tempo de reverberação [s] – F2P1 | 1,4  | 1,4  | 2,2  | 2,1  | 1,9  | 1,4  | 1,6  | 1,3  | 1,2  | 1,0  | 1,0  | 0,9  | 0,8  | 0,8  | 0,8  | 0,7  |
| Tempo de reverberação [s] – F3P1 | 1,5  | 1,5  | 2,2  | 1,8  | 1,6  | 1,5  | 1,4  | 1,2  | 1,2  | 1,0  | 1,0  | 0,9  | 0,8  | 0,8  | 0,8  | 0,7  |
| Tempo de reverberação [s] – F1P2 | 2,0  | 1,8  | 2,4  | 2,0  | 1,5  | 1,6  | 1,5  | 1,4  | 1,2  | 1,1  | 1,0  | 0,9  | 0,8  | 0,8  | 0,7  | 0,7  |
| Tempo de reverberação [s] – F2P2 | 2,4  | 1,5  | 2,2  | 2,2  | 1,8  | 1,7  | 1,7  | 1,3  | 1,2  | 1,1  | 1,0  | 0,9  | 0,9  | 0,8  | 0,8  | 0,8  |
| Tempo de reverberação [s] – F3P2 | 1,5  | 1,8  | 2,3  | 2,1  | 1,5  | 1,3  | 1,5  | 1,4  | 1,2  | 1,1  | 1,0  | 0,9  | 0,8  | 0,8  | 0,8  | 0,7  |
| <b>Média</b>                     | 1,7  | 1,6  | 2,3  | 2,0  | 1,7  | 1,5  | 1,5  | 1,3  | 1,2  | 1,1  | 1,0  | 0,9  | 0,8  | 0,8  | 0,8  | 0,7  |
| <b>Variância</b>                 | 0,16 | 0,03 | 0,01 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| <b>Desvio Padrão</b>             | 0,40 | 0,19 | 0,08 | 0,19 | 0,16 | 0,15 | 0,12 | 0,08 | 0,04 | 0,05 | 0    | 0    | 0,04 | 0    | 0,04 | 0,04 |

Tabela 6- 3: RF para quatro posições de medição na suíte receptora

| Frequência [Hz]                 | 100  | 125  | 160  | 200  | 250  | 315  | 400  | 500  | 630  | 800  | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| NPS do Ruído de Fundo [dB] – P1 | 31,1 | 40,2 | 43,7 | 43,9 | 40,7 | 40,6 | 36,8 | 35,9 | 35,1 | 36,6 | 35,3 | 33,8 | 33,1 | 30,5 | 26,5 | 27,4 |
| NPS do Ruído de Fundo [dB] – P2 | 37,8 | 47,3 | 43,0 | 42,1 | 46,6 | 42,7 | 38,2 | 40,0 | 38,7 | 39,4 | 38,0 | 36,4 | 35,3 | 33,7 | 30,4 | 28,0 |
| NPS do Ruído de Fundo [dB] – P3 | 32,3 | 41,8 | 39,6 | 41,5 | 39,4 | 37,1 | 37,5 | 38,8 | 36,5 | 37,1 | 35,5 | 32,9 | 32,7 | 31,6 | 30,7 | 30,9 |
| NPS do Ruído de Fundo [dB] – P4 | 33,8 | 38,1 | 40,9 | 40,5 | 41,1 | 39,0 | 36,7 | 37,6 | 36,3 | 36,7 | 35,9 | 35,1 | 34,3 | 33,3 | 32,1 | 31,7 |

Tabela 6- 4: Parâmetros medidos na suíte receptora

| Frequência [Hz]                     | 100  | 125  | 160  | 200  | 250  | 315  | 400  | 500  | 630  | 800  | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| NPSI ( $L_i$ ) [dB]                 | 60,9 | 70,1 | 70,2 | 74,1 | 74,8 | 73,5 | 74,0 | 74,1 | 73,0 | 73,5 | 73,4 | 71,4 | 69,2 | 67,3 | 65,3 | 63,8 |
| NPSI padronizado ( $L'_{nT}$ ) [dB] | 55,6 | 65,1 | 63,6 | 68,0 | 69,4 | 68,7 | 69,2 | 69,9 | 69,2 | 70,1 | 70,3 | 68,8 | 67,2 | 65,3 | 63,2 | 62,3 |
| Tempo de reverberação médio [s]     | 1,7  | 1,6  | 2,2  | 2,0  | 1,7  | 1,5  | 1,5  | 1,3  | 1,2  | 1,1  | 1,0  | 0,9  | 0,9  | 0,8  | 0,8  | 0,8  |
| Ruído de fundo médio [dB]           | 34,6 | 43,3 | 42,1 | 42,2 | 43,0 | 40,3 | 37,3 | 38,3 | 36,9 | 37,6 | 36,3 | 34,8 | 34,0 | 32,5 | 30,4 | 29,9 |

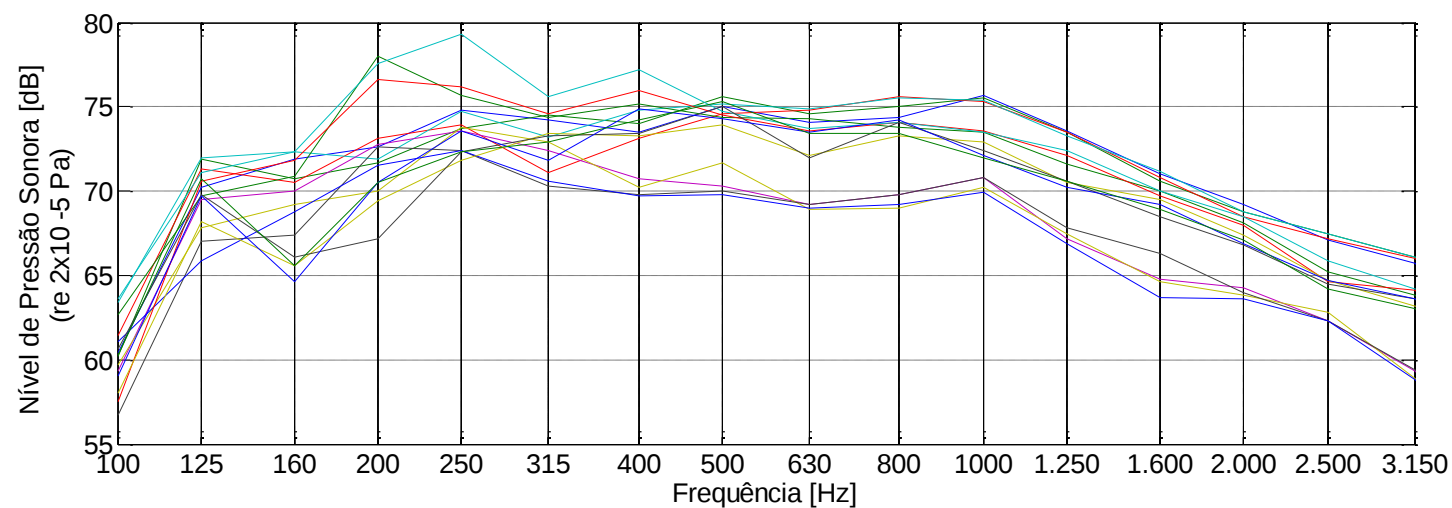


Figura 6.1: NPS das dezesseis combinações fonte-microfone para a suíte do apartamento receptor

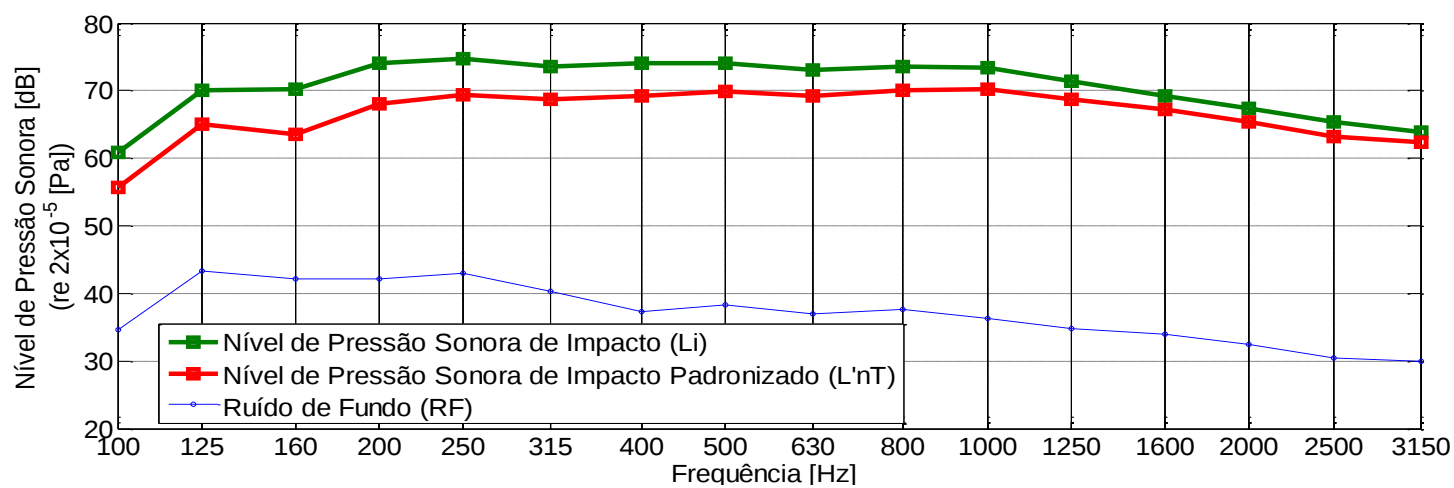


Figura 6.2:  $L_i$ ,  $L'_{nT}$  e RF para a suíte do apartamento receptor

Utilizando-se a norma ISO 717-2 (2013), constatou-se que o nível de pressão sonora padronizado ponderado ( $L'_{nT,w}$ ) do piso ensaiado é de 72 [dB] (Figura 6.3).

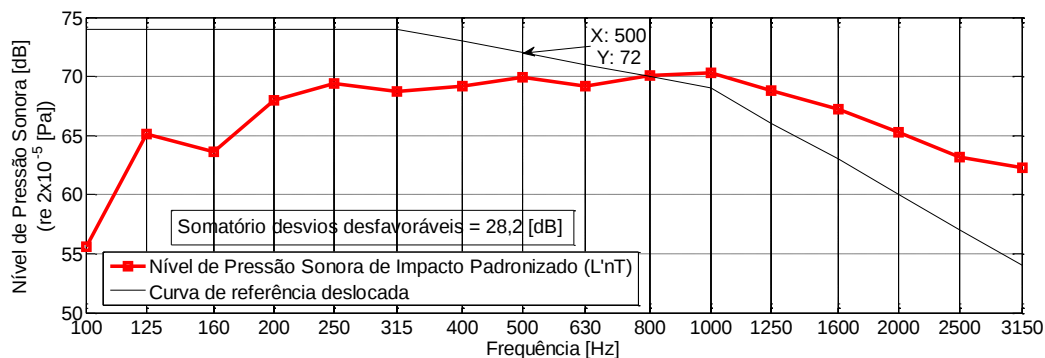


Figura 6.3: Aplicação da norma ISO 717-2 (2013) para cálculo do  $L'_{nT,w}$  do piso da suíte

Dessa forma, o piso de concreto atende a norma NBR 15575-3 (2013) com um nível de desempenho “mínimo”. A questão do tratamento dos dados utilizados para a classificação de pisos de acordo com seu nível de desempenho será vista de forma mais aprofundada no Capítulo 8.

### 6.2.2 Medição do ruído de impacto na sala

De forma análoga à seção anterior, medições foram feitas na sala receptora do já referido apartamento a fim de se obter os parâmetros acústicos de tal ambiente.

Mostra-se na Tabela 6-5 e Figura 6.4 o nível de pressão sonora em bandas de frequência de um terço de oitavas para cada ponto de medição. Nas Tabelas 6-6 e 6-7 são ilustrados o tempo de reverberação e o ruído de fundo em cada ponto de medição da sala, respectivamente. Já a Figura 6.5 são apresentados o nível de pressão sonora de impacto ( $L_i$ ), o nível de pressão sonora de impacto padronizado ( $L'_{nT}$ ), o ruído de fundo médio; parâmetros, estes, mostrados na Tabela 6-8 juntamente com o tempo de reverberação médio.

Tabela 6- 5: NPS em cada posição de medição na sala receptora

| NPS (i, j) [dB]/Freq. [Hz] | 100  | 125  | 160  | 200  | 250  | 315  | 400  | 500  | 630  | 800  | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| NPS (1, 1)                 | 58,0 | 62,6 | 66,9 | 65,0 | 66,5 | 64,2 | 67,2 | 70,8 | 68,9 | 64,8 | 66,7 | 66,4 | 65,0 | 62,9 | 59,5 | 54,5 |
| NPS (1, 2)                 | 54,6 | 61,5 | 65,4 | 65,2 | 64,3 | 63,0 | 66,7 | 71,1 | 68,4 | 63,9 | 65,4 | 65,0 | 63,9 | 61,9 | 58,7 | 53,0 |
| NPS (1, 3)                 | 52,6 | 60,6 | 62,6 | 63,7 | 62,4 | 61,8 | 64,5 | 69,7 | 67,0 | 62,8 | 64,3 | 64,7 | 63,1 | 60,2 | 57,1 | 51,9 |
| NPS (1, 4)                 | 54,1 | 61,4 | 65,9 | 65,3 | 65,5 | 62,9 | 65,4 | 69,7 | 67,9 | 63,7 | 65,9 | 66,0 | 64,7 | 61,8 | 58,2 | 53,3 |
| NPS (2, 1)                 | 53,8 | 70,4 | 67,8 | 70,5 | 72,1 | 70,7 | 71,1 | 69,6 | 69,7 | 70,5 | 70,1 | 69,6 | 67,4 | 67,2 | 63,3 | 57,7 |
| NPS (2, 2)                 | 54,8 | 68,3 | 66,8 | 69,1 | 70,8 | 71,1 | 71,2 | 69,9 | 70,3 | 70,7 | 71,4 | 68,4 | 67,6 | 67,4 | 63,7 | 57,8 |
| NPS (2, 3)                 | 51,7 | 69,0 | 67,1 | 69,5 | 71,6 | 71,3 | 71,4 | 70,6 | 70,4 | 71,0 | 70,4 | 67,6 | 67,1 | 66,4 | 62,0 | 56,6 |
| NPS (2, 4)                 | 54,7 | 70,0 | 67,3 | 70,1 | 70,6 | 71,0 | 70,8 | 70,5 | 69,8 | 71,4 | 69,8 | 67,6 | 67,4 | 66,6 | 61,4 | 58,1 |
| NPS (3, 1)                 | 57,3 | 58,7 | 64,8 | 68,8 | 65,8 | 64,2 | 65,1 | 67,9 | 65,9 | 64,5 | 64,5 | 63,5 | 63,5 | 62,9 | 58,6 | 52,8 |
| NPS (3, 2)                 | 53,1 | 59,7 | 64,1 | 68,8 | 68,2 | 65,8 | 67,3 | 68,0 | 65,7 | 65,3 | 64,1 | 63,3 | 61,7 | 61,2 | 57,6 | 54,5 |
| NPS (3, 3)                 | 55,6 | 60,1 | 64,5 | 71,3 | 67,5 | 65,7 | 67,8 | 66,7 | 65,5 | 65,4 | 63,5 | 62,6 | 59,6 | 58,7 | 56,5 | 53,9 |
| NPS (3, 4)                 | 49,8 | 56,7 | 62,7 | 69,4 | 66,5 | 64,3 | 65,4 | 65,8 | 64,1 | 63,2 | 61,7 | 59,5 | 57,8 | 57,5 | 56,0 | 52,1 |
| NPS (4, 1)                 | 61,7 | 68,5 | 71,3 | 74,7 | 73,5 | 73,1 | 73,0 | 72,5 | 70,2 | 69,8 | 68,6 | 64,7 | 63,2 | 62,6 | 60,7 | 57,8 |
| NPS (4, 2)                 | 57,3 | 70,2 | 69,9 | 77,0 | 74,0 | 73,0 | 73,6 | 72,3 | 70,5 | 69,5 | 69,0 | 65,0 | 63,4 | 62,8 | 61,0 | 58,1 |
| NPS (4, 3)                 | 59,3 | 69,5 | 72,0 | 76,3 | 73,7 | 74,6 | 73,8 | 73,2 | 72,3 | 70,1 | 68,5 | 64,7 | 64,4 | 63,0 | 61,1 | 58,5 |
| NPS (4, 4)                 | 59,2 | 70,7 | 70,7 | 76,1 | 73,9 | 73,1 | 74,0 | 73,3 | 71,1 | 70,6 | 69,3 | 65,2 | 63,9 | 63,5 | 61,8 | 59,2 |
| <b>Média</b>               | 56,6 | 67,1 | 67,8 | 72,0 | 70,6 | 70,0 | 70,5 | 70,6 | 69,2 | 68,4 | 67,9 | 65,8 | 64,7 | 63,8 | 60,4 | 56,3 |
| <b>Variância</b>           | 9,8  | 25,6 | 8,5  | 17,6 | 14,4 | 20,0 | 11,8 | 4,8  | 5,6  | 11,0 | 8,6  | 6,0  | 7,5  | 8,3  | 5,7  | 6,7  |
| <b>Desvio Padrão</b>       | 3,1  | 5,1  | 2,9  | 4,2  | 3,8  | 4,5  | 3,4  | 2,2  | 2,4  | 3,3  | 2,9  | 2,5  | 2,7  | 2,9  | 2,4  | 2,6  |

Tabela 6- 6: Tempo de reverberação na sala receptora

| $T_{60}(i, j)$ [s]/Frequência [Hz] | 100  | 125  | 160  | 200  | 250  | 315  | 400  | 500  | 630  | 800  | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Tempo de reverberação (1, 1)       | 2,4  | 1,3  | 2,1  | 2,1  | 1,8  | 1,6  | 1,8  | 1,7  | 1,5  | 1,4  | 1,3  | 1,2  | 1,2  | 1,1  | 1,1  | 1,1  |
| Tempo de reverberação (2, 1)       | 2,1  | 1,3  | 2,4  | 2,3  | 1,9  | 1,8  | 1,8  | 1,8  | 1,6  | 1,5  | 1,3  | 1,2  | 1,1  | 1,1  | 1,2  | 1,2  |
| Tempo de reverberação (3, 1)       | 2,1  | 1,6  | 2,2  | 2,1  | 1,7  | 1,7  | 1,8  | 1,6  | 1,4  | 1,4  | 1,3  | 1,2  | 1,2  | 1,1  | 1,1  | 1,1  |
| Tempo de reverberação (1, 2)       | 1,7  | 1,9  | 2,1  | 2,0  | 1,7  | 2,0  | 1,8  | 1,7  | 1,6  | 1,3  | 1,3  | 1,1  | 1,1  | 1,1  | 1,1  | 1,2  |
| Tempo de reverberação (2, 2)       | 1,4  | 1,9  | 2,1  | 2,0  | 1,7  | 1,7  | 1,7  | 1,8  | 1,7  | 1,4  | 1,3  | 1,2  | 1,1  | 1,2  | 1,1  | 1,1  |
| Tempo de reverberação (3, 2)       | 1,7  | 1,8  | 2,2  | 1,8  | 1,7  | 1,7  | 1,7  | 1,6  | 1,5  | 1,4  | 1,2  | 1,2  | 1,1  | 1,1  | 1,1  | 1,1  |
| <b>Média</b>                       | 1,9  | 1,6  | 2,2  | 2,1  | 1,8  | 1,8  | 1,8  | 1,7  | 1,6  | 1,4  | 1,3  | 1,2  | 1,1  | 1,1  | 1,1  | 1,1  |
| <b>Variância</b>                   | 0,13 | 0,08 | 0,01 | 0,03 | 0,01 | 0,02 | 0    | 0,01 | 0,01 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| <b>Desvio Padrão</b>               | 0,36 | 0,28 | 0,12 | 0,16 | 0,08 | 0,14 | 0,05 | 0,09 | 0,10 | 0,06 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,05 |

Tabela 6- 7: RF para quatro posições de medição na sala receptora

| Frequência [Hz]                 | 100  | 125  | 160  | 200  | 250  | 315  | 400  | 500  | 630  | 800  | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| NPS do Ruído de Fundo [dB] – P1 | 33,1 | 36,4 | 35,3 | 32,7 | 32,9 | 32,7 | 31,6 | 30,7 | 29,7 | 28,4 | 26,5 | 24,5 | 23,4 | 21,5 | 19,0 | 16,8 |
| NPS do Ruído de Fundo [dB] – P2 | 39,7 | 38,9 | 44,0 | 43,0 | 36,9 | 35,6 | 36,4 | 35,9 | 35,2 | 33,1 | 30,3 | 29,6 | 28,2 | 28,2 | 27,3 | 25,1 |
| NPS do Ruído de Fundo [dB] – P3 | 28,2 | 30,5 | 35,5 | 31,1 | 28,7 | 28,5 | 27,1 | 25,7 | 25,4 | 24,4 | 22,8 | 21,6 | 21,6 | 18,8 | 16,5 | 14,9 |
| NPS do Ruído de Fundo [dB] – P4 | 30,5 | 34,7 | 39,3 | 37,2 | 37,9 | 34,0 | 33,7 | 32,7 | 31,7 | 30,7 | 28,5 | 26,8 | 25,9 | 24,1 | 21,7 | 19,6 |

Tabela 6- 8: Parâmetros medidos na sala receptora

| Frequência [Hz]    | 100  | 125  | 160  | 200  | 250  | 315  | 400  | 500  | 630  | 800  | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $L_i$ [dB]         | 56,6 | 67,1 | 67,8 | 72,0 | 70,6 | 70,0 | 70,5 | 70,6 | 69,2 | 68,4 | 67,9 | 65,8 | 64,7 | 63,8 | 60,4 | 56,3 |
| $L'_{nT}$ [dB]     | 50,8 | 62,1 | 61,4 | 65,9 | 65,3 | 64,5 | 64,9 | 65,3 | 64,1 | 63,9 | 63,8 | 62,0 | 61,3 | 60,4 | 57,0 | 52,9 |
| $T_{60}$ médio [s] | 1,9  | 1,6  | 2,2  | 2,0  | 1,7  | 1,8  | 1,8  | 1,7  | 1,6  | 1,4  | 1,3  | 1,2  | 1,1  | 1,1  | 1,1  | 1,1  |
| RF médio [dB]      | 35,2 | 36,1 | 40,1 | 38,5 | 35,4 | 33,4 | 33,4 | 32,6 | 31,8 | 30,2 | 27,8 | 26,6 | 25,5 | 24,5 | 23,1 | 20,9 |

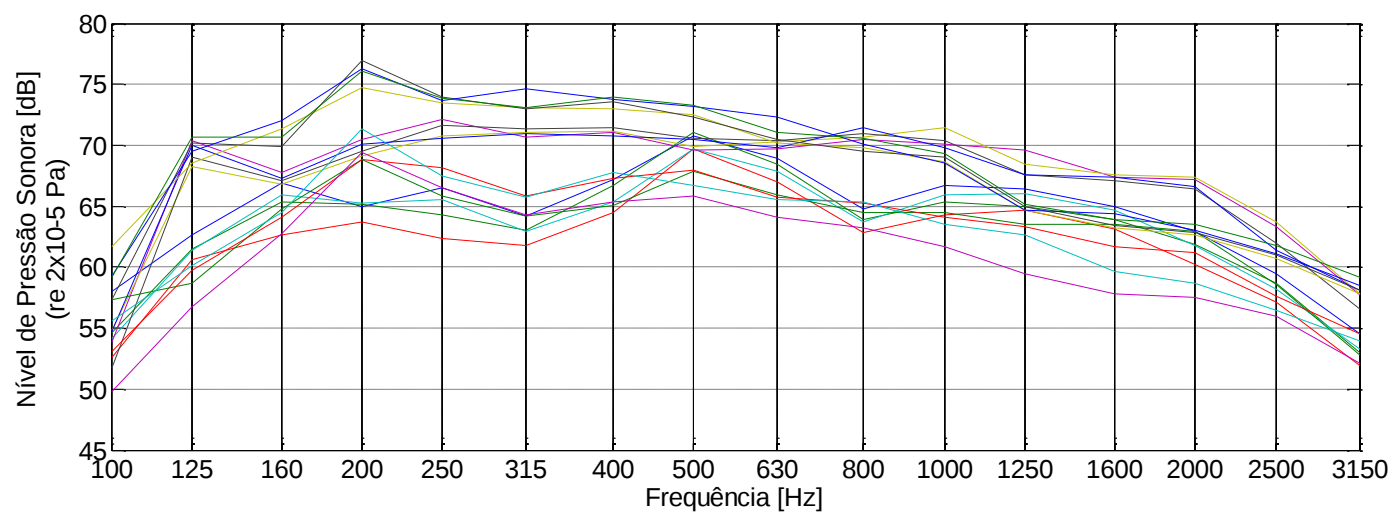


Figura 6.4: NPS das dezesseis combinações fonte-microfone para a sala do apartamento receptor

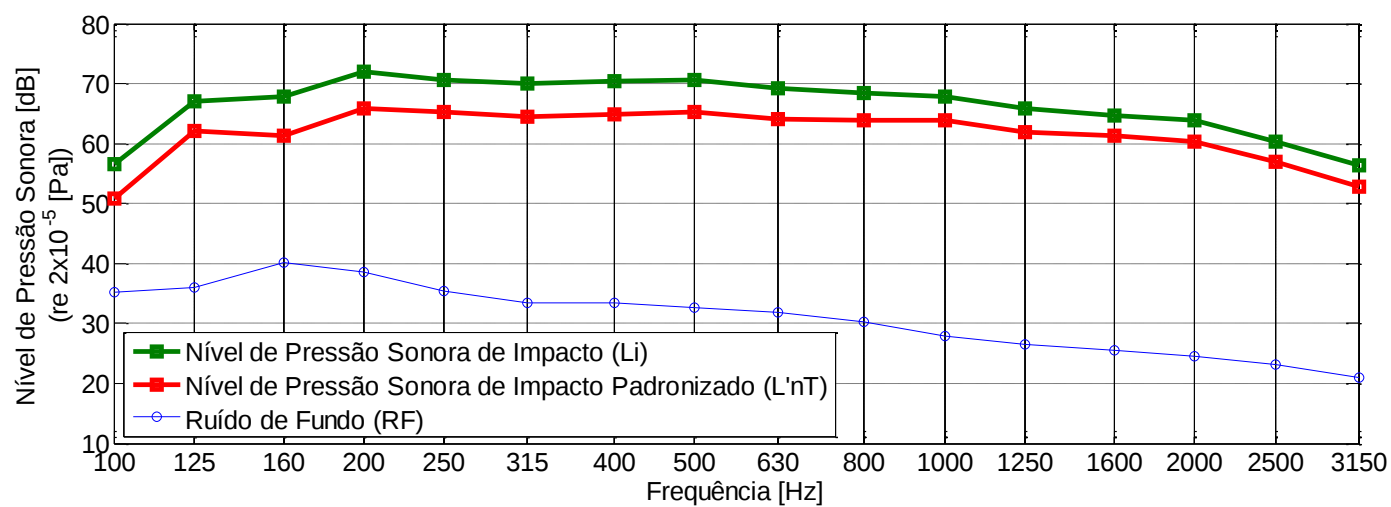


Figura 6.5:  $L_i$ ,  $L'_{nT}$  e RF para a sala do apartamento receptor

O tempo de reverberação foi calculado através da média aritmética de todas as posições de fonte (estouro do balão) e microfone, de acordo com a norma ISO 3382-2 (2008), sendo expresso em segundos por banda de frequência de um terço de oitavas. O resultado é mostrado na Tabela 6-6.

O nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado ( $L'_{nT,w}$ ) calculado foi de 65 [dB] (Figura 6.6). Logo, de acordo com a norma NBR 15575-3 (2013), o piso ensaiado apresentou desempenho “intermediário”.

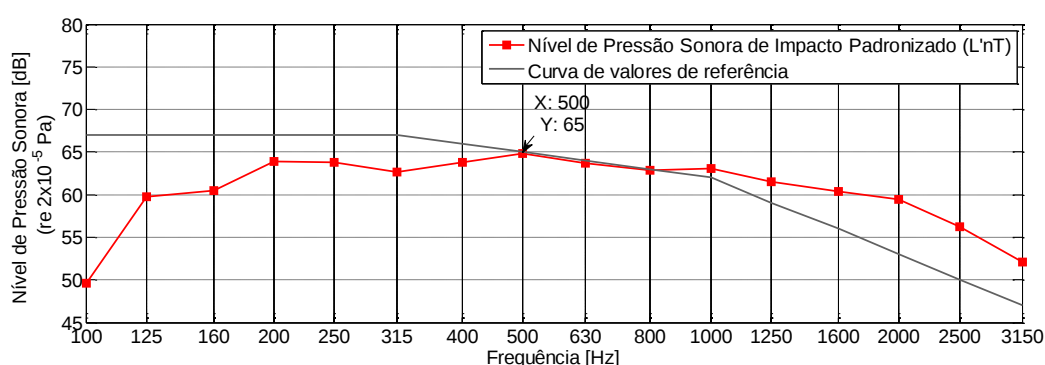


Figura 6.6: Aplicação da norma ISO 717-2 (2013) para cálculo do  $L'_{nT,w}$  do piso da sala

Observa-se que o desvio padrão dos níveis de pressão sonora da sala, em cada banda de frequência de um terço de oitavas, foi, em geral, maior que os níveis de pressão sonora da suíte. O fato das dimensões da sala serem maiores que o da suíte é, possivelmente, o fator responsável por essa discrepância.

### 6.3 Ruído de impacto entre cômodos adjacentes

A metodologia descrita pela norma ISO 140-7 (1998) prevê a medição do ruído de impacto somente para cômodos imediatamente sobrepostos. De forma complementar, foi realizada a medição do nível de pressão sonora de impacto nos demais cômodos do apartamento, dada uma fonte fixa de excitação de impacto localizada na sala emissora, utilizando um procedimento específico.

Foram utilizados dois pontos de fontes de ruído de impacto: um no centro e outro na extremidade da sala. Da mesma forma, foram utilizados dois pontos de medição em cada

cômodo: um no centro e outro na extremidade. Ao todo, realizaram-se 24 medições; 12 com a máquina padrão de impacto no centro da sala e 12 com ela na extremidade.

As Tabelas 6-9 e 6-10 retratam o ruído de fundo e o nível de pressão sonora de impacto em vários cômodos do apartamento receptor, respectivamente, dada uma fonte de impacto localizada no centro da sala emissora (coordenada 5). Os dois conjuntos de níveis de pressão sonora para cada cômodo são representados pela média dos valores, sendo apresentados por uma única distribuição dada pela Figura 6.7.

Já as Tabelas 6-11 e 6-12 mostram o ruído de fundo médio e o nível de pressão sonora em vários cômodos do apartamento receptor, respectivamente, quando a fonte de impacto (máquina padrão de impacto) localiza-se na extremidade da sala emissora (coordenada 6). Tais valores são ilustrados na Figura 6.8.

O ruído de fundo foi medido para cada posição de medição de nível de pressão sonora. Logo, nas Tabelas 6-9 e 6-11 foram mostrados os níveis de ruído de fundo médio para cada posição da máquina padrão de impacto (MPI). Ou seja, para MPI localizada no centro da sala emissora, representou-se o nível de ruído de fundo como a média dos níveis de ruído de fundo das duas posições (centro e extremidade) no cômodo de interesse.

Como já mencionado, as coordenadas  $i$  e  $j$  entre parênteses representam as posições de medição. A primeira faz referência à posição da máquina padrão de impacto no apartamento emissor e a segunda à posição do microfone no apartamento receptor.

Tomaram-se as médias logarítmicas das duas medições de cada cômodo (centro e extremidade) para cada posição da máquina padrão de impacto (centro e extremidade), confeccionando-se a Tabela 6-13. Feito a média por posição da máquina padrão de impacto, fez-se a média do NPS de impacto a partir das quatro medições em cada cômodo, valores estes dados na Tabela 6-14 (incluindo o ruído de impacto da sala calculado na seção 6.1.2). As quatro medições em cada cômodo são dadas pela combinação das duas posições de fonte e duas posições de medição. Finalmente, a Figura 6.9 foi apresentada a fim de ilustrar o nível de ruído de impacto médio em cômodos adjacentes quando uma fonte de excitação se localiza na sala do apartamento emissor.

Tabela 6- 9: RF médio (MPI: centro da sala emissora)

| NPS (i, j) [dB]/Freq. [Hz]  | 100  | 125  | 160  | 200  | 250  | 315  | 400  | 500  | 630  | 800  | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ruído de Fundo – Banheiro 1 | 34,8 | 34,9 | 36,6 | 28,5 | 32,5 | 35,3 | 34,5 | 34,8 | 35,9 | 39,1 | 37,9 | 37,5 | 34,5 | 30,4 | 25,4 | 20,5 |
| Ruído de Fundo – Banheiro 2 | 32,1 | 34,1 | 34,0 | 25,8 | 28,5 | 32,8 | 32,9 | 34,4 | 31,8 | 34,0 | 34,0 | 33,4 | 28,5 | 25,2 | 23,4 | 21,5 |
| Ruído de Fundo – Cozinha    | 43,5 | 39,5 | 43,8 | 35,9 | 34,7 | 34,9 | 34,4 | 34,8 | 32,4 | 33,9 | 35,2 | 33,2 | 30,1 | 28,0 | 26,9 | 26,2 |
| Ruído de Fundo – Quarto 1   | 47,7 | 45,9 | 45,6 | 38,0 | 40,8 | 37,1 | 34,9 | 34,6 | 33,6 | 33,7 | 32,2 | 30,4 | 29,2 | 27,8 | 29,4 | 22,0 |
| Ruído de Fundo – Quarto 2   | 41,7 | 51,8 | 45,4 | 43,9 | 43,1 | 45,9 | 43,8 | 41,6 | 41,8 | 42,4 | 40,0 | 37,9 | 35,3 | 32,3 | 29,8 | 31,4 |
| Ruído de Fundo – Quarto 3   | 36,2 | 42,3 | 39,6 | 37,3 | 40,9 | 34,3 | 34,3 | 33,5 | 33,7 | 32,1 | 32,3 | 29,9 | 27,2 | 24,5 | 22,8 | 20,3 |
| <b>Média</b>                | 42,4 | 45,7 | 42,7 | 38,4 | 39,2 | 39,6 | 37,9 | 36,7 | 36,5 | 37,6 | 36,3 | 34,8 | 31,9 | 28,9 | 27,1 | 25,9 |
| <b>Variância</b>            | 35,1 | 45,7 | 23,7 | 44,2 | 32,9 | 22,2 | 15,8 | 8,8  | 13,5 | 15,9 | 9,8  | 11,5 | 11,0 | 8,9  | 8,7  | 19,0 |
| <b>Desvio Padrão</b>        | 5,9  | 6,8  | 4,9  | 6,7  | 5,7  | 4,7  | 4,0  | 3,0  | 3,7  | 4,0  | 3,1  | 3,4  | 3,3  | 3,0  | 3,0  | 4,4  |

Tabela 6- 10: NPS em cômodos adjacentes do apartamento receptor (MPI: centro da sala emissora)

| NPS (i, j) [dB]/Freq. [Hz]          | 100  | 125  | 160  | 200  | 250  | 315  | 400  | 500  | 630  | 800  | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ruído de Impacto – Banheiro 1 (5,6) | 44,5 | 58,1 | 58,9 | 49,1 | 55,2 | 56,0 | 54,7 | 52,4 | 56,3 | 55,9 | 50,9 | 49,8 | 48,6 | 47,1 | 41,9 | 38,4 |
| Ruído de Impacto – Banheiro 1 (5,5) | 45,1 | 56,9 | 57,6 | 50,8 | 54,2 | 55,9 | 53,9 | 53,8 | 55,5 | 54,7 | 51,7 | 50,1 | 49,0 | 46,2 | 43,1 | 37,3 |
| Ruído de Impacto – Banheiro 2 (5,5) | 53,4 | 64,9 | 64,4 | 64,1 | 64,1 | 65,8 | 66,6 | 63,7 | 63,8 | 63,7 | 62,4 | 59,2 | 58,0 | 56,6 | 53,4 | 49,1 |
| Ruído de Impacto – Banheiro 2 (5,6) | 51,1 | 62,9 | 69,6 | 56,8 | 63,1 | 66,4 | 62,8 | 63,6 | 62,0 | 63,0 | 62,9 | 58,6 | 58,6 | 56,5 | 52,7 | 48,5 |
| Ruído de Impacto – Cozinha (5,5)    | 58,3 | 67,0 | 62,1 | 62,7 | 67,6 | 67,4 | 66,2 | 67,7 | 67,3 | 68,4 | 65,4 | 64,3 | 63,2 | 61,8 | 60,8 | 56,7 |
| Ruído de Impacto – Cozinha (5,6)    | 65,4 | 61,2 | 63,5 | 58,7 | 65,9 | 67,2 | 67,5 | 67,8 | 66,8 | 70,2 | 66,3 | 63,9 | 63,4 | 61,8 | 60,7 | 56,3 |
| Ruído de Impacto – Quarto 1 (5,5)   | 55,5 | 56,4 | 62,2 | 61,4 | 61,3 | 60,8 | 59,1 | 59,0 | 59,9 | 61,3 | 57,8 | 54,6 | 52,7 | 51,3 | 48,1 | 44,0 |
| Ruído de Impacto – Quarto 1 (5,6)   | 53,9 | 59,9 | 61,1 | 56,9 | 60,0 | 60,4 | 60,2 | 57,8 | 60,2 | 61,5 | 58,0 | 53,8 | 52,7 | 51,2 | 47,5 | 43,9 |
| Ruído de Impacto – Quarto 2 (5,5)   | 46,3 | 62,4 | 54,8 | 58,1 | 60,2 | 62,5 | 59,9 | 57,1 | 57,9 | 57,9 | 54,8 | 53,5 | 52,4 | 51,2 | 47,6 | 43,7 |
| Ruído de Impacto – Quarto 2 (5,6)   | 47,1 | 60,9 | 53,8 | 58,0 | 60,9 | 61,6 | 60,2 | 56,8 | 57,1 | 58,3 | 52,9 | 53,9 | 51,1 | 51,8 | 48,2 | 42,1 |

|                                   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ruído de Impacto – Quarto 3 (5,5) | 56,2 | 60,9 | 60,1 | 61,5 | 63,2 | 68,6 | 64,8 | 62,9 | 63,3 | 64,5 | 61,1 | 59,5 | 59,3 | 58,4 | 54,8 | 51,5 |
| Ruído de Impacto – Quarto 3 (5,6) | 57,2 | 63,8 | 62,6 | 60,2 | 64,2 | 66,9 | 65,1 | 63,4 | 63,0 | 64,9 | 61,0 | 59,7 | 58,8 | 58,5 | 54,4 | 51,0 |
| <b>Média</b>                      | 57,1 | 62,3 | 62,9 | 59,8 | 63,0 | 64,9 | 63,5 | 62,9 | 62,7 | 64,3 | 61,2 | 59,1 | 58,3 | 57,0 | 54,8 | 50,7 |
| <b>Variância</b>                  | 39,5 | 10,1 | 18,5 | 20,2 | 15,7 | 19,6 | 20,4 | 25,9 | 15,5 | 22,6 | 27,7 | 23,5 | 27,0 | 28,1 | 37,3 | 40,4 |
| <b>Desvio Padrão</b>              | 6,3  | 3,2  | 4,3  | 4,5  | 4,0  | 4,4  | 4,5  | 5,1  | 3,9  | 4,8  | 5,3  | 4,8  | 5,2  | 5,3  | 6,1  | 6,4  |

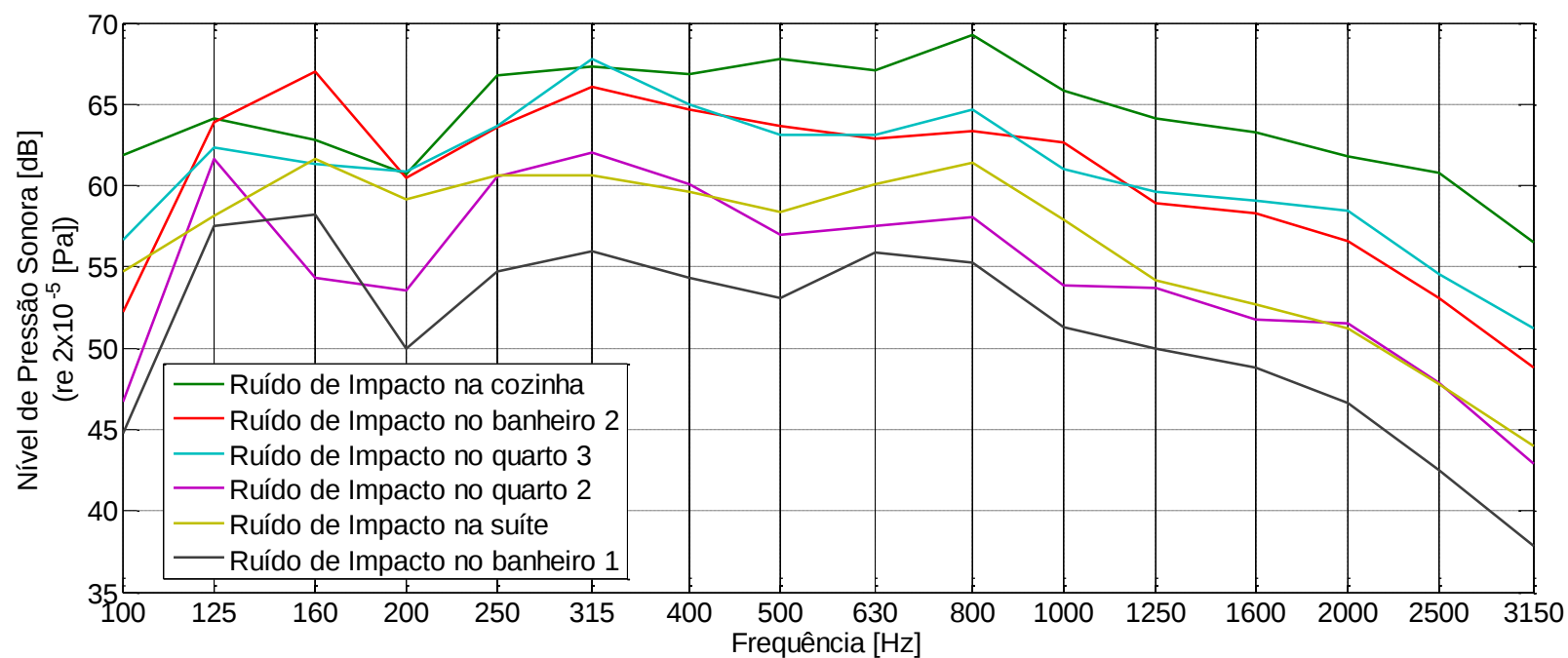


Figura 6.7: NPS com a MPI padrão localizada no centro da sala emissora

Tabela 6- 11: RF médio (MPI: extremidade da sala emissora)

| NPS [dB]/Freq. [Hz]         | 100  | 125  | 160  | 200  | 250  | 315  | 400  | 500  | 630  | 800  | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ruído de Fundo – Banheiro 1 | 35,8 | 43,9 | 38,3 | 32,7 | 36,5 | 35,9 | 33,9 | 33,9 | 33,6 | 36,3 | 37,1 | 36,5 | 34,3 | 31,1 | 29,9 | 30,3 |
| Ruído de Fundo – Banheiro 2 | 25,2 | 33,0 | 32,1 | 27,6 | 30,1 | 28,8 | 30   | 29,2 | 27,5 | 29,1 | 29,6 | 29,8 | 29,1 | 29,3 | 30,0 | 30,8 |
| Ruído de Fundo – Banheiro 3 | 25,3 | 39,1 | 34,0 | 23,7 | 30,2 | 30,4 | 32,4 | 30,0 | 34,5 | 41,1 | 34,1 | 29,3 | 28,7 | 29,0 | 29,6 | 30,5 |
| Ruído de Fundo – Cozinha    | 41,2 | 37,2 | 43,4 | 31,4 | 34,0 | 32,4 | 30,2 | 32,1 | 32,1 | 31,1 | 31,3 | 31,1 | 29,8 | 29,9 | 30,3 | 31,5 |
| Ruído de Fundo – Quarto 1   | 40,8 | 41,6 | 40,8 | 32,9 | 32,5 | 34,0 | 32,5 | 31,7 | 31,4 | 29,7 | 31,1 | 31,5 | 31,4 | 31,9 | 33,5 | 33,6 |
| Ruído de Fundo – Quarto 2   | 40,7 | 41,5 | 38,1 | 38,1 | 36,9 | 36,1 | 37,2 | 36,5 | 35,7 | 34,8 | 35,1 | 33,4 | 31,9 | 30,6 | 30,5 | 31,7 |
| Ruído de Fundo – Quarto 3   | 39,4 | 41,1 | 37,5 | 38,9 | 32,5 | 37,4 | 38,6 | 32,2 | 35,6 | 35,2 | 35,6 | 30,6 | 31,2 | 31,9 | 33,9 | 32   |
| <b>Média</b>                | 38,6 | 40,7 | 39,1 | 34,6 | 34,0 | 34,5 | 34,7 | 32,9 | 33,6 | 35,8 | 34,1 | 32,5 | 31,3 | 30,7 | 31,5 | 31,6 |
| <b>Variância</b>            | 52,2 | 13,0 | 14,6 | 29,1 | 7,5  | 10,1 | 10,9 | 5,9  | 8,4  | 18,1 | 7,7  | 6,1  | 3,7  | 1,4  | 3,2  | 1,3  |
| <b>Desvio Padrão</b>        | 7,2  | 3,6  | 3,6  | 5,4  | 2,7  | 3,2  | 3,3  | 2,4  | 2,9  | 4,3  | 2,8  | 2,5  | 1,9  | 1,2  | 1,8  | 1,1  |

Tabela 6- 12: NPS em cômodos adjacentes do apartamento receptor (MPI: extremidade da sala emissora)

| NPS ( <i>i, j</i> ) [dB]/Freq. [Hz] | 100  | 125  | 160  | 200  | 250  | 315  | 400  | 500  | 630  | 800  | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ruído de Impacto – Banheiro 1 (6,5) | 35,9 | 50,0 | 47,9 | 48,4 | 53,9 | 54,6 | 51,9 | 51,2 | 49,6 | 46,2 | 44,1 | 43,9 | 40,4 | 40,6 | 38,5 | 36,4 |
| Ruído de Impacto – Banheiro 1 (6,6) | 50,9 | 58,2 | 59,3 | 60,6 | 57,1 | 55,4 | 52,7 | 51,3 | 51,1 | 46,3 | 43,6 | 43,5 | 40,6 | 39,9 | 38,0 | 35,7 |
| Ruído de Impacto – Banheiro 2 (6,5) | 51,2 | 59,7 | 60,7 | 59,5 | 60,3 | 62,4 | 60,9 | 59,2 | 57,7 | 55,8 | 53,7 | 52,6 | 49,9 | 49,1 | 49,0 | 46,5 |
| Ruído de Impacto – Banheiro 2 (6,6) | 48,0 | 58,6 | 58,0 | 54,8 | 62,7 | 63,5 | 59,5 | 59,7 | 57,5 | 54,8 | 52,8 | 50,8 | 49,2 | 49,3 | 49,2 | 46,6 |
| Ruído de Impacto – Cozinha (6,5)    | 49,2 | 58,0 | 59,4 | 62,4 | 63,7 | 63,4 | 62,5 | 62,2 | 61,5 | 58,8 | 58,7 | 56,8 | 55,5 | 55,2 | 57,2 | 54,9 |
| Ruído de Impacto – Cozinha (6,6)    | 55,6 | 58,4 | 60,0 | 60,3 | 63,5 | 63,3 | 62,4 | 63,2 | 61,0 | 59,8 | 57,7 | 55,8 | 54,1 | 55,6 | 57,2 | 55,1 |
| Ruído de Impacto – Quarto 1 (6,5)   | 51,2 | 53,7 | 59,4 | 58,8 | 59,8 | 58,1 | 56,1 | 55,6 | 54,7 | 52,4 | 49,7 | 47,1 | 45,4 | 44,6 | 43,8 | 41,1 |
| Ruído de Impacto – Quarto 1 (6,6)   | 45,0 | 56,8 | 57,2 | 53,7 | 56,5 | 56,9 | 57,0 | 56,0 | 54,4 | 51,4 | 48,5 | 46,0 | 44,9 | 44,1 | 43,4 | 40,8 |
| Ruído de Impacto – Quarto 2 (6,6)   | 58,8 | 62,0 | 61,6 | 54,1 | 58,4 | 57,3 | 56,5 | 54,3 | 52,8 | 49,0 | 47,1 | 45,5 | 44,3 | 44,5 | 42,7 | 41,0 |
| Ruído de Impacto – Quarto 2 (6,5)   | 49,2 | 59,4 | 52,9 | 56,9 | 57,0 | 58,6 | 55,7 | 53,7 | 52,5 | 49,9 | 46,8 | 45,2 | 43,9 | 44,4 | 42,8 | 40,6 |

|                                   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ruído de Impacto – Quarto 3 (6,5) | 55,6 | 61,8 | 58,4 | 58,4 | 61,4 | 61,2 | 60,1 | 60,9 | 57,0 | 54,4 | 52,8 | 51,4 | 49,7 | 50,1 | 49,0 | 47,1 |
| Ruído de Impacto – Quarto 3 (6,6) | 53,2 | 59,4 | 58,7 | 56,1 | 58,3 | 61,8 | 61,1 | 60,3 | 57,3 | 54,7 | 52,5 | 51,1 | 49,0 | 49,6 | 48,5 | 46,7 |
| <b>Média</b>                      | 52,9 | 58,9 | 58,8 | 58,3 | 60,3 | 60,7 | 59,2 | 58,9 | 57,0 | 54,7 | 53,1 | 51,3 | 49,6 | 49,9 | 50,8 | 48,6 |
| <b>Variância</b>                  | 34,7 | 11,1 | 14,4 | 14,9 | 9,4  | 10,6 | 12,9 | 17,3 | 13,9 | 19,5 | 23,8 | 20,8 | 23,2 | 25,9 | 39,4 | 39,6 |
| <b>Desvio Padrão</b>              | 5,9  | 3,3  | 3,8  | 3,9  | 3,1  | 3,3  | 3,6  | 4,2  | 3,7  | 4,4  | 4,9  | 4,6  | 4,8  | 5,1  | 6,3  | 6,3  |

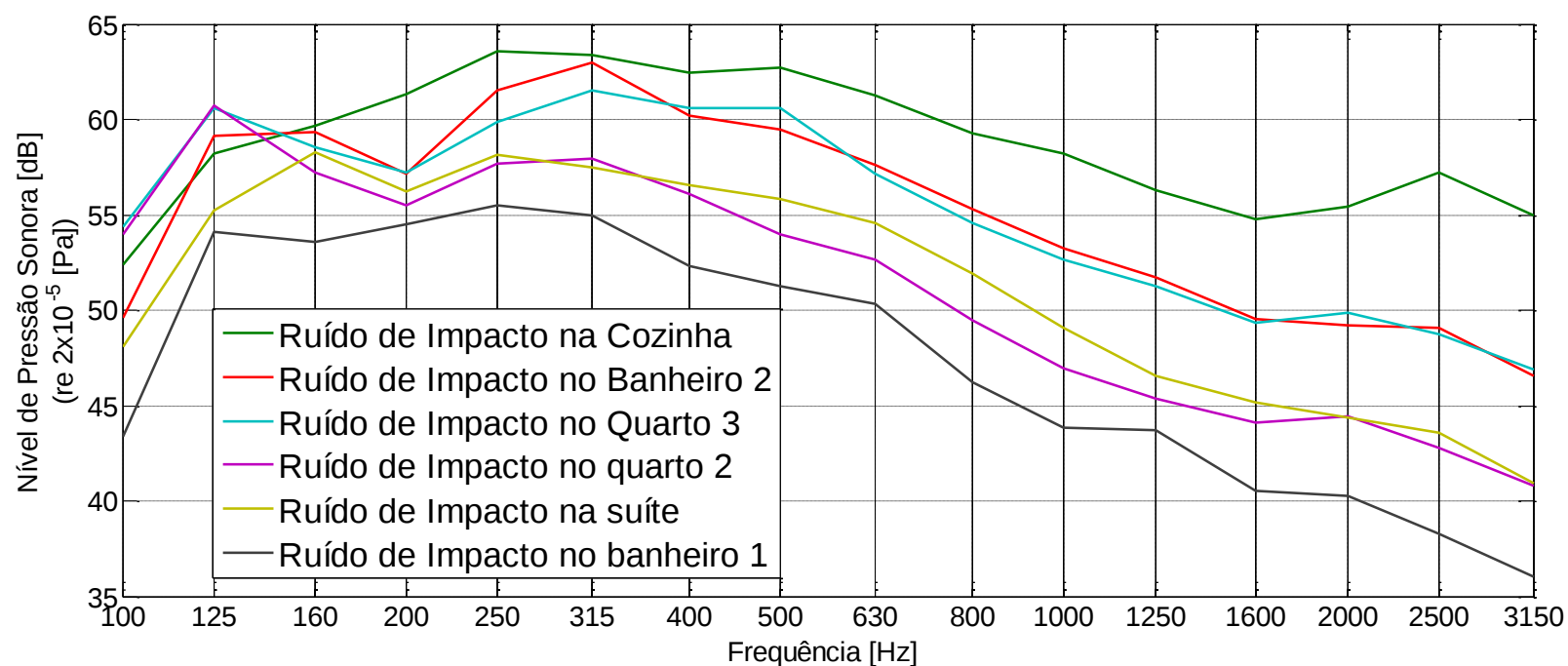


Figura 6.8: Níveis de Pressão Sonora com a máquina de impacto padrão localizada na extremidade da sala emissora

Tabela 6- 13: NPS médio em cômodos adjacentes do apartamento receptor (por posição da MPI)

| Nível de Pressão Sonora [dB]/Freq. [Hz] | 100  | 125  | 160  | 200  | 250  | 315  | 400  | 500  | 630  | 800  | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 |
|-----------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ruído de Impacto – Cozinha (5)          | 63,2 | 65,0 | 62,9 | 61,1 | 66,8 | 67,3 | 66,9 | 67,8 | 67,1 | 69,4 | 65,9 | 64,1 | 63,3 | 61,8 | 60,8 | 56,5 |
| Ruído de Impacto – Banheiro 2 (5)       | 52,4 | 64,0 | 67,7 | 61,8 | 63,6 | 66,1 | 65,1 | 63,7 | 63,0 | 63,4 | 62,7 | 58,9 | 58,3 | 56,6 | 53,1 | 48,8 |
| Ruído de Impacto – Quarto 3 (5)         | 56,7 | 62,6 | 61,5 | 60,9 | 63,7 | 67,8 | 65,0 | 63,2 | 63,2 | 64,7 | 61,1 | 59,6 | 59,1 | 58,5 | 54,6 | 51,3 |
| Ruído de Impacto – Quarto 2 (5)         | 46,7 | 61,7 | 54,3 | 58,1 | 60,6 | 62,1 | 60,1 | 57,0 | 57,5 | 58,1 | 54,0 | 53,7 | 51,8 | 51,5 | 47,9 | 43,0 |
| Ruído de Impacto – Quarto 1 (5)         | 54,8 | 58,5 | 61,7 | 59,7 | 60,7 | 60,6 | 59,7 | 58,4 | 60,1 | 61,4 | 57,9 | 54,2 | 52,7 | 51,3 | 47,8 | 44,0 |
| Ruído de Impacto – Banheiro 1 (5)       | 44,8 | 57,5 | 58,3 | 50,0 | 54,7 | 56,0 | 54,3 | 53,2 | 55,9 | 55,3 | 51,3 | 50,0 | 48,8 | 46,7 | 42,5 | 37,9 |
| Ruído de Impacto – Cozinha (6)          | 53,5 | 58,2 | 59,7 | 61,5 | 63,6 | 63,4 | 62,5 | 62,7 | 61,3 | 59,3 | 58,2 | 56,3 | 54,9 | 55,4 | 57,2 | 55,0 |
| Ruído de Impacto – Banheiro 2 (6)       | 49,9 | 59,2 | 59,6 | 57,8 | 61,7 | 63,0 | 60,3 | 59,5 | 57,6 | 55,3 | 53,3 | 51,8 | 49,6 | 49,2 | 49,1 | 46,6 |
| Ruído de Impacto – Quarto 3 (6)         | 54,6 | 60,8 | 58,6 | 57,4 | 60,1 | 61,5 | 60,6 | 60,6 | 57,2 | 54,6 | 52,7 | 51,3 | 49,4 | 49,9 | 48,8 | 46,9 |
| Ruído de Impacto – Quarto 2 (6)         | 56,2 | 60,9 | 59,1 | 55,7 | 57,8 | 58,0 | 56,1 | 54,0 | 52,7 | 49,5 | 47,0 | 45,4 | 44,1 | 44,5 | 42,8 | 40,8 |
| Ruído de Impacto – Quarto 1 (6)         | 49,1 | 55,5 | 58,4 | 57,0 | 58,5 | 57,5 | 56,6 | 55,8 | 54,6 | 51,9 | 49,1 | 46,6 | 45,2 | 44,4 | 43,6 | 41,0 |
| Ruído de Impacto – Banheiro 1 (6)       | 48,0 | 55,8 | 56,6 | 57,8 | 55,8 | 55,0 | 52,3 | 51,3 | 50,4 | 46,3 | 43,9 | 43,7 | 40,5 | 40,3 | 38,3 | 36,1 |
| <b>Média</b>                            | 55,5 | 60,9 | 61,3 | 59,1 | 61,9 | 63,3 | 61,9 | 61,4 | 60,7 | 61,8 | 58,9 | 56,7 | 55,8 | 54,8 | 53,3 | 49,8 |
| <b>Variância</b>                        | 28,9 | 10,1 | 12,7 | 12,2 | 12,4 | 18,4 | 19,6 | 25,0 | 22,5 | 43,7 | 43,7 | 37,6 | 44,4 | 40,3 | 44,6 | 40,4 |
| <b>Desvio Padrão</b>                    | 5,4  | 3,2  | 3,6  | 3,5  | 3,5  | 4,3  | 4,4  | 5,0  | 4,7  | 6,6  | 6,6  | 6,1  | 6,7  | 6,3  | 6,7  | 6,4  |

Tabela 6- 14: NPS médio em cômodos adjacentes do apartamento receptor

| Nível de Pressão Sonora [dB]/Freq. [Hz] | 100  | 125  | 160  | 200  | 250  | 315  | 400  | 500  | 630  | 800  | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 |
|-----------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ruído de Impacto – Sala                 | 56,6 | 67,1 | 67,8 | 72,0 | 70,6 | 70,0 | 70,5 | 70,6 | 69,2 | 68,4 | 67,9 | 65,8 | 64,7 | 63,8 | 60,4 | 56,3 |
| Ruído de Impacto - Cozinha              | 60,6 | 62,8 | 61,6 | 61,3 | 65,5 | 65,8 | 65,2 | 66,0 | 65,1 | 66,8 | 63,6 | 61,8 | 60,9 | 59,7 | 59,4 | 55,8 |
| Ruído de Impacto – Banheiro 2           | 51,3 | 62,2 | 65,3 | 60,2 | 62,8 | 64,8 | 63,3 | 62,1 | 61,1 | 61,0 | 60,2 | 56,7 | 55,8 | 54,3 | 51,5 | 47,8 |

|                               |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ruído de Impacto – Quarto 3   | 55,8 | 61,8 | 60,3 | 59,5 | 62,3 | 65,7 | 63,3 | 62,1 | 61,2 | 62,1 | 58,7 | 57,2 | 56,5 | 56,1 | 52,6 | 49,6 |
| Ruído de Impacto – Quarto 2   | 53,7 | 61,3 | 57,3 | 57,1 | 59,4 | 60,5 | 58,5 | 55,8 | 55,7 | 55,7 | 51,8 | 51,3 | 49,5 | 49,3 | 46,1 | 42,0 |
| Ruído de Impacto – Quarto 1   | 52,8 | 57,3 | 60,4 | 58,6 | 59,7 | 59,3 | 58,4 | 57,3 | 58,2 | 58,9 | 55,4 | 51,9 | 50,4 | 49,1 | 46,2 | 42,8 |
| Ruído de Impacto – Banheiro 1 | 46,7 | 56,7 | 57,5 | 55,5 | 55,3 | 55,5 | 53,4 | 52,4 | 54,0 | 52,8 | 49,0 | 47,9 | 46,4 | 44,6 | 40,9 | 37,1 |
| <b>Média</b>                  | 55,5 | 60,9 | 61,3 | 59,1 | 61,9 | 63,3 | 61,9 | 61,4 | 60,7 | 61,8 | 58,9 | 56,7 | 55,8 | 54,8 | 53,3 | 49,8 |
| <b>Variância</b>              | 20,0 | 9,5  | 14,5 | 30,8 | 20,3 | 18,9 | 26,9 | 38,1 | 27,7 | 32,2 | 44,7 | 41,7 | 44,9 | 44,8 | 53,3 | 49,1 |
| <b>Desvio Padrão</b>          | 4,5  | 3,1  | 3,8  | 5,6  | 4,5  | 4,3  | 5,2  | 6,2  | 5,3  | 5,7  | 6,7  | 6,5  | 6,7  | 6,7  | 7,3  | 7,0  |

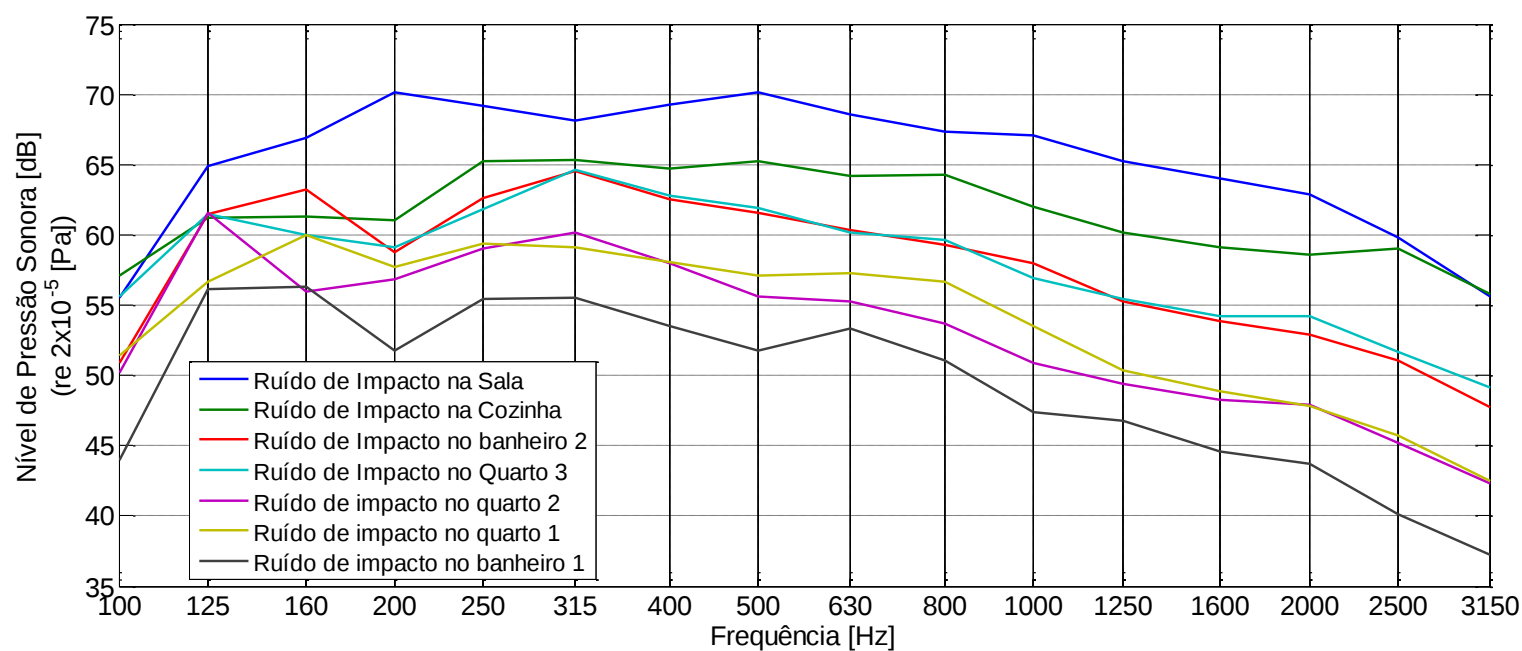


Figura 6. 9: NPS em cômodos adjacentes de um apartamento residencial dado uma fonte de impacto fixa

Percebe-se que, ao analisar os níveis de pressão sonora da Tabela 6-13, em geral, o ruído de impacto gerado pela máquina padrão de impacto localizado no centro da sala emissora é maior que o ruído de impacto gerado pela máquina padrão de impacto localizado da extremidade da sala emissora. A máquina padrão de impacto posicionada no centro de uma placa excita menor quantidade de modos acústicos, porém, os que são excitados possuem uma amplitude maior, o que gera maior irradiação de energia sonora.

O ruído de fundo, como resultou em níveis de pressão sonora bem abaixo dos níveis de pressão sonora dos ruídos de impacto medidos, optou-se não representá-lo graficamente.

### 6.3.1 $L'_{nT,w}$ para cômodos adjacentes

Além das medições realizadas na sala e na suíte, o tempo de reverberação foi medido nos demais recintos. A seguir, tem-se representado os tempos de reverberação do quarto 2, quarto 3, cozinha, banheiro 1 e banheiro 2 (Tabelas 6.15 a 6.19, respectivamente). Tais valores são necessários para determinação do “*Nível de Pressão Sonora de Impacto Padronizado ( $L'_{nT}$ )*” para cômodos adjacentes, devido uma excitação de impacto fixa.

Os tempos de reverberação são dados em segundos, na forma  $T_{60}(i, j)$  no qual  $i$  e  $j$  representam as posições de fonte e de medição, respectivamente. Fonte e medição, neste caso, localizam-se no ambiente receptor. As localizações exatas de fonte e medição são dadas pelas Figuras 5.22 a 5.27.

O parâmetro  $L'_{nT}$  (Nível de Pressão Sonora de Impacto Padronizado) constante na norma ISO 140-7 (1998) é resultado de um processo metodológico realizado a partir de ensaio realizado em cômodos imediatamente sobrepostos, referindo-se, portanto, a um procedimento de campo específico. Ao se medir o nível de pressão sonora de impacto em cômodos adjacentes, ou seja, aqueles que não são imediatamente sobrepostos, obtém-se um novo parâmetro. Tal parâmetro, no presente trabalho, foi chamado de  $L'_{nT(adj.)}$  (Nível de Pressão Sonora de Impacto Padronizado para cômodos adjacentes), sendo mostrados pela Tabela 6.20.



Tabela 6- 17: Tempo de reverberação da Cozinha

| $T_{60}(i, j)$ [s]/Frequência [Hz] | 100 | 125 | 160 | 200 | 250 | 315 | 400 | 500 | 630 | 800 | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 |
|------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|
| Tempo de reverberação (1,1)        | 1,6 | 1,9 | 1,6 | 1,9 | 1,8 | 1,5 | 1,4 | 1,5 | 1,3 | 1,2 | 1,2  | 1,3  | 1,2  | 1,1  | 1,0  | 1,0  |
| Tempo de reverberação (2,1)        | 1,3 | 2,0 | 1,9 | 2,0 | 1,9 | 1,4 | 1,5 | 1,4 | 1,2 | 1,1 | 1,2  | 1,2  | 1,1  | 1,1  | 1,0  | 0,9  |
| Tempo de reverberação (3,1)        | 2,9 | 2,0 | 1,6 | 1,8 | 1,5 | 1,5 | 1,4 | 1,5 | 1,3 | 1,2 | 1,3  | 1,2  | 1,2  | 1,1  | 1,0  | 1,0  |
| Tempo de reverberação (1,2)        | 2,0 | 1,6 | 1,9 | 1,9 | 1,7 | 1,5 | 1,5 | 1,4 | 1,4 | 1,3 | 1,3  | 1,2  | 1,2  | 1,1  | 1,0  | 0,9  |
| Tempo de reverberação (2,2)        | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,5 | 1,5 | 1,3 | 1,4 | 1,3 | 1,3 | 1,3  | 1,3  | 1,2  | 1,2  | 1,1  | 1,0  |
| Tempo de reverberação (3,2)        | 4,6 | 2,0 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,4 | 1,5 | 1,5 | 1,4 | 1,3 | 1,3  | 1,3  | 1,2  | 1,2  | 1,1  | 1,0  |
| <b>Média</b>                       | 2,3 | 1,8 | 1,7 | 1,8 | 1,7 | 1,5 | 1,4 | 1,4 | 1,3 | 1,2 | 1,3  | 1,2  | 1,2  | 1,1  | 1,0  | 1,0  |
| <b>Variância</b>                   | 1,5 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  |
| <b>Desvio Padrão</b>               | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,0 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  |

Tabela 6- 18: Tempo de reverberação do Banheiro 1

| $T_{60}(i, j)$ [s]/Frequência [Hz] | 100 | 125 | 160 | 200 | 250 | 315 | 400 | 500 | 630 | 800 | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 |
|------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|
| Tempo de reverberação (1,1)        | 1,5 | 1,4 | 1,5 | 1,7 | 1,3 | 1,5 | 1,3 | 1,2 | 1,1 | 0,9 | 0,9  | 0,8  | 0,8  | 0,7  | 0,7  | 0,6  |
| Tempo de reverberação (2,2)        | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,0 | 1,1 | 0,9 | 1,0 | 0,9 | 0,8 | 0,8  | 0,8  | 0,8  | 0,8  | 0,7  | 0,6  |
| <b>Média</b>                       | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,5 | 1,2 | 1,3 | 1,1 | 1,1 | 1,0 | 0,9 | 0,8  | 0,8  | 0,8  | 0,7  | 0,7  | 0,6  |
| <b>Variância</b>                   | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  |
| <b>Desvio Padrão</b>               | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,0  |

Tabela 6- 19: Tempo de reverberação do banheiro 2

| $T_{60}(i, j)$ [s]/Frequência [Hz] | 100 | 125 | 160 | 200 | 250 | 315 | 400 | 500 | 630 | 800 | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 |
|------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|
| Tempo de reverberação (1,1)        | 1,5 | 1,2 | 1,6 | 1,9 | 1,5 | 1,5 | 1,3 | 1,3 | 0,9 | 1,0 | 0,8  | 0,8  | 0,8  | 0,7  | 0,7  | 0,7  |
| Tempo de reverberação (2,2)        | 1,6 | 1,6 | 1,5 | 1,7 | 1,6 | 1,4 | 1,5 | 1,4 | 1,3 | 1,3 | 1,3  | 1,2  | 1,2  | 1,1  | 1,1  | 1,0  |
| <b>Média</b>                       | 1,5 | 1,4 | 1,5 | 1,8 | 1,5 | 1,5 | 1,4 | 1,4 | 1,1 | 1,2 | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 0,9  | 0,9  | 0,8  |
| <b>Variância</b>                   | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,1  | 0,1  | 0,1  | 0,1  | 0,1  | 0,1  |
| <b>Desvio Padrão</b>               | 0,1 | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,1 | 0,1 | 0,3 | 0,2 | 0,3  | 0,3  | 0,3  | 0,2  | 0,2  | 0,2  |

Tabela 6- 20: Conjunto de valores de  $L'_{nT(adj.)}$  para cada cômodo

| $L'_{nT(adj.)}$ . [dB]/Frequência [Hz] | 100  | 125  | 160  | 200  | 250  | 315  | 400  | 500  | 630  | 800  | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 |
|----------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Cozinha ( $L'_{nT(adj.)}$ )            | 54,0 | 57,3 | 56,3 | 55,7 | 60,2 | 61,0 | 60,8 | 61,5 | 61,0 | 63,0 | 59,4 | 58,0 | 57,1 | 56,3 | 56,4 | 52,8 |
| Banheiro 2 ( $L'_{nT(adj.)}$ )         | 46,6 | 57,8 | 60,5 | 54,7 | 58,0 | 60,0 | 58,9 | 57,6 | 57,7 | 57,2 | 57,2 | 53,7 | 52,8 | 51,8 | 49,0 | 45,8 |
| Quarto 3 ( $L'_{nT(adj.)}$ )           | 47,0 | 52,7 | 51,5 | 51,3 | 54,2 | 58,4 | 56,3 | 55,5 | 54,9 | 56,3 | 53,4 | 52,1 | 51,5 | 51,0 | 47,8 | 45,2 |
| Quarto 2 ( $L'_{nT(adj.)}$ )           | 46,7 | 53,8 | 50,0 | 49,4 | 52,6 | 53,9 | 52,3 | 49,7 | 50,2 | 50,6 | 47,3 | 46,8 | 45,0 | 45,1 | 41,9 | 38,2 |
| Banheiro 1 ( $L'_{nT(adj.)}$ )         | 42,2 | 52,3 | 53,1 | 50,7 | 51,5 | 51,4 | 50,0 | 48,9 | 51,0 | 50,3 | 47,0 | 45,9 | 44,3 | 43,1 | 39,4 | 36,3 |
| Suíte ( $L'_{nT(adj.)}$ )              | 47,5 | 52,2 | 53,7 | 52,5 | 54,4 | 54,5 | 53,6 | 53,1 | 54,4 | 55,4 | 52,4 | 49,3 | 48,4 | 47,1 | 44,1 | 41,3 |

A análise dos desvios padrão dos tempos de reverberação ( $T_{60}$ ) analisados corroboram o que foi afirmado por Scrosati e Scamoni (2015) e Kylliainen (2004), ou seja, o desvio padrão associado às baixas frequências nas medições de  $T_{60}$  é maior do que para as demais faixas de frequência.

Para obtenção do Nível de Pressão Sonora de Impacto Padronizado Ponderado ( $L'_{nT,w}$ ), utilizou-se a norma ISO 717-2 (2013). Tal norma leva em conta o parâmetro  $L'_{nT}$  que, como já mencionado, refere-se à metodologia de ensaio que abrange recintos imediatamente sobrepostos. Sendo assim, ao aplicar a norma ISO 717-2 (2013) referindo-se a cômodos adjacentes, será obtido o parâmetro  $L'_{nT,w (adj.)}$  (Nível de Pressão Sonora de Impacto Padronizado Ponderado para cômodos adjacentes). A Tabela 6.21 foi confeccionada com propósito de mostrar tais valores.

Tabela 6- 21: Valores de  $L'_{nT,w (adj.)}$  (cômodos adjacente) e de  $L'_{nT,w}$  (cômodo sobreposto)

| <b>Cômodo</b> | <b><math>L'_{nT,w (adj.)} / L'_{nT,w}</math> [dB]</b> |
|---------------|-------------------------------------------------------|
| Sala          | 65                                                    |
| Cozinha       | 63                                                    |
| Banheiro 2    | 58                                                    |
| Quarto 3      | 56                                                    |
| Suíte         | 54                                                    |
| Quarto 2      | 51                                                    |
| Banheiro 1    | 50                                                    |

A distribuição acústica dos cômodos ensaiados do apartamento, a partir de  $L'_{nT,w}$  e  $L'_{nT,w (adj.)}$ , foi confeccionada e mostrada na Figura 6.10.

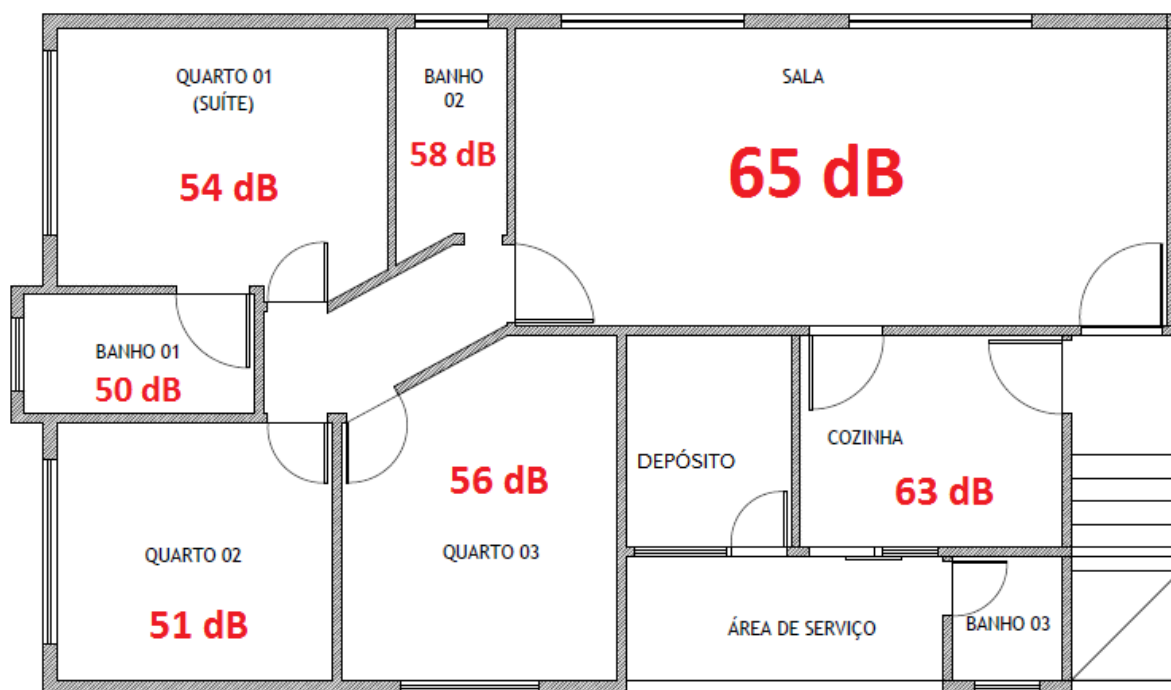


Figura 6.10: Distribuição de  $L'_{nT,w} (adj.) / L'_{nT,w}$

Observa-se que o menor valor de  $L'_{nT,w} (adj.)$  foi de 49 [dB] (banheiro 1), enquanto o maior foi de 61 [dB] (cozinha). Obviamente, a distância para a fonte foi o fator preponderante para tal constatação. Assumindo o  $L'_{nT,w}$  registrado para a sala receptora (65 [dB]) como referência, os valores de  $L'_{nT,w} (adj.)$ , em termos percentuais, foram, aproximadamente: 93,8% para a cozinha; 87,8% para o banheiro 2; 84,6% para o quarto 3; 81,5% para a suíte; 76,9% para o quarto 2 e 75,4% para o banheiro 1. Dessa forma, verifica-se o elevado grau de irradiação sonora que o ruído de impacto exerce sobre os ambientes adjacentes à estrutura no qual a fonte excitadora é aplicada.

## 6.4 Vibração devido ao Ruído de impacto

Nesta seção, serão apresentados os resultados para as medições de vibração, tanto as realizadas no teto/laje de cada cômodo do apartamento receptor (subseção 6.4.1) como as realizadas nas paredes e tetos do sistema sala-banheiro-suíte (subseção 6.4.2).

### 6.4.1 Medição no teto/laje de cada cômodo

Concomitantemente aos ensaios de medição de ruído de impacto, mensurou-se a vibração dos sistemas pisos/lajes de vários cômodos a partir da instalação de acelerômetros em tais

componentes estruturais. As posições dos acelerômetros em cada cômodo do apartamento receptor foram numeradas (1 a 12) e mostradas na Figura 6.11. Já a posição de excitação no apartamento emissor é mostrada com a indicação “TM” na mesma figura.

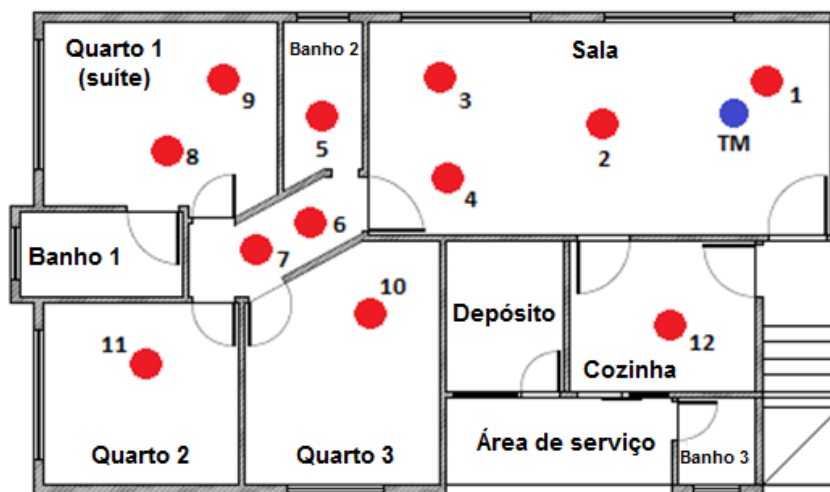


Figura 6.11: Posições dos acelerômetros

A Tabela 6-22 mostra os dados referentes a cada sinal de aceleração captado pelo acelerômetro e processado pelo computador através da utilização do software Matlab<sup>®</sup> 2010a.

Tabela 6- 22: Características do sinal

| Característica                           | Valor              |
|------------------------------------------|--------------------|
| Tempo de duração do sinal                | 10 [s]             |
| Frequência amostral (Fs)                 | 33333 [amostras/s] |
| Resolução no domínio do tempo (1/Fs)     | 0.00003            |
| Dimensão do vetor tempo (H)              | 333333             |
| Resolução no domínio da frequência (1/T) | 0.1 [Hz]           |

Nas Figuras 6.12 a 6.35 são mostrados os dados referentes à aceleração, no domínio do tempo, e do nível de aceleração (NA), no domínio da frequência, para cada ponto de medição. Apesar do tempo de duração da medição ser de 10 [s], preferiu-se ilustrá-lo de 0 a 5 [s], uma vez que o sinal é periódico e se repete ao longo de cada período. Aliado a este fator, tem-se o ganho de melhor visualização dos dados mostrados.

Para todos os pontos, a fonte de excitação (máquina padrão de impacto) estava localizada na sala do apartamento emissor (ponto “TM” na Figura 6.11).

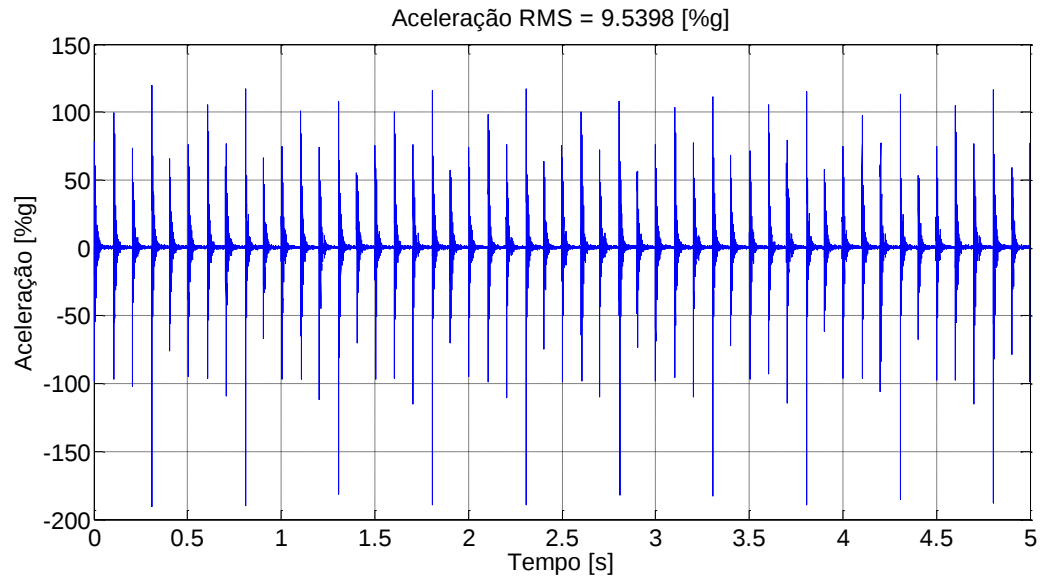


Figura 6. 12: Variação da Aceleração com o tempo para a posição P1

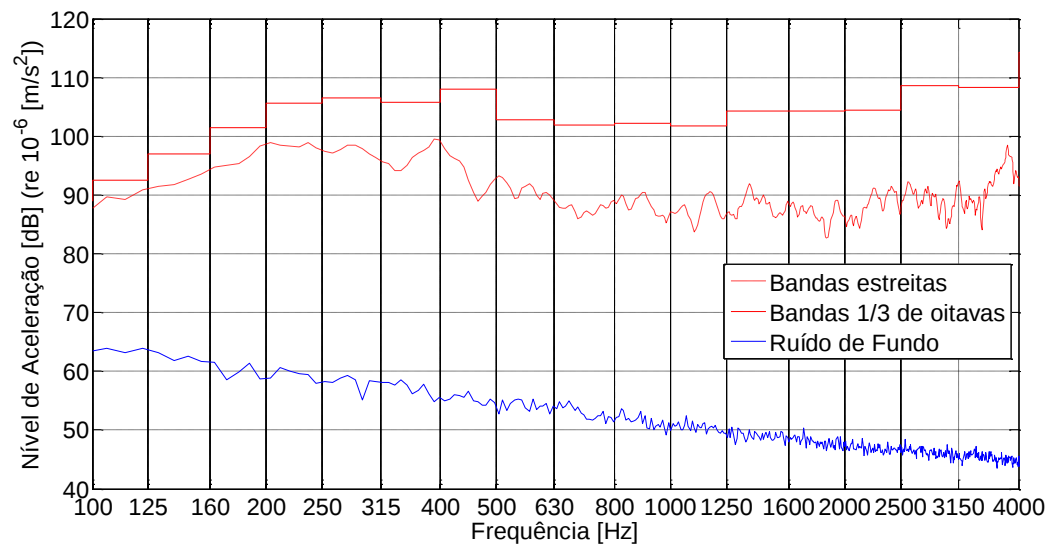


Figura 6.13: NA para a a posição P1 (bandas 1/3 oitavas)

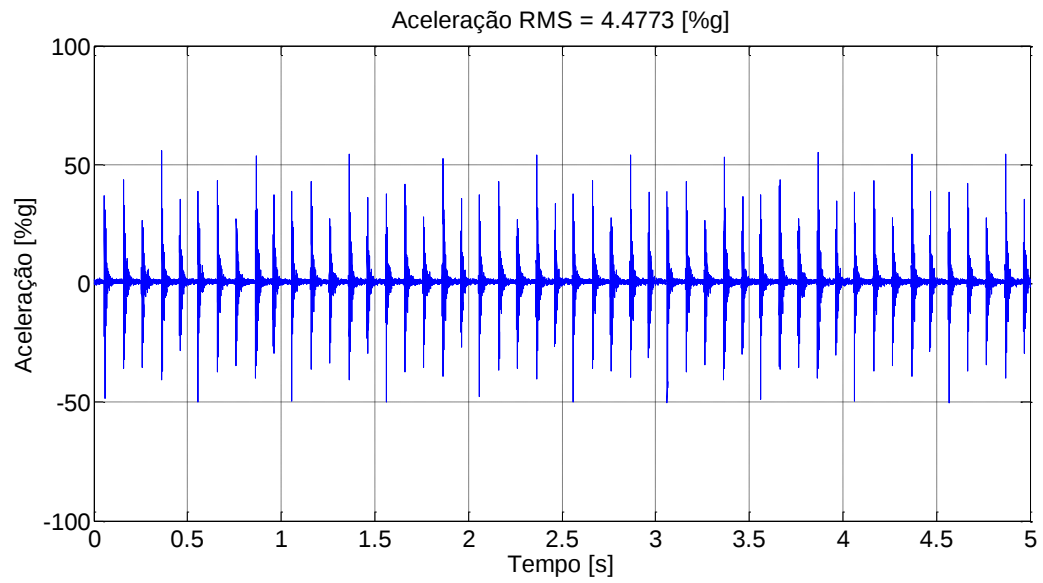


Figura 6.14: Variação da Aceleração com o tempo para a posição P2

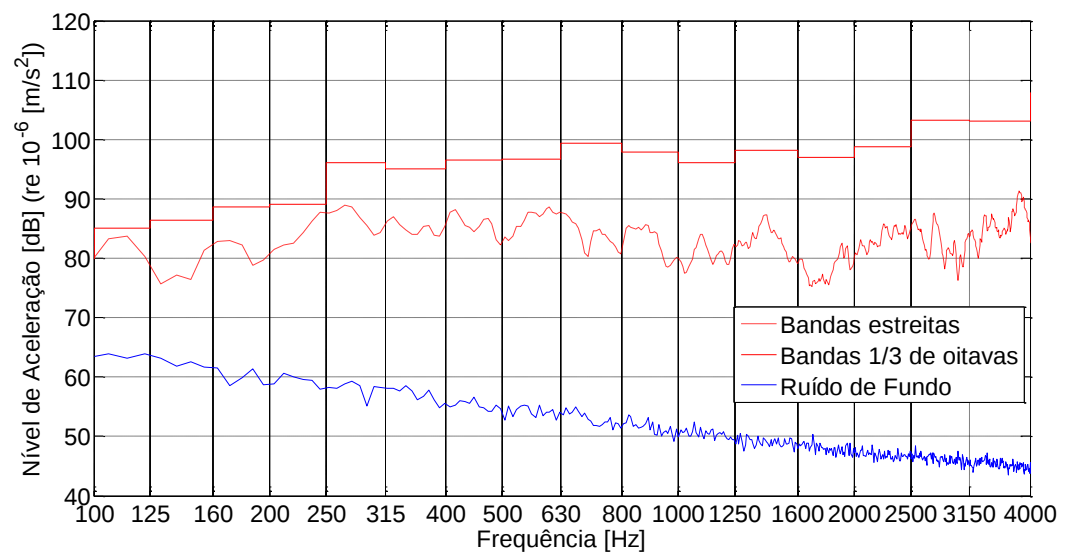


Figura 6.15: NA para a posição P2 (bandas 1/3 oitavas)

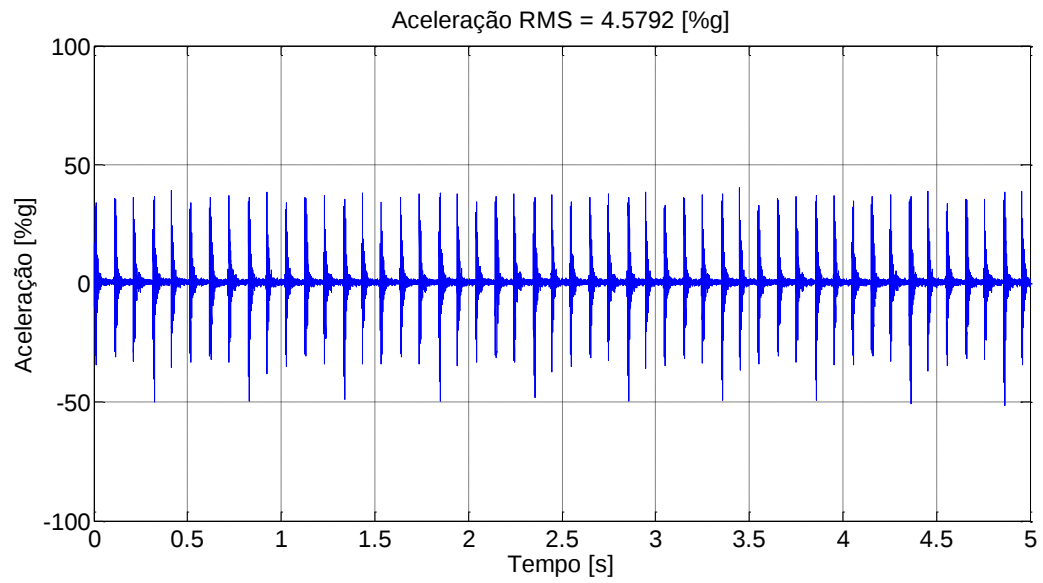


Figura 6.16: Variação da Aceleração com o tempo para a posição P3

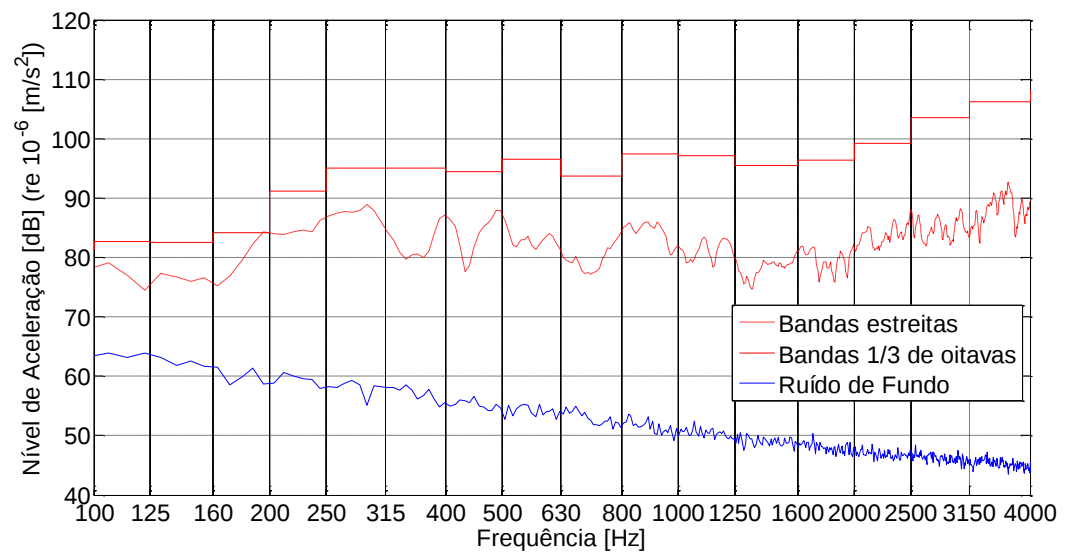


Figura 6.17: NA para a posição P3 ((bandas 1/3 oitavas)

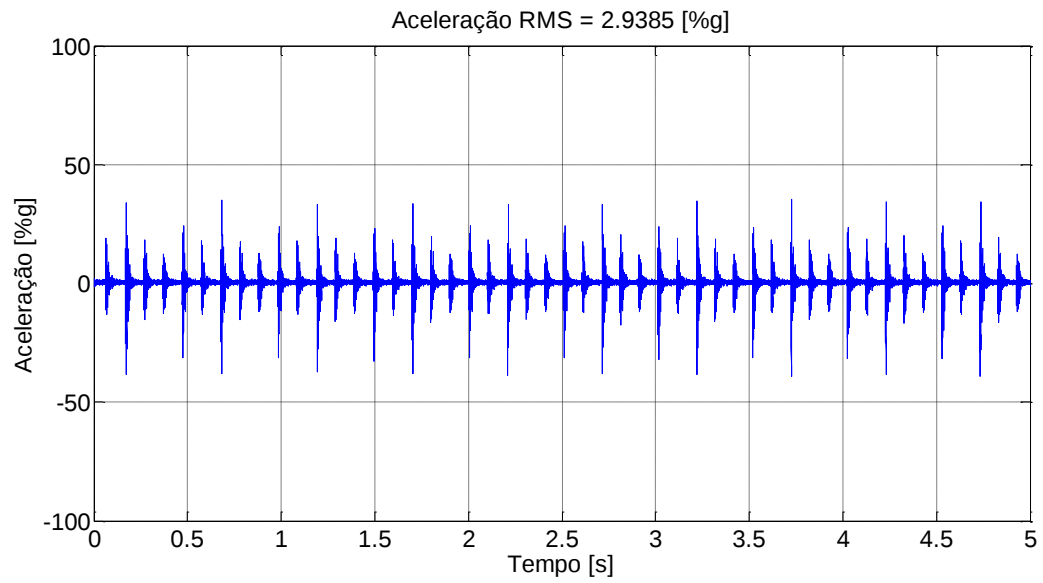


Figura 6.18: Variação da Aceleração com o tempo para a posição P4

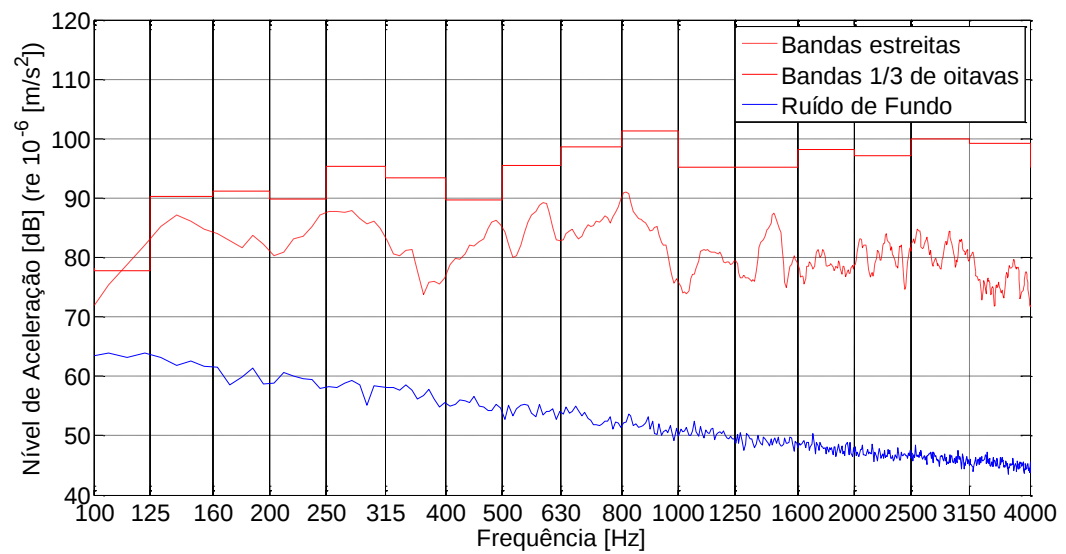


Figura 6.19: NA para a posição P4 (bandas 1/3 oitavas)

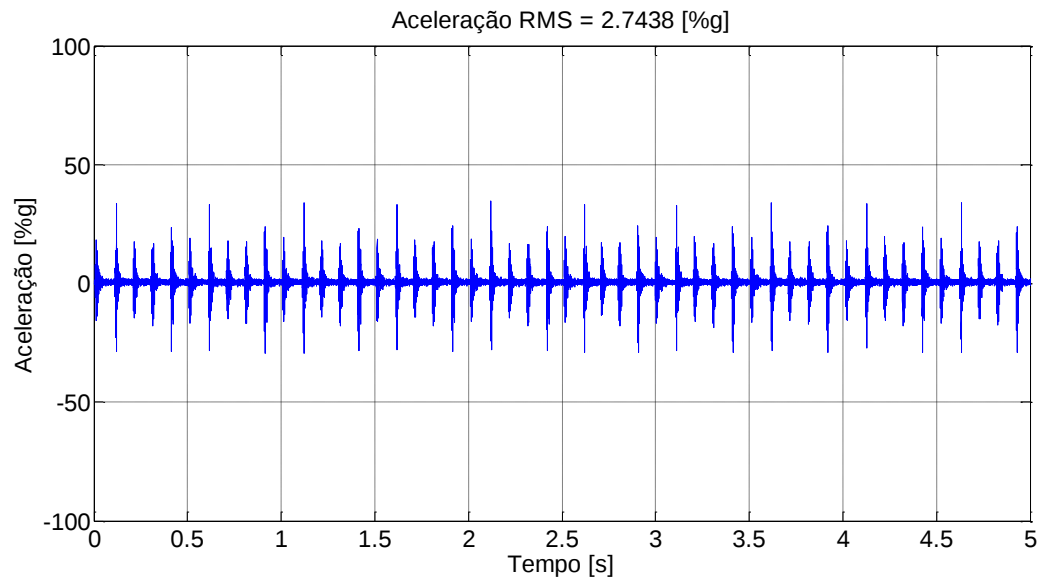


Figura 6.20: Variação da Aceleração com o tempo para a posição P5

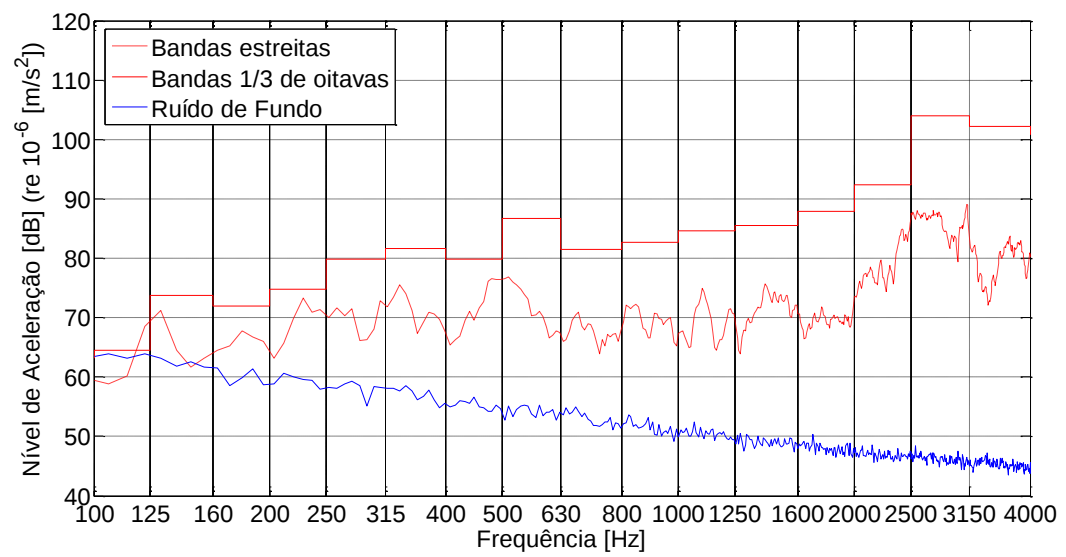


Figura 6.21: NA para a posição P5 (bandas 1/3 oitavas)

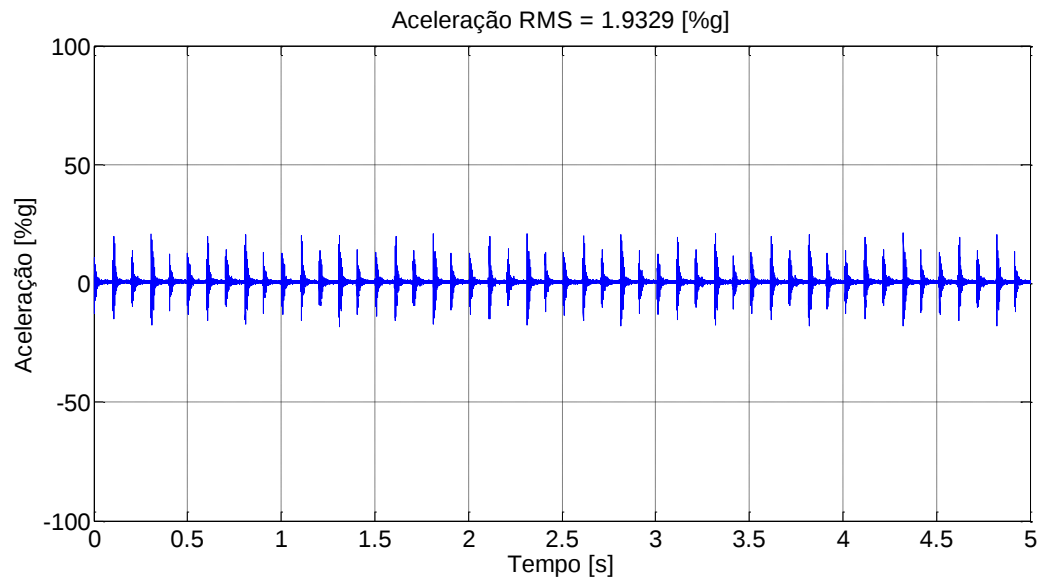


Figura 6. 22: Variação da Aceleração com o tempo para a posição P6

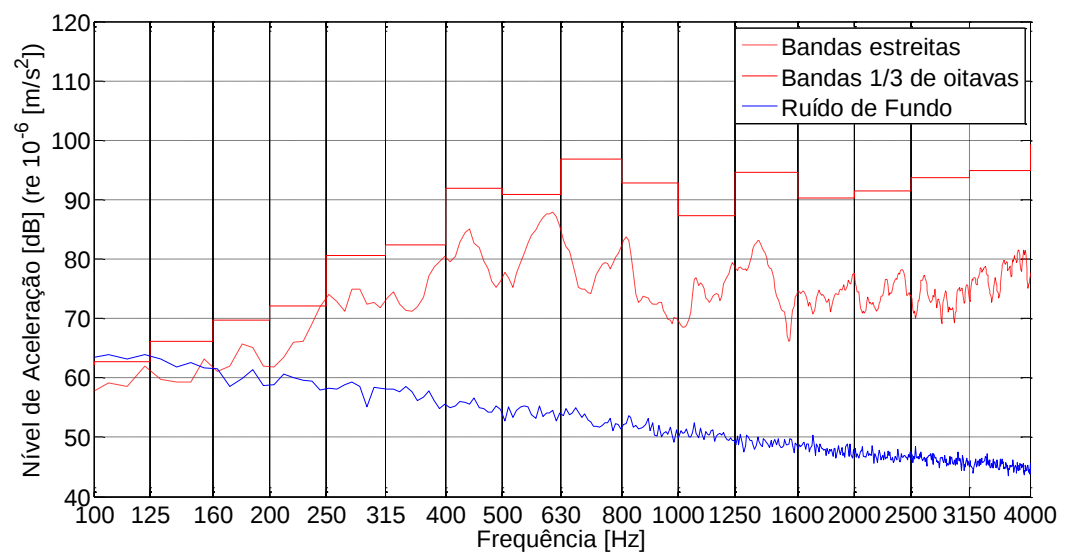


Figura 6. 23: NA para a posição P6 (bandas 1/3 oitavas)

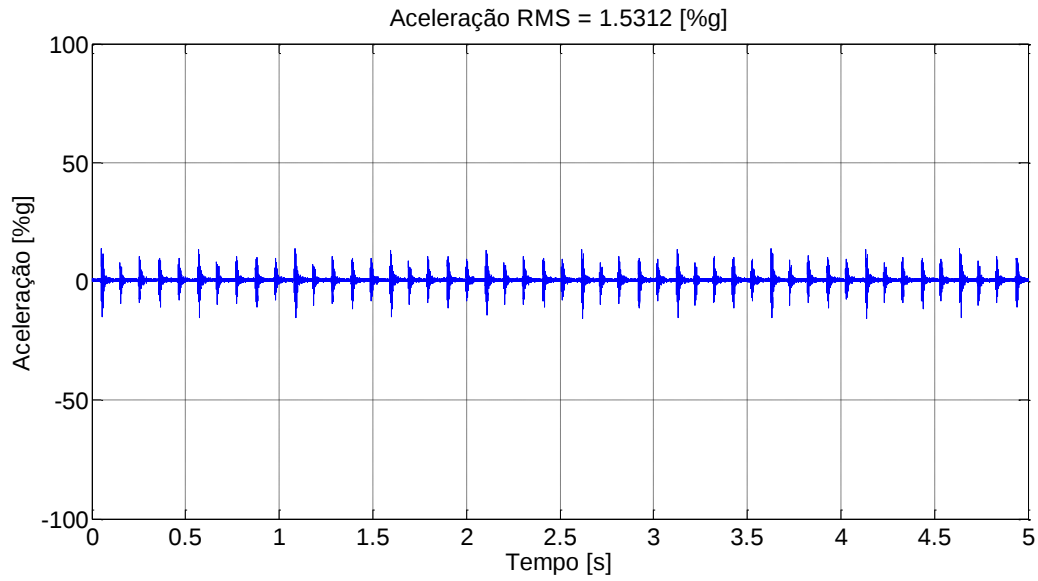


Figura 6.24: Variação da Aceleração com o tempo para a posição P7

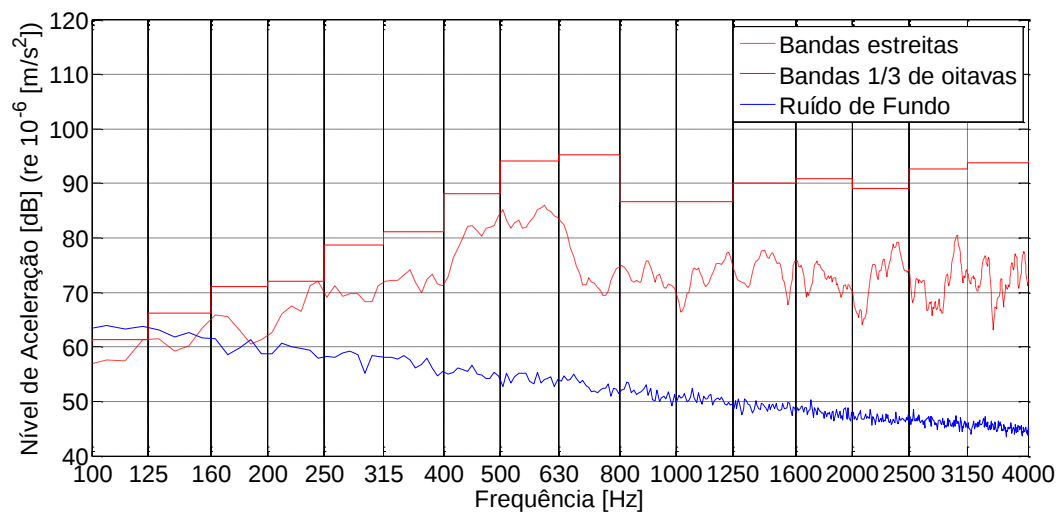


Figura 6.25: NA para a posição P7 (bandas 1/3 oitavas)

Percebe-se que, para as posições P5, P6 e P7, a relação sinal/ruído é baixa para as baixas frequências, ou seja, a diferença entre o sinal medido e o ruído de fundo é de ordem de grandeza reduzida. Sendo assim, o sinal de aceleração de interesse só é válido para frequências a partir de 250 [Hz], no qual a diferença entre sinal e ruído passa a ser significativa.

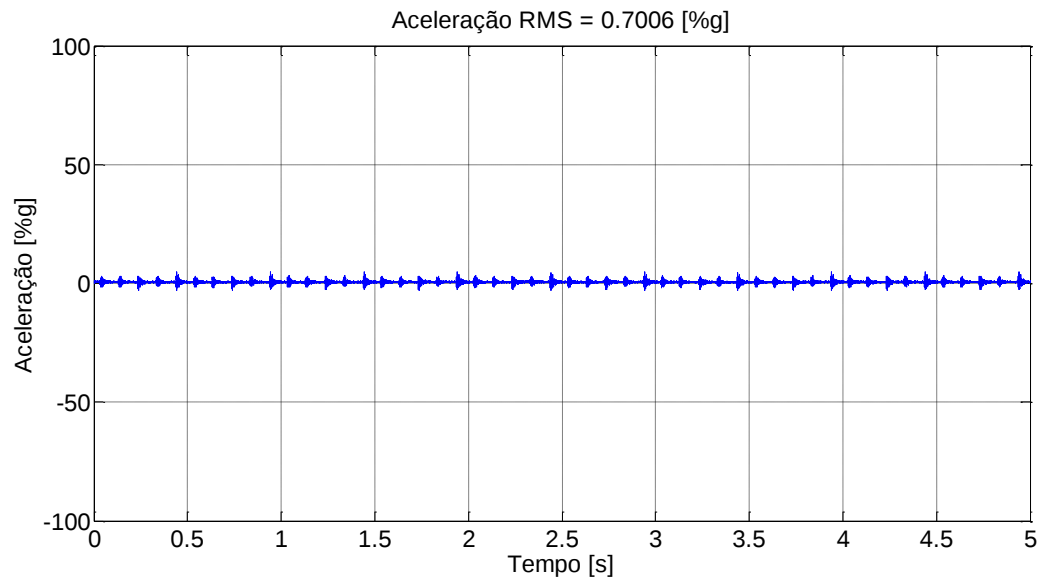


Figura 6.26: Variação da Aceleração com o tempo para a posição P8

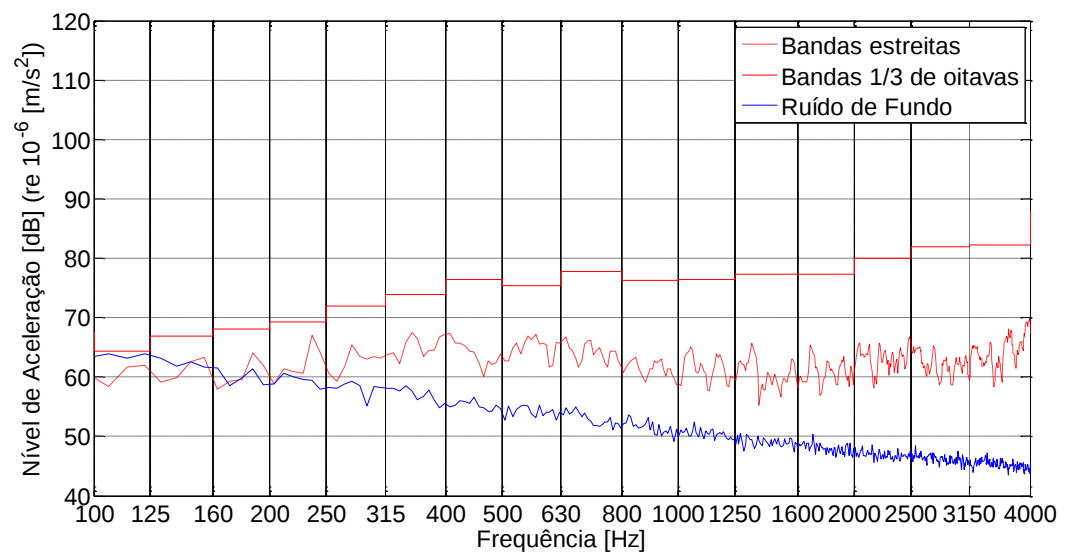


Figura 6.27: NA para a posição P8 (bandas 1/3 oitavas)

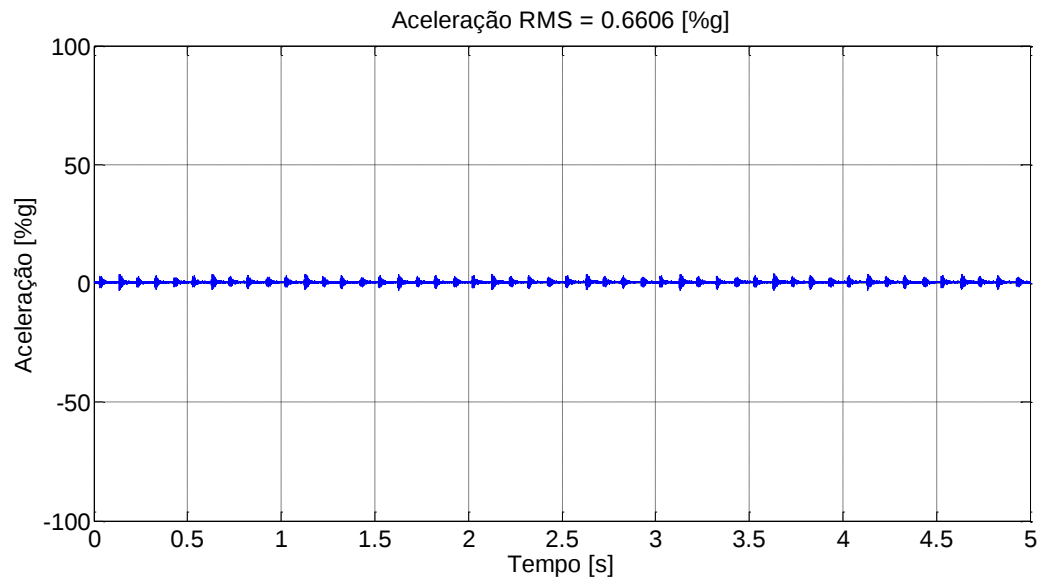


Figura 6.28: Variação da Aceleração com o tempo para a posição P9

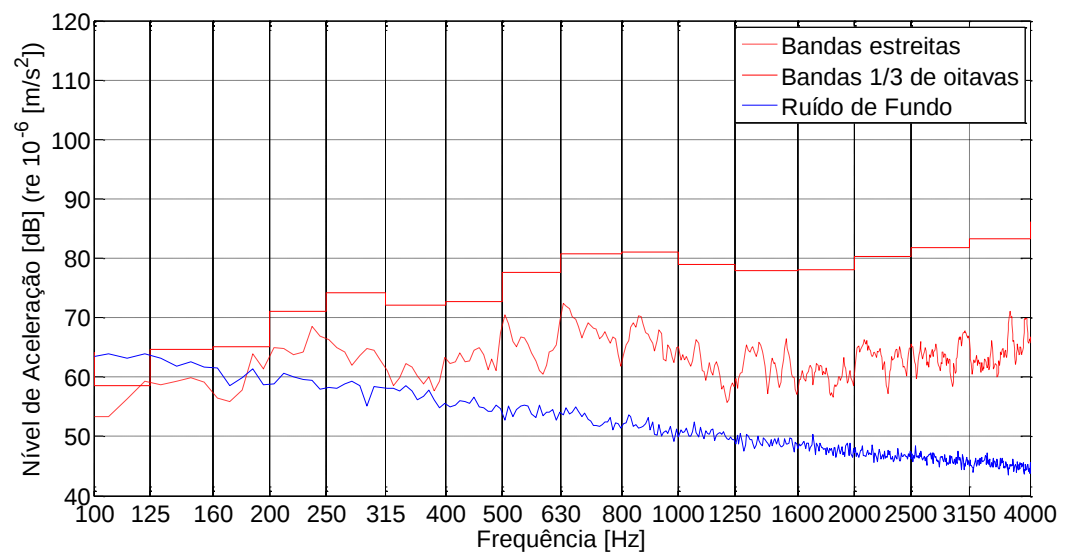


Figura 6.29: NA para a posição P9 (bandas 1/3 oitavas)

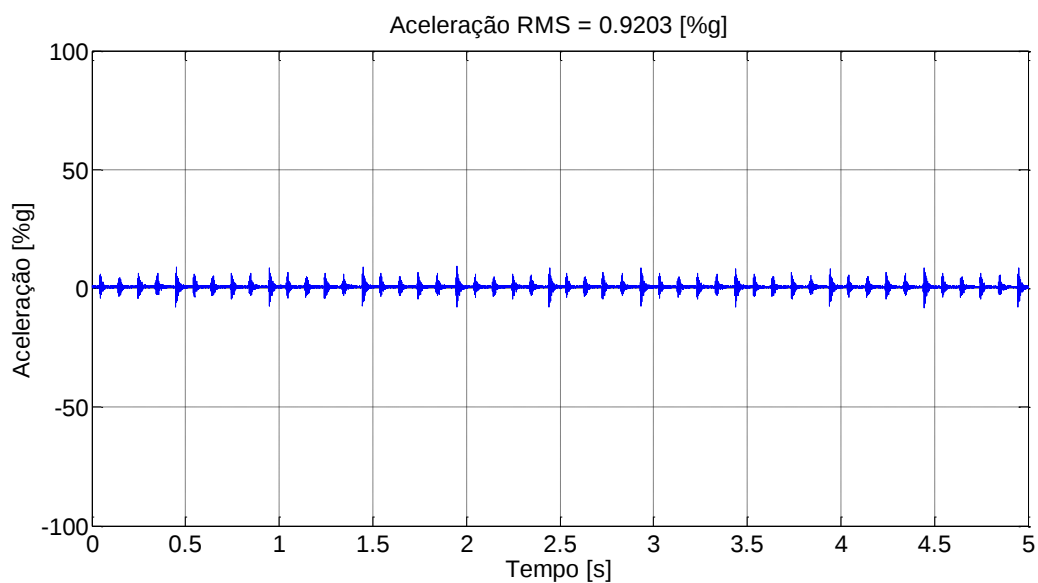


Figura 6.30: Variação da Aceleração com o tempo para a posição P10

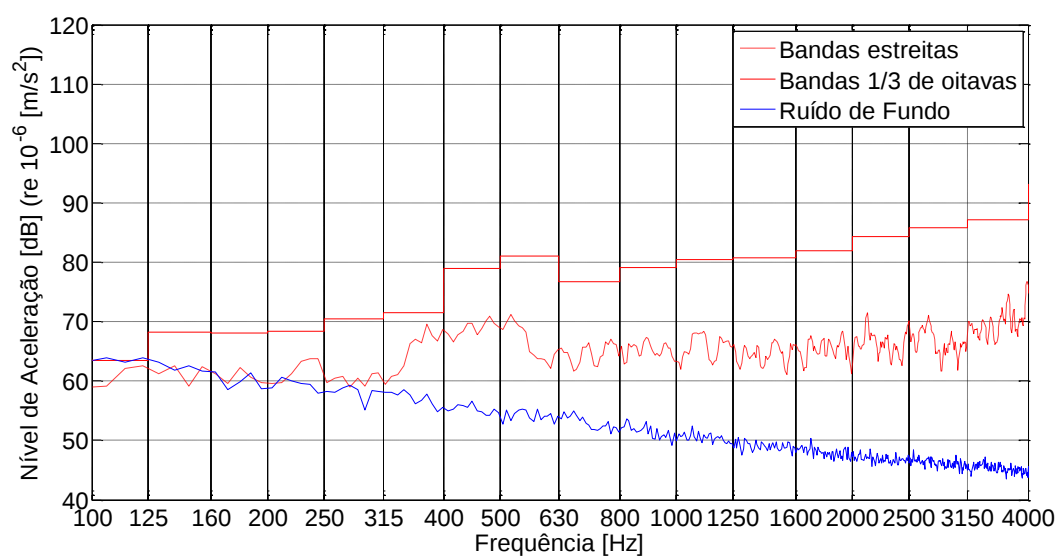


Figura 6.31: NA para a posição P10 (bandas 1/3 oitavas)

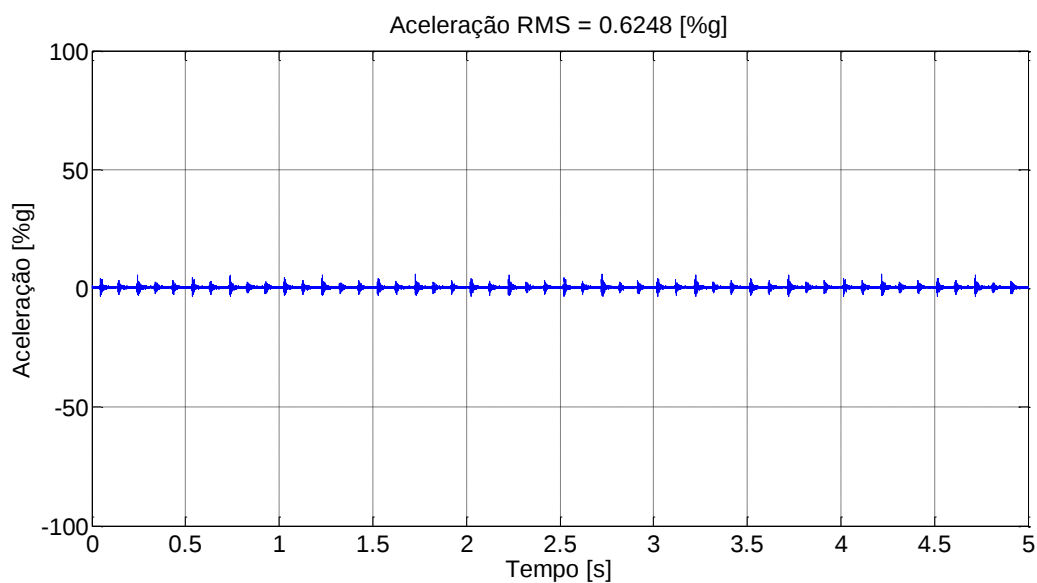


Figura 6.32: Variação da Aceleração com o tempo para a posição P11

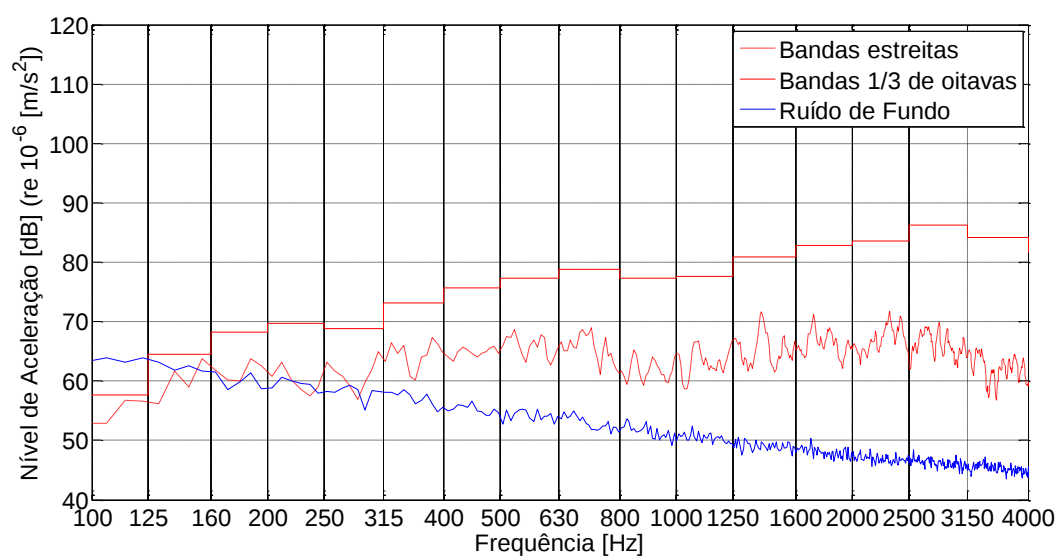


Figura 6.33: NA para a posição P11 (bandas 1/3 oitavas)

Para os pontos P8, P9, P10 e P11, pelo fato dos cômodos estarem mais afastados, observa-se que a razão sinal/ruído só é válida para frequências a partir de 1000 [Hz].

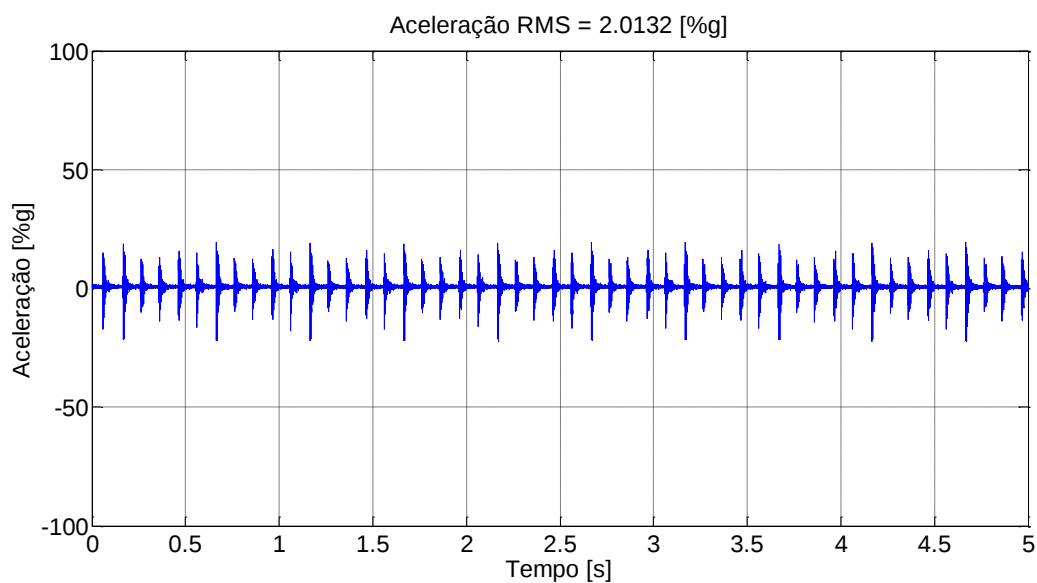


Figura 6.34: Variação da Aceleração com o tempo para a posição P12

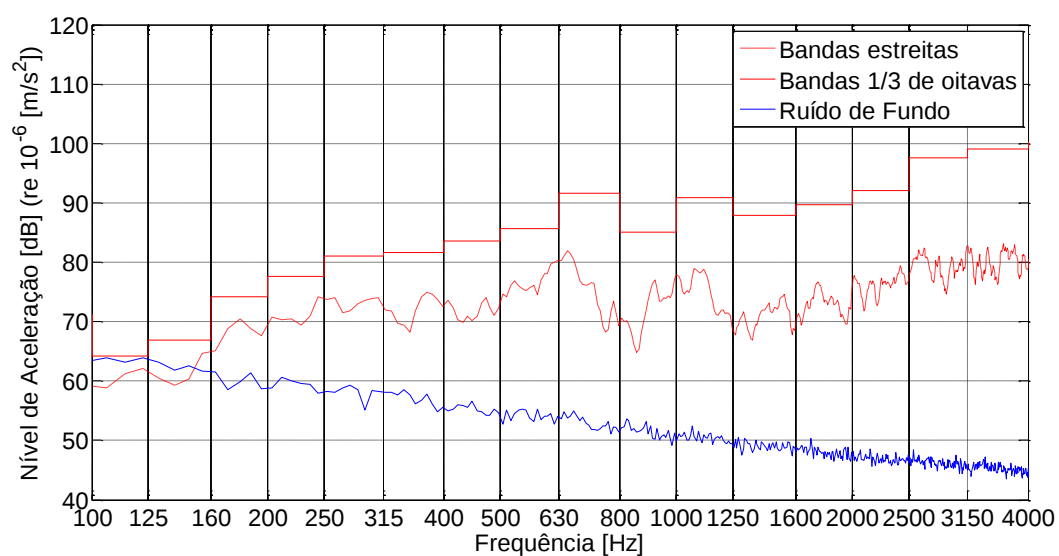


Figura 6.35: NA para a posição P12 (bandas 1/3 oitavas)

Tem-se ilustrado nas Figuras 6.36 e 6.37 o nível de aceleração [dB], em bandas estreitas, e a aceleração, em  $[m/s^2]$ , respectivamente, para todos os pontos de medição com o acelerômetro.

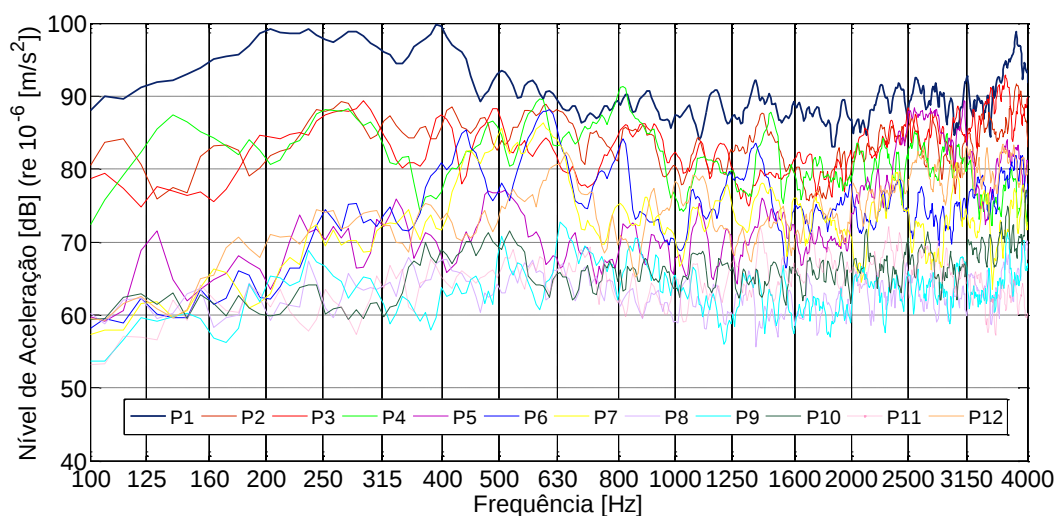


Figura 6.36: NA em bandas estreitas (*narrow frequency*) para todas as posições de medição

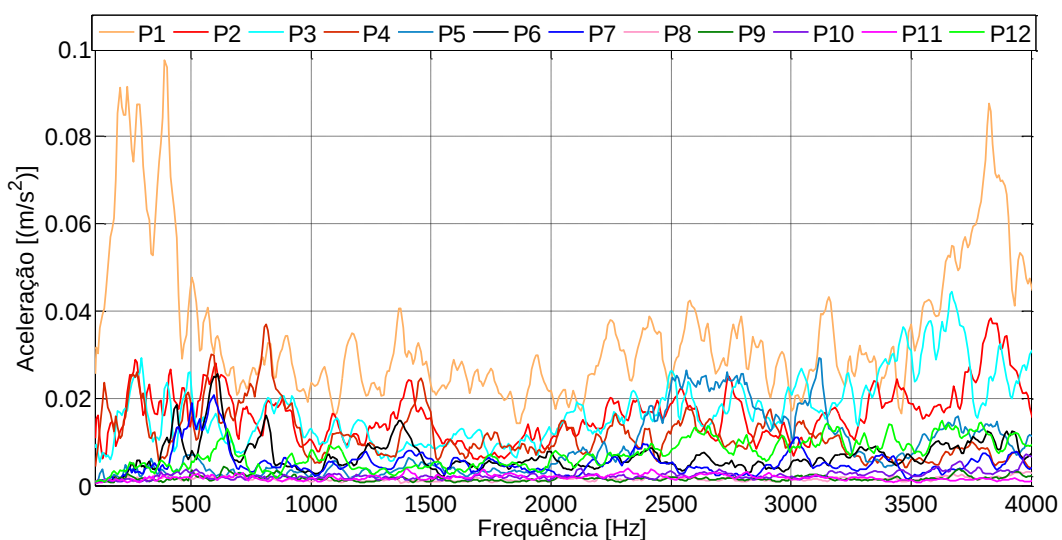


Figura 6.37: Aceleração no domínio da frequência para todas as posições de medição

As Tabelas 6-23 e 6-24 detalham o nível de aceleração (NA) e o nível de velocidade (NV), respectivamente, em cada posição de medição, divididos em bandas de frequência de um terço de oitava. A Tabela 6-25 mostra NA e NV em cada cômodo. Para cômodos com mais de um ponto de medição, realizou-se a média aritmética das medidas de cada um deles.

Admitindo-se a sala como cômodo de referência uma vez que se encontra logo abaixo da fonte excitadora, calcularam-se as porcentagens de nível de aceleração e vibração em cada cômodo. Tais valores são mostrados nas Tabelas 6-26 e 6-27.

Tabela 6- 23: NA ([dB] re.  $10^{-6}$  [m/s<sup>2</sup>]) em cada posição para a medição da vibração em vários cômodos

| NA (i, j)<br>[dB]/Freq. [Hz] | 100   | 125   | 160   | 200   | 250   | 315   | 400   | 500   | 630   | 800   | 1000  | 1250  | 1600  | 2000  | 2500  | 3150  | 4000  |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| NA (TM, 1)                   | 92,5  | 97,0  | 101,4 | 105,6 | 106,5 | 105,8 | 107,9 | 102,8 | 101,9 | 102,2 | 101,8 | 104,3 | 104,3 | 104,5 | 108,6 | 108,3 | 114,3 |
| NA (TM, 2)                   | 85,1  | 86,4  | 88,7  | 89,2  | 96,0  | 95,0  | 96,5  | 96,7  | 99,3  | 97,9  | 96,0  | 98,2  | 97,0  | 98,8  | 103,2 | 103,1 | 107,9 |
| NA (TM, 3)                   | 82,6  | 82,5  | 84,1  | 91,1  | 95,1  | 95,1  | 94,5  | 96,5  | 93,8  | 97,5  | 97,2  | 95,6  | 96,4  | 99,3  | 103,5 | 106,2 | 108,2 |
| NA (TM, 4)                   | 77,8  | 90,3  | 91,1  | 89,9  | 95,4  | 93,5  | 89,7  | 95,4  | 98,6  | 101,3 | 95,2  | 95,2  | 98,2  | 97,2  | 100,0 | 99,2  | 95,2  |
| NA (TM, 5)                   | 64,5  | 73,8  | 72,0  | 74,8  | 79,9  | 81,6  | 79,9  | 86,6  | 81,5  | 82,7  | 84,6  | 85,5  | 87,9  | 92,4  | 104,0 | 102,3 | 100,8 |
| NA (TM, 6)                   | 62,8  | 66,1  | 69,8  | 72,1  | 80,7  | 82,5  | 91,9  | 90,9  | 96,9  | 92,9  | 87,2  | 94,6  | 90,2  | 91,5  | 93,7  | 94,8  | 99,2  |
| NA (TM, 7)                   | 61,4  | 66,2  | 71,0  | 72,1  | 78,7  | 81,2  | 88,1  | 94,1  | 95,2  | 86,7  | 86,7  | 90,0  | 90,8  | 89,1  | 92,7  | 93,8  | 94,2  |
| NA (TM, 8)                   | 64,4  | 66,8  | 68,0  | 69,3  | 72,0  | 73,9  | 76,4  | 75,4  | 77,7  | 76,3  | 76,4  | 77,3  | 77,3  | 80,0  | 81,9  | 82,2  | 87,9  |
| NA (TM, 9)                   | 58,5  | 64,6  | 65,1  | 71,1  | 74,2  | 72,1  | 72,8  | 77,6  | 80,8  | 81,0  | 78,9  | 77,9  | 78,0  | 80,4  | 81,8  | 83,3  | 86,1  |
| NA (TM, 10)                  | 63,5  | 68,2  | 68,1  | 68,4  | 70,4  | 71,5  | 79,0  | 81,0  | 76,7  | 79,1  | 80,4  | 80,8  | 81,9  | 84,3  | 85,9  | 87,1  | 93,0  |
| NA (TM, 11)                  | 57,6  | 64,5  | 68,3  | 69,8  | 68,8  | 73,2  | 75,7  | 77,3  | 78,9  | 77,3  | 77,7  | 80,9  | 82,8  | 83,5  | 86,3  | 84,2  | 81,6  |
| NA (TM, 12)                  | 64,2  | 66,9  | 74,1  | 77,6  | 81,0  | 81,7  | 83,6  | 85,7  | 91,6  | 85,0  | 90,9  | 87,9  | 89,7  | 92,0  | 97,5  | 99,1  | 100,2 |
| <b>Máximo</b>                | 92,5  | 97,0  | 101,4 | 105,6 | 106,5 | 105,8 | 107,9 | 102,8 | 101,9 | 102,2 | 101,8 | 104,3 | 104,3 | 104,5 | 108,6 | 108,3 | 114,3 |
| <b>Mínimo</b>                | 57,6  | 64,5  | 65,1  | 68,4  | 68,8  | 71,5  | 72,8  | 75,4  | 76,7  | 76,3  | 76,4  | 77,3  | 77,3  | 80,0  | 81,8  | 82,2  | 81,6  |
| <b>Média</b>                 | 83,0  | 87,5  | 91,3  | 95,2  | 96,7  | 96,0  | 97,9  | 94,9  | 95,6  | 95,8  | 94,0  | 95,8  | 95,9  | 96,6  | 101,3 | 101,5 | 105,6 |
| <b>Variância</b>             | 136,7 | 132,4 | 134,4 | 140,3 | 147,0 | 122,6 | 107,5 | 82,3  | 90,7  | 91,8  | 72,1  | 76,2  | 71,5  | 62,7  | 86,2  | 85,1  | 94,2  |
| <b>Desvio Padrão</b>         | 11,7  | 11,5  | 11,6  | 11,8  | 12,1  | 11,1  | 10,4  | 9,1   | 9,5   | 9,6   | 8,5   | 8,7   | 8,5   | 7,9   | 9,3   | 9,2   | 9,7   |

Tabela 6- 24: NV ([dB] re.  $10^{-9}$  [m/s]) em cada posição para a medição da vibração em vários cômodos

| NV ( <i>i, j</i> )<br>[dB]/Freq. [Hz] | 100   | 125   | 160   | 200   | 250   | 315   | 400   | 500  | 630  | 800  | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 | 4000 |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| NV (TM, 1)                            | 96,6  | 99,0  | 101,1 | 103,6 | 102,6 | 100,1 | 100,1 | 92,9 | 90,2 | 88,1 | 86,0 | 86,3 | 84,3 | 82,4 | 84,7 | 82,4 | 86,4 |
| NV (TM, 2)                            | 89,0  | 88,9  | 88,4  | 87,2  | 91,9  | 89,1  | 88,4  | 86,8 | 87,6 | 83,8 | 80,1 | 80,0 | 77,3 | 76,6 | 79,3 | 76,9 | 79,9 |
| NV (TM, 3)                            | 86,8  | 84,6  | 83,8  | 89,1  | 91,0  | 89,5  | 86,5  | 86,7 | 82,1 | 83,2 | 81,4 | 77,9 | 76,3 | 77,1 | 79,6 | 80,1 | 80,5 |
| NV (TM, 4)                            | 81,8  | 92,0  | 91,2  | 88,0  | 91,3  | 87,8  | 81,4  | 85,5 | 86,9 | 87,3 | 79,5 | 77,4 | 78,5 | 75,1 | 76,1 | 73,6 | 67,5 |
| NV (TM, 5)                            | 68,9  | 75,7  | 71,6  | 72,9  | 76,0  | 75,4  | 71,9  | 76,7 | 69,7 | 68,5 | 68,5 | 67,5 | 68,0 | 70,0 | 79,8 | 76,7 | 72,9 |
| NV (TM, 6)                            | 66,9  | 68,2  | 69,4  | 70,3  | 76,5  | 76,6  | 83,5  | 81,0 | 85,3 | 78,9 | 71,1 | 76,3 | 70,3 | 69,6 | 69,8 | 68,7 | 71,3 |
| NV (TM, 7)                            | 65,6  | 68,2  | 70,8  | 69,9  | 74,7  | 75,0  | 79,6  | 84,1 | 83,7 | 72,5 | 70,8 | 72,1 | 70,9 | 67,1 | 69,1 | 67,9 | 66,2 |
| NV (TM, 8)                            | 68,8  | 69,1  | 68,1  | 67,4  | 68,1  | 67,8  | 68,4  | 65,3 | 65,9 | 62,4 | 60,4 | 59,4 | 57,1 | 57,9 | 58,0 | 56,2 | 59,8 |
| NV (TM, 9)                            | 62,9  | 66,6  | 65,1  | 69,0  | 70,4  | 66,3  | 64,5  | 67,6 | 68,6 | 66,9 | 63,1 | 59,8 | 58,0 | 58,2 | 57,9 | 57,4 | 58,3 |
| NV (TM, 10)                           | 67,7  | 70,2  | 67,9  | 66,6  | 66,7  | 65,3  | 70,9  | 71,1 | 64,8 | 65,0 | 64,3 | 63,0 | 61,8 | 62,2 | 61,8 | 61,0 | 65,0 |
| NV (TM, 11)                           | 61,9  | 66,3  | 68,2  | 67,9  | 64,8  | 67,1  | 67,6  | 67,3 | 66,9 | 63,5 | 61,6 | 62,8 | 62,6 | 61,6 | 62,5 | 58,5 | 53,8 |
| NV (TM, 12)                           | 68,5  | 69,1  | 73,6  | 75,7  | 77,0  | 75,9  | 75,7  | 75,5 | 79,6 | 71,2 | 74,8 | 70,4 | 69,5 | 69,9 | 73,4 | 73,1 | 72,5 |
| <b>Máximo</b>                         | 96,6  | 99,0  | 101,1 | 103,6 | 102,6 | 100,1 | 100,1 | 92,9 | 90,2 | 88,1 | 86,0 | 86,3 | 84,3 | 82,4 | 84,7 | 82,4 | 86,4 |
| <b>Mínimo</b>                         | 61,9  | 66,3  | 65,1  | 66,6  | 64,8  | 65,3  | 64,5  | 65,3 | 64,8 | 62,4 | 60,4 | 59,4 | 57,1 | 57,9 | 57,9 | 56,2 | 53,8 |
| <b>Média</b>                          | 87,0  | 89,5  | 91,1  | 93,1  | 92,7  | 90,2  | 89,9  | 85,0 | 83,9 | 81,6 | 78,2 | 77,8 | 76,0 | 74,5 | 77,3 | 75,5 | 77,8 |
| <b>Variância</b>                      | 133,9 | 132,2 | 134,0 | 139,7 | 145,7 | 125,6 | 107,8 | 83,2 | 93,1 | 90,5 | 73,5 | 76,4 | 73,0 | 62,3 | 85,6 | 84,7 | 94,7 |
| <b>Desvio<br/>Padrão</b>              | 11,6  | 11,5  | 11,6  | 11,8  | 12,1  | 11,2  | 10,4  | 9,1  | 9,6  | 9,5  | 8,6  | 8,7  | 8,5  | 7,9  | 9,3  | 9,2  | 9,7  |

Tabela 6- 25: NA e NV médios em cada cômodo do apartamento receptor

| NA/NV<br>(cômodo)<br>[dB]/Freq. [Hz] | 100  | 125  | 160  | 200  | 250   | 315   | 400   | 500  | 630  | 800   | 1000 | 1250  | 1600  | 2000  | 2500  | 3150  | 4000  |
|--------------------------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| NA (sala)                            | 87,7 | 92,2 | 96,1 | 99,9 | 101,4 | 100,7 | 102,5 | 99,0 | 99,2 | 100,2 | 98,4 | 100,0 | 100,3 | 100,9 | 105,0 | 105,4 | 110,0 |
| NA (cozinha)                         | 64,2 | 66,9 | 74,1 | 77,6 | 81,0  | 81,7  | 83,6  | 85,7 | 91,6 | 85,0  | 90,9 | 87,9  | 89,7  | 92,0  | 97,5  | 99,1  | 100,2 |
| NA (banh. 2)                         | 64,5 | 73,8 | 72,0 | 74,8 | 79,9  | 81,6  | 79,9  | 86,6 | 81,5 | 82,7  | 84,6 | 85,5  | 87,9  | 92,4  | 104,0 | 102,3 | 100,8 |
| NA (quarto 3)                        | 63,5 | 68,2 | 68,1 | 68,4 | 70,4  | 71,5  | 79,0  | 81,0 | 76,7 | 79,1  | 80,4 | 80,8  | 81,9  | 84,3  | 85,9  | 87,1  | 93,0  |
| NA (quarto 2)                        | 57,6 | 64,5 | 68,3 | 69,8 | 68,8  | 73,2  | 75,7  | 77,3 | 78,9 | 77,3  | 77,7 | 80,9  | 82,8  | 83,5  | 86,3  | 84,2  | 81,6  |
| NA (suíte)                           | 62,4 | 65,9 | 66,8 | 70,3 | 73,2  | 73,1  | 74,9  | 76,6 | 79,5 | 79,2  | 77,8 | 77,6  | 77,7  | 80,2  | 81,9  | 82,8  | 87,1  |
| NV (sala)                            | 91,7 | 94,2 | 95,8 | 97,9 | 97,4  | 94,9  | 94,5  | 89,1 | 87,5 | 86,1  | 82,6 | 82,1  | 80,4  | 78,8  | 81,1  | 79,4  | 82,1  |
| NV (cozinha)                         | 68,5 | 69,1 | 73,6 | 75,7 | 77,0  | 75,9  | 75,7  | 75,5 | 79,6 | 71,2  | 74,8 | 70,4  | 69,5  | 69,9  | 73,4  | 73,1  | 72,5  |
| NV (banh. 2)                         | 68,9 | 75,7 | 71,6 | 72,9 | 76,0  | 75,4  | 71,9  | 76,7 | 69,7 | 68,5  | 68,5 | 67,5  | 68,0  | 70,0  | 79,8  | 76,7  | 72,9  |
| NV (quarto 3)                        | 67,7 | 70,2 | 67,9 | 66,6 | 66,7  | 65,3  | 70,9  | 71,1 | 64,8 | 65,0  | 64,3 | 63,0  | 61,8  | 62,2  | 61,8  | 61,0  | 65,0  |
| NV (quarto 2)                        | 61,9 | 66,3 | 68,2 | 67,9 | 64,8  | 67,1  | 67,6  | 67,3 | 66,9 | 63,5  | 61,6 | 62,8  | 62,6  | 61,6  | 62,5  | 58,5  | 53,8  |
| NV (suíte)                           | 66,8 | 68,0 | 66,9 | 68,3 | 69,4  | 67,1  | 66,9  | 66,6 | 67,4 | 65,2  | 62,0 | 59,6  | 57,6  | 58,0  | 57,9  | 56,8  | 59,1  |

Tabela 6- 26: NA (%) em cada cômodo do apartamento receptor

| NA (%) / Freq.<br>[Hz] | 100  | 125  | 160  | 200  | 250  | 315  | 400  | 500  | 630  | 800  | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500  | 3150 | 4000 |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|
| Cozinha                | 76,0 | 75,1 | 81,2 | 82,6 | 82,4 | 83,9 | 86,0 | 87,5 | 93,1 | 85,3 | 93,1 | 89,4 | 90,6 | 92,0 | 93,9  | 95,1 | 94,2 |
| Banheiro 2             | 76,3 | 82,8 | 78,9 | 79,6 | 81,3 | 83,8 | 82,2 | 88,5 | 82,8 | 82,9 | 86,7 | 87,0 | 88,8 | 92,4 | 100,2 | 98,2 | 94,7 |
| Quarto 3               | 75,1 | 76,5 | 74,6 | 72,8 | 71,6 | 73,4 | 81,3 | 82,7 | 77,9 | 79,3 | 82,4 | 82,2 | 82,7 | 84,3 | 82,8  | 83,6 | 87,4 |
| Quarto 2               | 68,2 | 72,4 | 74,8 | 74,3 | 70,0 | 75,2 | 77,9 | 79,0 | 80,2 | 77,5 | 79,6 | 82,3 | 83,6 | 83,5 | 83,1  | 80,8 | 76,7 |
| Suíte                  | 72,8 | 73,7 | 72,9 | 74,7 | 74,4 | 74,9 | 76,7 | 78,1 | 80,6 | 78,9 | 79,6 | 78,9 | 78,5 | 80,2 | 78,9  | 79,5 | 81,8 |

Tabela 6- 27: NV (%) em cada cômodo do apartamento receptor

| NV (%) / Freq.<br>[Hz] | 100  | 125  | 160  | 200  | 250  | 315  | 400  | 500  | 630  | 800  | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 | 4000 |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Cozinha                | 77,3 | 75,9 | 80,8 | 82,3 | 81,7 | 82,9 | 85,0 | 85,8 | 91,8 | 83,2 | 91,4 | 87,6 | 87,9 | 89,8 | 91,9 | 93,4 | 92,2 |
| Banheiro 2             | 77,8 | 83,1 | 78,6 | 79,2 | 80,7 | 82,3 | 80,7 | 87,2 | 80,4 | 80,0 | 83,7 | 84,0 | 86,0 | 90,0 | 99,9 | 98,0 | 92,7 |
| Quarto 3               | 76,4 | 77,1 | 74,5 | 72,4 | 70,8 | 71,3 | 79,6 | 80,8 | 74,7 | 75,9 | 78,6 | 78,4 | 78,1 | 79,9 | 77,3 | 77,9 | 82,7 |
| Quarto 2               | 69,9 | 72,8 | 74,9 | 73,8 | 68,8 | 73,3 | 75,9 | 76,5 | 77,2 | 74,2 | 75,3 | 78,1 | 79,1 | 79,2 | 78,2 | 74,7 | 68,4 |
| Suíte                  | 74,4 | 74,5 | 73,1 | 74,1 | 73,6 | 73,3 | 74,6 | 75,6 | 77,6 | 75,6 | 75,6 | 74,1 | 72,8 | 74,7 | 72,6 | 72,5 | 75,2 |

Verifica-se, em geral, a redução dos níveis de aceleração e velocidade à medida que a posição de medição se afasta da fonte de excitação localizada. Os valores de NA (%) e NV (%), na maior parte dos casos, são bem próximos. Para a frequência de 1000 [Hz], por exemplo, no qual todas as medições são válidas, as porcentagens de nível de aceleração em cada cômodo relativas à sala receptora foram: 93,1 % para a cozinha; 86,7 % para o banheiro 2; 82,4 % para o quarto 3; 79,6 % para o quarto 2 e 79,6 % para a suíte. Já para as porcentagens referentes ao nível de velocidade em cada cômodo relativas à sala receptora, tem-se: 91,4 % para a cozinha; 83,7 % para o banheiro 2; 78,6 % para o quarto 3; 75,3 % para o quarto 2 e 75,5 % para a suíte.

Os níveis de aceleração obtidos em cada cômodo serão importantes para obtenção da correlação entre nível de vibração e nível de pressão sonora que será realizada na próxima seção. É válido ressaltar as frequências naturais e críticas dos pisos ensaiados foram calculadas e mostradas no apêndice B.

#### **6.4.2 Medição em paredes e tetos do sistema sala-banheiro-suíte**

Com o objetivo de avaliar a influência do ruído de impacto gerado em diferentes cômodos, mediu-se, com o auxílio do acelerômetro, a vibração nas paredes e tetos da sala, banheiro 2 e suíte, a partir da alternância da fonte entre esses três ambientes.

Na Figura 6.38 são mostradas as posições de fonte e de medição. Com as indicações “TM-1”, “TM-2” e “TM-3”, tem-se as posições da máquina de impacto padrão na sala, banheiro 2 e suíte, respectivamente. Já para as posições de medição de vibração, tem-se as indicações “P-1” a “P-5”, nos quais foram medidas as acelerações no teto da sala (P-1), banheiro 2 (P-3) e suíte (P-5) e nas paredes da sala/banheiro 2 (P-2) e banheiro 2/suíte (P-4).

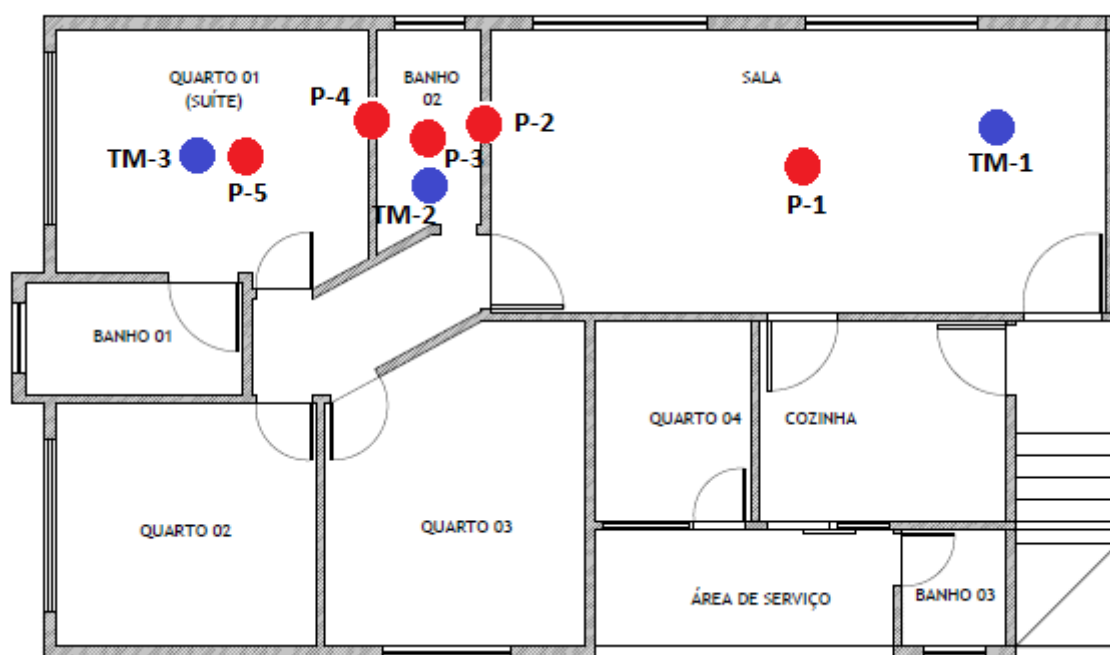


Figura 6.38: Posições da máquina de impacto padrão (TM-1 a TM-3) e dos acelerômetros (P-1 a P-5)

A Tabela 6-28 detalha os níveis de aceleração para cada posição de medição, enquanto a Tabela 6-33 mostra os níveis de velocidade, divididos em bandas de um terço de oitavas. As Tabelas 6-29 a 6-31 relatam os níveis de aceleração, em porcentagem, para diferentes posições de medição, tomando-se como referência o NA do ponto logo abaixo da fonte excitadora. Já a Tabela 6-32 indica as porcentagens de níveis de aceleração que chegam até a suíte, dado fontes de excitação de impacto postas na sala e banheiro 2 emissores. As coordenadas  $i$  e  $j$ , tanto dos níveis de aceleração quanto dos níveis de velocidade, representam, respectivamente, as posição de fonte no ambiente emissor e a posição de medição no ambiente receptor.

Nas Figuras 6.39 a 6.54 são mostrados os resultados de aceleração e velocidades referentes às medições realizadas nas posições em vermelho da Figura 6.38. Primeiramente, são representados nas Figuras 6.39 a 6.44 os gráficos de níveis de aceleração e velocidade para os cinco pontos de medição (P1 a P5 na Figura 6.38), dada cada posição da máquina padrão de impacto (TM1 a TM3 na Figura 6.38). Por fim, apresentam-se nas Figuras 6.45 a 6.54 os gráficos de níveis de aceleração e velocidade referentes a cada ponto de medição, dado as três posições da máquina padrão de impacto. Os resultados são apresentados em bandas de frequência de um terço de oitavas.

Tabela 6- 28: NA [dB] re  $10^{-6}$  [m/s<sup>2</sup>] em bandas de um terço de oitavas para cada combinação fonte-medição

| NA (i, j)<br>[dB]/Freq. [Hz] | 100  | 125   | 160   | 200   | 250  | 315   | 400  | 500   | 630   | 800   | 1000  | 1250  | 1600  | 2000  | 2500  | 3150  | 4000  |
|------------------------------|------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| NA (TM1, P1)                 | 85,1 | 86,4  | 88,7  | 89,2  | 96,0 | 95,0  | 96,5 | 96,7  | 99,3  | 97,9  | 96,0  | 98,2  | 97,0  | 98,8  | 103,2 | 103,1 | 107,9 |
| NA (TM2, P1)                 | 75,1 | 78,2  | 82,1  | 78,9  | 76,8 | 91,5  | 88,0 | 88,4  | 88,9  | 96,0  | 100,0 | 97,9  | 97,6  | 98,8  | 101,0 | 104,2 | 110,9 |
| NA (TM3, P1)                 | 69,3 | 73,3  | 71,3  | 71,2  | 72,2 | 72,5  | 80,2 | 79,1  | 80,6  | 85,3  | 86,6  | 86,0  | 87,8  | 88,9  | 91,3  | 94,1  | 88,7  |
| NA (TM1, P2)                 | 85,8 | 77,1  | 80,6  | 79,9  | 87,9 | 85,7  | 87,2 | 86,9  | 88,8  | 93,5  | 90,9  | 94,2  | 98,8  | 96,3  | 95,0  | 92,9  | 86,7  |
| NA (TM2, P2)                 | 85,0 | 88,3  | 96,7  | 95,1  | 89,5 | 91,5  | 91,2 | 96,5  | 95,2  | 97,5  | 97,1  | 101,1 | 105,6 | 107,1 | 108,0 | 108,8 | 113,3 |
| NA (TM3, P2)                 | 77,1 | 79,7  | 87,6  | 83,0  | 87,1 | 82,9  | 90,6 | 91,8  | 86,1  | 94,1  | 92,9  | 95,3  | 95,8  | 96,7  | 94,9  | 100,1 | 93,0  |
| NA (TM1, P3)                 | 64,5 | 73,8  | 72,0  | 74,8  | 79,9 | 81,6  | 79,9 | 86,6  | 81,5  | 82,7  | 84,6  | 85,5  | 87,9  | 92,4  | 104,0 | 102,3 | 100,8 |
| NA (TM2, P3)                 | 91,5 | 104,4 | 105,2 | 102,9 | 97,3 | 104,3 | 99,6 | 96,6  | 99,2  | 100,3 | 104,5 | 104,4 | 108,8 | 117,1 | 123,9 | 116,7 | 111,8 |
| NA (TM3, P3)                 | 74,4 | 81,0  | 83,4  | 80,6  | 80,8 | 81,4  | 86,1 | 88,5  | 87,1  | 89,5  | 90,3  | 93,3  | 100,4 | 102,1 | 105,0 | 104,1 | 102,9 |
| NA (TM1, P4)                 | 66,0 | 69,4  | 74,5  | 78,0  | 82,2 | 81,3  | 81,2 | 79,9  | 83,0  | 84,2  | 84,6  | 86,6  | 89,5  | 94,1  | 91,9  | 86,7  | 83,6  |
| NA (TM2, P4)                 | 82,1 | 90,2  | 95,9  | 93,0  | 97,5 | 99,9  | 92,5 | 88,4  | 96,4  | 97,0  | 101,0 | 103,0 | 106,0 | 108,9 | 110,4 | 109,8 | 111,8 |
| NA (TM3, P4)                 | 81,3 | 83,8  | 88,7  | 87,7  | 87,8 | 88,3  | 90,4 | 92,4  | 91,7  | 94,9  | 95,0  | 100,8 | 101,2 | 103,2 | 105,8 | 104,1 | 101,9 |
| NA (TM1, P5)                 | 64,4 | 66,8  | 68,0  | 69,3  | 72,0 | 73,9  | 76,4 | 75,4  | 77,7  | 76,3  | 76,4  | 77,3  | 77,3  | 80,0  | 81,9  | 82,2  | 87,9  |
| NA (TM2, P5)                 | 78,8 | 84,7  | 81,2  | 82,5  | 83,3 | 87,6  | 86,2 | 86,8  | 89,4  | 96,5  | 98,7  | 96,7  | 98,5  | 101,1 | 104,8 | 108,0 | 114,7 |
| NA (TM3, P5)                 | 92,5 | 93,6  | 95,1  | 100,4 | 99,9 | 103,1 | 99,3 | 101,8 | 104,2 | 102,7 | 107,5 | 109,4 | 108,7 | 107,7 | 111,6 | 113,7 | 117,3 |
| <b>Máximo</b>                | 92,5 | 104,4 | 105,2 | 102,9 | 99,9 | 104,3 | 99,6 | 101,8 | 104,2 | 102,7 | 107,5 | 109,4 | 108,8 | 117,1 | 123,9 | 116,7 | 117,3 |
| <b>Mínimo</b>                | 64,4 | 66,8  | 68,0  | 69,3  | 72,0 | 72,5  | 76,4 | 75,4  | 77,7  | 76,3  | 76,4  | 77,3  | 77,3  | 80,0  | 81,9  | 82,2  | 83,6  |
| <b>Média</b>                 | 85,0 | 93,4  | 95,0  | 94,0  | 92,7 | 96,4  | 93,0 | 93,8  | 95,7  | 96,3  | 99,4  | 101,0 | 102,7 | 107,1 | 112,9 | 108,5 | 110,2 |
| <b>Variância</b>             | 84,9 | 96,1  | 114,1 | 101,9 | 80,7 | 93,9  | 49,3 | 52,8  | 59,3  | 54,6  | 69,9  | 72,2  | 76,9  | 81,1  | 102,5 | 91,9  | 132,5 |
| <b>Desvio Padrão</b>         | 9,2  | 9,8   | 10,7  | 10,1  | 9,0  | 9,7   | 7,0  | 7,3   | 7,7   | 7,4   | 8,4   | 8,5   | 8,8   | 9,0   | 10,1  | 9,6   | 11,5  |

Tabela 6- 29: NA (%) em bandas de um terço de oitavas relativo à (TM1, P1)

| NA (%) / $f$ [Hz] | 100   | 125  | 160  | 200  | 250  | 315  | 400  | 500  | 630  | 800  | 1000 | 1250 | 1600  | 2000 | 2500  | 3150 | 4000 |
|-------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|------|------|
| NA (TM1, P2)      | 100,8 | 89,2 | 90,9 | 89,6 | 91,6 | 90,2 | 90,4 | 89,9 | 89,4 | 95,5 | 94,7 | 95,9 | 101,9 | 97,5 | 92,1  | 90,1 | 80,4 |
| NA (TM1, P3)      | 75,8  | 85,4 | 81,2 | 83,9 | 83,2 | 85,9 | 82,8 | 89,6 | 82,1 | 84,5 | 88,1 | 87,1 | 90,6  | 93,5 | 100,8 | 99,2 | 93,4 |
| NA (TM1, P4)      | 77,6  | 80,3 | 84,0 | 87,4 | 85,6 | 85,6 | 84,1 | 82,6 | 83,6 | 86,0 | 88,1 | 88,2 | 92,3  | 95,2 | 89,1  | 84,1 | 77,5 |
| NA (TM1, P5)      | 75,7  | 77,3 | 76,7 | 77,7 | 75,0 | 77,8 | 79,2 | 78,0 | 78,2 | 77,9 | 79,6 | 78,7 | 79,7  | 81,0 | 79,4  | 79,7 | 81,5 |

Tabela 6- 30: NA (%) em bandas de um terço de oitavas relativo à (TM2, P3)

| NA (%) / $f$ [Hz] | 100  | 125  | 160  | 200  | 250   | 315  | 400  | 500  | 630  | 800  | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 | 4000  |
|-------------------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| NA (TM2, P1)      | 82,1 | 74,9 | 78,0 | 76,7 | 78,9  | 87,7 | 88,4 | 91,5 | 89,6 | 95,7 | 95,7 | 93,8 | 89,7 | 84,4 | 81,5 | 89,3 | 99,2  |
| NA (TM2, P2)      | 92,9 | 84,6 | 91,9 | 92,4 | 92,0  | 87,7 | 91,6 | 99,9 | 96,0 | 97,2 | 92,9 | 96,8 | 97,1 | 91,5 | 87,2 | 93,2 | 101,3 |
| NA (TM2, P4)      | 89,7 | 86,4 | 91,2 | 90,4 | 100,2 | 95,8 | 92,9 | 91,5 | 97,2 | 96,7 | 96,7 | 98,7 | 97,4 | 93,0 | 89,1 | 94,1 | 100,0 |
| NA (TM2, P5)      | 86,1 | 81,1 | 77,2 | 80,2 | 85,6  | 84,0 | 86,5 | 89,9 | 90,1 | 96,2 | 94,4 | 92,6 | 90,5 | 86,3 | 84,6 | 92,5 | 102,6 |

Tabela 6- 31: NA (%) em bandas de um terço de oitavas relativo à (TM3, P5)

| NA (%) / $f$ [Hz] | 100  | 125  | 160  | 200  | 250  | 315  | 400  | 500  | 630  | 800  | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 | 4000 |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| NA (TM3, P1)      | 74,9 | 78,3 | 75,0 | 70,9 | 72,3 | 70,3 | 80,8 | 77,7 | 77,4 | 83,1 | 80,6 | 78,6 | 80,8 | 82,5 | 81,8 | 82,8 | 75,6 |
| NA (TM3, P2)      | 83,4 | 85,1 | 92,1 | 82,7 | 87,2 | 80,4 | 91,2 | 90,2 | 82,6 | 91,6 | 86,4 | 87,1 | 88,1 | 89,8 | 85,0 | 88,0 | 79,3 |
| NA (TM3, P3)      | 80,4 | 86,5 | 87,7 | 80,3 | 80,9 | 79,0 | 86,7 | 86,9 | 83,6 | 87,1 | 84,0 | 85,3 | 92,4 | 94,8 | 94,1 | 91,6 | 87,7 |
| NA (TM3, P4)      | 87,9 | 89,5 | 93,3 | 87,4 | 87,9 | 85,6 | 91,0 | 90,8 | 88,0 | 92,4 | 88,4 | 92,1 | 93,1 | 95,8 | 94,8 | 91,6 | 86,9 |

Tabela 6- 32: NA (%) em bandas de um terço de oitavas relativo à (TM3, P5)

| NA (%) / $f$ [Hz] | 100  | 125  | 160  | 200  | 250  | 315  | 400  | 500  | 630  | 800  | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 | 4000 |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| NA (TM1, P5)      | 69,6 | 71,4 | 71,5 | 69,0 | 72,1 | 71,7 | 76,9 | 74,1 | 74,6 | 74,3 | 71,1 | 70,7 | 71,1 | 74,3 | 73,4 | 72,3 | 74,9 |
| NA (TM2, P5)      | 85,2 | 90,5 | 85,4 | 82,2 | 83,4 | 85,0 | 86,8 | 85,3 | 85,8 | 94,0 | 91,8 | 88,4 | 90,6 | 93,9 | 93,9 | 95,0 | 97,8 |

Tabela 6- 33: NV [d B] re  $10^{-9}$  [m/s] em bandas de um terço de oitavas para cada combinação fonte-medição

| NV (i, j)<br>[dB]/Freq. [Hz] | 100  | 125   | 160   | 200   | 250  | 315  | 400  | 500  | 630  | 800  | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500  | 3150 | 4000  |
|------------------------------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|
| NV (TM1, P1)                 | 89,0 | 88,9  | 88,4  | 87,2  | 91,9 | 89,1 | 88,4 | 86,8 | 87,6 | 83,8 | 80,1 | 80,0 | 77,3 | 76,6 | 79,3  | 76,9 | 79,9  |
| NV (TM2, P1)                 | 79,1 | 80,7  | 82,1  | 77,0  | 72,8 | 85,5 | 80,0 | 78,4 | 76,9 | 81,8 | 83,9 | 80,1 | 77,4 | 76,8 | 77,2  | 78,3 | 82,8  |
| NV (TM3, P1)                 | 73,5 | 75,6  | 71,1  | 69,3  | 68,2 | 66,4 | 72,2 | 69,3 | 68,5 | 71,3 | 70,9 | 67,8 | 67,9 | 66,9 | 67,3  | 68,1 | 61,0  |
| NV (TM1, P2)                 | 90,4 | 78,9  | 80,8  | 78,3  | 83,8 | 79,9 | 79,2 | 77,3 | 76,7 | 79,3 | 75,1 | 75,9 | 78,7 | 74,5 | 71,0  | 67,3 | 58,9  |
| NV (TM2, P2)                 | 89,5 | 89,9  | 96,6  | 93,6  | 85,6 | 85,4 | 83,4 | 86,4 | 83,7 | 83,3 | 81,1 | 83,1 | 85,5 | 85,4 | 84,0  | 82,8 | 85,5  |
| NV (TM3, P2)                 | 81,4 | 81,3  | 87,7  | 81,5  | 82,9 | 77,1 | 82,3 | 82,1 | 74,3 | 80,1 | 77,0 | 77,4 | 75,6 | 75,0 | 70,9  | 74,0 | 65,2  |
| NV (TM1, P3)                 | 68,9 | 75,7  | 71,6  | 72,9  | 76,0 | 75,4 | 71,9 | 76,7 | 69,7 | 68,5 | 68,5 | 67,5 | 68,0 | 70,0 | 79,8  | 76,7 | 72,9  |
| NV (TM2, P3)                 | 95,4 | 106,4 | 105,0 | 101,4 | 93,1 | 98,5 | 91,9 | 86,6 | 87,0 | 86,4 | 88,5 | 86,6 | 88,4 | 94,9 | 99,9  | 91,3 | 83,8  |
| NV (TM3, P3)                 | 78,6 | 83,1  | 83,3  | 78,6  | 76,9 | 75,2 | 78,2 | 78,7 | 75,2 | 75,4 | 74,4 | 75,3 | 80,2 | 80,0 | 81,2  | 78,5 | 75,0  |
| NV (TM1, P4)                 | 70,6 | 71,3  | 74,1  | 75,7  | 78,2 | 75,3 | 73,1 | 70,4 | 71,1 | 69,9 | 68,6 | 68,6 | 69,4 | 72,3 | 67,8  | 61,1 | 56,1  |
| NV (TM2, P4)                 | 86,3 | 92,5  | 95,5  | 91,6  | 93,1 | 94,3 | 85,0 | 78,6 | 84,4 | 82,6 | 85,1 | 85,0 | 85,8 | 87,1 | 86,2  | 84,1 | 84,3  |
| NV (TM3, P4)                 | 85,3 | 85,9  | 88,1  | 86,2  | 83,9 | 82,5 | 82,0 | 82,8 | 79,4 | 80,8 | 79,0 | 82,9 | 81,0 | 81,4 | 81,8  | 78,5 | 74,3  |
| NV (TM1, P5)                 | 68,8 | 69,1  | 68,1  | 67,4  | 68,1 | 67,8 | 68,4 | 65,3 | 65,9 | 62,4 | 60,4 | 59,4 | 57,1 | 57,9 | 58,0  | 56,2 | 59,8  |
| NV (TM2, P5)                 | 82,6 | 87,0  | 81,0  | 80,8  | 79,3 | 81,6 | 78,6 | 77,0 | 77,3 | 82,1 | 82,9 | 78,9 | 78,3 | 79,0 | 80,8  | 82,2 | 86,3  |
| NV (TM3, P5)                 | 96,8 | 95,9  | 94,6  | 98,5  | 96,0 | 97,1 | 91,6 | 91,9 | 92,3 | 88,8 | 91,3 | 91,7 | 88,6 | 85,9 | 87,5  | 87,7 | 89,3  |
| <b>Máximo</b>                | 96,8 | 106,4 | 105,0 | 101,4 | 96,0 | 98,5 | 91,9 | 91,9 | 92,3 | 88,8 | 91,3 | 91,7 | 88,6 | 94,9 | 99,9  | 91,3 | 89,3  |
| <b>Mínimo</b>                | 68,8 | 69,1  | 68,1  | 67,4  | 68,1 | 66,4 | 68,4 | 65,3 | 65,9 | 62,4 | 60,4 | 59,4 | 57,1 | 57,9 | 58,0  | 56,2 | 56,1  |
| <b>Média</b>                 | 89,1 | 95,5  | 94,8  | 92,4  | 88,6 | 90,5 | 85,2 | 83,9 | 83,8 | 82,2 | 83,4 | 83,1 | 82,5 | 85,1 | 88,9  | 82,9 | 82,2  |
| <b>Variância</b>             | 83,6 | 96,8  | 113,3 | 104,3 | 79,3 | 95,3 | 50,5 | 52,2 | 59,4 | 54,5 | 69,4 | 73,2 | 75,7 | 81,8 | 101,9 | 92,5 | 130,5 |
| <b>Desvio Padrão</b>         | 9,1  | 9,8   | 10,6  | 10,2  | 8,9  | 9,8  | 7,1  | 7,2  | 7,7  | 7,4  | 8,3  | 8,6  | 8,7  | 9,0  | 10,1  | 9,6  | 11,4  |

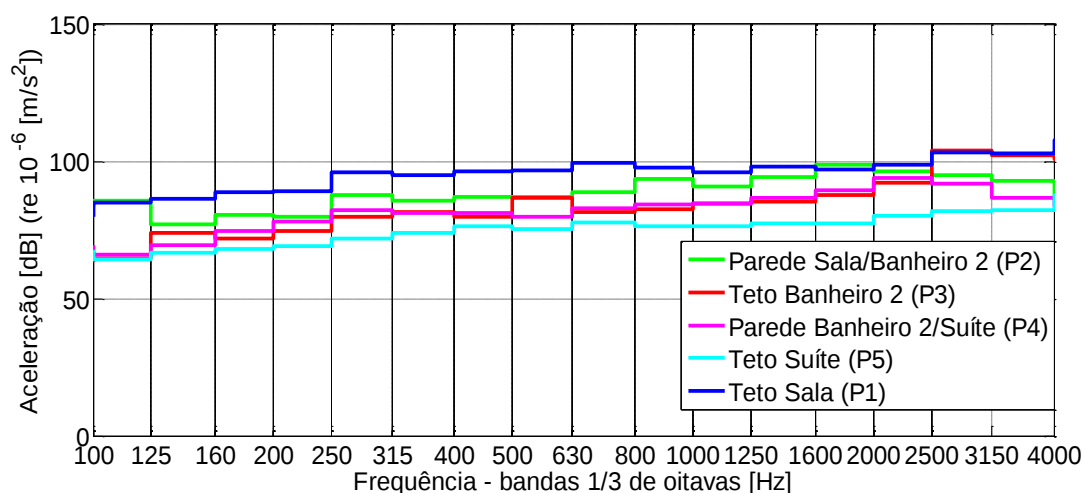


Figura 6.39: NA para a MPI localizada na sala emissora (TM-1)

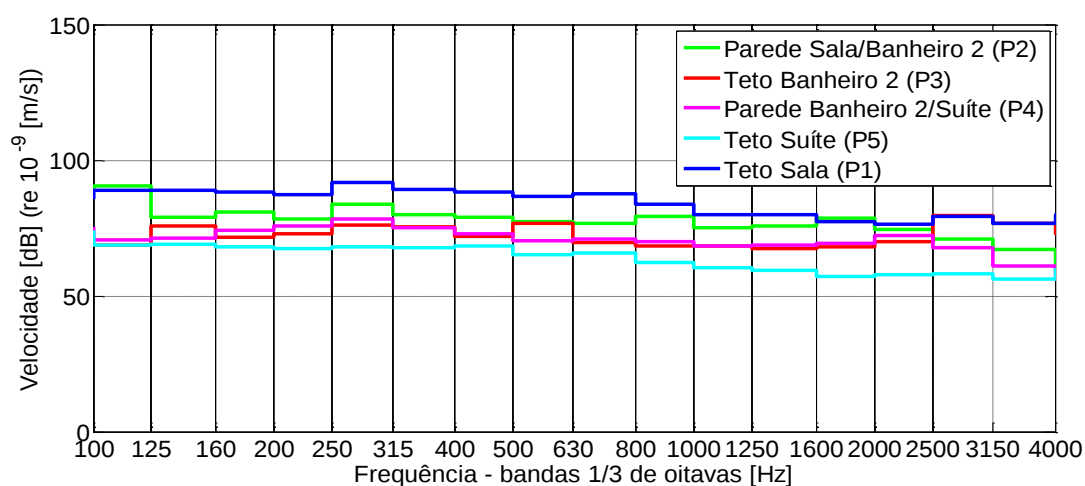


Figura 6.40: NV para a MPI localizada na sala emissora (TM-1)

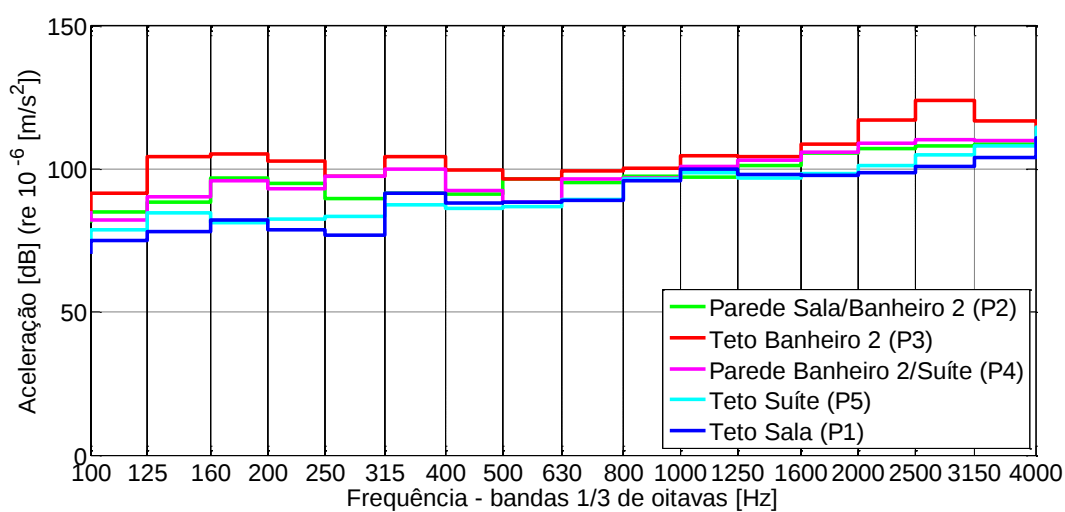


Figura 6.41: NA para a MPI localizada no banheiro 2 emissor (TM-2)

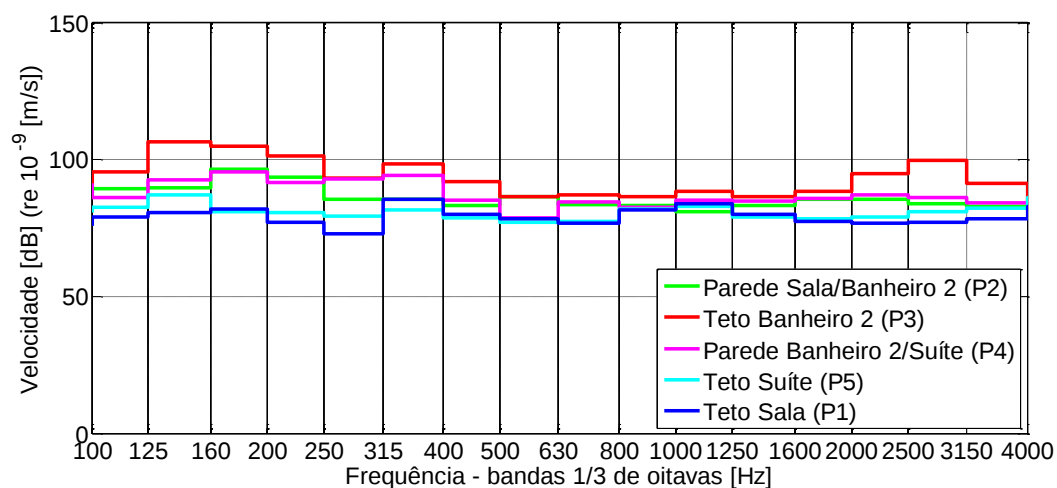


Figura 6.42: NV para a MPI localizada no banheiro 2 emissor (TM-2)

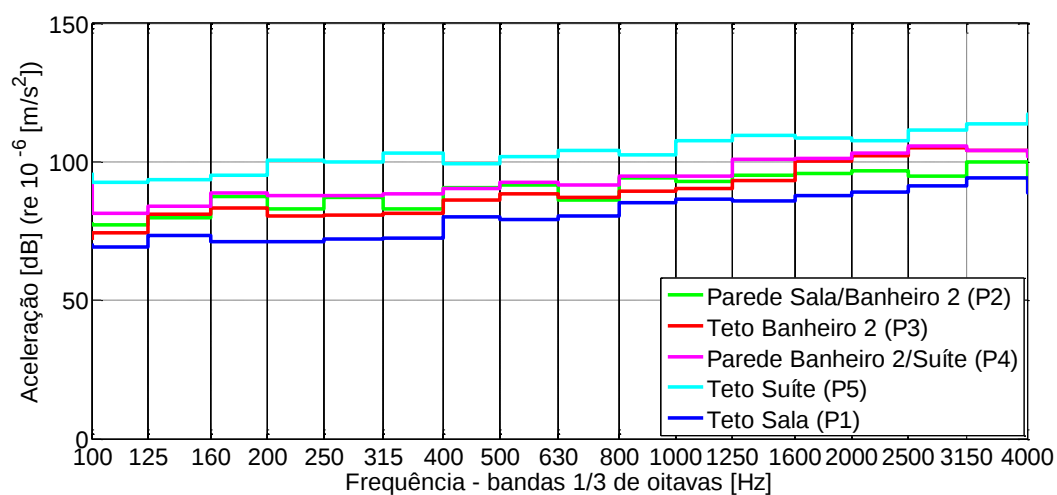


Figura 6.43: NA para a MPI localizada na suíte emissora (TM-3)

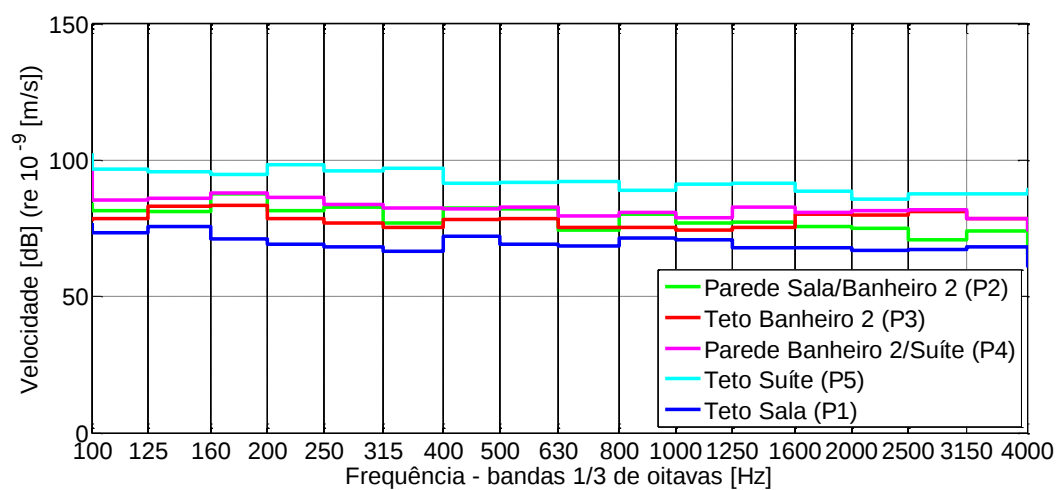


Figura 6.44: NV para a MPI localizada na suíte emissora (TM-3)

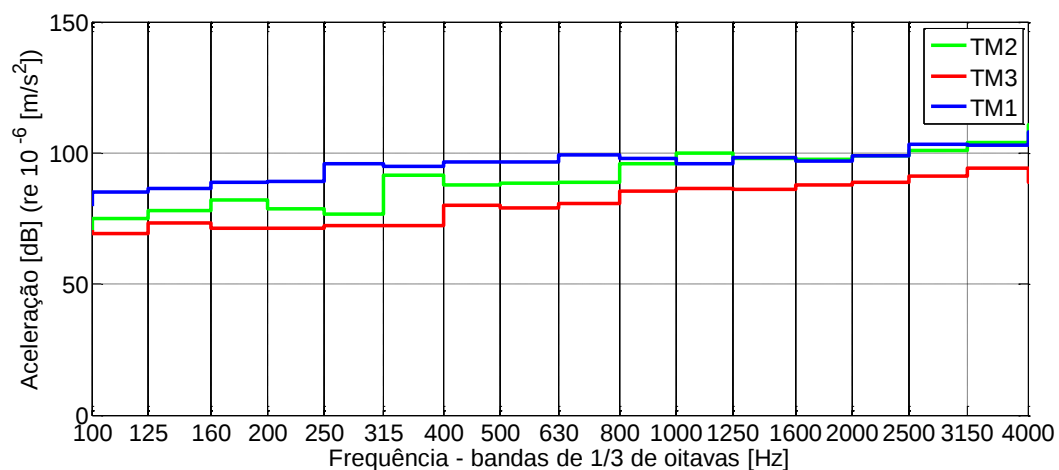


Figura 6.45: NA para o acelerômetro localizado no teto da sala receptora

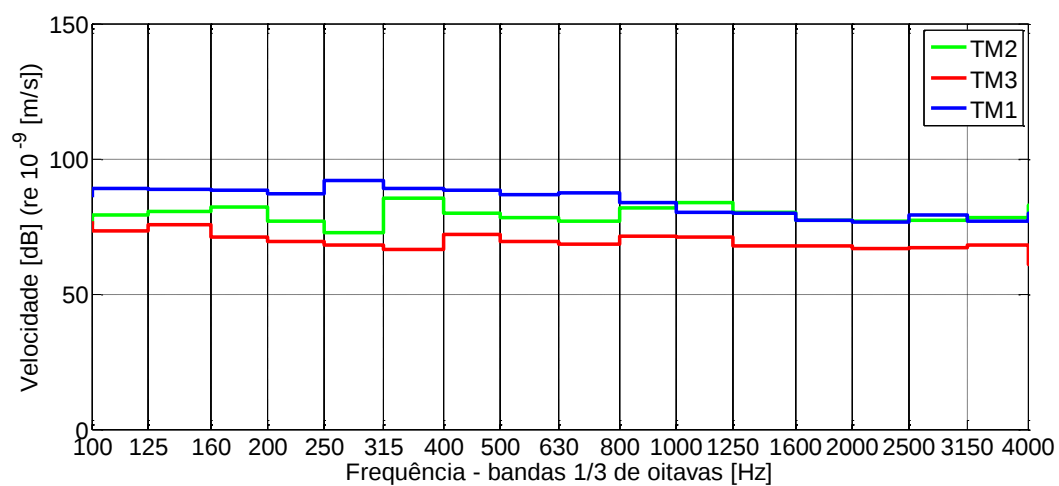


Figura 6.46: NV para o acelerômetro localizado no teto da sala receptora

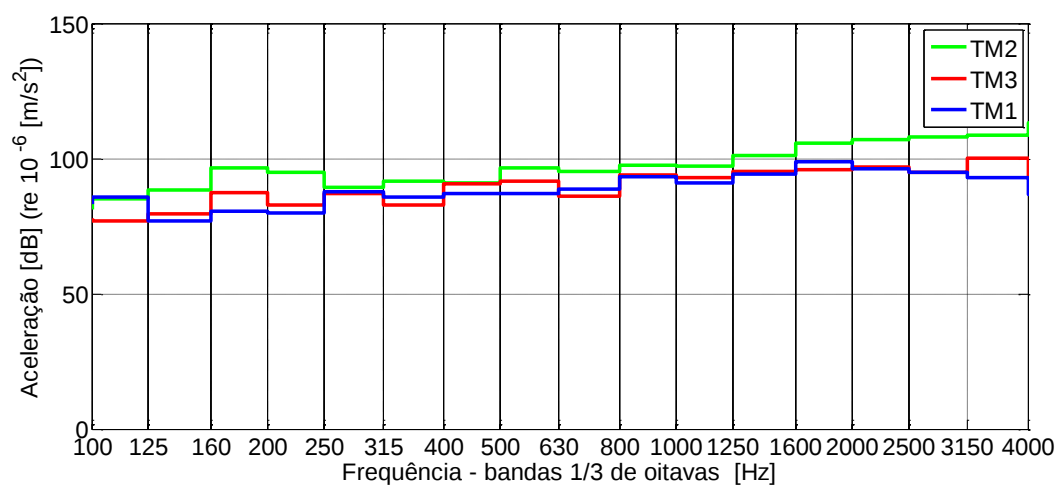


Figura 6.47: NA para o acelerômetro localizado na parede sala/banheiro 2 receptora

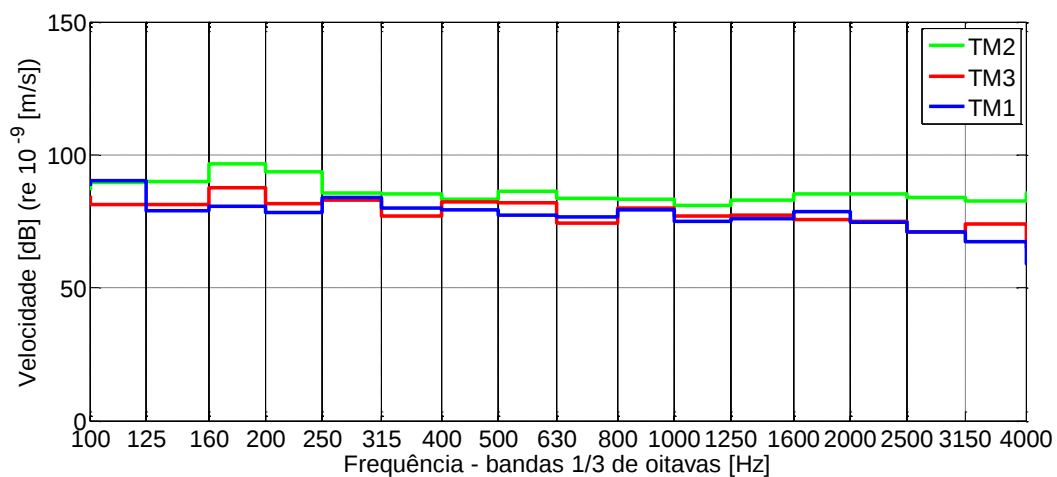


Figura 6.48: NV para o acelerômetro localizado na parede sala/banheiro 2 receptora

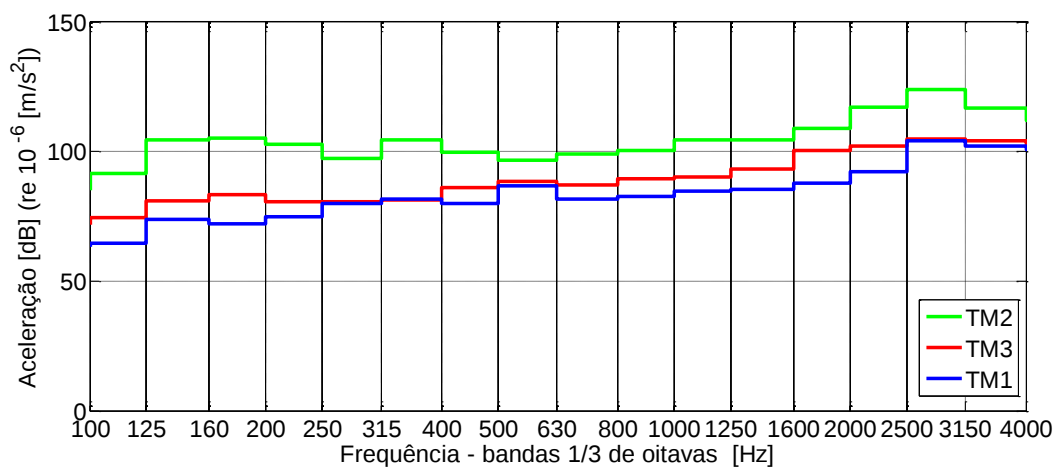


Figura 6.49: NA para o acelerômetro localizado no teto do banheiro 2 receptor

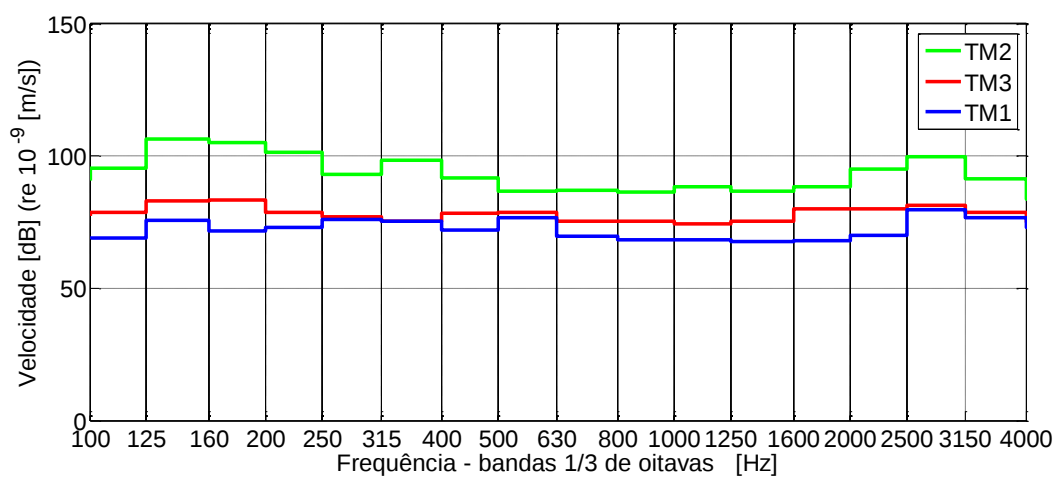


Figura 6.50: NV para o acelerômetro localizado no teto do banheiro 2 receptor

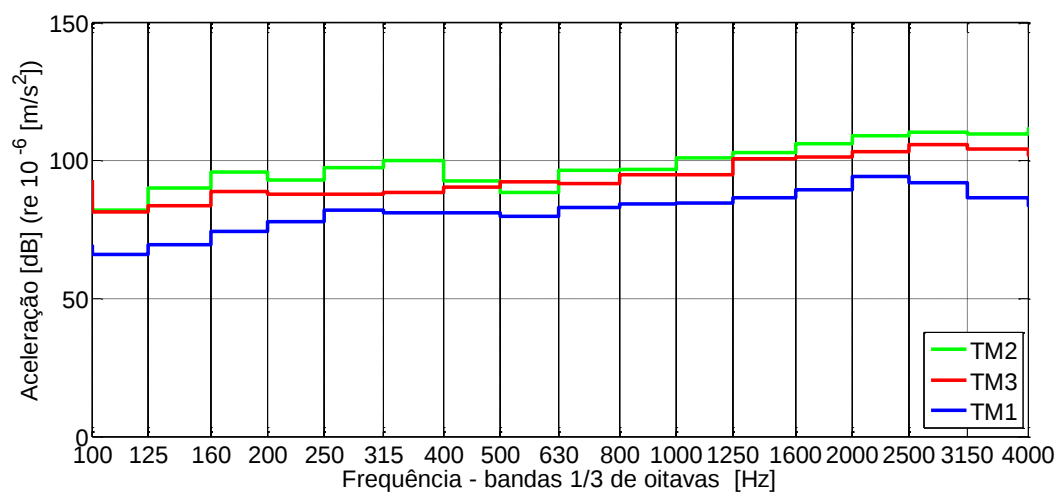


Figura 6.51: NA para o acelerômetro localizado na parede banheiro 2/suíte receptor

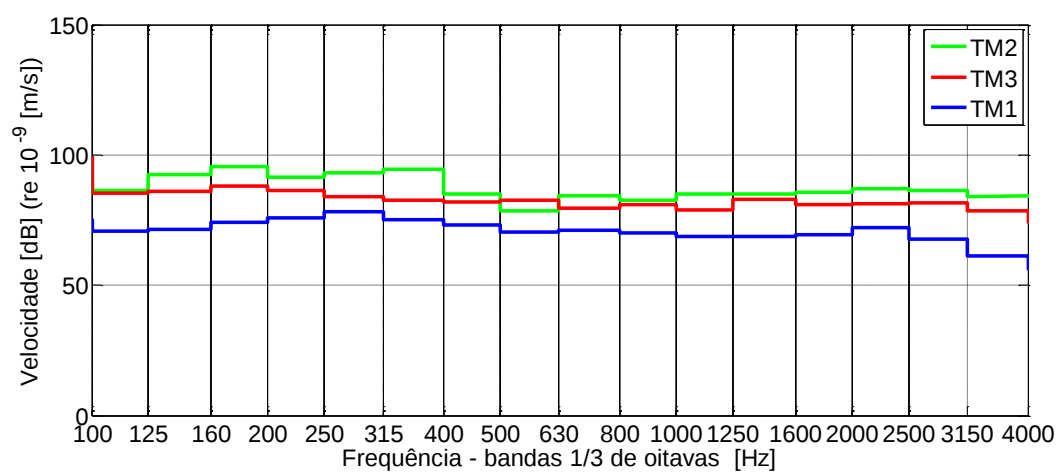


Figura 6.52: NV para o acelerômetro localizado na parede banheiro 2/suíte receptor

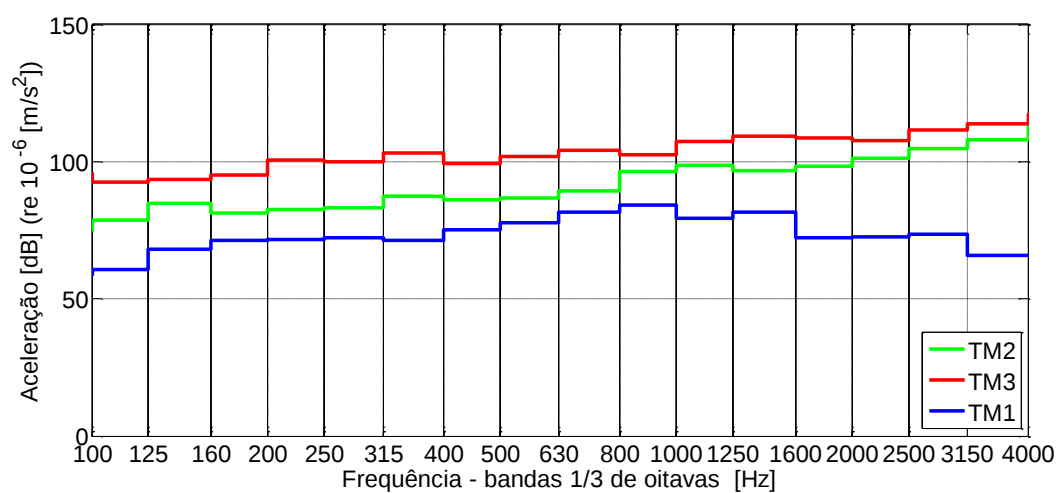


Figura 6.53: NA para o acelerômetro localizado no teto da suíte receptora

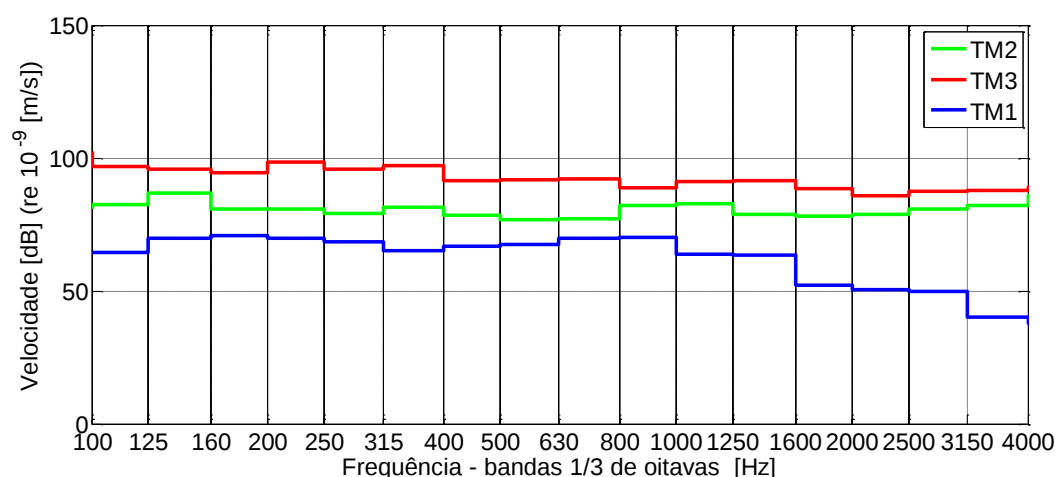


Figura 6.54: NV para o acelerômetro localizado no teto da suíte receptora

Tais figuras foram confeccionadas com o objetivo de analisar experimentalmente a transmissão vibroacústica entre cômodos de sistemas residenciais adjacentes. De acordo com as Tabelas 6-29 a 6-32, foram analisadas, em termos percentuais, as quantidades de níveis de aceleração transmitidas para as estruturas adjacentes ao da aplicação da fonte excitadora. Para uma análise de transmissibilidade em termos percentuais, tomou-se como referência o nível de aceleração correspondente à posição de medição imediatamente abaixo da excitação, no qual a vibração é captada em sua quase totalidade. Foi analisada a transmissão da vibração a partir do ruído de impacto gerado na sala, banheiro 2 e suíte. Para a máquina padrão de impacto posicionada na sala emissora (considerando a banda de frequência de 1000 [Hz]) as porcentagens de NA transmitidas foram: 94,7 % para a posição P2 (parede da sala); 88,1 % para P3 (teto do banheiro 2); 88,1% para o ponto P4 (parede da suíte) e 79,6 % para P5 (teto da suíte). Já para fonte no banheiro 2 emissor, tem-se as seguintes porcentagens de NA transmitidas: 95,7 % (P1); 92,9 % (P2); 96,7 % (P4) e 94,4 % (P5). Por fim, para a excitação localizada sobre o piso da suíte emissora, obtiveram-se: 80,6 % para P1; 86,4 % para P2; 84,0 % para P3 e 88,4 % para P4.

Analisou-se a influência da vibração na suíte receptora a partir de fontes de excitação em estruturas de cômodos adjacentes. Verificou-se que 71,1 % do nível de aceleração gerado na sala emissora e 91,8 % do nível de aceleração gerado no banheiro 2 (para a banda de frequência cuja frequência central é de 1000 [Hz]), chegam até a suíte receptora. Observa-se que não apenas a distância interfere na transmissão, mas também outros fatores, tais como: material, acoplamento, tipos de ligações, etc.

## 6.5 Resumo das informações coletadas

Dado as análises descritas nas seções anteriores, esta seção visa à síntese das informações extraídas do estudo de nível de pressão sonora e aceleração, obtendo-se parâmetros que serão importantes ao longo do desenvolvimento dessa dissertação.

Na seção 6.2 foram analisados os resultados das medições de níveis de pressão sonora para cômodos imediatamente sobrepostos. Dessa forma, as medições ocorreram no cômodo imediatamente inferior ao da fonte de excitação de impacto. Avaliaram-se o desempenho acústico de dois sistemas estruturais (piso da suíte e piso da sala) através da obtenção dos níveis de pressão sonora ( $L_i$ ) medidos na sala e suíte receptoras do apartamento inferior. Foi calculado o nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado ( $L'_{nT,w}$ ), de acordo com a norma ISO 717-2 (2013), a partir da obtenção do nível de pressão sonora de impacto padronizado ( $L'_{nT}$ ) e do tempo de reverberação ( $T_{60}$ ) de cada cômodo. Cada piso foi classificado, segundo sua classe de desempenho, de acordo com a norma NBR 15575-3 (2013).

Já na seção 6.3, os níveis de pressão sonora foram avaliados para os ensaios de ruído de impacto realizados em cômodos adjacentes do apartamento receptor. Assim, as medições ocorreram em cômodos inferiores adjacentes ao da máquina padrão de impacto. O nível de pressão sonora de impacto padronizado para cada cômodo ( $L'_{nT(adj.)}$ ) foi calculado. Admitindo o procedimento da norma ISO 717-2 (2013), obtiveram-se os parâmetros únicos para o piso de cada cômodo, descritores do grau de isolamento do ruído de impacto, denominados nessa dissertação de  $L'_{nT,w(adj.)}$  ou nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado para cômodos adjacentes.

Por fim, na seção 6.4 foram analisados os resultados da vibração gerada pelo ruído de impacto gerado no apartamento emissor. Primeiramente, com a máquina padrão de impacto na sala emissora, calcularam-se a aceleração dos pisos de vários cômodos do apartamento receptor. Posteriormente, níveis de aceleração e velocidade foram calculados em paredes e pisos das interfaces de três cômodos adjacentes (sala, banheiro 2 e suíte), a partir do posicionamento da máquina padrão de impacto no recinto emissor de cada um dos três ambientes.

# 7

## DESENVOLVIMENTO DE MODELO VIBROACÚSTICO ATRAVÉS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DE ENERGIA

### 7.1 Considerações Gerais

O método de Análise Estatística de Energia – do inglês *Statistical Energy Analysis (SEA)* – representa uma metodologia de análise de problemas simples ou complexos, tais como a transmissão de som/vibração através dos sistemas estruturais de um edifício. É usada em acústica e vibrações para a solução de problemas que apresentem várias fontes e trajetórias de ruído, como transmissões por vias aéreas, estruturais e/ou aquáticas. Pode ser utilizado tanto para problemas simples, como para a estimativa do ruído em um ambiente dada uma fonte sonora, quanto para problemas mais complexos, como desempenho de uma edificação como um todo.

A metodologia SEA surgiu em meados dos anos 60, constituindo um campo de estudos dinâmicos. R. H. Lyon e P. W. Smith Jr foram responsáveis por conduzir os primeiros trabalhos a respeito do desenvolvimento e formulação da Análise Estatística de Energia. Eles mostraram que uma análise das propriedades de uma sala, do ponto de vista acústico, através do estudo de modos individuais, seria inviável com exceção dos primeiros modos. Sendo assim, a pesquisa relativa à acústica de salas foi desenvolvida via métodos estatísticos, fornecendo base necessária para determinação das propriedades médias de uma sala sem necessariamente apresentar cálculos detalhados para cada modo. (LYON, 1975, CRAIK, 1996).

De forma geral, a transmissão sonora em edificações depende do número de “caminhos de transmissão”. Em SEA, estes caminhos são classificados como diretos e indiretos (transmissão pelos flancos). Neste capítulo, será abordada somente a transmissão direta. Será analisado um sistema composto por dois subsistemas, um estrutural (piso da sala emissora) e

outro acústico (ambiente sala receptora). Essa abordagem é razoável, uma vez que a transmissão não ressonante ou transmissão forçada é a contribuição mais importante para o mecanismo de transmissão.

## 7.2 Parâmetros utilizados na Análise Estatística de Energia

Segundo Craik (1996), a Análise Estatística de Energia utiliza alguns parâmetros já conhecidos da acústica clássica, porém apresenta outros completamente novos. Em sequência, serão enumerados e definidos tais parâmetros:

- 1) Sistema: é a parte do sistema físico que está sendo modelada;
- 2) Subsistema: é um grupo de modos com as mesmas propriedades e energia modal similar. Está, geralmente, relacionado a um elemento físico, como uma sala ou uma parede, por exemplo;
- 3) Energia: é o parâmetro que descreve a resposta dinâmica, sendo relacionado com as medidas mais comuns de pressão e velocidade. O fluxo de potência através do sistema é descrito pelo fator de perda.

Segundo Craik (1996), para um subsistema estrutural, a energia é definida por:

$$E = mv^2 \quad (7.1)$$

onde,  $E$  denota a energia [J],  $m$  é a massa total do subsistema, em [Kg], e  $v$  é a velocidade média quadrática, em [m/s], calculada ao longo do tempo e do espaço.

Em contrapartida, para subsistemas acústicos, segundo Craik (1996), a energia no espaço acústico é dada por:

$$E = \frac{p^2 V}{\rho_0 C_0^2} \quad (7.2)$$

onde  $p$  denota a pressão sonora [Pa],  $V$  é o volume do subsistema,  $\rho_0$  é a densidade do ar [Kg/m<sup>3</sup>] e  $C_0$  é a velocidade do som no ar [m/s].

4) Fator de perda ( $\eta$ ): é a fração de energia perdida por ciclo de radiano. Há vários tipos de fatores de perda, tais como por amortecimento e acoplamento. A energia perdida devido ao aquecimento interno é chamada de fator de perda interna, sendo denominada por  $\eta_{id}$  (fator de perda interna do subsistema  $i$ ). A perda devido ao acoplamento de um subsistema a outro é denominada fator de perda por acoplamento –  $\eta_{ij}$  (fator de perda por acoplamento do subsistema  $i$  ao  $j$ ). O fator de perda total,  $\eta_i$  (fator de perda total do subsistema  $i$ ), é resultante da soma de todas as perdas para um subsistema (CRAIK, 1996).

O fator de perda total de um subsistema  $i$  qualquer, é dado pela seguinte equação:

$$\eta_i = \frac{2,2}{fT_{60}} \quad (7.3)$$

no qual  $f$  é a frequência [Hz] e  $T_{60}$  o tempo de reverberação [s] do subsistema, ou seja, o tempo necessário para a energia decair de 60 [dB] cessada a fonte excitadora. O fator de perda total é a soma de todas as perdas existentes no subsistema, representado, através da modelagem realizada, pelo somatório de todos os fatores de perda por acoplamento em adição ao fator de perda interna do subsistema, tal como:

$$\eta_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n \eta_{ij} + \eta_{id} \quad (7.4)$$

O fluxo de potência entre dois subsistemas pode ser definido em termos da energia e do fator de perda por acoplamento (*coupling loss factor* – CLF). A perda por acoplamento é o parâmetro em SEA que descreve a transmissão do som entre subsistemas, de tal maneira que o acoplamento se dá através das interfaces dos subsistemas. Sendo assim, a potência transmitida de um subsistema  $i$  para um subsistema  $j$  é definida como:

$$W_{ij} = E_i \omega \eta_{ij} \quad (7.5)$$

no qual  $E_i$  é a energia do subsistema  $i$ ,  $\omega$  é a frequência em [Rad/s] e  $\eta_{ij}$  é o fator de perda por acoplamento do subsistema  $i$  ao subsistema  $j$ , ou seja, é a fração de energia máxima armazenada do subsistema  $i$  transmitida para o subsistema  $j$ . Da mesma maneira, a potência gerada devido a perdas internas de um subsistema  $i$  é dada por:

$$W_{id} = E_i \omega \eta_{id} \quad (7.6)$$

no qual  $\eta_{id}$  é o fator de perda interna.

5) Densidade modal: é definida como sendo o número de modos existentes em certa banda de frequência. Tal parâmetro é importante para a predição de energia, uma vez que mostra quantos modos ressonantes estão disponíveis para armazenar energia e quantos modos estão transferindo energia entre si.

A densidade modal é definida pela seguinte equação:

$$n(f) = \frac{N}{\Delta f} \quad (7.7)$$

No qual  $\Delta f$  é igual a 0,23 vezes a frequência central da banda de um terço de oitavas de interesse. A densidade modal para uma sala padrão é dada por:

$$n(f) = \frac{4\pi f^2 V}{c_0^3} + \frac{\pi f S'}{2c_0^2} + \frac{L'}{8c_0} \quad (7.8)$$

no qual  $V$  é o volume da sala,  $S'$  é a área superficial total da sala e  $L'$  é o comprimento total de todas as arestas. Para estruturas, a densidade modal é definida por:

$$n(f) = \frac{\pi S f_c}{c_0^2} \quad (7.9)$$

onde,  $S$  denota a área do piso,  $f_c$  é a frequência crítica da estrutura e  $c_0$  é a velocidade da onda no ar.

Segundo Craik (1996), a densidade modal e o fator de acoplamento se relacionam pela seguinte equação:

$$n_i \eta_{ij} = n_j \eta_{ji} \quad (7.10)$$

onde  $n_i$  é a densidade modal do subsistema  $i$  e  $\eta_{ij}$  representa o fator de acoplamento do subsistema  $i$  para o  $j$ . Já a rigidez à flexão ( $B$ ) para placas é determinada pela fórmula:

$$B = \frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)} \quad (7.11)$$

no qual  $E$  é módulo de elasticidade do material,  $h$  a espessura e  $\mu$  o coeficiente de *Poisson*. A velocidade da onda sonora no ar varia conforme a temperatura ambiente, segundo a função aproximada dada por (BS 3638, 1987):

$$c_0 \cong 331 + 0,6t \quad (7.12)$$

onde  $t$  é a temperatura em [°C]. Em temperaturas normais de 25 [°C], a velocidade da onda sonora no ar equivale a 346 [m/s].

### 7.3 Transmissão direta (Estrutural-acústico)

Nesse modelo, será realizada a estimativa do fator de acoplamento entre dois subsistemas, através de um modelo de transmissão direta de energias. O subsistema 1 será representado pelo piso da sala emissora (subsistema estrutural) que será excitado pela máquina padrão de impacto. Já o subsistema 2 será representado pelo ambiente sala (subsistema acústico), de acordo com a Figura 7.1.

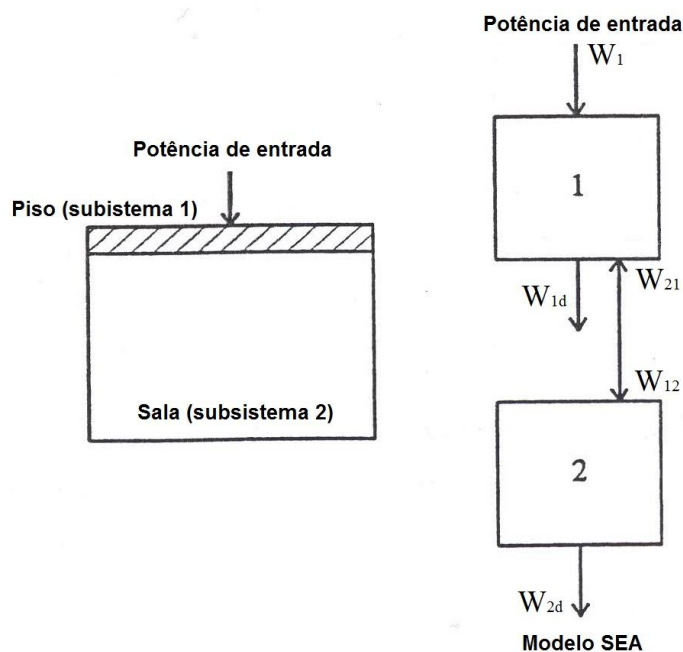


Figura 7.1: Modelo SEA para um piso excitado por uma fonte de radiação estrutural (adaptado CRAIK (1996))

Dado o fluxo de potências entre os subsistemas 1 e 2, descrito pelo sistema mostrado pela figura 7.1, obtém-se:

$$W_1 + W_{21} = W_{12} + W_{1d} \quad (7.13)$$

$$W_{12} = W_{21} + W_{2d} \quad (7.14)$$

De acordo com as equações (7.5) e (7.6), as potências geradas pelo acoplamento e pelo amortecimento dos subsistemas são tais que:

$$W_{21} = \eta_{21} \omega E_2 \quad (7.15)$$

$$W_{12} = \eta_{21} \omega E_1 \quad (7.16)$$

$$W_{1d} = \eta_{1d} \omega E_1 \quad (7.17)$$

$$W_{2d} = \eta_{2d} \omega E_2 \quad (7.18)$$

De (7.15), (7.16), (7.17) e (7.18) em (7.13) e (7.14), obtém-se:

$$W_1 + \eta_{21} \omega E_2 = \eta_{21} \omega E_1 + \eta_{1d} \omega E_1 \quad (7.19)$$

$$\eta_{21} \omega E_1 = \eta_{21} \omega E_2 + \eta_{2d} \omega E_2 \quad (7.20)$$

Rearranjando os termos das equações (7.19) e (7.20):

$$-\frac{W_1}{\omega} + \eta_{1d} E_1 = \eta_{21} E_1 \quad (7.21)$$

$$\eta_{2d} E_2 = \eta_{12} E_1 \quad (7.22)$$

As equações (7.21) e (7.22) podem ser representadas em termos matriciais, tal como:

$$\begin{bmatrix} 0 & E_2 \\ E_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_{12} \\ \eta_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{w_1}{w} + \eta_1 E_1 \\ \eta_2 E_2 \end{bmatrix} \quad (7.23)$$

O sistema modelado de acordo com as equações dadas pela matriz (7.23) foi implementado em algoritmo desenvolvido via software *Matlab*<sup>®</sup>. Os parâmetros utilizados para os subsistemas 1 e 2, piso da sala emissora e ambiente da sala receptora, respectivamente, foram:

Tabela 7- 1: Dados utilizados para cálculo do sistema piso-recinto

| Subsistema         | Característica                           | Valor                          |
|--------------------|------------------------------------------|--------------------------------|
| Piso da sala (1)   | Dimensões                                | 7,1 x 3,25 x 0,1 [m]           |
|                    | Densidade ( $\rho$ )                     | 2500 [Kg/m <sup>3</sup> ]      |
|                    | Frequência crítica ( $f_c$ )             | 184,9 [Hz]                     |
|                    | Potência de entrada                      | 0,1042 x 10 <sup>-4</sup> [W]  |
|                    | Módulo de elasticidade (E) - concreto    | 20 x 10 <sup>9</sup> [Pa]      |
|                    | Coefficiente de Poisson ( $\mu$ )        | 0,29                           |
|                    | Densidade superficial ( $\rho_s$ )       | 250 [Kg/m <sup>2</sup> ]       |
| Sala receptora (2) | Rigidez à flexão (B)                     | 1,8197 x 10 <sup>6</sup> [N.m] |
|                    | Dimensões                                | 7,1 x 3,25 x 2,7 [m]           |
|                    | Tempo de reverberação (500 [Hz])         | 1.7 [s]                        |
|                    | Densidade do ar ( $\rho_0$ ) - 25°C      | 1,2 [Kg/m <sup>3</sup> ]       |
|                    | Velocidade do som no ar ( $C_0$ ) - 25°C | 346 [m/s]                      |

A velocidade final do subsistema 1 foi calculada segundo a média dos quatro valores de velocidades obtidas através das medições com acelerômetro em quatro posições distintas na laje da sala receptora, de acordo com os pontos 1, 2, 3 e 4 da Figura 5.19. Tal figura mostra a localização exata da posição de fonte (máquina padrão de impacto) e das posições de medição.

Já a pressão sonora final do subsistema 2 foi calculada segundo a média de dezesseis conjuntos de níveis de pressões sonoras obtidas através da recomendação da norma ISO 140-7 (1998). O nível de pressão sonora médio para a sala receptora foi mostrado na Tabela 6-8 da subseção 6.6.2.

Quando a fonte de excitação é uma fonte atuando sobre um determinado ponto, então a potência de entrada [W], segundo Craik (1996), é dada por:

$$W = F^2 Re(Y) \quad (7.24)$$

no qual  $Re(Y)$  é a parte real da mobilidade da estrutura e  $F$  é a força RMS.

Na maioria dos casos reais, a entrada de energia em subsistemas através de fontes excitadoras, tais como a máquina padrão de impacto, dependerá não apenas das forças de excitação, mas também da impedância (ou mobilidade) da própria máquina e da impedância da estrutura que a suporta. Quando há muitos modos em uma estrutura, a mobilidade tende ao mesmo valor que seria obtido se a estrutura fosse considerada infinita. Segundo Cremer *et al.* (1973) e Young (1989), a impedância para uma placa infinita excitada no centro é dada por:

$$Z = 8\sqrt{B\rho_s} \quad (7.25)$$

Sendo a mobilidade ( $Y$ ) expressa por (CRAIK, 1996):

$$Y = \frac{1}{Z} \quad (7.26)$$

Segundo Rabold *et al.* (2010) a força de entrada da máquina padrão de impacto é equivalente a 2 [N] ao longo da frequência.

Com o auxílio do software *Matlab*<sup>®</sup>, o sistema foi modelado a partir de uma simulação computacional de uma situação real. Optou-se pela exibição das frequências de 100 a 2000 [Hz] (em bandas de um terço de oitavas), uma vez que a relação sinal-ruído para frequências acima de 2000 [Hz] foi baixa, refletindo na não linearidade do sistema para as faixas de frequências mais elevadas. A distribuição de energia dos subsistemas 1 e 2 é dada pela Figura 7.2.

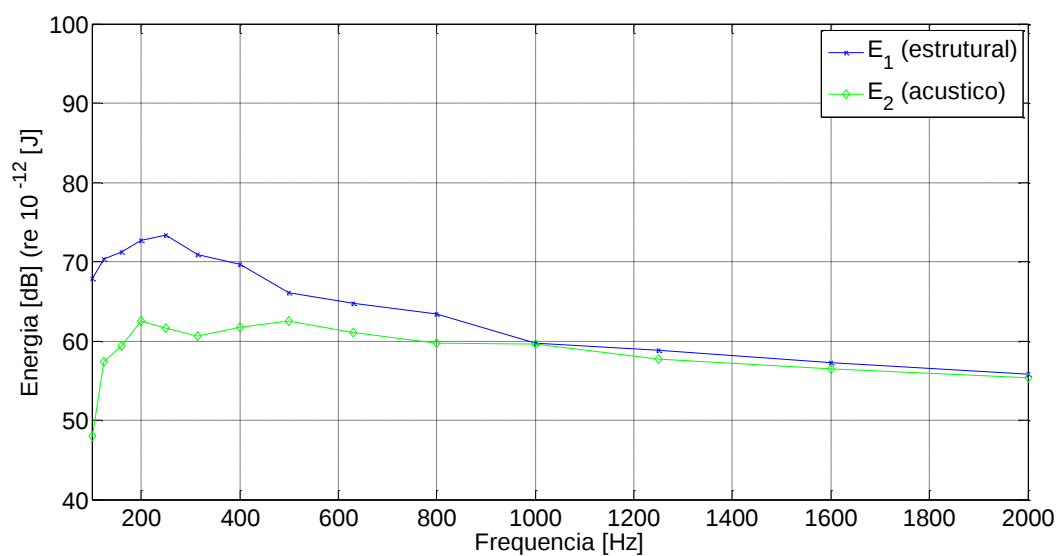


Figura 7.2: Distribuição de energias

O fator de perda total é dado pelo somatório de todas as perdas do subsistema, de acordo a Figura 7.3.

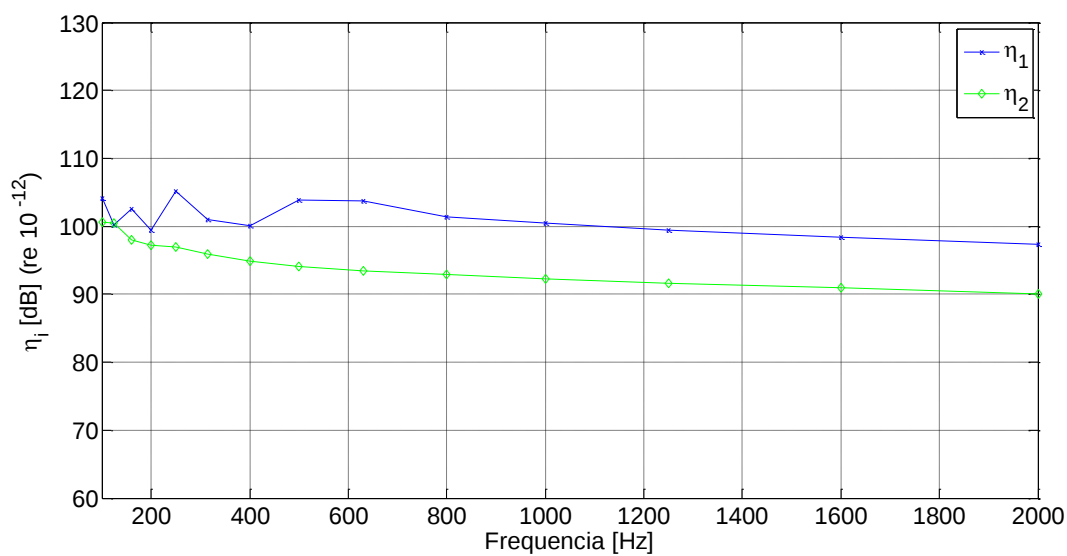


Figura 7.3: Fator de Perda Total

Os fatores de acoplamento entre os subsistemas representam as incógnitas do problema. Simulando tal sistema com o auxílio do software *Matlab*®, obtêm-se os fatores de acoplamento em função da frequência, como mostrado na Figura 7.4.

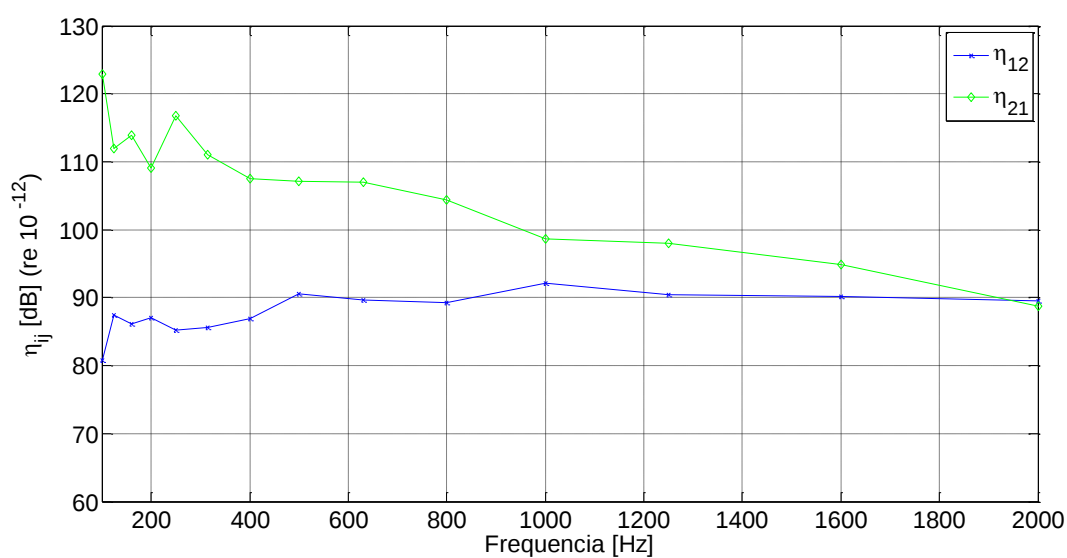


Figura 7.4: Fatores de Perda por Acoplamento

Percebe-se que o acoplamento fluido-estrutura foi maior que o acoplamento estrutura-fluido ao longo da faixa de frequência considerada, com tendência à aproximação dos dois fatores a medida que a frequência cresce.

O produto da densidade modal do subsistema 1 pelo fator de acoplamento do subsistema 1 para o 2 foi calculado e mostrado na Figura 7.5, assim como o produto da densidade modal do subsistema 1 pelo fator de acoplamento de 2 para 1.

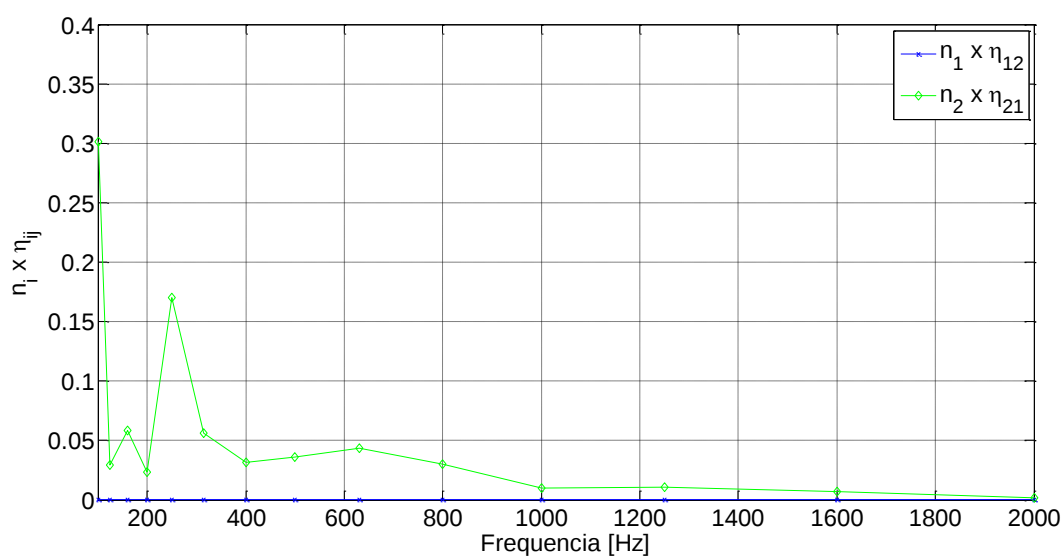


Figura 7.5: Produto Densidade Modal x Fator de Acoplamento

Observa-se que para frequências acima de 1000 [Hz], os produtos convergiram para um mesmo valor. As discrepâncias observadas para frequências abaixo de 1000 [Hz] foram de uma ordem de grandeza reduzida, visto que os desvios padrão para as baixas frequências são maiores. Em adição, tem-se o fato da Análise Estatística de Energia ser uma metodologia para avaliação do fluxo de energia entre subsistemas através da análise de médias e altas frequências.

De forma analítica, segundo a equação 7.10, as duas curvas da Figura 7.5 deveriam ser iguais. Porém, a partir de procedimento experimental no qual a presença de incertezas é um fator inerente ao processo, os resultados são considerados satisfatórios.

# 8

## CRITÉRIOS DE DECISÃO PARA DESEMPENHO ACÚSTICO DE PISOS

### 8.1 Considerações Gerais

Tradicionalmente, as ferramentas da Teoria da Confiabilidade fazem referência à sua aplicação em estruturas, visando à determinação da probabilidade da mesma em entrar em estado de falha, dentre outras análises. O problema básico da confiabilidade estrutural consiste na hipótese no qual a força resistente  $R$  (suprimento) seja maior do que a força solicitante  $S$  (demanda) ao longo da vida útil da estrutura. Devido às incertezas associadas à determinação das resistências e solicitações, a confiabilidade só pode ser tratada em termos probabilísticos (DINIZ, 2008).

No problema específico da acústica estrutural, este assunto pode ser modelado como “Nível aceitável de ruído” (suprimento),  $X$ , versus “Nível de pressão sonora gerado pelo ruído de impacto”,  $Y$  (demanda). No problema em questão,  $X$  é uma variável determinística, definida a partir da ABNT NBR15575-3, e  $Y$  é uma variável aleatória. Tem-se como objetivo, portanto, garantir que o evento ( $X > Y$ ) seja satisfeito, ou seja, que o desempenho acústico requerido seja satisfeito ao longo da vida útil do piso estrutural. Dessa forma:

$$P(X > Y) \rightarrow \text{Confiabilidade do piso estrutural}$$

$$P(X < Y) \rightarrow \text{Falha do piso estrutural}$$

O problema suprimento ( $X$ ) versus demanda ( $Y$ ) modelado é posto em um fluxograma e mostrado na Figura 8.1.

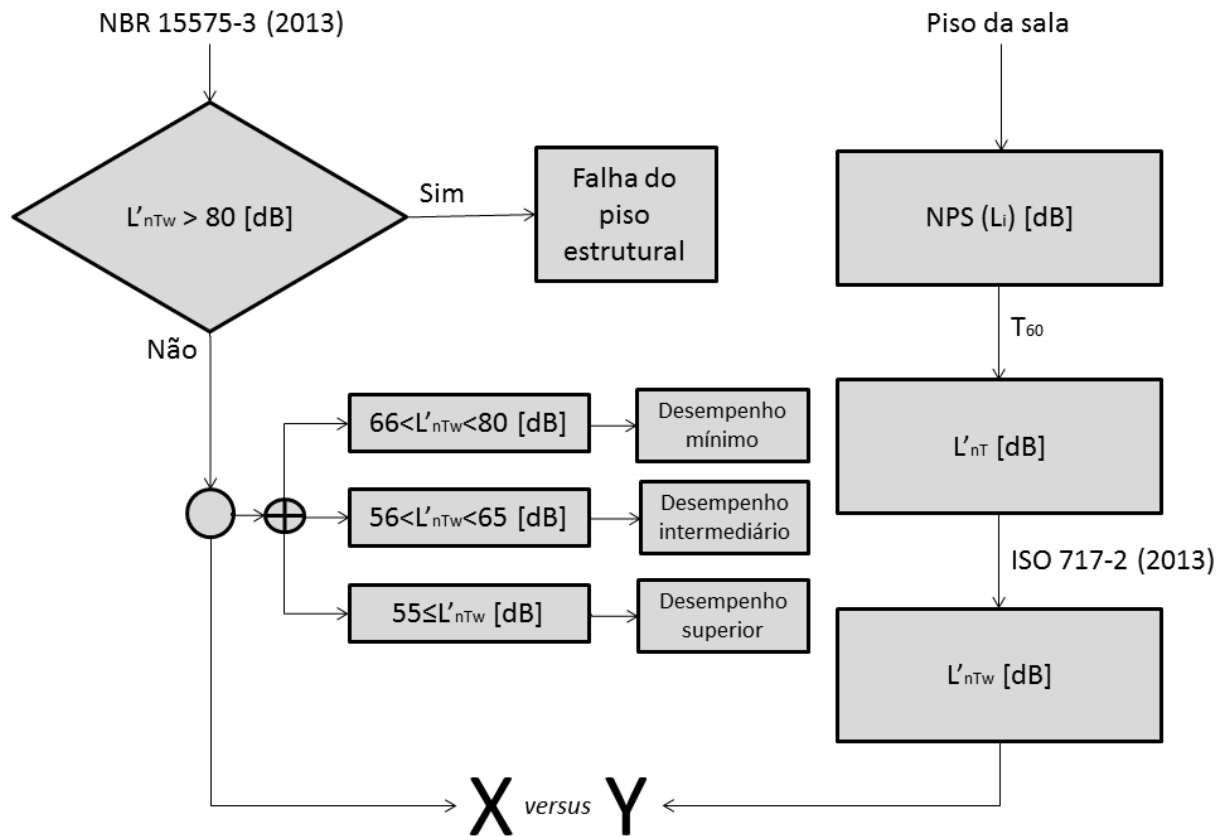


Figura 8. 1: Fluxograma para obtenção de parâmetros acústicos

Assumindo que  $F_X(x)$  (ou  $p_X(x)$ ) e  $F_Y(y)$  (ou  $p_Y(y)$ ) sejam conhecidos, a probabilidade de falha será dada pela equação (4.26). Se  $X$  e  $Y$  forem estatisticamente independentes, a probabilidade de falha é calculada através da equação (4.27).

Admite-se que  $\sum_{\text{todo } y} P(Y = y) = 1$ ; logo, a probabilidade de falha resulta em:

$$p_f = P(X < y) \quad (8.1)$$

no qual a probabilidade de falha se resume nos valores de níveis de pressão sonora de impacto que são maiores que o nível aceitável de ruído.

Neste capítulo, utilizaram-se as ferramentas da Teoria da Confiabilidade para análise do conforto acústico relacionado ao desempenho de pisos estruturais. De posse dos resultados das medições, utilizou-se a Norma Internacional ISO 717-2 (2013) como forma de classificação dos dados de tal maneira que sejam representados por um único parâmetro, o

Nível de Pressão Sonora de Impacto Padronizado Ponderado, ou simplesmente  $L'_{nT,w}$ . Tal parâmetro é utilizado pela Norma Brasileira NBR 15575-3 (2013) que estabelece os requisitos e critérios de desempenho nos quais se aplicam aos sistemas de pisos de edificações habitacionais. Realizou-se uma avaliação a respeito da metodologia utilizada para cálculo do parâmetro  $L'_{nT,w}$ . Para tanto, efetuou-se dois tipos de análise: a primeira relativa aos níveis de pressão sonora máximos e mínimos (seção 8.2) e a segunda referente à análise dos dados de medição de forma detalhada, a partir dos dados coletados a cada instante de medição (seção 8.3). As duas análises, via máximos e mínimos e detalhamento do espectro sonoro ao longo do tempo, foram realizadas para os ensaios dos pisos da suíte e da sala, respectivamente. Foram utilizadas as ferramentas da confiabilidade estrutural para análise e interpretação dos dados.

## 8.2 Ruído de impacto na suíte

Na Tabela 8.1 são mostrados os resultados das medições dos níveis de pressão sonora (NPS) decorrentes da aplicação da norma ISO 140-7 (1998) na suíte do apartamento receptor, destacando-se os valores máximos (em verde) e mínimos (em amarelo) de cada uma das dezesseis bandas de frequência de um terço de oitavas. São apresentados também a média, a variância e o desvio padrão para cada banda. Já a Tabela 8.2 e Figura 8.2 fornecem os níveis de pressão sonora de impacto (NPSI) padronizado calculados para os valores extremos (máximo e mínimo) e médios de cada banda de frequência de um terço de oitavas, juntamente com o tempo de reverberação e ruído de fundo da suíte receptora. Dessa forma, o conjunto de valores de  $L'_{nT}$  (max.) foi calculado considerando o NPS máximo de cada banda de frequência, e, de forma análoga obteve-se  $L'_{nT}$  (min.) considerando o NPS mínimo de cada banda de frequência de um terço de oitavas.

Tabela 8- 1: NPS em cada posição de medição na suíte receptora

| Nível de Pressão Sonora [dB]/Freq. [Hz] | 100  | 125  | 160  | 200  | 250  | 315  | 400  | 500  | 630  | 800  | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 |
|-----------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| NPS (1,1)                               | 60,4 | 70,2 | 71,9 | 72,6 | 74,8 | 74,2 | 73,5 | 75,0 | 74,1 | 74,4 | 75,7 | 73,6 | 71,0 | 69,2 | 67,1 | 65,7 |
| NPS (1,2)                               | 60,2 | 71,9 | 70,7 | 71,7 | 73,7 | 74,5 | 74,0 | 75,6 | 74,6 | 75,0 | 75,5 | 73,5 | 70,6 | 68,8 | 67,5 | 66,1 |
| NPS (1,3)                               | 61,4 | 71,3 | 70,5 | 73,1 | 73,9 | 71,1 | 73,1 | 74,6 | 74,8 | 75,6 | 75,3 | 73,5 | 70,8 | 68,5 | 67,2 | 66,0 |
| NPS (1,4)                               | 63,4 | 72,0 | 72,3 | 71,9 | 74,7 | 73,2 | 74,8 | 75,2 | 74,9 | 75,5 | 75,4 | 73,3 | 71,2 | 68,8 | 67,5 | 66,1 |
| NPS (2,1)                               | 59,3 | 69,5 | 70,0 | 72,8 | 73,6 | 72,4 | 70,7 | 70,3 | 69,2 | 69,8 | 70,8 | 67,2 | 64,8 | 64,3 | 62,3 | 59,3 |
| NPS (2,2)                               | 59,7 | 67,8 | 69,2 | 70,0 | 73,8 | 72,9 | 70,2 | 71,7 | 68,9 | 69,0 | 70,2 | 67,5 | 64,6 | 63,8 | 62,8 | 58,9 |
| NPS (2,3)                               | 56,7 | 67,0 | 67,4 | 72,6 | 72,4 | 70,3 | 69,8 | 70,0 | 69,2 | 69,8 | 70,8 | 67,8 | 66,3 | 64,0 | 62,3 | 59,4 |
| NPS (2,4)                               | 61,1 | 65,9 | 68,8 | 71,5 | 72,4 | 70,6 | 69,7 | 69,8 | 69,0 | 69,2 | 69,9 | 66,9 | 63,7 | 63,6 | 62,3 | 58,8 |
| NPS (3,1)                               | 62,7 | 69,7 | 70,9 | 78,0 | 75,7 | 74,4 | 75,2 | 74,4 | 74,3 | 73,8 | 73,5 | 71,6 | 70,0 | 68,1 | 65,2 | 63,8 |
| NPS (3,2)                               | 57,5 | 70,6 | 71,8 | 76,6 | 76,2 | 74,6 | 76,0 | 74,5 | 73,6 | 74,1 | 73,6 | 72,1 | 69,7 | 68,0 | 64,6 | 64,1 |
| NPS (3,3)                               | 63,6 | 71,1 | 72,3 | 77,6 | 79,3 | 75,6 | 77,2 | 74,7 | 73,7 | 74,1 | 73,5 | 72,4 | 70,0 | 68,5 | 65,9 | 64,2 |
| NPS (3,4)                               | 63,6 | 71,8 | 73,7 | 78,7 | 77,3 | 76,1 | 75,7 | 75,3 | 72,9 | 73,7 | 73,8 | 72,3 | 70,3 | 67,7 | 65,8 | 64,2 |
| NPS (4,1)                               | 58,0 | 68,2 | 65,6 | 69,4 | 71,8 | 73,4 | 73,3 | 73,9 | 72,1 | 73,3 | 72,9 | 70,5 | 69,5 | 67,4 | 64,7 | 63,2 |
| NPS (4,2)                               | 60,6 | 69,8 | 66,1 | 67,2 | 72,3 | 73,3 | 73,4 | 75,0 | 72,0 | 74,1 | 72,4 | 70,6 | 68,5 | 66,8 | 64,5 | 63,6 |
| NPS (4,3)                               | 59,0 | 69,7 | 64,6 | 70,5 | 73,6 | 71,8 | 74,9 | 74,3 | 73,5 | 74,2 | 72,1 | 70,2 | 69,2 | 66,9 | 64,7 | 63,6 |
| NPS (4,4)                               | 60,3 | 70,7 | 65,6 | 70,5 | 72,3 | 72,9 | 74,2 | 75,3 | 73,4 | 73,4 | 72,0 | 70,6 | 68,9 | 67,1 | 64,2 | 63,0 |
| <b>Máximo</b>                           | 63,6 | 72,0 | 73,7 | 78,7 | 79,3 | 76,1 | 77,2 | 75,6 | 74,9 | 75,6 | 75,7 | 73,6 | 71,2 | 69,2 | 67,5 | 66,1 |
| <b>Mínimo</b>                           | 56,7 | 65,9 | 64,6 | 67,2 | 71,8 | 70,3 | 69,7 | 69,8 | 68,9 | 69,0 | 69,9 | 66,9 | 63,7 | 63,6 | 62,3 | 59,3 |
| <b>Média</b>                            | 60,9 | 70,1 | 70,2 | 74,1 | 74,8 | 73,5 | 74,0 | 74,1 | 73,0 | 73,5 | 73,4 | 71,4 | 69,2 | 67,3 | 65,3 | 63,8 |
| <b>Variância</b>                        | 4,5  | 3,2  | 8,0  | 11,0 | 4,2  | 2,8  | 5,3  | 4,14 | 4,9  | 5,1  | 3,7  | 5,6  | 6,0  | 3,8  | 3,4  | 6,8  |
| <b>Desvio Padrão</b>                    | 2,1  | 1,8  | 2,8  | 3,3  | 2,1  | 1,7  | 2,3  | 2,0  | 2,2  | 2,3  | 1,9  | 2,4  | 2,5  | 2,0  | 1,8  | 2,6  |

Tabela 8- 2: Parâmetros representativos dos dados medidos na suíte receptora

| Frequência [Hz]                            | 100  | 125  | 160  | 200  | 250  | 315  | 400  | 500  | 630  | 800  | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 | 2500 | 3150 |
|--------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| NPSI – médio ( $L_i$ ) [dB]                | 60,9 | 70,1 | 70,2 | 74,1 | 74,8 | 73,5 | 74,0 | 74,1 | 73,0 | 73,5 | 73,4 | 71,4 | 69,2 | 67,3 | 65,3 | 63,8 |
| NPSI – máximo ( $L_{\max}$ ) [dB]          | 63,6 | 72,0 | 73,7 | 78,7 | 79,3 | 76,1 | 77,2 | 75,6 | 74,9 | 75,6 | 75,7 | 73,6 | 71,2 | 69,2 | 67,5 | 66,1 |
| NPSI – mínimo ( $L_{\min}$ ) [dB]          | 56,7 | 65,9 | 64,6 | 67,2 | 71,8 | 70,3 | 69,7 | 69,8 | 68,9 | 69,0 | 69,9 | 66,9 | 63,7 | 63,6 | 62,3 | 59,3 |
| NPSI padronizado ( $L'_{nT}$ ) [dB]        | 55,6 | 65,1 | 63,6 | 68,0 | 69,4 | 68,7 | 69,2 | 69,9 | 69,2 | 70,1 | 70,3 | 68,8 | 67,2 | 65,3 | 63,2 | 62,3 |
| NPSI padr. – Max. ( $L'_{nT} \max.$ ) [dB] | 58,3 | 66,9 | 67,3 | 72,7 | 74,0 | 71,3 | 72,4 | 71,5 | 71,1 | 72,2 | 72,7 | 71,0 | 68,6 | 67,2 | 65,5 | 64,1 |
| NPSI padr. – Min. ( $L'_{nT} \min.$ ) [dB] | 51,4 | 60,8 | 58,2 | 61,8 | 66,5 | 65,5 | 64,9 | 65,7 | 65,1 | 65,6 | 66,9 | 64,3 | 61,1 | 61,6 | 60,3 | 57,3 |
| Tempo de reverberação médio [s]            | 1,7  | 1,6  | 2,2  | 2,0  | 1,7  | 1,5  | 1,5  | 1,3  | 1,2  | 1,1  | 1,0  | 0,9  | 0,9  | 0,8  | 0,8  | 0,8  |
| Ruído de Fundo médio [dB]                  | 34,6 | 43,3 | 42,1 | 42,2 | 43,0 | 40,3 | 37,3 | 38,3 | 36,9 | 37,6 | 36,3 | 34,8 | 34,0 | 32,5 | 30,4 | 29,9 |

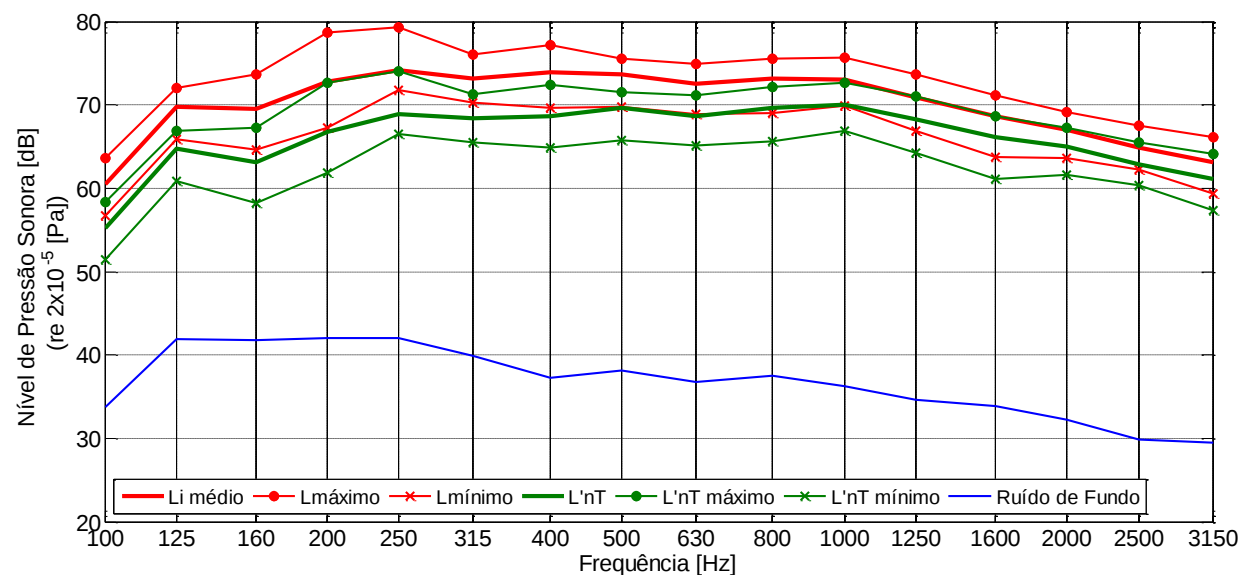


Figura 8.2: NPS ao se avaliar a média, máximo e mínimo dos resultados experimentais

Conforme calculado anteriormente, o nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado ( $L'_{nT,w}$ ) para a suíte receptora, segundo a norma ISO 717-2 (2013), foi de 72 [dB] (Figura 8.2). Tal norma utiliza a distribuição  $L'_{nT}$  (nível de pressão sonora de impacto padronizado) como base de cálculo do parâmetro único desejado. Dessa forma, segundo a norma ISO 140-7 (1998), o  $L'_{nT}$  é obtido através da média dos níveis de pressão sonora medidos em todas as posições de medição utilizando-se o tempo de reverberação medido no recinto em questão como fator de correção.

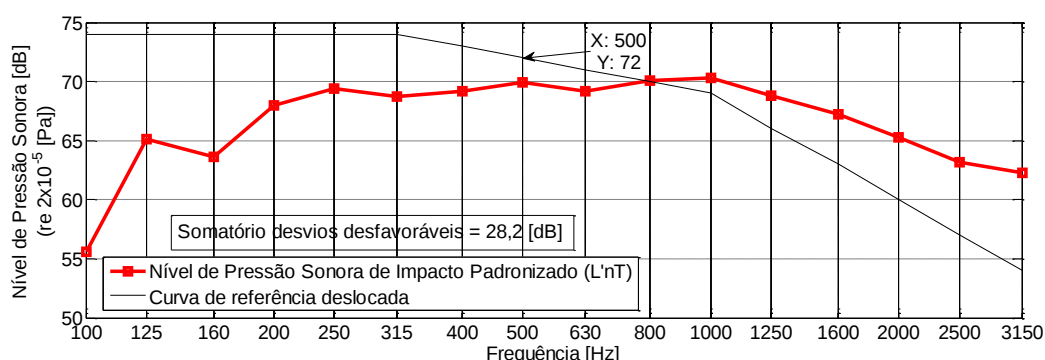


Figura 8.3: Aplicação da norma ISO 717-2 (2013) para cálculo do  $L'_{nT,w}$  para o piso da suíte

Acredita-se que a média foi utilizada como parâmetro representativo da quantidade total de amostras pelo fato de melhor representar a aleatoriedade da posição do usuário do sistema residencial, ou seja, do mesmo ter igual probabilidade em estar posicionado em qualquer ponto do cômodo em análise (para o caso em estudo, da suíte receptora).

Entretanto, ao analisar o grau de isolamento de um piso estrutural ao ruído de impacto, e, conseqüentemente, a proteção conferida aos ouvidos do usuário de um sistema residencial, sugere-se trabalhar com o pior caso. Dessa forma, o pior caso representaria a combinação de fonte-microfone que gerasse o maior nível de pressão sonora para cada banda de frequência de um terço de oitavas. A Tabela 8.1 mostra os níveis de pressão sonora máximos, destacados em verde, para cada faixa de frequência. Logo, o “nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado”<sup>1</sup> foi recalculado utilizando os valores máximos de cada faixa, e não

<sup>1</sup>O nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado representa uma condição específica de cálculo, no qual se utiliza como referência a média dos níveis de pressão sonora medidos. Por esse motivo, optou-se por mencioná-lo entre aspas ao calculá-lo utilizando os valores máximos de medição.

através dos valores médios como feito anteriormente. O resultado é dado na Figura 8.3.

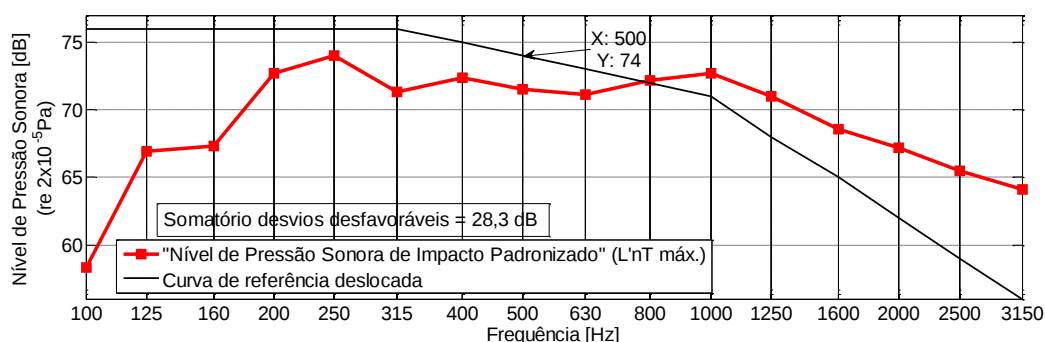


Figura 8.4: Aplicação da norma ISO 717-2 (2013) para cálculo do “nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado” do piso da suíte utilizando NPSI máx.

Observa-se um aumento do  $L'_{nT,w}$  de 71 para 74 [dB], como era esperado. Ao adotar o nível de pressão sonora máximo para cada faixa de frequência, considera-se a situação no qual o piso é menos restritivo quanto a passagem de energia acústica, refletindo na elevação de tal parâmetro. Diferentemente da abordagem prevista em norma, considera-se esse tratamento como o que reflete uma melhor representação dos dados medidos quando se tem por objetivo analisar a proteção conferida aos ouvidos dos usuários de sistemas residenciais.

De maneira complementar, calculou-se o “nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado” a partir dos valores mínimos (destacados em amarelo na Tabela 8-1) de nível de pressão sonora para cada faixa de frequência. O resultado é mostrado na Figura 8.4.

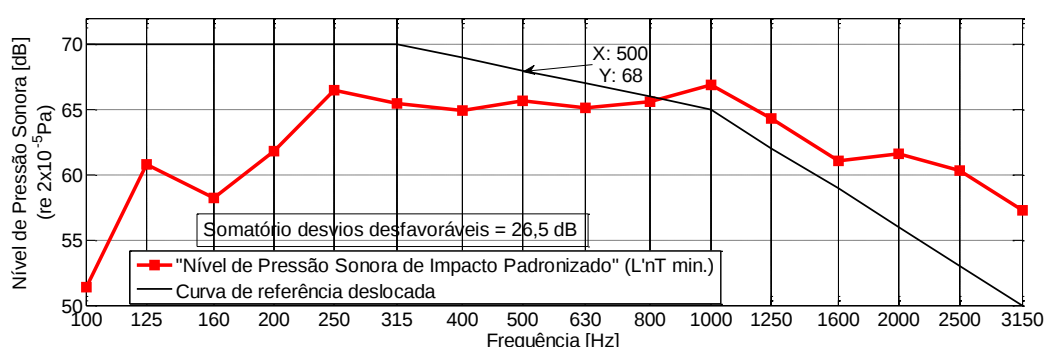


Figura 8.5: Aplicação da norma ISO 717-2 (2013) para cálculo do “ $L'_{nT,w}$ ” do piso da suíte utilizando NPSI min.

Nesse novo tipo de abordagem, o  $L'_{nT,w}$  foi de 68 [dB], indicando uma maior eficiência do piso para conter o ruído de impacto. Nesse sentido, tal procedimento indica que há situações piores, ou seja, outras combinações de fonte-medição nas quais o usuário recebe uma maior quantidade de nível de pressão sonora.

A NBR 15575-3 (2013) estabelece critérios eliminatórios e classificatórios quanto à avaliação de isolamento de pisos submetidos ao ruído de impacto. Segundo essa norma, se o piso apresentar  $L'_{nT,w}$  maior que 80 [dB], tal componente não cumpre com o requisito mínimo de isolamento, sendo “reprovado” nos ensaios. Por outro lado, se o  $L'_{nT,w}$  for menor que 80 [dB], o piso é considerado dentro dos limites previstos em norma, podendo ser classificado em três níveis de desempenho: mínimo, intermediário e superior.

Como mostrado anteriormente, o nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado do piso da suíte para os três métodos adotados estiveram dentro dos limites previstos em norma, ou seja, foram menores que 80 [dB], sendo todos classificados como nível de desempenho ‘mínimo’. Todavia, poderão ocorrer situações nas quais o nível de desempenho será alterado conforme as três metodologias sugeridas por esse trabalho (via NPS máximo, mínimo e médio), especificamente nessa seção.

Nos cinco gráficos seguintes (Figuras 8.6 a 8.10) são mostrados o Nível de Pressão Sonora de Impacto Padronizado ( $L'_{nT}$ ) calculado conforme a média dos valores medidos e as respectivas posições das curvas de referência deslocadas de acordo com cada limite (superior e inferior) do intervalo para diferentes níveis de desempenho previsto pela Norma NBR 15575-3 (2013).

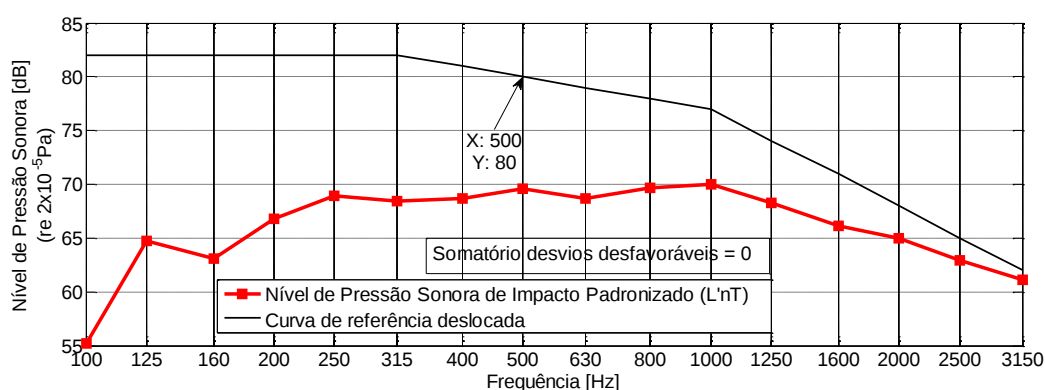


Figura 8.6: Representação do  $L'_{nT}$  e da curva de referência deslocada cujo NPS para a frequência de 500 [Hz] é de 80 [dB]

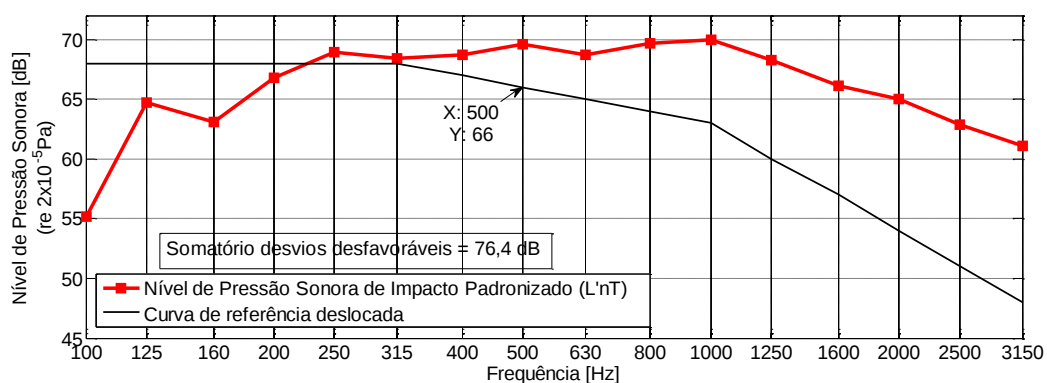


Figura 8.7: Representação do  $L'_{nT}$  e da curva de referência deslocada cujo NPS para a frequência de 500 [Hz] é de 66 [dB]

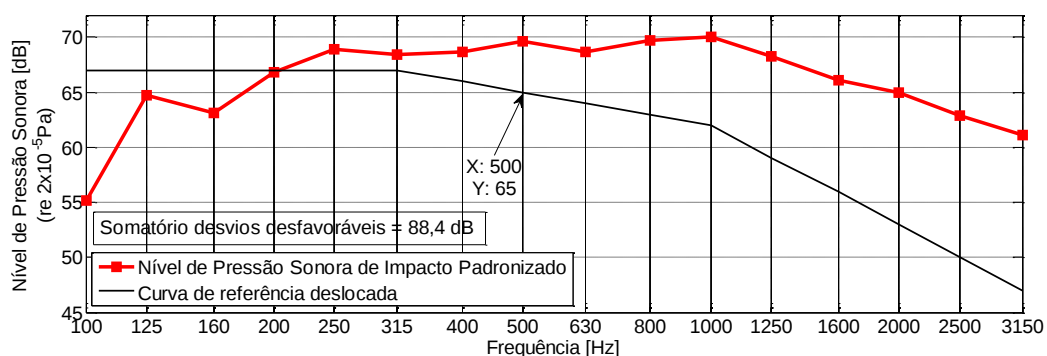


Figura 8.8: Representação do  $L'_{nT}$  e da curva de referência deslocada cujo NPS para a frequência de 500 [Hz] é de 65 [dB]

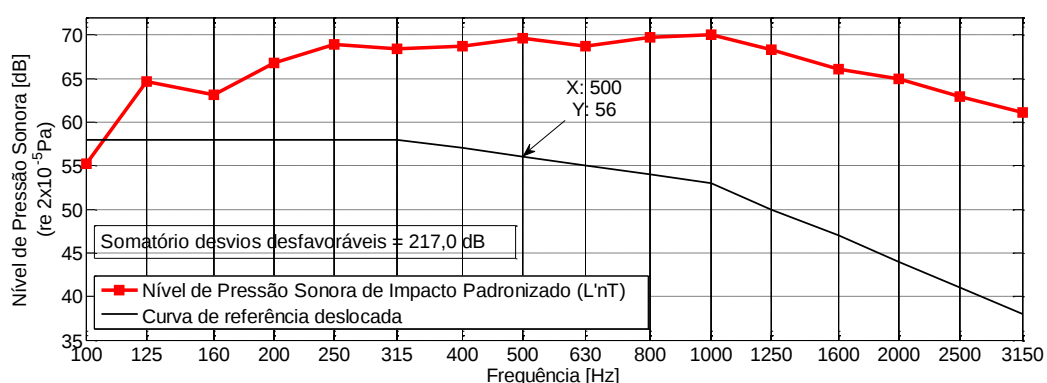


Figura 8.9: Representação do  $L'_{nT}$  e da curva de referência deslocada cujo NPS para a frequência de 500 [Hz] é de 56 [dB]

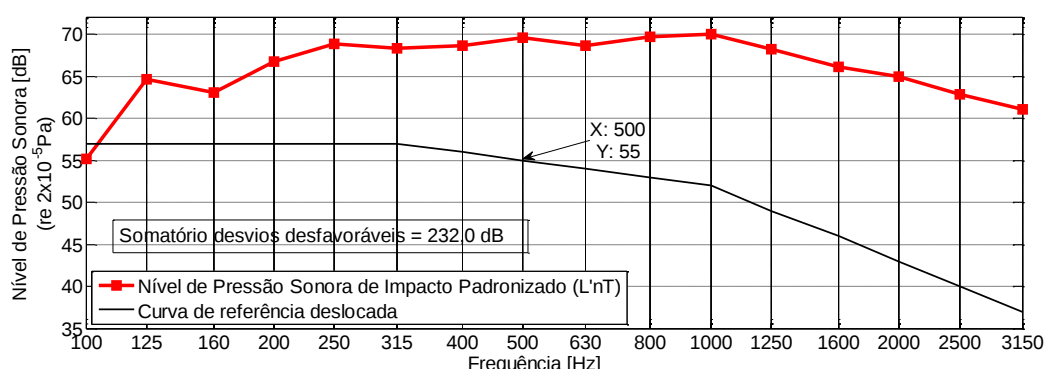


Figura 8.10: Representação do  $L'_{NT}$  e da curva de referência deslocada cujo NPS para a frequência de 500 [Hz] é de 55 [dB]

A Tabela 8-3 quantifica os parâmetros analisados nos cinco gráficos mostrados nas Figuras 8.5 a 8.9. Para cada limite, superior e inferior, de cada intervalo de desempenho, foram atribuídos determinados julgamentos. Os limites são: 66 a 80 [dB], para desempenho mínimo; 56 a 65 [dB], para desempenho intermediário e abaixo de 55 [dB] para desempenho superior. Os dados utilizados para comparação foram: violar ou não violar a curva de referência (violar significa ter pelo menos um desvio desfavorável); quantidade de bandas de frequência que violaram; parte do todo (porcentagem e fração) das frequências que violaram e somatório dos desvios desfavoráveis.

Tabela 8- 3: Dados comparativos entre a ISO 717-2 (2013) e a NBR 15575-3 (2013) na suíte receptora

| Parâmetros de análise/Limites para " $L'_{NT,w}$ " [dB] | 80   | 66    | 65    | 56    | 55    |
|---------------------------------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|
| Violou (V) ou Não Violou (NV)                           | NV   | V     | V     | V     | V     |
| Nº de bandas de freq. que violaram                      | 0    | 12    | 12    | 15    | 15    |
| Fração das frequências que violaram                     | 0/16 | 12/16 | 12/16 | 15/16 | 15/16 |
| Porcentagem (%) das frequências que violaram            | 0    | 75    | 75    | 93,75 | 93,75 |
| Somatório dos desvios desfavoráveis [dB]                | 0    | 76,4  | 88,4  | 217,0 | 232,0 |

Considerou-se que cada frequência violada pela curva de referência possui pesos iguais, uma vez que a sensação maior de desconforto por parte dos ouvidos humanos é atribuída às médias e altas frequências, já sendo representada pela inclinação da curva de referência no qual impõe uma situação menos restritiva às médias e altas frequências. Conforme será abordado

no próximo capítulo, ensaios experimentais realizados via *Método de Comparação em Pares* atribuem uma sensação maior de desconforto às médias frequências.

Segundo a Tabela 8-3, observa-se que o  $L'_{nT,w}$  varia conforme o valor máximo do somatório de desvios desfavoráveis estabelecido. O valor dado pela norma internacional ISO 717-2 (2013) como limite superior para o somatório dos desvios desfavoráveis é de 32 [dB]. Para uma normatização mais rígida tal valor precisaria ser reduzido e, por consequência, para uma normatização menos rígida, tal valor necessitaria ser aumentado.

### 8.3 Ruído de impacto na sala

Ao se calcular o nível de pressão sonora do piso da sala, classificando-o segundo uma faixa de desempenho (seção 6.1.2), considerou-se a média dos valores de NPS descritos no tempo. Ou seja, para uma determinada medição, foi registrada a média dos trinta valores de nível de pressão sonora em cada banda de frequência, uma vez que o tempo de cada medição foi de trinta segundos e o NPS é registrado a cada segundo. Se para cada combinação de medição fonte-microfone, tem-se trinta valores de NPS por banda de frequência, ao todo, serão totalizados 480 conjuntos de 16 valores de NPS (combinações fonte-microfone) correspondendo à faixa de frequências de 100 a 3150 [Hz]. Os 480 conjuntos de níveis de pressão sonora medidos ( $L_i$ ) foram convertidos em 480 conjuntos de níveis de pressão sonora de impacto padronizado ( $L'_{nT}$ ), utilizando-se o tempo de reverberação da sala como fator de correção, conforme a Equação (2.10). O conjunto de valores para  $L'_{nT}$ , de acordo cada combinação fonte-microfone, são mostrados no Apêndice D.

Ao analisar os dados, foi calculado o nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado ( $L'_{nT,w}$ ) para cada conjunto de  $L'_{nT}$ , de acordo a metodologia descrita pela ISO 717-2 (2013). Ressalta-se que os valores  $L'_{nT,w}$  gerados são todos números inteiros, uma vez que o procedimento de obtenção de tal parâmetro implica numa forma de arredondamento de valores reais em um único parâmetro descrito por um valor inteiro. Os resultados para o nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado também são mostrados ao longo das 16 tabelas (Tabelas D-1 a D-16) do Apêndice D.

A Tabela 8.4 apresenta a frequência absoluta, relativa e percentual associada à variável  $L'_{nT,w}$ ; observa-se que a frequência em termos percentuais representa a probabilidade associada a cada valor assumido por  $L'_{nT,w}$ . A amplitude total foi de 13 [dB] (69 [dB] – 56 [dB]).

Tabela 8- 4: Distribuição de frequências

| $L'_{nT,w}$  | Frequência absoluta ( $F_i$ ) | Frequência relativa ( $F_{ri}$ ) | Frequência percentual ( $F_{pi}$ ) (%) | Frequência acumulada |
|--------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|----------------------|
| 56           | 1                             | 0,0021                           | 0,21                                   | 0                    |
| 57           | 1                             | 0,0021                           | 0,21                                   | 1                    |
| 58           | 4                             | 0,0083                           | 0,83                                   | 2                    |
| 59           | 4                             | 0,0083                           | 0,83                                   | 6                    |
| 60           | 10                            | 0,0208                           | 2,08                                   | 10                   |
| 61           | 26                            | 0,0542                           | 5,42                                   | 20                   |
| 62           | 48                            | 0,1000                           | 10,00                                  | 46                   |
| 63           | 67                            | 0,1396                           | 13,96                                  | 94                   |
| 64           | 41                            | 0,0854                           | 8,54                                   | 161                  |
| 65           | 29                            | 0,0604                           | 6,04                                   | 202                  |
| 66           | 56                            | 0,1167                           | 11,67                                  | 231                  |
| 67           | 111                           | 0,2313                           | 23,13                                  | 287                  |
| 68           | 80                            | 0,1667                           | 16,67                                  | 398                  |
| 69           | 2                             | 0,0042                           | 0,42                                   | 478                  |
| 70           | 0                             | 0                                | 0                                      | 480                  |
| <b>Total</b> | 480                           | 1,00                             | 100                                    |                      |

Na figura 8.10, é mostrado o histograma para o nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado do piso da sala. Observa-se uma distribuição assimétrica e bimodal (moda inferior igual a 63 e moda superior igual a 67). Para essa distribuição, as medidas de tendência central ou de posição são: média, 64,97 e mediana, 66. O desvio padrão é de 2,56, variância igual a 6,56 e coeficiente de variação assume o valor de 3,9432%.

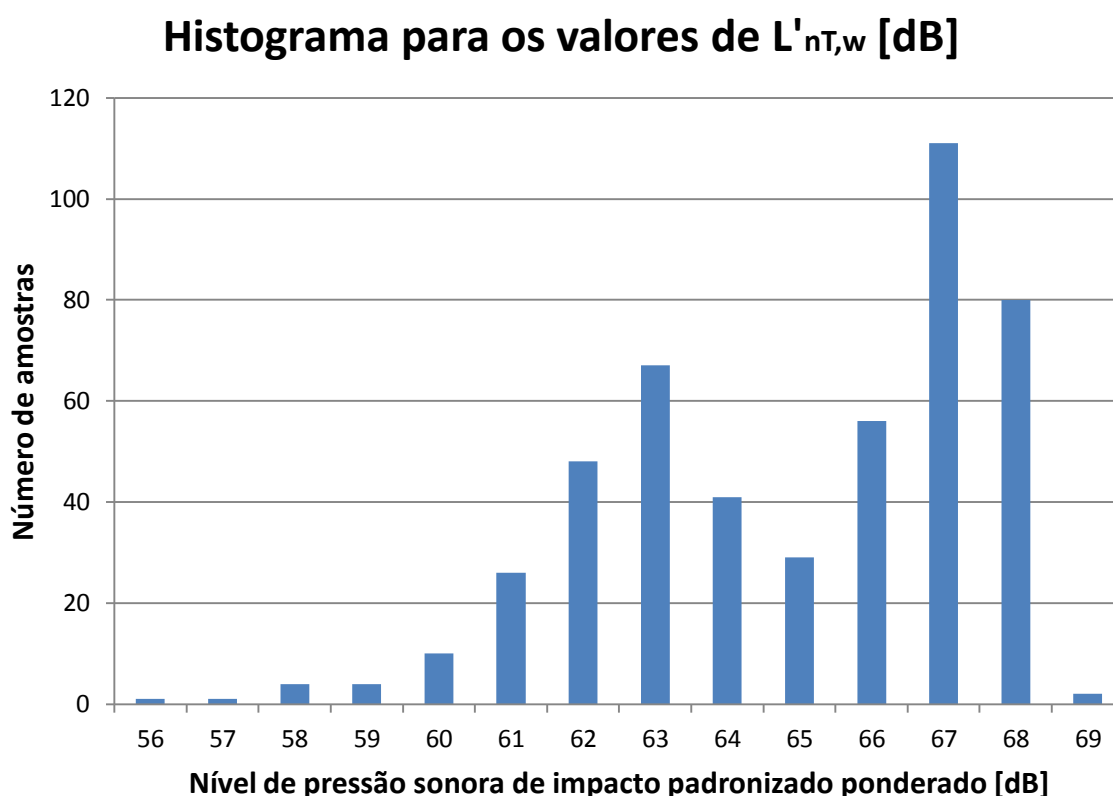


Figura 8.11: Histograma

Conforme já mencionado, a distribuição de probabilidade que apresenta duas modas distintas é chamada de bimodal. As duas modas aparecem como picos distintos (máximos locais) na função massa de probabilidade. Em uma distribuição bimodal frequentemente há uma mistura de duas populações estatísticas.

Com o objetivo de identificar o fator que influencia na ocorrência das duas modas, foi confeccionada a Tabela 8-5 que mostra o número de ocorrências para  $L'_{nT,w}$  igual a 63 e 67, valores correspondentes as duas modas encontradas, de acordo à posição fonte-medição. Observa-se que a posição com o maior número de ocorrências de  $L'_{nT,w}$  igual a 63 [dB] foi a (3,2), com 19 ocorrências. Em contrapartida, as posições (4,3) e (4,4), juntas, responderam por 60 ocorrências de  $L'_{nT,w}$  igual a 67 [dB], sendo 30 ocorrências de cada posição. As posições (1,2), (1,3), (1,4), (3,1), (3,2) e (3,3) foram responsáveis por resultarem em um  $L'_{nT,w}$  igual a 63 [dB], valor correspondente a moda inferior. Já as posições (2,3), (2,4), (4,2), (4,3) e (4,4) responderam pela quase totalidade das ocorrências de  $L'_{nT,w}$  igual a 67 [dB], valor correspondente a moda superior. De forma geral, de acordo às localizações das medições

dadas pela Figura 5.16, nota-se que posições de fonte próximas à fachada lateral do prédio (posições 2 e 4) geram níveis de pressão sonora maiores do que pontos de fonte mais afastados da lateral do prédio (posições 1 e 3). Isso pode ser explicado pelo fato dos pontos 2 e 4 apresentarem menor quantidade de caminhos de transmissão de energia quando incidido sobre eles uma fonte de excitação, em relação aos pontos 1 e 3.

Para os pontos no qual a medição ocorreu na posição logo abaixo à posição de fonte, verificou-se que os níveis de pressão sonora, em ordem crescente, foram para as posições: (3,3), (1,1), (4,4) e (2,2). Evidencia-se, dessa forma, a influência das junções na transmissão e propagação de ruído estrutural.

Tabela 8- 5: Número de ocorrências para  $L'_{nT,w}$  igual a 63 e 67 [dB] de acordo à posição de medição

| <b>Posição<br/>Fonte-medição</b> | <b>Nº de ocorrências<br/><math>L'_{nT,w} = 63[\text{dB}]</math></b> | <b>Nº de ocorrências<br/><math>L'_{nT,w} = 67 [\text{dB}]</math></b> |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| (1,1)                            | 0                                                                   | 0                                                                    |
| (1,2)                            | 8                                                                   | 0                                                                    |
| (1,3)                            | 13                                                                  | 0                                                                    |
| (1,4)                            | 7                                                                   | 0                                                                    |
| (2,1)                            | 0                                                                   | 1                                                                    |
| (2,2)                            | 0                                                                   | 1                                                                    |
| (2,3)                            | 0                                                                   | 23                                                                   |
| (2,4)                            | 0                                                                   | 13                                                                   |
| (3,1)                            | 12                                                                  | 0                                                                    |
| (3,2)                            | 19                                                                  | 0                                                                    |
| (3,3)                            | 8                                                                   | 0                                                                    |
| (3,4)                            | 0                                                                   | 0                                                                    |
| (4,1)                            | 0                                                                   | 0                                                                    |
| (4,2)                            | 0                                                                   | 13                                                                   |
| (4,3)                            | 0                                                                   | 30                                                                   |
| (4,4)                            | 0                                                                   | 30                                                                   |

A Tabela 8-4 e Figura 8.12 mostram a distribuição de frequências acumuladas para os valores  $L'_{nT,w}$  obtidos. A distribuição acumulada retorna a quantidade de ocorrências que acontecem abaixo de cada valor  $L'_{nT,w}$  considerado.

O procedimento da ISO 717-2 (2013) transforma, artificialmente, variáveis contínuas em variáveis discretas. Dessa forma, a Figura 8.13 mostra a função massa de probabilidade da

variável aleatória discreta  $L'_{nT,w}$ , representando as probabilidades associadas a cada valor discreto da V.A..

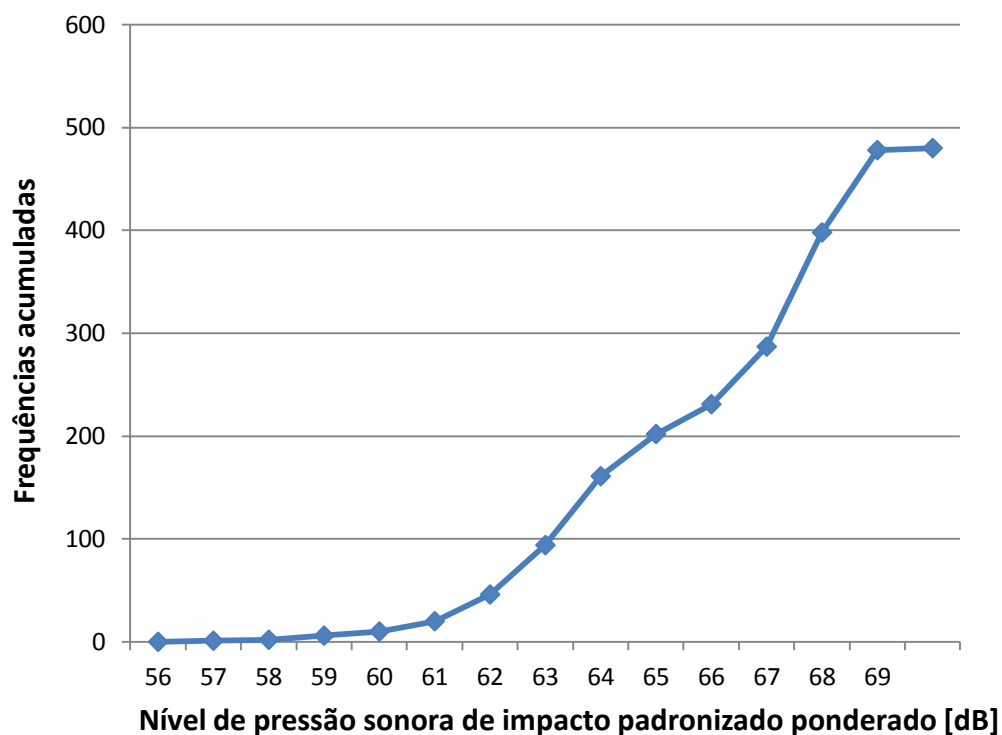


Figura 8. 12: Gráfico de frequências acumuladas

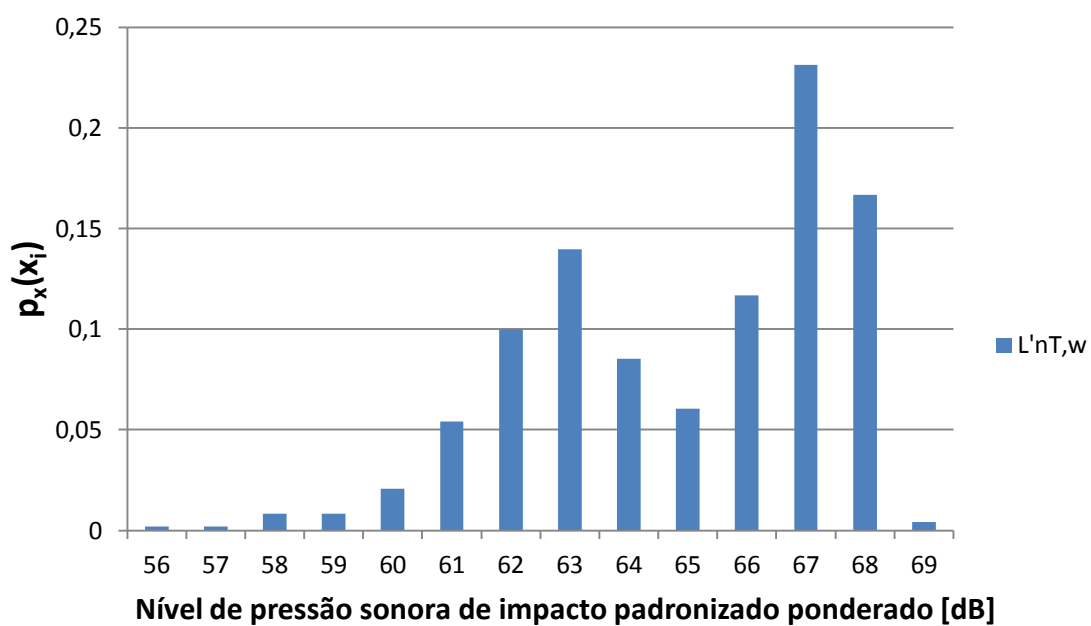


Figura 8. 13: Função massa de probabilidade da variável  $L'_{nT,w}$

A distribuição de probabilidade é uma regra que descreve as medidas de probabilidade associadas a todos os valores de uma determinada variável aleatória (V.A.), tal como evidenciado pela equação (4.1). A V.A. representa o conjunto dos valores associados a variável de interesse. A distribuição de probabilidade pode ser representada pela *função de distribuição acumulada*, dada pela equação 4.2, no qual  $X$  discreto está associado a valores discretos de  $x_i$ .

A função massa de probabilidade (Figura 8.13) pode ser descrita como pela equação 4.4. Se  $X$  discreto, a distribuição de probabilidade também pode ser descrita em termos da *função massa de probabilidade*, tal como mostrado pela equação 4.3.

Pela Tabela 8-4 e gráfico de frequências acumuladas apresentado na Figura 8.11, nota-se que, segundo a NBR 15575-3 (2013), o piso ensaiado encontra-se em duas classes de desempenho: mínimo e intermediário. Sendo assim, valores de  $L'_{nT,w}$  na faixa de 56 a 65 [dB] correspondem a um desempenho “intermediário”. A frequência acumulada associada a tal atribuição é dada por 231. Logo, a probabilidade de desempenho “intermediário” é igual a 231/480 ou 48,125%. Por outro lado, níveis de pressão sonora de impacto padronizado ponderado dentro da faixa de 66 a 80 [dB] representam um desempenho mínimo para o piso ensaiado. A frequência acumulada associada a esse valor é de 249. Analogamente, a probabilidade de desempenho “mínimo” desse piso é de 249/480 ou 51,875%. A probabilidade de desempenho “superior”, neste caso, foi de zero.

Para o caso avaliado, nota-se uma pequena preponderância da classe de desempenho “mínimo”. Porém, ao trabalhar com valores médios ao longo do tempo de medição, segundo especificação das normas ISO 140-7 (1998) e ISO 717-2 (2013) obteve-se um desempenho “intermediário”, contrapondo à análise detalhada realizada.

Ao considerar valores máximos e mínimos ao longo de cada banda de frequência, conforme abordado na seção anterior, os valores de  $L'_{nT,w}$  encontrados foram de 70 e 56 [dB], respectivamente. Tal resultado é descrito na Tabela D-17 do Apêndice D.

O valor de  $L'_{nT,w \text{ (min)}}$  de 56 [dB] corresponde a um desempenho de piso “intermediário”, enquanto o de 70 [dB] ( $L'_{nT,w \text{ (max)}}$ ) corresponde a um desempenho “mínimo”. A análise via “máximos” corrobora com a classificação do desempenho através do detalhamento do nível

de pressão sonora ao longo do tempo descrita nesta seção, uma vez que os resultados evidenciam uma menor restrição quanto ao isolamento ao ruído de impacto do piso ensaiado e refletem uma representação que mais se aproxima ao ensaio de campo realizado.

Ao se avaliar o nível de desempenho do piso ensaiado, considerou-se a aleatoriedade do receptor, ou seja, do mesmo ter igual probabilidade em se encontrar em qualquer posição da sala receptora. Dessa forma, diferentes posições de fonte e microfone foram tratadas da mesma maneira, sob as mesmas circunstâncias, haja vista o objetivo comum do experimento: avaliar o grau de isolamento ao ruído de impacto do piso ensaiado.

Os modelos desenvolvidos nos capítulos 7 e 8 fazem referência a uma análise objetiva do nível de pressão sonora/vibração gerada por uma fonte de excitação localizada (máquina padrão de impacto). Tais análises são importantes para quantificação do ruído estrutural, relacionando-o, na maioria das vezes, à influência que ele exerce na percepção subjetiva dos usuários de sistemas residenciais de múltiplos pavimentos. Entretanto, a análise subjetiva da percepção do ruído estrutural também constitui uma ferramenta importante ao se avaliar a influência do ruído estrutural na sensação de conforto acústico, e, para tanto, será abordada no próximo capítulo.

# 9

## SUMÁRIO, CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 9.1 Sumário

Nesta dissertação, a análise vibroacústica entre duas unidades residenciais adjacentes foi objeto de estudo. Basicamente, o trabalho foi dividido em cinco etapas: i) introdução (capítulo 1), ii) realização de revisão bibliográfica (capítulos 2, 3 e 4), iii) realização do procedimento experimental e análise dos resultados (capítulos 5 e 6), iv) implementação de modelos e análise de critérios normativos (capítulos 7 e 8) e, por último, v) conclusões e sugestões para trabalhos futuros que serão abordadas nesse capítulo (capítulo 9).

Na Introdução, foi realizada uma contextualização acerca do problema, abordando os aspectos que tangem à propagação de ruído e vibração em sistemas residenciais de múltiplos pavimentos. Foram mostrados os objetivos (geral e específicos) do trabalho, bem como a justificativa, breve descrição da metodologia aplicada e estrutura da dissertação.

Quanto à Revisão Bibliográfica, foram confeccionados três capítulos que tratam dos seguintes temas: Acústica das Edificações, Ruído/Vibração Estrutural e Normalização (capítulo 2), Análise Estatística de Energia (capítulo 3) e Conceitos Estatísticos e Teoria da Confiabilidade (capítulo 4).

O procedimento experimental realizado foi descrito ao longo do capítulo 5. Foram detalhados o objeto de estudo, equipamentos e softwares utilizados, bem como a metodologia usada nos cinco ensaios *in situ*: medição do ruído de impacto em cômodos sobrepostos (ensaio 1) e em cômodos adjacentes (ensaio 2); medição da vibração em cômodos adjacentes (ensaio 3) e em paredes e tetos da interface de três cômodos (ensaio 4); e, por último, medição do tempo de reverberação dos ambientes analisados (ensaio 5).

No capítulo 6, foram realizadas análises dos dados coletados com o procedimento experimental descrito no capítulo 5. A NBR 15575-3 (2013) foi utilizada para classificação dos pisos da sala e da suíte quanto ao seu desempenho de isolamento acústico. A transmissão de energia vibroacústica foi avaliada a partir do cálculo de parâmetros únicos de isolamento em cômodos adjacentes devido à geração do ruído de impacto na sala emissora.

No capítulo 7, foi desenvolvido um modelo vibroacústico através da metodologia de Análise Estatística de Energia para predição do fator de acoplamento estrutura-fluído e fluído-estrutura. Por fim, no capítulo 8 foram discutidos os critérios de decisão para desempenho acústico de pisos através da aplicação de conceitos estatísticos e ferramentas da confiabilidade.

## **9.2 Considerações finais**

Há diferenças entre desempenho de um piso e conforto em um ambiente, muito embora, um dependa do outro; há inúmeras reclamações de moradores a respeito dos seus vizinhos por ouvirem discussões e impactos. O conforto acústico vai além do desempenho das paredes e envolve privacidade, no qual a representação da subjetividade do termo depende do grau de robustez do modelo para representar o fenômeno físico. O conforto acústico em uma edificação está intimamente ligado à inteligibilidade da fala e não somente ao isolamento objetivo da partição. Posto isso, assume-se que o valor do isolamento de sistemas estruturais residenciais é um fator fundamental na avaliação final do conforto. Ao ser mencionado nessa dissertação, sua análise se restringe à análise dos parâmetros acústicos aqui mencionados, numa relação inversamente proporcional entre ruído e conforto acústico.

O ruído de impacto tem sido fonte de contantes incômodos por parte de usuários de edificações de múltiplos pavimentos. No Brasil, apesar de pouco difundido, esforços tem sido registrados nos últimos anos no intuito de estabelecer critérios mínimos de desempenho de sistemas estruturais em edificações. A despeito, a norma NBR 15575-3 (2013), mesmo possuindo limites pouco restritivos, 80 e 55 [dB] para as duas categorias de elementos consideradas, ainda é a legislação vigente para o atual cenário construtivo de desempenho de pisos de edificações. Faz-se necessário a sua veemente aplicação, bem como sua constante

atualização à medida que o avanço de técnicas construtivas e desenvolvimento de materiais resilientes para pisos flutuantes se fazem necessários.

A análise vibroacústica de pisos e paredes é essencial para avaliação do conforto acústico de usuários de sistemas residenciais de múltiplos pavimentos, uma vez que o ruído estrutural gerado em um cômodo se propaga para os demais espaços adjacentes. Vibração e nível de pressão sonora, neste caso, estão diretamente relacionados, uma vez que a excitação localizada gera vibração estrutural, ocasionando transmissão de ruído estrutural para diversos sistemas estruturais adjacentes. Devido ao acoplamento fluído-estrutura, a energia acústica emerge em forma de som em distintos ambientes adjacentes ao da aplicação da fonte de impacto padrão, conforme pode ser constatado pela Tabela 6-20. Logo, faz-se necessário o estudo da transmissão vibroacústica entre sistemas estruturais adjacentes, dada uma fonte de excitação de impacto, uma vez que as condições de salubridade e conforto dos usuários de sistemas residenciais são almejadas.

### 9.3 Conclusões

Neste trabalho, constatou-se que os pisos de concreto ensaiados possuem bom desempenho quanto ao isolamento de ruído aéreo e estrutural, atendendo a norma NBR 15575-3 (2013) quanto ao isolamento de ruído estrutural. Para o piso da sala, o nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado ( $L'_{nT,w}$ ) encontrado foi de 65 [dB], enquadrando-se na faixa “intermediária” de desempenho. Já para o piso da suíte, o  $L'_{nT,w}$  foi de 72 [dB], correspondendo a um desempenho “mínimo”. A discrepância observada entre os dois valores se deu em função de valores diferentes tanto do nível de pressão sonora médio ( $L_i$ ) quanto do tempo de reverberação ( $T_{60}$ ). Para valores maiores de  $T_{60}$ , o nível de pressão sonora de impacto padronizado ( $L'_{nT}$ ) diminui, ocorrendo o mesmo para o valor de  $L'_{nT,w}$ . Outro aspecto relevante observado foi o maior grau de incertezas registradas nas baixas frequências, representadas por maiores valores de desvios padrão, o que foi condizente com trabalhos já publicados na literatura.

Em relação ao isolamento de ruído aéreo, o piso de concreto tem a propriedade de bloquear o som, uma vez que o concreto apresenta um valor de densidade representativo. Seu desempenho, porém, varia conforme a espessura da camada de concreto, tipo de acabamento

do piso, textura, porosidade, dentre outros fatores. A clausura utilizada no ensaio de ruído de impacto mostrou-se eficiente para isolamento de ruído aéreo, mesmo sendo demonstrado que a maior parcela do ruído gerado pela máquina padrão de impacto se deve ao ruído estrutural. Apesar dos resultados satisfatórios quanto ao isolamento acústico de piso de concreto, recomenda-se a utilização de materiais do tipo resiliente (lã de vidro, lã de rocha, polietileno, etc.) para composição de pisos estruturais. Tal material tem por objetivo aumentar o amortecimento do sistema, maximizando a eficiência quanto ao isolamento de ruído de impacto do piso, reduzindo o nível de pressão sonora na suíte e priorizando o conforto de seus usuários.

Quanto ao parâmetro único que descreve o comportamento de pisos de cômodos adjacentes devido à geração de impacto, obteve-se o seguinte resultado, em ordem crescente de valores: Banheiro 1 ( $L'_{nT,w (adj.)} = 50$  [dB]), Quarto 2 ( $L'_{nT,w (adj.)} = 51$  [dB]), Suíte ( $L'_{nT,w (adj.)} = 54$  [dB]), Quarto 3 ( $L'_{nT,w (adj.)} = 56$  [dB]), Banheiro 2 ( $L'_{nT,w (adj.)} = 58$  [dB]) e Cozinha ( $L'_{nT,w (adj.)} = 63$  [dB]). A princípio, o fator distância é a principal razão para as divergências apresentadas. Cômodos mais próximos ao recinto no qual a excitação é aplicada (sala emissora) irão apresentar níveis de pressão sonora – e consequentemente  $L'_{nT,w (adj.)}$  – maiores. Entretanto, não somente a distância é o elemento que influencia na obtenção destes resultados, como também os tipos de interconexão entre elementos estruturais, o posicionamento da fachada lateral do apartamento, os diferentes tipos de materiais constituintes dos sistemas estruturais, dentre outros. Constatou-se a elevada capacidade que o ruído estrutural tem de se irradiar e emergir energia em forma de som para os ambientes adjacentes à estrutura que sofre à ação da excitação de impacto.

Ao se considerar o modelo vibroacústico de transmissão direta via análise estatística de energia, percebe-se que os fatores de acoplamento estimados foram divergentes. O acoplamento fluído-estrutura registrado foi maior que o acoplamento estrutura-fluído, indicando maior capacidade de transmissão de energia do piso para a sala do que da sala para o piso, o que é justificável, uma vez que o ruído estrutural do piso irradia-se com maior facilidade para os ambientes adjacentes do que o ruído aéreo gerado pela sala transmite energia para as estruturas ao seu redor. Ao funcionar como barreira para o ruído aéreo, o piso estrutural atua de forma mais eficaz na reflexão do que na transmissão de ondas sonoras, o que é revelado pelo elevado fator de acoplamento registrado.

Através de uma análise probabilística, e com o auxílio das ferramentas da confiabilidade, os critérios de decisão quanto à avaliação do desempenho de pisos estruturais foram analisados. Duas análises distintas foram realizadas: a primeira para o piso da suíte e a segunda para o piso da sala. A norma ISO 140-7 (1998) recomenda o cálculo do parâmetro  $L_i$ , dado pela média das pressões sonoras medidas em várias posições. Implicitamente, ao utilizar a média como parâmetro representativo da distribuição, a aleatoriedade do receptor é o fator levado em consideração. No entanto, para o cálculo de desempenho de pisos, no qual a proteção conferida aos ouvidos dos usuários de sistemas residenciais é fundamental, o parâmetro  $L_i$  é inapropriado para a ocasião. Dessa forma, sugere-se trabalhar com o pior caso, ou seja, aquele que gera o maior nível de pressão sonora em cada banda de frequência para cálculo do parâmetro  $L'_{nT,w}$  que é descritor de nível de desempenho de pisos. De forma complementar, ao considerar valores mínimos em cada banda de frequência para cálculo do  $L'_{nT,w}$ , reforça-se o fato de haver combinações fonte-microfone mais desconfortáveis, ou seja, que geram maior nível de pressão sonora para o receptor. Em relação a norma ISO 717-2 (2013), o valor de 32 [dB] atribuído ao somatório dos desvios desfavoráveis foi questionado. Para uma regulamentação mais restritiva, o valor padrão deve ser reduzido, e vice-versa. Tais análises foram realizadas considerando ensaio realizado nas suítes.

De forma complementar, para o piso da sala foi realizada uma análise detalhada dos níveis de pressão sonora tomados ao longo de cada instante de tempo. Os dados foram tratados de forma estatística, gerando 480 níveis de pressão sonora de impacto padronizado ponderado ( $L'_{nT,w}$ ) ao longo de 16 medições de 30 segundos. Obteve-se leve inclinação do piso ao desempenho “mínimo” contrapondo o resultado obtido com o método normativo. Reforça-se a necessidade das medidas, principalmente as de campo, virem acompanhadas de valores de dispersão, usualmente dados pelo desvio padrão, fato este que não consta na norma NBR 15575-3 (2013).

Os resultados encontrados são úteis, não só pelo fato de possibilitar a avaliação da transmissão de energia sonora e de vibração em cômodos do apartamento receptor, mas também por permitir o desenvolvimento de regimes de controle de ruído mais efetivos e com atenção especial para as faixas de frequências que geram a sensação de desconforto para os usuários de sistemas residenciais.

## 9.4 Sugestões para trabalhos futuros

- Desenvolver mecanismos que tratem adequadamente as incertezas presentes em projetos acústicos, tais como a aplicação da norma ISO 717-2 (2013) para geração de um parâmetro único de desempenho;
- Alterar a fonte de excitação para cálculo do tempo de reverberação de recintos;
- Expandir a utilização da Análise Estatística de Energia para uma quantidade maior de subsistemas;
- Aplicar as análises e modelos desenvolvidos para pisos estruturais de diferentes composições, formatos, tipologias, materiais, acabamentos, etc;

# 10

## REFERÊNCIAS

ANG, A. H.; TANG, W. H. *Probability Concepts in Engineering Planning and Design - Vol. I*. John Wiley & Sons. EUA, 1975.

ANG, A. H.; TANG, W. H. *Probability Concepts in Engineering Planning and Design – Decision, Risk and Reliability - Vol. II*. John Wiley & Sons. EUA, 1990.

ALCANTARA, L. C. G. *Avaliação do conforto acústico de residências populares utilizando análise estatística de energia*. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE, 2010.

ARAÚJO JUNIOR, J. C. C. *Ruído Estrutural em Sistemas Oceânicos através da Análise Estatística de Energia*. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE, 122 p, 2014.

ARAÚJO, A. M. S.; PAUL, S.; VERGARA, E, F. *Isolamento do ruído de impacto de pisos em baixa frequência com fontes normalizada e não normalizada*. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 16, n. 1, p. 163-174, jan/mar. 2016.

ARCH-TEC. *Edificações e Tecnologia do Conforto Ambiental e Impermeabilizações Ltda*. Disponível em: <<http://www.arch-tec.com.br>>. Acesso em: 18 de março de 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15575-3. *Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho - Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos*. Brasil, 2013. 42p.

AZEVEDO FILHO, L. G. *Análise Estatística de Energia aplicada ao Ruído Interno de Aeronaves*. Dissertação de Mestrado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, SP, Brasil, 2004.

BISTAFA, S. R. *Acústica aplicada ao controle de ruído*. São Paulo: Blucher, Brasil. 1ª edição, 368p., 2006.

BORELLO, G. *Virtual SEA Analysis of a Warship Classification*. 10ème Congrès Français d'Acoustique, Hal-00550544, Lyon, France, 12-16 April 2010.

BRANDÃO, E. *Acústica de Salas: projeto e modelagem*. 1ª edição. São Paulo/SP: Editora Blucher, 2016. 654p.

BRASIL. *Constituição da República Federativa do Brasil (1988)*. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/constituicaocompilado.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicaocompilado.htm)>. Acesso em: 10 de janeiro de 2017.

BS 3638. *Measurement of sound absorption in a reverberant room*. London: British Standards Institution, 1987.

CHANDIRAMANI, K. L.; FRANKEN, P. A.; LYON, R. H. *Structural Response to Inflight Acoustic and Aerodynamic Environments*. In: BBN Report 1417, 1966, July.

CHURCILL, C.; HOPKINS, C. *Prediction of airborne sound transmission across a timber-concrete composite floor using Statistical Energy Analysis*. Applied Acoustics, 110, 145-159, 2016.

CHEN, J.; XU, R.; ZHANG, M. *Acceleration response spectrum for predicting floor vibration due to occupants walking*. Journal of Sound and Vibration 333, 2014, 3564-3579.

CORNACCHIA, G. M. M. *Investigação in-situ do isolamento sonoro ao ruído de impacto em edifícios residenciais*. Dissertação de Mestrado. Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Florianópolis, Brasil, 2009.

CRAIK, R. J. M. *Sound Transmission through Buildings using Statistical Energy Analysis*. Cambridge, 1996.

CREMER, L.; HECKL, M.; UNGAR, E. E. *Structure-borne sound*. Berlin: Springer-verlag, 1973.

DINIZ, S. M. C. *Structural Reliability: Rational Tools for Design Code Development*. ASCE, 2008.

DODD, G.; YEN, B. *Measuring  $L_n$  without using a tapping machine?* Internoise 2014, p. 1–6, 2014.

EICHLER, E. *Thermal Circuit Approach to Vibration in Coupled Systems and the Noise Reduction of a Rectangular Box*. Journal of the Acoustical Society of America, 1964, v. 36, pp. 995-1007.

EICHLER, E. *Plate Edge Admittances*. Journal of the Acoustical Society of America, 1965, v. 37, pp. 344-348.

FAHY, F. *Sound and Structural Vibration: radiation, transmittion and response*. London, UK: Academic Press, 1987. 309p.

FERRAZ, R. *Atenuação de ruído de impacto em pisos de edificações de pavimentos múltiplos*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia UFMG. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Estruturas. Belo Horizonte, Brasil, 2008.

GERGES, S. N. Y. *Ruído: Fundamentos e Controle*. 1ª edição. Florianópolis/SC. 1992, 600p.

GERRETSEN, E. A. *New System for Rating Impact Sound Insulation*. *Applied Acoustics*, v. 9, p. 247-263, 1976.

HALDAR, A.; MAHADEVAN, S. *Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design*. John Wiley & Sons, 2000.

HECKL, M. *Vibration of Point Driven Cylindrical Shells*. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1962, v. 34, pp. 1553-1557.

HIRASHIMA, S. Q. S.; ASSIS, E. S. DE. *Percepção sonora e conforto acústico em espaços urbanos do município de Belo Horizonte, MG*. p. 7–22, 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 140-7. *Acoustics: measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part VII: Field measurements of impact sound insulation of floors*. Genève, Switzerland, 1998. 18p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 3382-2. *Acoustics: Measurement of room acoustic parameters*. Genève, Switzerland, 2008. 24p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 717-2. *Acoustics: Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part II: Impact sound insulation*. Genève, Switzerland, 2013, 17p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO/CD 16251-1: *Acoustics-Laboratory measurement of the reduction of transmitted impact noise by floor coverings on a small floor mock-up – Part 1: Heavyweight compact floor*.

JAMBROSIC, K.; HORVAT, M.; DOMITROVIC, H. *The influence of excitation type on reverberation time measurements*. 3<sup>rd</sup> Congress of Alps Adria Acoustics Association. Austria, 2007. 6p.

JEON, J. Y.; JEONG, J. H.; SEO, S. H. *Heavy-Weight Floor Impact Sound in Reinforced Concrete Structures*. *Acoustics 2004*, n. November, p. 631–636, 2004.

JEON, J. Y.; LIM, H.; LEE, B. K. *Transfer path analysis of floor impact noise and vibration in a multi-story building*. INTER-NOISE 2015 - 44th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, n. August 2015, 2015.

KEANE, J. K. *Statistical Energy Analysis of Engineering Structures*. Tese de Doutorado, Brunel University, Uxbridge, Brunel, United Kingdom, 1988.

KIM, K. et al. *Floor Impact Sound and Vibration Propagation Characteristics in Adjacent Houses*. n. July, p. 12–16, 2015.

KURZWEIL, L. *Seismic Excitation of Footing and Footing-Supported Structures*. Tese de Doutorado, 1971, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, Massachusetts, USA.

KYLLIAINEN, M. *Standard deviations in field measurements of impact sound insulation*. Joint Baltic-Nordic Acoustic Meeting 2004, 8-10 June, Mariehamn, Åland.

LÍBERO, H. S.; MAGALHAES, M. C.; DINIZ, S. M. C. *Análise In-Situ do Isolamento Acústico de Piso de Concreto ao Ruído de Impacto*. 58º IBRACON – Congresso Brasileiro do Concreto. Belo Horizonte, 2016.

LYON, R. H. *Statistical energy analysis of dynamical systems: theory and applications*. The MIT Press, 1975.

LYON, R. H.; DEJONG, R. G. *Theory and Application of Statistical Energy Analysis*. Newton: Butterworth-Heinemann, 1995, 2ª ed., 277 p.

LOVERDE, J. J.; DONG, W. *A new metric to quantify and evaluate low frequency impact noise*. Internoise 2014, p. 1–5, 2014.

LYON, R. H.; SMITH JUNIOR, P. W. *Power Flow between Structures*. Journal of the Acoustical Society of America, 1959, v. 31, pp. 611-625.

LYON, R. H.; MAIDANIK, G. *Power Flow between Linearly coupled Oscillators*. Journal of the Acoustical Society of America, 1962, v.34, pp. 623-639.

LYON, R. H.; EICHLER, E. *Random Vibration of Connected Structures*. Journal of the Acoustical Society of America, 1964, v. 36, pp. 1344-1254.

LYON, R. H.; SCHARTON, T. D. *Vibrational Energy Transmission in a Three Element Structure*. Journal of the Acoustical Society of America, 1965, v. 38, pp. 253-261.

MACHADO, J. C. *Análise de vibração e ruído estrutural em piso slim floor de edifícios de aço para atender requisitos de conforto*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas. Belo Horizonte/MG, Brasil, 2003.

MAGALHÃES, M. D. C. *Fundamentos de acústica estrutural*. São Paulo: All Print Editora. Brasil, 2013. 270p.

MAIDANIK, G. *Response of Ribbed Panels to Reverberant Acoustic Fields*. Journal of the Acoustical Society of America, 1962, v. 34, pp. 809-829.

MANNING, J. E.; MAIDANIK, G. *Radiation Properties of Cylindrical Shells*. Journal of the Acoustical Society of America, 1964, v. 36, pp. 1691-1698.

MANNING, J. E.; LYON, R. H.; SCHARTON, T. D. *Transmission of Sound and Vibration to Shroud-Enclosed Spacecraft*. In: NASA Report CR-81688, 1966, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA.

MEHTA, M.; JOHNSON, J.; ROCAFORT, J. *Architectural Acoustics: principles and design*. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 445p.

MILLER, D. K.; HART, F. D. *Modal Density of Thin Circular Cylinders*. In: NASA Contractors Report CR-897, 1967.

MOJOLLA, R. *Fonte geradora de impacto padronizado: construção e qualificação*. 2015.

NAVARRO, M. P. N. *Conforto Acústico Em Ambientes De Praças De Alimentação Em Shopping Centers*. 2004.

NETO, M. F. *Nível de Conforto Acústico: uma proposta para edifícios*. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas, 2009.

NEUBAUER, P. M. *Estudo comparativo ente diversas composições com pisos flutuantes de madeira natural – assoalho e tacos – quanto ao isolamento ao ruído de impacto*. Dissertação de Mestrado. Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria. Programa de Pós-Graduação e Engenharia Civil. Santa Maria/RS, Brasil, 2009.

NOCETI, S; DALCASTAGNÉ, A. L. *Geração de ruído rosa a partir de ruído branco*. In: *Seminário de Áudio*. Anais Belo Horizonte, 2002 – CD.

OWNERS CORPORATION NETWORK (OCN). *Testing walls and floors for sound transmission*. Disponível em: <<https://www.ocn.org.au/guide/253-testing-walls-and-floors-sound-transmission>>. Acesso em: 01 de fevereiro de 2016.

OPERE IN CARTONGESSO. W. *Isolamento Acústico Bergamo*. Disponível em: <<http://www.opereincartongessobergamo.it/>>. Acesso em: 02 maio. 2017.

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS). *Promoción de la Salud Glosario*. Organización Mundial de la Salud, p. 1–35, 1998.

PAIXÃO, D. *Instrumentos e normas técnicas para ensaios acústicos*. Universidade Federal de Santa Maria – Rio Grande do Sul. Santa Maria/RS, 2004.

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

PEDROSO, M. A. T. *Estudo comparativo entre as modernas composições de pisos flutuantes quanto ao desempenho no isolamento ao ruído de impacto*. Dissertação de Mestrado. Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria. Programa de Pós-Graduação e Engenharia Civil. Santa Maria/RS, Brasil, 2007.

PEREIRA, A.; GODINHO, L.; MATEUS, D.; RAMIS, J.; BRANCO, F. G. *Assessment of a simplified experimental procedure to evaluate impact sound reduction of floor coverings*. Applied Acoustics, v. 79, p. 92–103, 2014.

PEREYRON, D. *Estudo de tipologia de lajes quanto ao isolamento ao ruído de impacto*. Dissertação de Mestrado. Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria. Programa de Pós-Graduação e Engenharia Civil. Santa Maria/RS, Brasil, 2008.

RABOLD A.; BUCHSHMID, M.; DUSTER, A.; MULLER, G.; RANK, E. *Modelling the excitation force of a standard tapping machine on lightweight floor structures*. Building Acoustics, vol 17, num 3, p. 175-197, 2010

REZENDE J. B. *Modelo estatístico para análise subjetiva da influência do ruído de impacto de pisos em edificações*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia UFMG. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Estruturas. Belo Horizonte/MG, Brasil, 2014.

RODRIGUES, A H. B. *Características Vibro-Acústicas de Cascas Cilíndricas*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, Brasil, 2003.

RODRIGUES, M, N. *Metodologia para definição de estratégia de controle e avaliação de ruído ocupacional*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas. Belo Horizonte/MG, Brasil, 2009.

SCHIAVI, A; ASTOLFI, A. *The prediction of the vibration reduction index  $K_{ij}$  for brick and concrete rigid junctions*. Applied Acoustics 71, 523-530, 2010.

SCHOLL, W. *Impact Sound Insulation: The Standard Tapping Machine Shall Learn to Walk!* Building Acoustics, v. 8, n. 4, p. 245–256, 2001.

SCROSATI, C.; SCAMONI, F. *Managing Measurement Uncertainty in Building Acoustics*. Buildings, v. 5, n. 4, p. 1389–1413, 2015.

SHI, W.; JOHANSSON, C.; SUNDBACK, U. *An investigation of the characteristics of impact sound sources for impact sound insulation measurement*. Applied Acoustics, v. 51, p. 85-108, 1997.

SILVA, P. *Acústica Arquitetônica & Condicionamento de Ar*. Belo Horizonte: EDTAL, 2002.

SIMONS, M. W.; WATERS, J. R. *Sound control in buildings*. Oxford: Blackwell Publishing Ltda., 2004.

SOUZA, L. C. L.; ALMEIDA, M. G.; BRAGANÇA, L. *Bê-a-bá da acústica arquitetônica: ouvindo a arquitetura*. São Carlos/SP: EdUFSCar, 2006. 149p.

SMITH, M. *Prediction Methodologies for Vibration and Structure Borne Noise*. Alberta Acoustics and Noise Association Spring Conference, Invited Plenary Paper, Banff, Alberta, Canada, May, 2011.

TRATCH JUNIOR, J. *Vibration Transmission through Machinery Foundation and Ship Bottom Structure*. Dissertação de Mestrado. Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, Massachusetts, USA, 1985.

WEISZFLOG, W. *Michaelis Dicionário Brasileiro Digital da Língua Portuguesa*. Disponível em: <<http://michaelis.uol.com.br/>>. Acesso em: 31 maio. 2017.

WILKINSON, J. P. D. *Modal Densities of Certain Shallow Structural Elements*. Journal of the Acoustical Society of America, 1968, v. 43, pp. 245-251.

YEON, J. O.; KIM, K. W.; YANG, K. S. *A correlation between a single number quantity and noise level of real impact sources for floor impact sound*. Applied Acoustics, v. 125, p. 20–33, 2017.

YOUNG, W. C. *Roarks formulas for stress and strain*. London: McGraw-Hill,, 1989.

ZHOU, X. et al. *Experimental and analytical studies on the vibration serviceability of pre-stressed cable RC truss floor systems*. Journal of Sound and Vibration, v. 361, p. 130–147, 2016.

# APÊNDICE A

## EFICIÊNCIA DA CLAUSURA

### A.1 Medição dos Níveis de Pressão Sonora com e sem clausura

Com o objetivo de se avaliar e possivelmente minimizar a influência do ruído aéreo gerado e transmitido para o ambiente receptor (nível de pressão sonora de impacto médio ' $L_i$ '), devido ao funcionamento da máquina de impacto, optou-se pela fabricação de uma clausura para a máquina de impacto padrão. A eficiência desta clausura no isolamento do ruído aéreo gerado pela máquina de impacto foi considerada através de medições *in situ*. Primeiramente, uma caixa acústica gerando ruído rosa foi enclausurada e apoiada sobre camada de elastômero enquanto os níveis do ruído aéreo eram medidos simultaneamente nos ambientes emissor e receptor. Em seguida, a caixa acústica foi substituída pela máquina de impacto, e os níveis de ruído aéreo e estrutural gerados pela máquina foram medidos no ambiente emissor e receptor. Desta forma, foi possível a realização de uma análise quantitativa mostrando a influência do ruído aéreo nos resultados (LÍBERO *et al.*, 2016).

A figura A.1 apresenta os resultados dos níveis de pressão sonora nos ambientes emissor e receptor devido ao ruído rosa gerado por uma caixa acústica. Como mencionado anteriormente, esta caixa foi acusticamente isolada do piso utilizando-se camada de neoprene de forma a minimizar a transmissão do ruído estrutural, nos ambientes emissor e receptor. As medições foram realizadas com e sem enclausuramento. Sendo assim, os resultados obtidos foram importantes para se avaliar a influência do ruído aéreo. Observa-se uma significativa diferença entre os níveis de pressão sonora no ambiente emissor com e sem clausura, depreendendo-se que o objetivo para o qual a clausura foi confeccionada está sendo cumprido. Em contrapartida, vê-se que a diferença entre os níveis de pressão sonora no ambiente receptor com e sem a presença da clausura foi mínima (quase nula para algumas bandas de frequência). Tal constatação encontra-se justificada no fato de que o piso de concreto ensaiado ter sido bastante eficiente para isolamento de ruído aéreo. Sendo assim os

níveis de pressão sonora medidos na suíte receptora, dada uma fonte sonora de ruído aéreo no pavimento superior, foram praticamente os mesmos.

Para as medições no ambiente emissor (curvas em vermelho), verificou-se uma diferença máxima de 29,4 [dB] e mínima de 8,7 [dB] nas bandas de frequências de um terço de oitavas de 3150 [Hz] e 100 [Hz], respectivamente. Já para as medições no ambiente receptor (curvas em preto), a diferença máxima verificada foi de 4,6 [dB] e mínima de 0,3 [dB] nas bandas de frequências de um terço de oitavas de 160 [Hz] e 800 [Hz], respectivamente.

Em todas as medições no ambiente emissor, o nível de pressão sonora sem clausura foi maior do que com a clausura em todas as faixas de frequência. O mesmo ocorreu no ambiente receptor, com exceção da banda de frequência de um terço de oitavas com frequência central em 630 [Hz], no qual o nível de pressão sonora com clausura foi maior do que sem clausura, com diferença registrada de 4,0 [Hz].

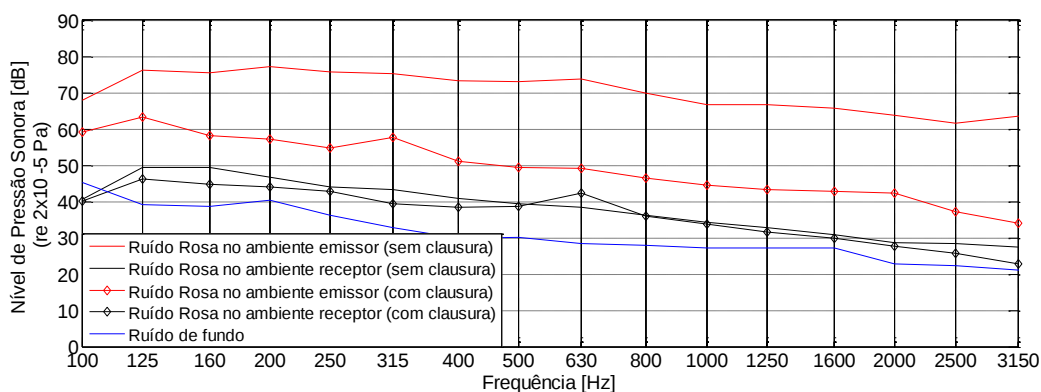


Figura A. 1: NPS do Ruído Rosa com/sem clausura

Dada a eficiência da clausura, mediu-se, então, o nível de pressão sonora a partir da geração do ruído de impacto nos ambientes emissor e receptor com e sem clausura (figura A.2). Percebe-se que a diferença do nível de pressão sonora na suíte receptora para as duas situações tende a zero. Sendo assim, conclui-se que a parcela de nível de pressão sonora presente na suíte receptora proveniente do ruído de impacto, para essa situação, é bem superior à parcela proveniente do ruído aéreo.

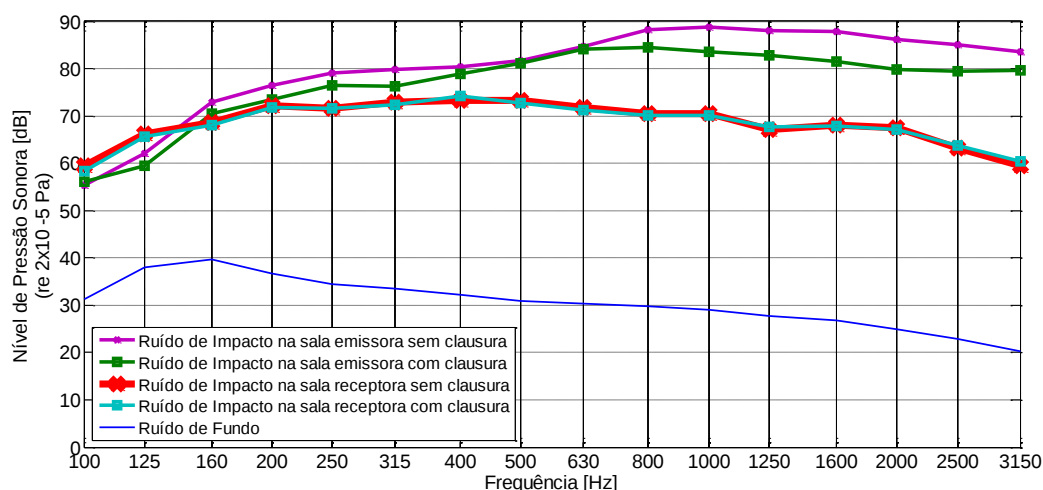


Figura A.2: NPS do Ruído de Impacto com/sem clausura

Na sala emissora, a maior diferença de nível de pressão sonora entre as medições sem e com clausura foi de 5,2 [dB] registrada para a faixa de frequência de um terço de oitavas cuja frequência central é de 2000 [Hz]. Já a menor foi de 0,5 [dB] para a faixa de frequência de 500 [Hz].

Na sala receptora, o nível de pressão sonora com e sem clausura foram bem semelhantes. A maior diferença registrada foi de 1,1 [dB] para as faixas de frequência de 100 e 400 [Hz].

Sendo assim, conclui-se que o uso da clausura foi bastante efetivo quanto ao isolamento do ruído aéreo, fato este comprovado através do ensaio com a caixa acústica. Notou-se que a parcela de ruído aéreo captada no ambiente receptor devido à sua geração no ambiente emissor foi mínima (irrisória para algumas faixas de frequência). O piso de concreto armado, considerando a transmissão direta do ruído, apresentou valores significativos de perda de transmissão, ou seja, proporcionou um isolamento sonoro considerável. Devido a sua elevada densidade, o concreto, utilizado em pisos estruturais, comparado, por exemplo, com a alvenaria, tem a propriedade de isolar o ruído aéreo de forma significativa. O desempenho acústico de um piso estrutural normalmente também varia com a espessura, textura e porosidade da camada de concreto.

# APÊNDICE B

## CÁLCULO DA FREQUÊNCIA CRÍTICA E NATURAL DOS PISOS ENSAIADOS

### B.1 Introdução

Uma das principais características do isolamento acústico de uma estrutura é a chamada “frequência crítica”, no qual a Perda de Transmissão (PT) ou o Índice de Redução Sonora (IRS) assumem um valor mínimo, permitindo uma máxima transmissão sonora.

Outro tipo de frequência também de grande importância para análise do comportamento dinâmico de estruturas são as frequências naturais. Tais frequências refletem um comportamento intrínseco das estruturas, não dependendo de excitação para existirem, apenas de um distúrbio. Quando a excitação se dá na mesma frequência que a frequência natural, ocorre o fenômeno chamado de ressonância. Em termos de projetos estruturais, a ressonância é um fenômeno indesejável, pois a vibração das partículas pode ser bastante excessiva ao ponto de levar a estrutura à ruína.

Para obter uma melhor compreensão dos resultados encontrados, calcularam-se a frequência crítica e as dez primeiras frequências naturais dos sistemas pisos estruturais ensaiados (Tabela B.1).

Segundo Fahy (1987), a frequência crítica para placas planas, uniformes e homogêneas é dada por:

$$f_c = \frac{C^2}{1,8hC_L} \quad (B.1)$$

onde  $C$  é a velocidade do som no meio,  $h$  é a espessura da placa e  $C_L$  é a velocidade da onda longitudinal no sólido.

Já a frequência natural é dada por (FAHY, 1987):

$$\omega_{pq} = \sqrt{\frac{D}{m'}} \left[ \left( \frac{p\pi}{a} \right)^2 + \left( \frac{q\pi}{b} \right)^2 \right] \quad (\text{B.2})$$

No qual  $D$  é a rigidez da placa,  $m'$  é a massa por unidade de área,  $a$  e  $b$  são o comprimento e largura da placa, respectivamente, e  $p$  e  $q$  relacionam-se ao número de onda primário.

Tabela B- 1: Frequência Crítica e Frequências Naturais para os sistemas estruturais de ensaio

| <b>Elemento estrutural/Freq. [Hz]</b> | <b><math>f_c</math></b> | <b><math>F_n^1</math></b> | <b><math>F_n^2</math></b> | <b><math>F_n^3</math></b> | <b><math>F_n^4</math></b> | <b><math>F_n^5</math></b> | <b><math>F_n^6</math></b> | <b><math>F_n^7</math></b> | <b><math>F_n^8</math></b> | <b><math>F_n^9</math></b> | <b><math>F_n^{10}</math></b> |
|---------------------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|
| Teto da Sala                          | 184,9                   | 18,4                      | 27,9                      | 63,9                      | 73,4                      | 89,3                      | 149,3                     | 165,2                     | 187,5                     | 271,5                     | 293,7                        |
| Teto do Banheiro 2                    | 184,9                   | 140,4                     | 227,5                     | 474,6                     | 561,5                     | 706,6                     | 1118,1                    | 1263,3                    | 1466,5                    | 2042,6                    | 2245,8                       |
| Teto da Suíte                         | 184,9                   | 32,8                      | 69,9                      | 94,1                      | 131,3                     | 193,2                     | 233,5                     | 295,4                     | 381,9                     | 438,5                     | 525,1                        |
| Teto do Quarto 2                      | 184,9                   | 36,3                      | 89,7                      | 91,5                      | 144,9                     | 234,0                     | 237,1                     | 326,1                     | 450,8                     | 455,1                     | 579,7                        |
| Teto do Quarto 3                      | 184,9                   | 29,8                      | 65,9                      | 83,2                      | 119,3                     | 179,5                     | 208,5                     | 268,6                     | 352,8                     | 393,3                     | 477,5                        |
| Teto da Cozinha                       | 184,9                   | 50,0                      | 109,2                     | 140,9                     | 200,1                     | 298,8                     | 351,7                     | 450,4                     | 588,5                     | 662,5                     | 800,7                        |

# APÊNDICE C

## CALIBRAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

### C.1 Acelerômetro

A seguir, são mostrados dois gráficos relativos aos resultados da calibração de um dos acelerômetros utilizados nas medições de aceleração desse trabalho. O Calibrador PCB gera uma aceleração padrão de 1 [g] (amplitude) na frequência de 159,2 [Hz].

O primeiro gráfico (Figura C.1) faz referência a resposta do acelerômetro acoplado ao calibrador, no domínio do tempo, no qual observa-se picos de aceleração iguais ao módulo da gravidade, ou seja, 9,8 [m/s<sup>2</sup>].

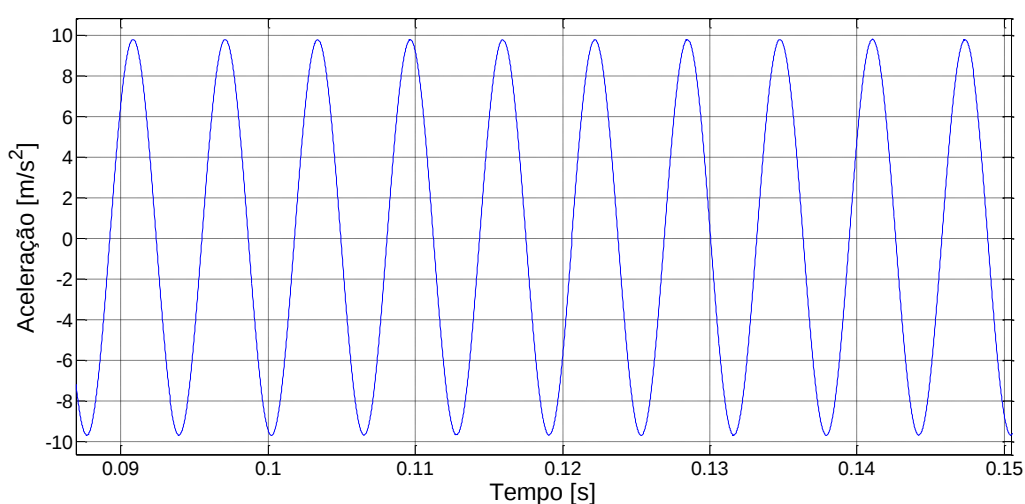


Figura C. 1: Resposta do acelerômetro no domínio do tempo

Já o segundo gráfico (Figura C.2) se refere à medida do acelerômetro que utilizou o domínio da frequência, mostrando que o calibrador vibra numa frequência de 159,2 [Hz].

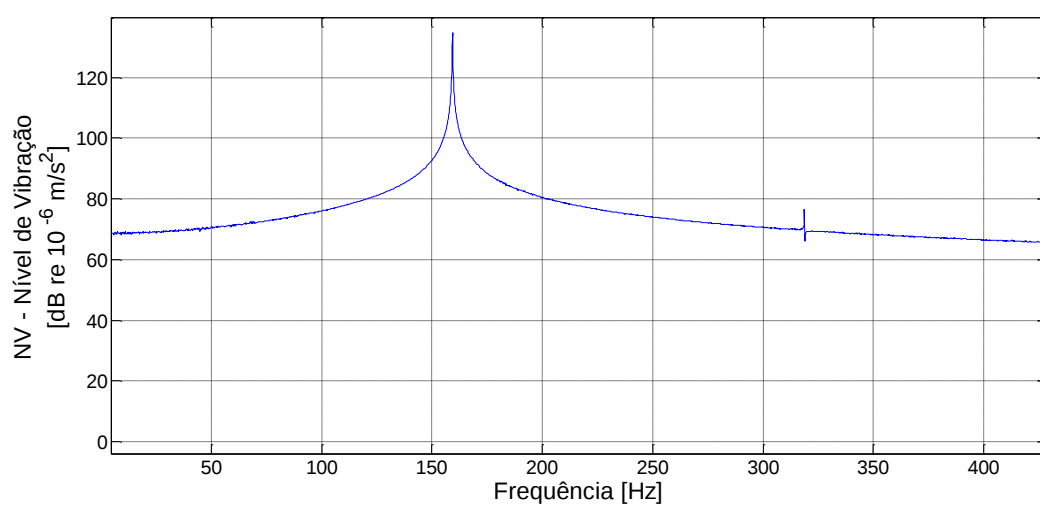


Figura C. 2: Resposta do Acelerômetro no domínio da frequência  
(Pico na frequência de excitação igual a 159,2 [Hz])

# APÊNDICE D

## DETALHAMENTO DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA REGISTRADO PARA O PISO DA SALA

### D.1 Nível de pressão sonora de impacto padronizado detalhado

Neste apêndice serão mostradas os conjuntos de níveis de pressão sonora de impacto padronizado ( $L'_{nT}$ ) e valores de nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado ( $L'_{nT,w}$ ) para o ensaio realizado no piso da sala, levando-se em consideração cada intervalo de segundo de cada medição, a partir da confecção de 16 tabelas (Tabelas D-1 a D-16). Os níveis de pressão sonora de impacto padronizado serão representados na forma  $L'_{nT}(i,j)$  no qual  $i$  e  $j$  simbolizam as posições de fonte e de medição, respectivamente.

Para cada combinação fonte-microfone – 16 no total – foi realizada uma medição com duração de 30 segundos. Até então, utilizou-se a média do nível de pressão sonora de cada banda de frequência ao longo do tempo (capítulo 6), conforme previsto pela norma ISO 140-7 (1998), fazendo-se as análises necessárias. Aqui, serão mostrados os resultados encontrados a partir de cada instante de medição, ou seja, a cada segundo. Dessa forma, totalizam-se 480 conjuntos de valores  $L'_{nT}$  e, por consequência, 480 valores de  $L'_{nT,w}$ .

Tabela D- 1: Conjunto de  $L'_{nT}$  [dB] (bandas 1/3 de oitavas) e  $(L'_{nT,w})$  [dB] para a posição (1,1) do piso da sala

| $L'_{nT}$          | $\tau$ [s] | 100   | 125   | 160   | 200   | 250   | 315   | 400   | 500   | 630   | 800   | 1000  | 1250  | 1600  | 2000  | 2500  | 3150  | $L'_{nT,w}$ |
|--------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| $L'_{nT}$<br>(1,1) | 1          | 48,30 | 51,05 | 55,77 | 54,78 | 55,99 | 53,94 | 57,14 | 59,99 | 58,95 | 57,33 | 59,85 | 60,20 | 58,38 | 56,48 | 51,98 | 47,48 | 61          |
|                    | 2          | 53,10 | 56,85 | 59,07 | 57,98 | 59,99 | 57,74 | 61,24 | 64,79 | 63,45 | 60,23 | 62,45 | 61,80 | 61,28 | 58,78 | 55,38 | 50,08 | 64          |
|                    | 3          | 52,60 | 56,35 | 58,77 | 59,58 | 61,79 | 58,74 | 61,24 | 64,99 | 63,95 | 61,03 | 62,95 | 63,30 | 61,78 | 59,68 | 55,88 | 50,88 | 65          |
|                    | 4          | 52,30 | 58,55 | 60,17 | 59,18 | 62,39 | 57,94 | 61,64 | 64,99 | 63,25 | 60,03 | 62,15 | 63,00 | 61,08 | 58,98 | 55,38 | 49,98 | 64          |
|                    | 5          | 51,10 | 54,95 | 59,07 | 58,08 | 61,39 | 57,24 | 60,44 | 64,79 | 63,35 | 59,33 | 61,65 | 61,70 | 60,88 | 58,58 | 54,88 | 49,88 | 64          |
|                    | 6          | 52,30 | 57,65 | 61,67 | 59,48 | 61,79 | 58,44 | 61,34 | 64,49 | 64,35 | 60,33 | 62,55 | 62,70 | 61,18 | 59,08 | 55,08 | 50,58 | 65          |
|                    | 7          | 51,30 | 55,65 | 59,57 | 58,68 | 59,89 | 57,74 | 60,54 | 64,29 | 62,55 | 59,63 | 62,05 | 61,90 | 60,88 | 58,78 | 55,98 | 50,98 | 64          |
|                    | 8          | 51,80 | 56,15 | 60,07 | 57,98 | 59,99 | 59,04 | 62,04 | 65,59 | 64,05 | 60,33 | 62,95 | 62,90 | 61,98 | 59,28 | 56,88 | 52,08 | 65          |
|                    | 9          | 52,00 | 56,25 | 58,27 | 58,78 | 61,09 | 58,94 | 61,14 | 65,19 | 63,75 | 60,03 | 61,95 | 62,30 | 61,68 | 58,28 | 54,88 | 50,28 | 64          |
|                    | 10         | 52,10 | 57,15 | 58,97 | 59,28 | 60,89 | 59,74 | 62,24 | 65,79 | 63,85 | 60,43 | 62,65 | 62,60 | 61,38 | 58,88 | 55,48 | 50,58 | 65          |
|                    | 11         | 51,00 | 56,35 | 60,47 | 57,68 | 59,59 | 58,54 | 62,04 | 65,39 | 63,55 | 59,53 | 62,15 | 62,00 | 61,08 | 58,48 | 54,68 | 50,08 | 64          |
|                    | 12         | 51,50 | 58,25 | 61,77 | 58,58 | 61,59 | 59,74 | 61,84 | 65,99 | 64,55 | 60,63 | 62,85 | 63,20 | 61,78 | 59,58 | 56,58 | 51,78 | 65          |
|                    | 13         | 51,70 | 57,75 | 59,87 | 57,98 | 59,79 | 57,54 | 61,14 | 64,99 | 63,95 | 60,03 | 62,25 | 62,40 | 61,48 | 58,38 | 55,38 | 50,48 | 64          |
|                    | 14         | 53,30 | 59,95 | 60,47 | 60,18 | 62,09 | 59,74 | 62,94 | 66,59 | 65,35 | 61,53 | 63,75 | 63,60 | 62,38 | 60,78 | 57,38 | 52,58 | 66          |
|                    | 15         | 52,90 | 58,55 | 60,37 | 60,18 | 62,79 | 58,94 | 62,64 | 66,49 | 64,85 | 60,93 | 62,95 | 62,90 | 61,98 | 59,78 | 56,58 | 51,78 | 65          |
|                    | 16         | 53,10 | 60,55 | 61,77 | 60,38 | 61,29 | 60,14 | 63,14 | 66,49 | 65,05 | 61,43 | 63,35 | 63,30 | 62,48 | 60,78 | 57,48 | 52,38 | 66          |
|                    | 17         | 52,80 | 60,05 | 60,87 | 60,08 | 62,49 | 58,84 | 62,44 | 65,99 | 64,25 | 60,03 | 62,45 | 62,50 | 61,48 | 59,38 | 56,38 | 51,48 | 65          |
|                    | 18         | 50,60 | 56,55 | 59,67 | 57,58 | 60,59 | 56,94 | 60,54 | 64,79 | 63,25 | 59,23 | 61,85 | 61,60 | 60,98 | 59,08 | 55,18 | 50,38 | 64          |
|                    | 19         | 52,70 | 56,55 | 60,17 | 60,18 | 61,89 | 59,64 | 61,84 | 66,59 | 63,95 | 60,73 | 62,85 | 63,30 | 61,98 | 60,58 | 57,08 | 51,98 | 66          |
|                    | 20         | 52,20 | 56,75 | 60,67 | 59,08 | 60,39 | 59,04 | 60,54 | 65,19 | 63,35 | 60,13 | 62,35 | 62,30 | 61,38 | 59,48 | 56,28 | 51,38 | 65          |
|                    | 21         | 52,80 | 56,75 | 61,07 | 59,08 | 61,59 | 58,94 | 61,84 | 65,49 | 63,35 | 60,43 | 62,95 | 63,10 | 61,78 | 60,58 | 57,28 | 52,28 | 65          |
|                    | 22         | 51,10 | 56,55 | 62,57 | 58,38 | 61,69 | 59,04 | 62,04 | 65,09 | 63,25 | 60,53 | 62,65 | 62,30 | 61,68 | 59,58 | 56,28 | 50,78 | 65          |
|                    | 23         | 51,00 | 55,75 | 59,17 | 56,78 | 57,49 | 55,34 | 59,14 | 64,79 | 62,75 | 59,03 | 61,65 | 61,40 | 61,08 | 58,38 | 54,48 | 49,78 | 64          |
|                    | 24         | 53,10 | 56,95 | 60,97 | 59,38 | 60,49 | 58,34 | 61,84 | 65,99 | 64,35 | 60,73 | 62,75 | 63,00 | 61,88 | 60,28 | 56,68 | 51,58 | 65          |
|                    | 25         | 53,50 | 58,35 | 62,67 | 60,38 | 62,89 | 60,14 | 63,44 | 66,99 | 65,05 | 61,73 | 63,45 | 63,80 | 62,58 | 60,98 | 57,78 | 52,48 | 66          |
|                    | 26         | 53,30 | 59,55 | 60,67 | 59,88 | 62,49 | 58,44 | 61,54 | 65,29 | 64,65 | 60,43 | 62,85 | 63,00 | 61,98 | 59,98 | 55,88 | 51,28 | 65          |
|                    | 27         | 50,60 | 57,25 | 61,17 | 58,88 | 60,69 | 57,94 | 61,14 | 66,09 | 63,65 | 59,63 | 62,35 | 62,10 | 61,68 | 59,18 | 55,48 | 50,48 | 65          |
|                    | 28         | 51,20 | 57,65 | 59,47 | 58,98 | 61,49 | 57,94 | 61,54 | 65,99 | 63,95 | 60,43 | 62,55 | 62,80 | 61,78 | 59,98 | 56,48 | 51,28 | 65          |
|                    | 29         | 54,00 | 58,35 | 61,77 | 59,78 | 62,89 | 60,34 | 62,44 | 66,19 | 64,95 | 60,93 | 62,75 | 63,30 | 62,28 | 60,78 | 56,98 | 51,68 | 66          |
|                    | 30         | 51,80 | 56,35 | 60,17 | 59,48 | 60,39 | 57,94 | 61,24 | 65,39 | 63,85 | 60,03 | 62,45 | 62,00 | 61,58 | 59,58 | 55,68 | 50,88 | 65          |

Tabela D- 2: Conjunto de  $L'_{nT}$  [dB] (bandas 1/3 de oitavas) e  $(L'_{nT,w})$  [dB] para a posição (1,2) do piso da sala

| $L'_{nT}$          | $\tau$ [s] | 100   | 125   | 160   | 200   | 250   | 315   | 400   | 500   | 630   | 800   | 1000  | 1250  | 1600  | 2000  | 2500  | 3150  | $L'_{nT,w}$ |
|--------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| $L'_{nT}$<br>(1,2) | 1          | 51,90 | 57,45 | 60,87 | 61,98 | 60,99 | 59,64 | 61,94 | 67,69 | 64,55 | 60,93 | 62,55 | 63,00 | 61,58 | 59,98 | 56,38 | 50,68 | 65          |
|                    | 2          | 50,10 | 57,65 | 62,27 | 63,28 | 61,49 | 59,04 | 63,14 | 68,69 | 65,25 | 61,03 | 63,05 | 63,50 | 62,18 | 60,68 | 57,28 | 51,68 | 66          |
|                    | 3          | 50,30 | 59,15 | 62,07 | 61,88 | 62,19 | 60,14 | 63,44 | 68,49 | 65,15 | 61,03 | 63,45 | 64,20 | 62,38 | 60,58 | 57,78 | 51,88 | 66          |
|                    | 4          | 51,30 | 57,35 | 58,97 | 61,28 | 60,39 | 58,84 | 62,14 | 67,69 | 64,65 | 60,23 | 62,45 | 62,70 | 62,08 | 59,68 | 56,48 | 50,98 | 65          |
|                    | 5          | 49,60 | 56,35 | 59,77 | 60,48 | 61,09 | 58,24 | 61,24 | 67,29 | 63,95 | 59,93 | 62,45 | 62,30 | 61,28 | 59,48 | 56,18 | 50,48 | 65          |
|                    | 6          | 50,40 | 55,75 | 59,37 | 62,08 | 62,09 | 60,34 | 62,44 | 68,49 | 64,45 | 61,13 | 63,15 | 62,80 | 61,88 | 60,08 | 57,18 | 51,28 | 66          |
|                    | 7          | 49,60 | 58,05 | 59,37 | 60,78 | 59,09 | 58,84 | 63,04 | 67,59 | 63,75 | 60,03 | 62,05 | 61,70 | 60,78 | 58,88 | 55,48 | 49,68 | 64          |
|                    | 8          | 47,60 | 56,25 | 59,57 | 58,58 | 58,49 | 57,44 | 60,84 | 65,09 | 63,05 | 59,23 | 60,85 | 60,70 | 60,58 | 57,98 | 54,98 | 49,08 | 64          |
|                    | 9          | 48,90 | 54,95 | 58,87 | 58,78 | 60,49 | 58,64 | 62,44 | 66,09 | 64,05 | 59,93 | 61,75 | 61,40 | 60,58 | 58,98 | 55,88 | 49,98 | 64          |
|                    | 10         | 47,90 | 54,45 | 57,67 | 58,38 | 58,59 | 57,44 | 61,34 | 65,79 | 63,35 | 58,73 | 61,75 | 61,30 | 60,48 | 58,18 | 55,08 | 49,48 | 64          |
|                    | 11         | 48,80 | 57,35 | 58,37 | 58,58 | 57,99 | 57,24 | 61,74 | 65,59 | 63,65 | 59,73 | 61,35 | 61,50 | 61,18 | 58,78 | 55,48 | 49,98 | 64          |
|                    | 12         | 49,50 | 56,05 | 60,67 | 59,38 | 59,49 | 57,84 | 60,74 | 65,39 | 63,35 | 59,53 | 60,85 | 61,20 | 60,28 | 58,38 | 55,08 | 49,18 | 64          |
|                    | 13         | 46,20 | 54,45 | 56,27 | 57,38 | 56,39 | 55,74 | 60,74 | 64,99 | 62,65 | 58,43 | 60,35 | 60,60 | 60,28 | 57,88 | 54,68 | 48,88 | 63          |
|                    | 14         | 51,40 | 57,55 | 60,47 | 59,58 | 59,89 | 58,14 | 61,24 | 65,99 | 64,45 | 60,63 | 61,75 | 61,80 | 60,88 | 59,08 | 55,88 | 50,58 | 65          |
|                    | 15         | 50,70 | 59,15 | 60,37 | 60,68 | 60,99 | 59,64 | 64,44 | 67,89 | 65,25 | 61,63 | 62,65 | 62,80 | 62,08 | 60,68 | 56,98 | 51,38 | 66          |
|                    | 16         | 48,10 | 58,15 | 60,67 | 58,28 | 58,69 | 57,74 | 61,54 | 65,49 | 63,85 | 60,13 | 61,25 | 61,30 | 61,18 | 58,78 | 55,28 | 49,78 | 64          |
|                    | 17         | 46,70 | 57,35 | 56,97 | 57,28 | 57,89 | 55,54 | 59,04 | 63,09 | 61,45 | 57,43 | 58,85 | 58,70 | 58,18 | 56,08 | 52,78 | 46,88 | 62          |
|                    | 18         | 47,00 | 56,45 | 56,77 | 57,48 | 57,19 | 56,44 | 60,24 | 65,09 | 62,45 | 59,03 | 60,25 | 59,90 | 59,28 | 57,08 | 53,98 | 48,08 | 63          |
|                    | 19         | 48,40 | 56,75 | 58,87 | 57,58 | 57,99 | 56,54 | 61,34 | 65,49 | 63,65 | 59,73 | 61,35 | 60,70 | 60,38 | 58,38 | 55,18 | 49,38 | 64          |
|                    | 20         | 48,60 | 55,55 | 56,87 | 56,68 | 57,19 | 56,44 | 61,74 | 64,79 | 63,25 | 58,93 | 61,15 | 60,70 | 60,08 | 57,68 | 54,78 | 49,08 | 63          |
|                    | 21         | 48,30 | 56,05 | 58,77 | 57,78 | 56,79 | 56,14 | 59,94 | 64,49 | 62,95 | 58,93 | 60,15 | 60,20 | 60,08 | 57,98 | 54,78 | 49,28 | 63          |
|                    | 22         | 47,00 | 55,55 | 59,07 | 57,38 | 57,39 | 54,44 | 57,74 | 62,19 | 61,25 | 57,93 | 59,85 | 59,80 | 58,68 | 57,58 | 54,08 | 48,88 | 62          |
|                    | 23         | 47,80 | 57,05 | 57,17 | 58,38 | 58,89 | 56,74 | 60,24 | 64,69 | 63,25 | 59,23 | 60,75 | 60,30 | 59,78 | 57,58 | 54,48 | 48,58 | 63          |
|                    | 24         | 47,50 | 56,35 | 58,37 | 57,38 | 56,39 | 55,54 | 60,34 | 64,99 | 63,15 | 58,73 | 60,45 | 60,10 | 59,58 | 57,18 | 54,38 | 48,08 | 63          |
|                    | 25         | 46,80 | 55,25 | 58,57 | 57,38 | 57,59 | 55,94 | 60,34 | 64,79 | 62,65 | 58,63 | 60,85 | 60,20 | 59,68 | 57,58 | 54,58 | 48,98 | 63          |
|                    | 26         | 48,00 | 54,55 | 56,37 | 56,78 | 57,09 | 56,24 | 60,04 | 63,69 | 61,55 | 57,43 | 59,15 | 58,70 | 58,48 | 56,58 | 53,88 | 47,58 | 62          |
|                    | 27         | 47,00 | 54,15 | 56,27 | 58,78 | 58,09 | 54,74 | 59,24 | 63,89 | 62,15 | 58,23 | 59,65 | 60,00 | 59,38 | 57,78 | 54,38 | 48,78 | 63          |
|                    | 28         | 44,90 | 52,15 | 55,67 | 56,68 | 56,19 | 53,44 | 57,34 | 61,49 | 60,35 | 57,23 | 58,25 | 58,60 | 57,68 | 56,48 | 53,38 | 47,88 | 61          |
|                    | 29         | 47,20 | 54,35 | 57,97 | 55,98 | 56,49 | 55,54 | 57,54 | 61,59 | 60,75 | 56,93 | 58,65 | 58,90 | 58,18 | 56,78 | 53,48 | 47,68 | 62          |
|                    | 30         | 47,20 | 52,45 | 55,77 | 55,88 | 54,29 | 54,34 | 58,14 | 62,99 | 60,45 | 56,73 | 58,55 | 57,80 | 58,08 | 55,58 | 53,18 | 47,18 | 61          |

Tabela D- 3: Conjunto de  $L'_{nT}$  [dB] (bandas 1/3 de oitavas) e  $(L'_{nT,w})$  [dB] para a posição (1,3) do piso da sala

| $L'_{nT}$          | $\tau$ [s] | 100   | 125   | 160   | 200   | 250   | 315   | 400   | 500   | 630   | 800   | 1000  | 1250  | 1600  | 2000  | 2500  | 3150  | $L'_{nT,w}$ |
|--------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| $L'_{nT}$<br>(1,3) | 1          | 48,50 | 56,25 | 56,37 | 57,68 | 58,09 | 57,04 | 59,04 | 64,49 | 62,25 | 59,53 | 60,35 | 61,30 | 60,08 | 57,48 | 54,58 | 49,48 | 63          |
|                    | 2          | 46,80 | 55,35 | 56,37 | 58,08 | 57,19 | 55,74 | 58,44 | 64,79 | 61,75 | 58,43 | 59,85 | 60,90 | 59,38 | 56,98 | 53,88 | 48,58 | 63          |
|                    | 3          | 47,50 | 55,75 | 56,37 | 57,38 | 57,19 | 56,84 | 60,34 | 65,69 | 62,95 | 59,03 | 60,65 | 61,50 | 60,58 | 57,28 | 54,68 | 49,78 | 64          |
|                    | 4          | 45,50 | 54,95 | 55,97 | 57,38 | 56,69 | 56,24 | 59,94 | 65,09 | 62,55 | 58,73 | 60,35 | 61,10 | 60,08 | 57,38 | 54,38 | 49,38 | 63          |
|                    | 5          | 46,60 | 55,55 | 56,57 | 58,18 | 56,89 | 56,74 | 59,74 | 64,99 | 62,35 | 58,83 | 60,55 | 61,00 | 59,88 | 57,18 | 54,38 | 49,08 | 63          |
|                    | 6          | 46,10 | 54,65 | 57,37 | 56,58 | 57,39 | 55,64 | 58,14 | 63,09 | 61,05 | 57,83 | 60,15 | 60,50 | 59,08 | 56,68 | 53,48 | 48,08 | 62          |
|                    | 7          | 48,30 | 55,75 | 55,87 | 57,18 | 55,09 | 55,44 | 57,64 | 62,89 | 61,65 | 58,33 | 60,25 | 60,90 | 59,38 | 56,88 | 53,98 | 48,68 | 63          |
|                    | 8          | 46,80 | 56,05 | 55,17 | 55,78 | 55,89 | 54,84 | 57,44 | 63,49 | 61,35 | 58,13 | 59,55 | 60,60 | 59,18 | 56,28 | 53,48 | 48,28 | 62          |
|                    | 9          | 46,40 | 55,85 | 58,37 | 57,08 | 57,09 | 56,24 | 58,64 | 64,69 | 62,05 | 58,83 | 59,85 | 60,80 | 59,58 | 57,28 | 54,08 | 48,88 | 63          |
|                    | 10         | 46,70 | 55,75 | 56,77 | 58,38 | 58,39 | 57,34 | 59,44 | 64,89 | 63,25 | 59,03 | 60,95 | 61,60 | 60,48 | 57,38 | 54,28 | 49,28 | 64          |
|                    | 11         | 47,80 | 54,65 | 56,17 | 57,48 | 56,39 | 56,34 | 58,24 | 63,89 | 61,95 | 57,53 | 58,95 | 59,50 | 58,88 | 55,88 | 52,38 | 47,38 | 62          |
|                    | 12         | 44,60 | 53,65 | 52,07 | 54,58 | 54,79 | 52,24 | 55,24 | 60,09 | 58,15 | 55,43 | 57,25 | 58,70 | 56,98 | 54,48 | 50,48 | 45,48 | 60          |
|                    | 13         | 45,20 | 52,95 | 53,67 | 55,38 | 54,39 | 53,94 | 56,84 | 62,49 | 60,55 | 56,53 | 58,95 | 59,60 | 58,48 | 55,78 | 51,88 | 47,08 | 61          |
|                    | 14         | 46,50 | 53,75 | 55,57 | 57,38 | 56,69 | 56,64 | 59,44 | 64,49 | 61,95 | 58,73 | 60,35 | 61,30 | 59,98 | 57,48 | 53,68 | 48,68 | 63          |
|                    | 15         | 47,80 | 56,65 | 57,27 | 58,18 | 58,69 | 57,54 | 60,54 | 65,29 | 63,55 | 59,53 | 61,85 | 62,70 | 61,28 | 58,48 | 54,98 | 49,78 | 64          |
|                    | 16         | 45,30 | 54,35 | 55,27 | 57,18 | 56,99 | 55,44 | 58,34 | 63,69 | 61,35 | 57,93 | 59,85 | 60,80 | 59,38 | 56,78 | 53,18 | 47,88 | 62          |
|                    | 17         | 47,80 | 57,05 | 58,27 | 60,28 | 58,49 | 58,14 | 59,84 | 65,89 | 63,05 | 58,93 | 61,45 | 61,60 | 60,48 | 57,68 | 54,28 | 48,98 | 64          |
|                    | 18         | 45,10 | 56,75 | 54,27 | 54,38 | 54,89 | 54,24 | 55,44 | 61,29 | 58,85 | 55,83 | 57,45 | 58,30 | 56,88 | 53,78 | 50,38 | 44,88 | 60          |
|                    | 19         | 44,70 | 54,05 | 54,07 | 57,88 | 57,39 | 55,94 | 59,14 | 64,79 | 61,65 | 58,53 | 60,75 | 62,00 | 60,58 | 57,28 | 54,08 | 48,38 | 63          |
|                    | 20         | 46,70 | 55,55 | 56,37 | 57,28 | 57,59 | 57,64 | 59,64 | 64,89 | 62,15 | 58,73 | 60,85 | 61,60 | 60,28 | 56,78 | 54,08 | 48,38 | 63          |
|                    | 21         | 45,30 | 54,65 | 55,87 | 55,58 | 55,69 | 55,54 | 58,44 | 63,39 | 61,35 | 57,83 | 59,75 | 60,50 | 59,48 | 56,08 | 53,08 | 47,58 | 62          |
|                    | 22         | 46,60 | 54,45 | 54,77 | 57,58 | 57,29 | 56,34 | 59,14 | 64,99 | 62,95 | 58,43 | 60,75 | 61,00 | 60,48 | 56,68 | 53,98 | 48,48 | 63          |
|                    | 23         | 48,20 | 55,75 | 55,17 | 58,18 | 57,29 | 57,24 | 58,34 | 63,99 | 61,85 | 58,13 | 60,05 | 60,70 | 59,08 | 56,08 | 52,88 | 47,38 | 62          |
|                    | 24         | 45,30 | 54,95 | 56,07 | 58,38 | 57,59 | 56,34 | 59,84 | 64,09 | 62,35 | 58,53 | 60,05 | 61,00 | 59,58 | 56,28 | 53,18 | 48,08 | 63          |
|                    | 25         | 47,30 | 56,75 | 58,07 | 60,78 | 59,59 | 57,74 | 60,44 | 64,89 | 63,15 | 59,63 | 61,05 | 62,00 | 60,38 | 57,38 | 54,38 | 49,48 | 64          |
|                    | 26         | 47,00 | 56,45 | 55,27 | 57,18 | 56,59 | 55,54 | 58,34 | 63,89 | 61,15 | 57,23 | 58,95 | 59,70 | 58,38 | 54,98 | 52,28 | 46,98 | 62          |
|                    | 27         | 46,30 | 54,15 | 54,07 | 56,88 | 55,89 | 54,84 | 58,74 | 65,19 | 62,25 | 58,33 | 60,05 | 60,60 | 59,98 | 56,68 | 54,18 | 48,88 | 63          |
|                    | 28         | 47,10 | 58,35 | 57,27 | 58,58 | 57,39 | 56,54 | 59,54 | 65,89 | 62,35 | 58,83 | 60,85 | 61,90 | 60,48 | 56,98 | 54,28 | 49,48 | 64          |
|                    | 29         | 47,60 | 55,95 | 56,77 | 58,18 | 57,89 | 56,64 | 59,44 | 64,89 | 61,65 | 57,83 | 59,55 | 60,50 | 59,08 | 56,08 | 53,08 | 47,98 | 62          |
|                    | 30         | 48,10 | 56,35 | 56,27 | 58,48 | 57,59 | 56,14 | 58,84 | 64,59 | 62,55 | 58,23 | 60,15 | 61,00 | 59,68 | 56,48 | 53,88 | 48,68 | 63          |

Tabela D- 4: Conjunto de  $L'_{nT}$  [dB] (bandas 1/3 de oitavas) e  $(L'_{nT,w})$  [dB] para a posição (1,4) do piso da sala

| $L'_{nT}$          | $\tau$ [s] | 100   | 125   | 160   | 200   | 250   | 315   | 400   | 500   | 630   | 800   | 1000  | 1250  | 1600  | 2000  | 2500  | 3150  | $L'_{nT,w}$ |
|--------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| $L'_{nT}$<br>(1,4) | 1          | 49,30 | 57,35 | 59,67 | 59,98 | 61,69 | 59,34 | 60,64 | 65,49 | 64,15 | 61,43 | 63,05 | 63,30 | 61,68 | 59,08 | 56,08 | 50,78 | 65          |
|                    | 2          | 50,30 | 57,35 | 61,97 | 61,18 | 61,49 | 58,04 | 61,04 | 65,79 | 64,15 | 61,33 | 63,35 | 63,50 | 62,08 | 59,38 | 56,18 | 50,98 | 65          |
|                    | 3          | 52,00 | 55,85 | 59,37 | 60,78 | 62,19 | 57,94 | 61,04 | 65,59 | 63,75 | 60,63 | 63,25 | 63,70 | 61,98 | 59,18 | 56,18 | 51,08 | 65          |
|                    | 4          | 48,50 | 57,95 | 61,67 | 60,18 | 60,59 | 58,84 | 60,54 | 64,89 | 64,05 | 60,63 | 62,65 | 63,40 | 62,28 | 59,48 | 55,98 | 50,98 | 65          |
|                    | 5          | 48,50 | 57,05 | 62,47 | 59,68 | 61,19 | 58,94 | 61,14 | 64,79 | 63,55 | 60,23 | 62,55 | 63,30 | 61,68 | 59,18 | 55,78 | 50,88 | 65          |
|                    | 6          | 47,30 | 55,85 | 61,07 | 61,08 | 61,49 | 59,04 | 61,54 | 64,89 | 63,85 | 60,53 | 62,75 | 63,10 | 61,78 | 59,28 | 55,68 | 50,78 | 65          |
|                    | 7          | 49,10 | 55,75 | 59,27 | 60,38 | 60,69 | 57,84 | 61,54 | 64,89 | 63,35 | 60,03 | 62,45 | 62,60 | 61,58 | 58,58 | 55,28 | 50,28 | 64          |
|                    | 8          | 48,10 | 58,05 | 58,77 | 59,08 | 59,59 | 57,44 | 60,64 | 64,39 | 62,75 | 59,03 | 61,15 | 61,30 | 60,78 | 57,88 | 54,58 | 49,58 | 64          |
|                    | 9          | 44,60 | 56,05 | 58,27 | 57,78 | 58,29 | 55,54 | 58,64 | 63,29 | 62,35 | 57,83 | 60,45 | 60,30 | 60,28 | 56,98 | 54,48 | 49,18 | 63          |
|                    | 10         | 46,90 | 55,55 | 59,27 | 58,78 | 59,39 | 57,24 | 60,04 | 64,69 | 63,25 | 59,03 | 61,75 | 61,50 | 61,28 | 57,88 | 54,78 | 49,48 | 64          |
|                    | 11         | 48,20 | 57,05 | 58,77 | 58,88 | 59,99 | 57,14 | 60,94 | 64,49 | 63,05 | 59,13 | 61,45 | 61,60 | 61,18 | 57,98 | 54,48 | 49,58 | 64          |
|                    | 12         | 49,10 | 55,65 | 58,67 | 57,88 | 59,19 | 56,84 | 59,64 | 63,79 | 62,15 | 58,33 | 60,95 | 61,10 | 60,48 | 57,18 | 53,88 | 49,08 | 63          |
|                    | 13         | 47,40 | 58,25 | 59,57 | 58,78 | 59,49 | 56,84 | 58,74 | 63,79 | 62,45 | 59,23 | 61,95 | 62,40 | 61,28 | 58,68 | 55,98 | 50,78 | 64          |
|                    | 14         | 47,70 | 56,25 | 56,87 | 57,78 | 59,59 | 56,34 | 58,74 | 63,99 | 62,25 | 58,13 | 60,95 | 61,00 | 60,78 | 57,28 | 53,98 | 48,98 | 63          |
|                    | 15         | 48,10 | 54,85 | 58,17 | 59,78 | 60,09 | 56,74 | 59,14 | 64,19 | 62,15 | 58,53 | 61,35 | 61,50 | 60,88 | 57,88 | 53,88 | 49,08 | 63          |
|                    | 16         | 45,80 | 56,25 | 58,37 | 57,58 | 58,79 | 54,84 | 57,64 | 62,39 | 60,65 | 56,83 | 59,85 | 59,20 | 59,08 | 55,78 | 52,18 | 47,38 | 62          |
|                    | 17         | 47,40 | 54,35 | 57,37 | 57,48 | 58,59 | 55,84 | 59,04 | 62,89 | 62,25 | 58,93 | 61,05 | 61,60 | 60,98 | 58,28 | 54,88 | 50,08 | 64          |
|                    | 18         | 47,50 | 56,55 | 60,17 | 58,78 | 60,29 | 56,84 | 60,24 | 63,99 | 62,65 | 59,03 | 61,15 | 62,40 | 61,48 | 58,48 | 54,28 | 49,78 | 64          |
|                    | 19         | 45,30 | 55,25 | 57,47 | 57,78 | 58,69 | 54,64 | 58,44 | 62,39 | 60,75 | 56,93 | 59,75 | 60,70 | 59,88 | 56,98 | 52,68 | 47,98 | 62          |
|                    | 20         | 46,70 | 53,85 | 59,07 | 59,08 | 59,59 | 57,34 | 59,44 | 64,39 | 63,15 | 58,93 | 61,95 | 62,90 | 61,98 | 58,88 | 55,28 | 50,38 | 64          |
|                    | 21         | 48,40 | 56,05 | 60,27 | 60,18 | 60,79 | 58,14 | 59,54 | 64,69 | 62,85 | 59,63 | 62,05 | 62,50 | 61,48 | 59,18 | 55,38 | 50,38 | 64          |
|                    | 22         | 50,30 | 54,55 | 58,47 | 59,58 | 61,29 | 58,44 | 61,24 | 65,59 | 63,75 | 60,23 | 62,45 | 63,10 | 61,88 | 59,48 | 55,78 | 50,88 | 65          |
|                    | 23         | 47,80 | 56,35 | 57,57 | 59,78 | 60,09 | 57,14 | 59,34 | 64,39 | 62,95 | 59,03 | 61,85 | 62,50 | 61,38 | 58,98 | 54,88 | 50,08 | 64          |
|                    | 24         | 48,30 | 58,15 | 57,37 | 58,88 | 59,79 | 56,94 | 59,44 | 63,99 | 61,95 | 57,93 | 61,05 | 61,30 | 60,78 | 58,18 | 53,68 | 49,28 | 63          |
|                    | 25         | 47,10 | 56,05 | 59,27 | 57,58 | 58,49 | 55,84 | 57,34 | 63,09 | 60,65 | 57,43 | 59,95 | 59,80 | 59,48 | 56,28 | 52,38 | 47,58 | 62          |
|                    | 26         | 45,20 | 56,65 | 58,87 | 58,98 | 60,99 | 56,24 | 59,64 | 63,79 | 62,45 | 58,23 | 61,25 | 62,30 | 61,38 | 58,18 | 53,48 | 48,88 | 63          |
|                    | 27         | 48,30 | 56,35 | 60,37 | 59,68 | 60,79 | 57,64 | 59,54 | 64,49 | 63,55 | 58,73 | 62,15 | 62,40 | 61,78 | 58,48 | 54,48 | 49,88 | 64          |
|                    | 28         | 47,80 | 54,35 | 59,87 | 58,38 | 59,29 | 56,14 | 58,34 | 63,99 | 63,05 | 58,93 | 62,35 | 62,00 | 61,78 | 58,48 | 54,58 | 49,58 | 64          |
|                    | 29         | 47,10 | 55,65 | 58,77 | 57,78 | 59,49 | 56,74 | 58,34 | 64,39 | 62,65 | 58,23 | 61,15 | 61,40 | 61,48 | 57,78 | 53,58 | 48,68 | 63          |
|                    | 30         | 50,70 | 56,65 | 60,37 | 59,98 | 60,59 | 57,24 | 59,64 | 65,09 | 62,85 | 59,13 | 62,05 | 62,60 | 62,08 | 58,68 | 54,28 | 49,58 | 64          |

Tabela D- 5: Conjunto de  $L'_{nT}$  [dB] (bandas 1/3 de oitavas) e  $(L'_{nT,w})$  [dB] para a posição (2,1) do piso da sala

| $L'_{nT}$          | $\tau$ [s] | 100   | 125   | 160   | 200   | 250   | 315   | 400   | 500   | 630   | 800   | 1000  | 1250  | 1600  | 2000  | 2500  | 3150  | $L'_{nT,w}$ |
|--------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| $L'_{nT}$<br>(2,1) | 1          | 50,20 | 68,95 | 61,77 | 64,38 | 66,59 | 65,44 | 65,84 | 64,59 | 64,45 | 65,73 | 65,55 | 66,40 | 65,68 | 63,98 | 60,48 | 54,88 | 68          |
|                    | 2          | 47,80 | 65,55 | 62,87 | 63,78 | 66,49 | 65,24 | 65,74 | 64,09 | 64,65 | 65,73 | 65,65 | 66,40 | 65,58 | 63,88 | 60,38 | 54,98 | 68          |
|                    | 3          | 48,10 | 65,25 | 61,07 | 64,48 | 67,39 | 64,94 | 66,04 | 63,99 | 64,75 | 65,83 | 65,85 | 66,50 | 65,18 | 63,78 | 60,58 | 55,08 | 68          |
|                    | 4          | 49,00 | 64,85 | 62,27 | 64,88 | 67,29 | 64,94 | 65,34 | 64,29 | 64,65 | 65,93 | 66,15 | 66,80 | 64,98 | 63,88 | 60,68 | 54,98 | 69          |
|                    | 5          | 49,00 | 65,35 | 60,27 | 65,18 | 67,29 | 64,94 | 65,64 | 63,89 | 64,25 | 66,03 | 66,15 | 66,70 | 64,88 | 63,78 | 60,28 | 54,28 | 68          |
|                    | 6          | 48,40 | 64,65 | 61,47 | 64,48 | 66,59 | 65,84 | 65,64 | 64,69 | 64,75 | 66,13 | 66,25 | 66,80 | 64,58 | 63,98 | 60,48 | 54,68 | 68          |
|                    | 7          | 48,30 | 63,95 | 61,87 | 63,08 | 66,49 | 65,14 | 65,44 | 64,49 | 64,35 | 65,73 | 65,75 | 66,40 | 64,28 | 63,58 | 60,28 | 54,18 | 68          |
|                    | 8          | 50,20 | 66,15 | 60,67 | 64,28 | 66,59 | 65,34 | 65,64 | 64,09 | 64,95 | 66,03 | 65,95 | 66,40 | 64,18 | 63,78 | 60,18 | 54,38 | 68          |
|                    | 9          | 48,00 | 63,95 | 61,17 | 65,18 | 66,59 | 65,34 | 65,54 | 64,19 | 64,65 | 66,13 | 65,85 | 66,20 | 63,88 | 63,78 | 60,18 | 54,48 | 68          |
|                    | 10         | 47,10 | 65,15 | 61,27 | 63,78 | 66,29 | 64,54 | 65,14 | 64,09 | 64,75 | 66,33 | 65,75 | 66,00 | 63,68 | 63,58 | 59,68 | 53,98 | 68          |
|                    | 11         | 47,60 | 63,25 | 61,97 | 63,58 | 66,39 | 65,94 | 64,54 | 63,29 | 64,15 | 65,63 | 65,85 | 65,90 | 63,38 | 63,38 | 59,78 | 53,88 | 68          |
|                    | 12         | 46,90 | 63,85 | 61,27 | 64,48 | 65,89 | 64,84 | 65,74 | 64,79 | 64,65 | 66,03 | 65,95 | 66,00 | 63,98 | 63,58 | 59,78 | 54,08 | 68          |
|                    | 13         | 47,70 | 66,05 | 61,47 | 63,68 | 66,89 | 65,44 | 65,44 | 64,49 | 64,75 | 65,93 | 65,95 | 66,10 | 63,98 | 63,68 | 59,78 | 54,38 | 68          |
|                    | 14         | 46,90 | 64,15 | 61,27 | 63,78 | 66,19 | 65,04 | 65,54 | 64,19 | 64,95 | 66,13 | 66,05 | 65,60 | 63,38 | 63,78 | 59,68 | 54,08 | 68          |
|                    | 15         | 48,00 | 65,15 | 60,87 | 65,38 | 66,99 | 64,84 | 65,74 | 64,09 | 64,65 | 66,13 | 65,95 | 65,50 | 63,48 | 63,58 | 59,68 | 54,18 | 68          |
|                    | 16         | 48,40 | 63,45 | 61,07 | 64,48 | 67,29 | 64,74 | 65,84 | 64,79 | 64,75 | 65,93 | 66,25 | 65,90 | 63,58 | 63,68 | 59,88 | 54,18 | 68          |
|                    | 17         | 49,00 | 67,35 | 61,67 | 63,48 | 66,09 | 64,04 | 65,14 | 63,99 | 64,65 | 66,13 | 65,65 | 65,60 | 63,38 | 63,58 | 59,38 | 53,88 | 68          |
|                    | 18         | 46,60 | 68,65 | 61,87 | 65,18 | 66,99 | 65,34 | 65,64 | 64,59 | 64,75 | 66,33 | 65,95 | 65,60 | 63,38 | 63,78 | 59,48 | 54,08 | 68          |
|                    | 19         | 47,00 | 65,75 | 62,37 | 64,68 | 67,19 | 64,64 | 66,04 | 63,59 | 64,45 | 65,83 | 66,05 | 65,60 | 63,48 | 63,78 | 60,08 | 54,38 | 68          |
|                    | 20         | 48,40 | 64,25 | 60,67 | 65,58 | 67,19 | 64,94 | 65,24 | 64,19 | 64,65 | 66,03 | 65,15 | 65,00 | 62,98 | 63,58 | 59,28 | 53,78 | 67          |
|                    | 21         | 46,90 | 64,85 | 62,07 | 64,38 | 67,09 | 64,34 | 65,54 | 63,79 | 64,65 | 65,73 | 66,05 | 65,50 | 63,58 | 63,58 | 59,38 | 53,78 | 68          |
|                    | 22         | 47,30 | 63,35 | 61,47 | 63,28 | 65,79 | 64,84 | 65,54 | 63,79 | 64,35 | 66,13 | 65,75 | 65,40 | 63,48 | 63,78 | 59,38 | 53,88 | 68          |
|                    | 23         | 47,60 | 62,95 | 61,47 | 64,08 | 66,09 | 64,74 | 65,94 | 63,89 | 64,85 | 66,43 | 66,25 | 65,50 | 63,68 | 63,78 | 59,78 | 54,28 | 68          |
|                    | 24         | 48,00 | 64,45 | 61,17 | 65,68 | 66,69 | 66,34 | 65,44 | 64,49 | 64,55 | 66,13 | 66,55 | 65,50 | 63,78 | 63,88 | 59,78 | 54,18 | 68          |
|                    | 25         | 48,40 | 67,55 | 61,47 | 64,78 | 66,19 | 64,74 | 64,84 | 64,29 | 64,55 | 66,23 | 66,05 | 65,10 | 63,28 | 63,78 | 59,28 | 53,98 | 68          |
|                    | 26         | 46,30 | 64,65 | 60,27 | 63,78 | 66,79 | 65,04 | 64,94 | 64,59 | 64,85 | 66,23 | 65,75 | 65,00 | 63,48 | 63,88 | 59,48 | 53,98 | 68          |
|                    | 27         | 47,20 | 62,25 | 61,57 | 63,78 | 66,49 | 65,34 | 65,44 | 64,39 | 64,75 | 66,23 | 66,15 | 65,30 | 63,58 | 63,98 | 59,78 | 54,28 | 68          |
|                    | 28         | 47,80 | 64,55 | 60,27 | 65,88 | 66,59 | 65,44 | 64,74 | 64,09 | 64,75 | 66,23 | 66,05 | 65,00 | 63,28 | 63,88 | 59,18 | 53,98 | 68          |
|                    | 29         | 47,00 | 64,65 | 60,77 | 65,08 | 67,59 | 65,54 | 65,94 | 64,99 | 65,25 | 66,13 | 66,35 | 65,40 | 63,18 | 63,98 | 59,58 | 54,58 | 68          |
|                    | 30         | 48,30 | 66,95 | 61,57 | 63,68 | 67,69 | 64,94 | 65,84 | 64,09 | 65,25 | 65,83 | 66,75 | 65,30 | 63,58 | 64,18 | 59,68 | 54,48 | 68          |

Tabela D- 6: Conjunto de  $L'_{nT}$  [dB] (bandas 1/3 de oitavas) e  $(L'_{nT,w})$  [dB] para a posição (2,2) do piso da sala

| $L'_{nT}$          | $\tau$ [s] | 100   | 125   | 160   | 200   | 250   | 315   | 400   | 500   | 630   | 800   | 1000  | 1250  | 1600  | 2000  | 2500  | 3150  | $L'_{nT,w}$ |
|--------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| $L'_{nT}$<br>(2,2) | 1          | 49,90 | 64,15 | 60,27 | 64,28 | 65,39 | 65,64 | 65,24 | 64,79 | 64,45 | 65,63 | 66,65 | 65,50 | 63,78 | 64,38 | 60,18 | 54,78 | 68          |
|                    | 2          | 48,00 | 63,25 | 59,37 | 62,18 | 65,39 | 65,74 | 64,94 | 64,79 | 64,95 | 65,63 | 66,35 | 65,30 | 63,68 | 64,68 | 59,88 | 54,48 | 68          |
|                    | 3          | 49,50 | 61,45 | 58,27 | 63,68 | 65,29 | 65,74 | 65,44 | 64,69 | 64,85 | 65,83 | 66,75 | 65,90 | 63,98 | 64,58 | 60,08 | 54,78 | 68          |
|                    | 4          | 49,90 | 63,55 | 58,57 | 62,68 | 65,69 | 65,54 | 65,24 | 64,09 | 65,25 | 66,03 | 66,85 | 65,30 | 63,98 | 64,38 | 60,38 | 54,88 | 68          |
|                    | 5          | 48,30 | 62,35 | 61,17 | 64,08 | 65,99 | 66,04 | 65,34 | 64,49 | 65,55 | 66,23 | 67,25 | 65,40 | 63,98 | 64,38 | 60,48 | 55,28 | 68          |
|                    | 6          | 49,90 | 62,85 | 60,47 | 62,68 | 66,79 | 65,44 | 65,24 | 63,99 | 65,45 | 65,73 | 67,45 | 65,00 | 63,88 | 64,18 | 60,88 | 54,88 | 68          |
|                    | 7          | 49,50 | 64,75 | 59,67 | 62,88 | 65,89 | 65,14 | 65,64 | 64,79 | 65,55 | 65,93 | 67,05 | 65,10 | 63,68 | 64,08 | 60,68 | 55,18 | 68          |
|                    | 8          | 49,20 | 62,35 | 59,37 | 63,38 | 65,39 | 65,34 | 66,44 | 64,09 | 65,25 | 66,03 | 67,45 | 65,10 | 63,78 | 63,98 | 60,78 | 55,38 | 68          |
|                    | 9          | 48,40 | 64,85 | 58,87 | 61,58 | 65,79 | 66,24 | 65,84 | 64,39 | 64,85 | 66,83 | 67,55 | 64,70 | 63,78 | 64,28 | 60,88 | 55,18 | 69          |
|                    | 10         | 48,60 | 62,35 | 59,57 | 63,28 | 65,19 | 65,64 | 65,94 | 64,29 | 65,15 | 66,43 | 67,45 | 64,80 | 63,78 | 64,08 | 60,38 | 54,88 | 68          |
|                    | 11         | 48,30 | 62,55 | 60,67 | 62,18 | 64,39 | 65,94 | 65,44 | 63,99 | 65,85 | 66,03 | 67,35 | 64,80 | 64,18 | 64,38 | 60,68 | 54,98 | 68          |
|                    | 12         | 49,40 | 63,85 | 59,57 | 63,28 | 65,09 | 65,64 | 65,04 | 64,39 | 65,45 | 66,43 | 67,15 | 64,70 | 63,98 | 63,98 | 60,58 | 54,68 | 68          |
|                    | 13         | 47,50 | 62,65 | 61,07 | 62,58 | 64,89 | 65,64 | 65,04 | 64,79 | 65,35 | 65,93 | 67,55 | 64,70 | 64,18 | 64,18 | 60,48 | 54,98 | 68          |
|                    | 14         | 49,10 | 62,45 | 60,57 | 62,58 | 65,09 | 65,04 | 65,34 | 64,49 | 65,45 | 66,13 | 67,45 | 64,50 | 64,38 | 64,28 | 60,68 | 54,88 | 68          |
|                    | 15         | 48,30 | 62,05 | 61,77 | 62,78 | 65,69 | 64,74 | 64,34 | 64,49 | 65,45 | 66,73 | 67,35 | 64,50 | 64,28 | 63,88 | 60,68 | 54,58 | 68          |
|                    | 16         | 47,50 | 61,75 | 60,77 | 63,48 | 65,09 | 65,54 | 65,74 | 64,39 | 64,85 | 66,73 | 67,35 | 64,50 | 64,38 | 63,78 | 60,48 | 54,48 | 68          |
|                    | 17         | 48,90 | 64,25 | 61,07 | 63,68 | 65,69 | 65,04 | 64,34 | 64,49 | 64,65 | 65,93 | 66,65 | 63,90 | 64,48 | 64,18 | 60,08 | 54,28 | 68          |
|                    | 18         | 48,60 | 64,15 | 59,57 | 63,48 | 63,99 | 64,84 | 65,24 | 64,09 | 65,25 | 66,23 | 67,35 | 64,30 | 64,48 | 63,98 | 60,48 | 54,48 | 68          |
|                    | 19         | 49,00 | 63,75 | 60,47 | 62,58 | 65,99 | 65,24 | 66,94 | 65,19 | 65,25 | 66,33 | 67,35 | 64,20 | 64,28 | 63,98 | 60,38 | 54,28 | 68          |
|                    | 20         | 48,40 | 63,15 | 58,97 | 62,88 | 65,29 | 66,04 | 66,94 | 64,19 | 65,05 | 66,23 | 67,55 | 64,20 | 64,48 | 64,18 | 60,68 | 54,38 | 68          |
|                    | 21         | 47,40 | 62,35 | 60,17 | 61,98 | 65,39 | 66,14 | 65,44 | 64,69 | 65,25 | 66,13 | 67,15 | 64,10 | 64,38 | 63,68 | 60,08 | 53,88 | 68          |
|                    | 22         | 48,70 | 65,25 | 59,37 | 62,88 | 65,19 | 65,24 | 66,04 | 64,79 | 65,45 | 66,43 | 67,05 | 64,30 | 64,58 | 63,58 | 60,08 | 53,58 | 68          |
|                    | 23         | 49,40 | 63,15 | 59,47 | 63,18 | 65,49 | 65,64 | 66,54 | 65,09 | 65,15 | 66,63 | 67,35 | 64,10 | 64,38 | 63,38 | 60,18 | 53,78 | 68          |
|                    | 24         | 50,50 | 62,95 | 61,77 | 63,08 | 65,29 | 66,24 | 66,24 | 64,99 | 64,75 | 66,33 | 67,65 | 63,90 | 64,48 | 63,58 | 60,18 | 53,88 | 68          |
|                    | 25         | 49,50 | 62,75 | 62,37 | 62,18 | 65,79 | 65,04 | 65,54 | 64,79 | 65,35 | 66,83 | 67,35 | 64,20 | 64,48 | 63,68 | 59,98 | 53,88 | 68          |
|                    | 26         | 49,10 | 63,75 | 61,47 | 63,28 | 65,79 | 66,04 | 65,64 | 65,29 | 65,65 | 66,03 | 67,35 | 64,00 | 64,68 | 63,68 | 59,98 | 53,58 | 68          |
|                    | 27         | 48,60 | 64,25 | 59,57 | 63,28 | 64,09 | 64,74 | 65,24 | 64,19 | 65,15 | 66,33 | 66,25 | 63,50 | 64,08 | 63,38 | 59,38 | 52,78 | 67          |
|                    | 28         | 49,20 | 64,65 | 61,27 | 62,88 | 64,99 | 65,64 | 65,34 | 64,39 | 65,45 | 66,23 | 67,05 | 64,10 | 64,48 | 63,38 | 59,78 | 53,38 | 68          |
|                    | 29         | 49,70 | 62,35 | 60,47 | 62,68 | 66,39 | 65,64 | 65,94 | 64,59 | 65,25 | 66,63 | 67,35 | 64,00 | 64,48 | 63,38 | 60,08 | 53,28 | 68          |
|                    | 30         | 49,70 | 61,35 | 62,17 | 64,28 | 65,89 | 65,54 | 65,74 | 65,09 | 65,55 | 66,43 | 67,35 | 64,40 | 64,08 | 63,78 | 59,58 | 53,38 | 68          |

Tabela D- 7: Conjunto de  $L'_{nT}$  [dB] (bandas 1/3 de oitavas) e  $(L'_{nT,w})$  [dB] para a posição (2,3) do piso da sala

| $L'_{nT}$          | $\tau$ [s] | 100   | 125   | 160   | 200   | 250   | 315   | 400   | 500   | 630   | 800   | 1000  | 1250  | 1600  | 2000  | 2500  | 3150  | $L'_{nT,w}$ |
|--------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| $L'_{nT}$<br>(2,3) | 1          | 44,40 | 63,05 | 60,37 | 63,58 | 66,39 | 65,44 | 65,54 | 65,59 | 65,25 | 66,13 | 66,85 | 63,80 | 63,68 | 63,18 | 59,08 | 52,78 | 67          |
|                    | 2          | 44,80 | 64,35 | 60,77 | 65,18 | 66,59 | 65,54 | 66,04 | 65,69 | 65,05 | 66,83 | 66,65 | 63,60 | 64,18 | 63,18 | 59,38 | 53,18 | 68          |
|                    | 3          | 46,70 | 63,65 | 60,67 | 62,28 | 65,89 | 65,74 | 65,24 | 64,69 | 64,75 | 65,73 | 65,55 | 62,70 | 62,88 | 62,38 | 58,08 | 51,78 | 67          |
|                    | 4          | 45,60 | 62,65 | 59,57 | 62,08 | 65,89 | 65,64 | 65,24 | 65,39 | 65,15 | 65,93 | 65,45 | 63,00 | 63,58 | 62,48 | 58,38 | 52,18 | 67          |
|                    | 5          | 47,10 | 63,85 | 59,07 | 62,78 | 66,49 | 66,04 | 66,24 | 64,99 | 65,25 | 67,23 | 66,95 | 63,30 | 63,78 | 62,98 | 58,78 | 52,68 | 67          |
|                    | 6          | 46,60 | 63,95 | 60,67 | 62,98 | 66,59 | 65,94 | 65,84 | 65,49 | 65,75 | 66,53 | 66,85 | 63,70 | 63,58 | 62,78 | 58,88 | 52,98 | 67          |
|                    | 7          | 44,20 | 63,75 | 59,77 | 64,28 | 66,59 | 66,64 | 66,34 | 65,29 | 65,25 | 66,73 | 67,05 | 63,60 | 63,68 | 62,98 | 58,88 | 52,78 | 67          |
|                    | 8          | 45,80 | 64,05 | 59,17 | 63,78 | 66,19 | 66,34 | 66,14 | 65,29 | 66,15 | 66,93 | 67,15 | 63,80 | 63,78 | 62,78 | 58,98 | 52,98 | 68          |
|                    | 9          | 46,70 | 66,35 | 61,07 | 64,48 | 66,49 | 65,74 | 65,74 | 65,09 | 65,95 | 66,33 | 66,55 | 64,10 | 63,88 | 63,18 | 58,58 | 52,98 | 67          |
|                    | 10         | 46,50 | 62,45 | 61,77 | 63,28 | 66,09 | 65,54 | 65,14 | 65,69 | 65,65 | 66,43 | 66,55 | 64,10 | 63,88 | 63,18 | 58,68 | 53,08 | 67          |
|                    | 11         | 44,80 | 63,05 | 61,07 | 64,18 | 66,69 | 65,94 | 65,74 | 65,19 | 65,75 | 66,33 | 66,45 | 63,40 | 63,48 | 62,78 | 58,78 | 52,68 | 67          |
|                    | 12         | 45,20 | 62,25 | 60,87 | 63,78 | 65,99 | 65,84 | 66,54 | 64,99 | 65,95 | 66,73 | 66,65 | 64,10 | 63,88 | 63,08 | 58,78 | 53,08 | 68          |
|                    | 13         | 47,00 | 62,65 | 60,37 | 64,28 | 66,69 | 65,94 | 66,34 | 64,69 | 65,85 | 66,83 | 66,85 | 64,00 | 63,78 | 63,08 | 58,98 | 53,28 | 68          |
|                    | 14         | 44,80 | 64,55 | 60,07 | 62,98 | 66,59 | 66,24 | 66,24 | 65,79 | 65,55 | 66,53 | 66,55 | 63,80 | 63,38 | 62,98 | 58,78 | 52,78 | 67          |
|                    | 15         | 47,30 | 65,25 | 60,17 | 63,18 | 66,79 | 65,84 | 65,74 | 65,59 | 65,35 | 66,53 | 66,75 | 63,80 | 63,38 | 62,78 | 58,38 | 52,68 | 67          |
|                    | 16         | 45,70 | 63,15 | 61,37 | 62,68 | 66,29 | 65,54 | 65,94 | 64,79 | 65,05 | 66,93 | 66,65 | 63,50 | 63,28 | 62,48 | 58,78 | 52,48 | 67          |
|                    | 17         | 46,50 | 63,95 | 61,67 | 62,78 | 66,99 | 66,04 | 65,94 | 65,09 | 65,35 | 66,53 | 66,15 | 63,50 | 63,18 | 62,58 | 58,78 | 52,58 | 67          |
|                    | 18         | 47,20 | 63,35 | 60,97 | 64,58 | 66,59 | 65,64 | 66,84 | 65,09 | 65,55 | 66,73 | 66,65 | 63,90 | 63,78 | 63,08 | 58,78 | 53,58 | 68          |
|                    | 19         | 44,90 | 62,25 | 61,67 | 63,78 | 65,99 | 65,84 | 66,54 | 66,29 | 65,75 | 66,33 | 66,65 | 63,90 | 63,88 | 63,28 | 58,98 | 53,88 | 68          |
|                    | 20         | 45,90 | 62,55 | 60,77 | 64,18 | 65,59 | 65,24 | 65,84 | 65,19 | 65,05 | 66,03 | 65,75 | 63,80 | 63,68 | 63,18 | 58,78 | 53,08 | 67          |
|                    | 21         | 45,00 | 62,65 | 61,27 | 63,08 | 66,79 | 64,74 | 64,94 | 65,19 | 64,75 | 66,43 | 65,65 | 63,60 | 64,18 | 63,48 | 58,68 | 53,68 | 67          |
|                    | 22         | 46,10 | 66,25 | 60,67 | 63,98 | 66,79 | 65,94 | 66,14 | 65,19 | 64,55 | 66,23 | 65,65 | 64,20 | 64,18 | 62,98 | 58,28 | 53,58 | 67          |
|                    | 23         | 45,70 | 63,75 | 61,77 | 63,68 | 66,19 | 65,64 | 65,94 | 65,19 | 65,65 | 66,53 | 65,55 | 64,30 | 64,18 | 63,28 | 58,48 | 53,78 | 68          |
|                    | 24         | 46,70 | 64,65 | 60,27 | 63,18 | 66,39 | 65,24 | 65,84 | 65,09 | 65,15 | 66,53 | 65,35 | 63,80 | 63,88 | 62,88 | 58,28 | 53,38 | 67          |
|                    | 25         | 45,20 | 66,65 | 60,37 | 62,78 | 66,19 | 65,14 | 64,74 | 64,79 | 65,55 | 66,53 | 65,85 | 64,10 | 63,78 | 62,88 | 58,48 | 53,78 | 67          |
|                    | 26         | 43,40 | 63,85 | 61,07 | 62,98 | 65,69 | 65,64 | 64,84 | 65,29 | 65,15 | 66,63 | 65,05 | 64,20 | 63,68 | 62,68 | 58,18 | 53,58 | 67          |
|                    | 27         | 46,60 | 65,35 | 60,47 | 62,88 | 65,49 | 65,64 | 65,34 | 65,29 | 65,35 | 66,63 | 65,25 | 64,20 | 63,18 | 62,58 | 57,98 | 53,58 | 67          |
|                    | 28         | 45,50 | 63,85 | 59,57 | 63,48 | 65,69 | 65,34 | 65,14 | 64,99 | 65,35 | 66,43 | 65,25 | 64,40 | 63,58 | 62,88 | 57,88 | 53,38 | 67          |
|                    | 29         | 45,80 | 62,85 | 60,67 | 63,18 | 66,09 | 65,24 | 65,44 | 65,69 | 65,35 | 66,33 | 65,25 | 64,40 | 63,78 | 63,08 | 58,08 | 53,58 | 67          |
|                    | 30         | 45,90 | 62,45 | 60,07 | 63,18 | 65,49 | 65,04 | 65,34 | 65,19 | 65,15 | 66,53 | 64,95 | 64,20 | 63,78 | 63,28 | 58,18 | 53,98 | 67          |

Tabela D- 8: Conjunto de  $L'_{nT}$  [dB] (bandas 1/3 de oitavas) e  $(L'_{nT,w})$  [dB] para a posição (2,4) do piso da sala

| $L'_{nT}$          | $\tau$ [s] | 100   | 125   | 160   | 200   | 250   | 315   | 400   | 500   | 630   | 800   | 1000  | 1250  | 1600  | 2000  | 2500  | 3150  | $L'_{nT,w}$ |
|--------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| $L'_{nT}$<br>(2,4) | 1          | 49,30 | 63,35 | 62,97 | 64,98 | 64,79 | 64,34 | 63,84 | 64,99 | 64,95 | 66,93 | 65,05 | 63,50 | 63,88 | 63,18 | 57,98 | 54,08 | 67          |
|                    | 2          | 49,00 | 64,75 | 61,57 | 65,78 | 66,39 | 65,74 | 64,34 | 64,79 | 64,85 | 67,43 | 66,15 | 63,70 | 63,98 | 63,38 | 57,78 | 54,48 | 68          |
|                    | 3          | 49,10 | 63,45 | 61,47 | 64,28 | 64,69 | 65,04 | 64,44 | 65,09 | 64,75 | 67,23 | 65,65 | 63,90 | 64,08 | 63,38 | 58,08 | 54,38 | 68          |
|                    | 4          | 48,30 | 66,15 | 61,37 | 64,08 | 64,89 | 66,04 | 65,34 | 64,79 | 64,65 | 66,93 | 66,25 | 63,80 | 63,58 | 63,18 | 58,18 | 54,48 | 68          |
|                    | 5          | 49,40 | 64,65 | 60,37 | 62,48 | 65,79 | 65,64 | 65,74 | 64,29 | 64,45 | 66,83 | 65,75 | 64,40 | 63,98 | 63,38 | 57,58 | 54,48 | 68          |
|                    | 6          | 48,80 | 66,25 | 60,07 | 63,78 | 64,89 | 65,24 | 64,94 | 65,49 | 64,65 | 66,43 | 65,75 | 63,60 | 64,18 | 63,18 | 57,78 | 54,48 | 67          |
|                    | 7          | 48,80 | 65,95 | 60,57 | 63,58 | 64,99 | 65,34 | 65,34 | 64,89 | 64,65 | 66,83 | 65,95 | 63,60 | 64,08 | 63,28 | 57,78 | 54,48 | 67          |
|                    | 8          | 48,50 | 65,85 | 59,77 | 62,78 | 65,19 | 65,24 | 65,64 | 65,19 | 65,05 | 67,43 | 66,05 | 63,80 | 64,08 | 63,28 | 58,18 | 54,58 | 68          |
|                    | 9          | 48,50 | 65,15 | 59,47 | 64,18 | 65,89 | 65,64 | 65,24 | 65,69 | 64,65 | 66,73 | 65,35 | 64,20 | 63,98 | 63,38 | 58,28 | 55,08 | 68          |
|                    | 10         | 49,70 | 66,25 | 59,97 | 64,08 | 65,49 | 65,74 | 65,54 | 65,49 | 64,85 | 66,83 | 65,55 | 63,80 | 64,08 | 63,48 | 57,98 | 54,78 | 68          |
|                    | 11         | 49,10 | 63,75 | 61,37 | 64,48 | 65,19 | 65,84 | 66,04 | 65,29 | 64,35 | 67,03 | 65,65 | 63,50 | 63,78 | 63,38 | 57,68 | 54,58 | 67          |
|                    | 12         | 48,30 | 65,85 | 59,87 | 64,08 | 64,49 | 65,24 | 65,74 | 65,49 | 64,45 | 66,73 | 65,85 | 63,50 | 64,28 | 63,28 | 57,88 | 54,68 | 68          |
|                    | 13         | 47,30 | 65,65 | 60,37 | 63,48 | 65,49 | 65,64 | 66,04 | 65,49 | 64,45 | 67,33 | 65,35 | 63,70 | 64,18 | 63,18 | 57,98 | 54,68 | 68          |
|                    | 14         | 47,70 | 64,85 | 59,77 | 62,08 | 64,69 | 65,54 | 65,64 | 64,39 | 64,85 | 67,53 | 65,75 | 64,00 | 64,28 | 63,28 | 58,18 | 54,98 | 68          |
|                    | 15         | 48,70 | 65,15 | 61,17 | 63,68 | 65,09 | 65,24 | 65,64 | 65,09 | 65,35 | 67,13 | 65,65 | 64,20 | 64,08 | 63,68 | 57,98 | 55,08 | 68          |
|                    | 16         | 48,20 | 65,55 | 60,97 | 63,68 | 64,69 | 65,54 | 66,14 | 65,59 | 64,95 | 67,23 | 65,95 | 64,70 | 64,18 | 63,28 | 58,08 | 55,18 | 68          |
|                    | 17         | 48,70 | 63,15 | 61,17 | 61,58 | 64,59 | 66,04 | 65,24 | 65,39 | 65,25 | 67,33 | 65,75 | 64,00 | 64,28 | 63,28 | 58,08 | 55,08 | 68          |
|                    | 18         | 48,90 | 67,25 | 61,87 | 64,58 | 66,29 | 65,44 | 65,44 | 65,29 | 64,45 | 66,93 | 65,35 | 63,10 | 63,88 | 62,88 | 57,98 | 54,38 | 67          |
|                    | 19         | 49,20 | 65,25 | 60,57 | 65,38 | 65,09 | 65,54 | 64,94 | 65,39 | 64,75 | 67,03 | 64,95 | 63,70 | 63,38 | 62,48 | 57,68 | 54,08 | 67          |
|                    | 20         | 50,00 | 63,25 | 60,47 | 64,68 | 65,19 | 65,54 | 64,74 | 64,69 | 64,45 | 66,73 | 65,25 | 63,50 | 63,28 | 62,38 | 57,38 | 53,88 | 67          |
|                    | 21         | 50,20 | 62,95 | 61,37 | 63,38 | 65,59 | 65,34 | 64,94 | 65,19 | 65,05 | 67,03 | 65,65 | 63,80 | 64,18 | 63,18 | 58,08 | 54,88 | 68          |
|                    | 22         | 48,30 | 63,35 | 61,57 | 64,18 | 65,59 | 65,64 | 65,94 | 65,59 | 64,85 | 67,13 | 65,75 | 64,00 | 63,98 | 63,48 | 58,08 | 55,08 | 68          |
|                    | 23         | 48,90 | 64,75 | 61,57 | 64,98 | 65,49 | 65,04 | 66,04 | 65,49 | 64,55 | 66,73 | 65,55 | 63,70 | 63,78 | 63,08 | 57,78 | 54,38 | 67          |
|                    | 24         | 48,20 | 64,15 | 60,07 | 63,08 | 65,39 | 64,94 | 64,74 | 64,99 | 64,65 | 66,73 | 65,45 | 63,30 | 63,08 | 62,78 | 57,78 | 54,48 | 67          |
|                    | 25         | 50,20 | 63,45 | 61,37 | 64,18 | 65,19 | 65,94 | 65,64 | 65,09 | 64,45 | 66,23 | 65,45 | 63,20 | 63,58 | 62,98 | 57,98 | 54,48 | 67          |
|                    | 26         | 49,40 | 63,45 | 60,77 | 63,68 | 65,39 | 65,34 | 64,94 | 65,99 | 64,95 | 67,03 | 65,35 | 63,90 | 64,38 | 63,48 | 58,38 | 54,78 | 68          |
|                    | 27         | 48,40 | 63,05 | 60,17 | 65,18 | 65,69 | 65,44 | 65,14 | 65,99 | 64,55 | 66,93 | 65,45 | 63,40 | 63,98 | 63,08 | 58,08 | 54,98 | 67          |
|                    | 28         | 48,60 | 65,25 | 60,17 | 64,98 | 65,29 | 65,14 | 64,64 | 64,69 | 64,95 | 66,73 | 65,55 | 63,80 | 64,38 | 62,68 | 57,88 | 54,98 | 67          |
|                    | 29         | 49,00 | 66,75 | 59,87 | 64,18 | 65,19 | 65,64 | 64,24 | 64,99 | 65,25 | 67,03 | 65,55 | 63,90 | 64,18 | 63,18 | 58,28 | 54,98 | 68          |
|                    | 30         | 49,00 | 64,35 | 60,57 | 64,38 | 65,09 | 64,84 | 64,44 | 65,79 | 65,35 | 66,93 | 65,55 | 63,40 | 63,68 | 62,88 | 57,88 | 54,98 | 67          |

Tabela D- 9: Conjunto de  $L'_{nT}$  [dB] (bandas 1/3 de oitavas) e  $(L'_{nT,w})$  [dB] para a posição (3,1) do piso da sala

| $L'_{nT}$          | $\tau$ [s] | 100   | 125   | 160   | 200   | 250   | 315   | 400   | 500   | 630   | 800   | 1000  | 1250  | 1600  | 2000  | 2500  | 3150  | $L'_{nT,w}$ |
|--------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| $L'_{nT}$<br>(3,1) | 1          | 52,40 | 54,85 | 57,97 | 63,88 | 60,69 | 59,54 | 61,14 | 63,49 | 62,35 | 61,73 | 62,15 | 61,00 | 61,48 | 61,18 | 56,98 | 50,78 | 65          |
|                    | 2          | 51,30 | 54,85 | 58,67 | 63,78 | 61,29 | 59,74 | 60,54 | 62,89 | 61,45 | 59,83 | 61,15 | 60,30 | 60,78 | 61,08 | 56,48 | 50,78 | 64          |
|                    | 3          | 51,80 | 53,85 | 59,07 | 64,08 | 62,09 | 59,04 | 60,64 | 63,39 | 62,25 | 61,03 | 61,45 | 60,90 | 61,18 | 60,68 | 56,78 | 50,58 | 64          |
|                    | 4          | 52,70 | 54,65 | 59,47 | 64,98 | 62,59 | 60,54 | 61,34 | 64,39 | 62,45 | 61,43 | 61,75 | 61,50 | 62,18 | 61,38 | 57,18 | 51,28 | 65          |
|                    | 5          | 53,70 | 55,65 | 60,87 | 62,88 | 62,59 | 59,94 | 60,74 | 62,79 | 61,75 | 61,03 | 61,35 | 60,60 | 61,68 | 61,08 | 56,88 | 50,78 | 64          |
|                    | 6          | 50,20 | 54,35 | 59,27 | 62,58 | 60,39 | 59,04 | 59,34 | 62,59 | 60,95 | 59,83 | 60,35 | 59,70 | 60,28 | 59,48 | 55,38 | 49,48 | 63          |
|                    | 7          | 52,30 | 52,15 | 58,37 | 62,68 | 59,59 | 59,54 | 59,14 | 61,99 | 60,35 | 58,83 | 60,15 | 58,90 | 60,08 | 59,38 | 54,78 | 49,48 | 63          |
|                    | 8          | 51,30 | 53,25 | 57,67 | 61,78 | 60,19 | 58,44 | 59,74 | 62,19 | 60,65 | 59,53 | 60,05 | 59,70 | 59,38 | 58,88 | 55,28 | 48,78 | 63          |
|                    | 9          | 52,30 | 54,15 | 59,27 | 62,78 | 61,09 | 60,64 | 60,74 | 63,39 | 62,35 | 60,53 | 61,75 | 61,00 | 62,08 | 61,88 | 57,38 | 51,38 | 65          |
|                    | 10         | 51,90 | 54,15 | 59,77 | 63,18 | 60,89 | 59,44 | 60,24 | 63,19 | 61,25 | 60,03 | 60,65 | 59,90 | 60,58 | 59,38 | 55,18 | 49,78 | 63          |
|                    | 11         | 52,50 | 54,25 | 58,27 | 62,48 | 61,69 | 58,84 | 58,74 | 62,59 | 61,05 | 60,13 | 60,05 | 59,80 | 59,78 | 59,28 | 55,58 | 48,98 | 63          |
|                    | 12         | 49,30 | 53,85 | 58,47 | 61,88 | 60,09 | 58,94 | 59,54 | 62,29 | 60,55 | 59,83 | 60,75 | 60,10 | 60,48 | 60,08 | 55,88 | 49,58 | 63          |
|                    | 13         | 51,30 | 54,15 | 59,27 | 61,98 | 59,69 | 58,74 | 59,54 | 61,69 | 59,75 | 59,63 | 60,55 | 59,80 | 60,18 | 59,78 | 55,48 | 49,58 | 63          |
|                    | 14         | 49,70 | 53,35 | 57,37 | 61,48 | 59,09 | 57,54 | 58,04 | 61,09 | 58,95 | 58,73 | 59,05 | 58,10 | 58,78 | 57,98 | 53,28 | 47,98 | 62          |
|                    | 15         | 50,40 | 51,85 | 57,07 | 60,98 | 57,09 | 56,74 | 57,44 | 60,29 | 58,85 | 57,93 | 59,15 | 58,00 | 58,78 | 57,98 | 53,58 | 48,08 | 62          |
|                    | 16         | 48,60 | 52,75 | 56,97 | 61,28 | 60,19 | 57,44 | 58,54 | 62,19 | 60,55 | 59,13 | 59,35 | 58,80 | 58,88 | 57,98 | 53,98 | 48,18 | 62          |
|                    | 17         | 51,90 | 53,85 | 57,77 | 64,08 | 61,49 | 59,54 | 60,34 | 62,49 | 60,95 | 59,83 | 60,65 | 60,40 | 61,28 | 60,38 | 55,68 | 50,28 | 64          |
|                    | 18         | 51,40 | 53,05 | 57,17 | 61,88 | 59,59 | 58,54 | 58,64 | 61,39 | 60,05 | 58,73 | 59,55 | 58,70 | 59,88 | 58,78 | 54,18 | 49,08 | 62          |
|                    | 19         | 51,80 | 52,85 | 58,07 | 62,38 | 59,29 | 58,04 | 58,84 | 62,09 | 59,75 | 59,23 | 59,85 | 59,20 | 60,18 | 59,38 | 54,98 | 49,68 | 63          |
|                    | 20         | 50,70 | 53,05 | 56,67 | 62,88 | 60,19 | 57,84 | 58,64 | 62,19 | 60,05 | 60,03 | 59,75 | 59,30 | 59,18 | 58,58 | 54,68 | 48,88 | 62          |
|                    | 21         | 50,70 | 54,55 | 58,57 | 63,08 | 60,29 | 57,94 | 59,74 | 62,39 | 60,65 | 59,93 | 60,45 | 59,80 | 60,28 | 59,48 | 55,38 | 49,48 | 63          |
|                    | 22         | 51,50 | 53,75 | 56,37 | 61,28 | 58,69 | 56,34 | 57,34 | 60,69 | 58,75 | 57,93 | 57,25 | 56,20 | 56,58 | 55,38 | 51,08 | 45,78 | 60          |
|                    | 23         | 51,10 | 52,95 | 57,67 | 63,28 | 60,89 | 57,84 | 58,34 | 62,39 | 60,65 | 59,43 | 59,15 | 58,50 | 58,28 | 57,08 | 52,68 | 46,88 | 62          |
|                    | 24         | 49,00 | 52,05 | 56,27 | 61,68 | 58,79 | 57,94 | 58,64 | 61,59 | 60,05 | 58,73 | 59,55 | 58,80 | 58,48 | 57,58 | 53,68 | 47,58 | 62          |
|                    | 25         | 51,60 | 51,15 | 57,97 | 61,48 | 58,99 | 58,04 | 58,94 | 62,49 | 60,75 | 60,23 | 59,95 | 59,50 | 59,78 | 59,18 | 55,08 | 48,78 | 63          |
|                    | 26         | 53,30 | 52,95 | 58,57 | 63,08 | 61,29 | 58,34 | 59,94 | 63,69 | 61,55 | 61,63 | 61,15 | 61,30 | 61,18 | 60,38 | 56,38 | 49,98 | 64          |
|                    | 27         | 51,00 | 53,95 | 59,47 | 64,08 | 60,29 | 57,94 | 59,74 | 63,29 | 61,15 | 60,73 | 60,25 | 59,70 | 59,68 | 58,78 | 54,28 | 48,48 | 63          |
|                    | 28         | 50,70 | 53,65 | 58,57 | 62,58 | 59,29 | 56,74 | 58,34 | 62,59 | 60,35 | 59,83 | 58,85 | 58,50 | 57,98 | 57,48 | 53,08 | 47,28 | 62          |
|                    | 29         | 51,30 | 53,05 | 57,67 | 63,78 | 61,79 | 57,94 | 59,24 | 62,79 | 60,95 | 60,03 | 59,65 | 59,00 | 59,08 | 57,98 | 53,58 | 48,58 | 62          |
|                    | 30         | 53,30 | 54,05 | 58,37 | 62,88 | 60,59 | 58,54 | 59,64 | 63,79 | 61,65 | 60,83 | 60,55 | 59,90 | 59,88 | 58,68 | 54,08 | 49,28 | 63          |

Tabela D- 10: Conjunto de  $L'_{nT}$  [dB] (bandas 1/3 de oitavas) e ( $L'_{nT,w}$ ) [dB] para a posição (3,2) do piso da sala

| $L'_{nT}$          | $\tau$ [s] | 100   | 125   | 160   | 200   | 250   | 315   | 400   | 500   | 630   | 800   | 1000  | 1250  | 1600  | 2000  | 2500  | 3150  | $L'_{nT,w}$ |
|--------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| $L'_{nT}$<br>(3,2) | 1          | 46,50 | 55,45 | 58,87 | 63,08 | 63,09 | 60,84 | 62,24 | 63,09 | 61,05 | 61,53 | 60,05 | 59,90 | 58,98 | 58,68 | 54,38 | 50,18 | 63          |
|                    | 2          | 45,60 | 56,25 | 58,67 | 62,28 | 62,59 | 61,64 | 62,94 | 63,29 | 61,25 | 61,13 | 60,25 | 60,30 | 59,28 | 58,18 | 53,88 | 50,18 | 63          |
|                    | 3          | 47,20 | 55,05 | 58,17 | 63,48 | 63,69 | 61,44 | 62,44 | 64,19 | 61,55 | 60,73 | 60,55 | 60,50 | 59,48 | 58,68 | 54,38 | 50,78 | 63          |
|                    | 4          | 45,90 | 55,45 | 58,37 | 63,18 | 62,29 | 61,24 | 62,24 | 62,09 | 61,05 | 60,03 | 60,65 | 60,90 | 59,78 | 59,68 | 55,28 | 50,68 | 63          |
|                    | 5          | 45,90 | 53,45 | 56,47 | 62,18 | 62,79 | 59,74 | 61,94 | 62,69 | 61,35 | 60,73 | 60,35 | 60,20 | 59,08 | 59,08 | 54,38 | 50,38 | 63          |
|                    | 6          | 47,20 | 55,75 | 57,87 | 62,38 | 62,79 | 60,84 | 62,54 | 63,59 | 61,55 | 61,03 | 60,55 | 60,50 | 58,88 | 58,98 | 54,98 | 51,08 | 63          |
|                    | 7          | 46,90 | 54,85 | 57,37 | 64,18 | 63,09 | 60,54 | 62,24 | 63,99 | 61,35 | 60,93 | 60,15 | 60,00 | 58,28 | 57,78 | 54,18 | 50,48 | 63          |
|                    | 8          | 46,40 | 53,65 | 55,17 | 61,68 | 62,09 | 58,64 | 61,14 | 62,79 | 60,35 | 60,23 | 58,65 | 58,20 | 56,58 | 56,28 | 53,08 | 49,48 | 62          |
|                    | 9          | 47,30 | 54,05 | 55,97 | 61,58 | 61,39 | 59,44 | 60,94 | 60,69 | 59,55 | 58,83 | 58,65 | 58,80 | 57,78 | 57,98 | 54,18 | 49,48 | 62          |
|                    | 10         | 44,50 | 52,65 | 55,17 | 61,18 | 60,59 | 58,24 | 60,34 | 62,09 | 60,05 | 60,03 | 58,45 | 58,20 | 56,88 | 56,88 | 53,18 | 49,58 | 62          |
|                    | 11         | 45,80 | 54,85 | 57,77 | 64,08 | 62,89 | 60,54 | 62,24 | 63,29 | 60,95 | 60,63 | 60,35 | 60,70 | 59,28 | 59,48 | 55,48 | 51,18 | 63          |
|                    | 12         | 45,20 | 52,65 | 56,37 | 61,08 | 61,09 | 60,34 | 61,04 | 61,29 | 59,95 | 59,73 | 59,55 | 59,00 | 57,58 | 57,98 | 54,48 | 50,48 | 62          |
|                    | 13         | 45,70 | 54,35 | 57,27 | 61,48 | 62,39 | 60,74 | 61,84 | 61,09 | 60,85 | 60,23 | 60,15 | 59,90 | 58,78 | 58,78 | 55,28 | 51,48 | 63          |
|                    | 14         | 47,10 | 55,85 | 57,97 | 62,78 | 62,79 | 60,94 | 62,64 | 62,29 | 61,05 | 60,83 | 60,45 | 59,90 | 58,58 | 58,28 | 55,18 | 51,68 | 63          |
|                    | 15         | 48,50 | 53,85 | 56,87 | 62,38 | 62,99 | 59,04 | 61,94 | 61,49 | 60,05 | 60,53 | 59,45 | 58,50 | 57,08 | 56,98 | 54,08 | 50,98 | 62          |
|                    | 16         | 47,90 | 53,35 | 56,87 | 61,68 | 62,29 | 59,74 | 61,34 | 61,99 | 60,05 | 60,53 | 59,75 | 59,40 | 58,48 | 58,38 | 54,88 | 52,18 | 63          |
|                    | 17         | 46,60 | 54,45 | 57,67 | 62,58 | 63,29 | 59,24 | 60,74 | 62,09 | 59,85 | 60,83 | 59,25 | 58,10 | 56,98 | 56,48 | 53,88 | 51,48 | 62          |
|                    | 18         | 48,40 | 56,35 | 58,77 | 62,98 | 62,69 | 60,14 | 61,64 | 62,89 | 60,65 | 61,43 | 60,35 | 59,90 | 59,38 | 58,28 | 54,68 | 52,28 | 63          |
|                    | 19         | 47,70 | 54,45 | 57,87 | 63,58 | 64,19 | 61,14 | 61,64 | 62,59 | 60,45 | 61,73 | 60,75 | 59,90 | 59,28 | 58,48 | 55,08 | 52,28 | 63          |
|                    | 20         | 48,40 | 55,25 | 58,37 | 63,68 | 63,89 | 60,74 | 61,84 | 63,09 | 60,85 | 61,43 | 60,45 | 60,00 | 59,08 | 58,18 | 54,88 | 52,08 | 63          |
|                    | 21         | 46,20 | 54,85 | 58,37 | 62,58 | 63,69 | 60,44 | 61,44 | 62,49 | 60,85 | 61,33 | 60,35 | 59,40 | 58,18 | 56,98 | 53,58 | 51,38 | 63          |
|                    | 22         | 48,50 | 53,35 | 57,77 | 61,98 | 63,49 | 59,74 | 60,84 | 63,09 | 60,25 | 60,93 | 59,75 | 58,70 | 57,18 | 55,88 | 53,48 | 51,58 | 62          |
|                    | 23         | 48,10 | 53,15 | 56,17 | 63,78 | 62,69 | 59,04 | 61,14 | 62,59 | 60,05 | 60,83 | 58,75 | 57,60 | 55,58 | 54,58 | 52,08 | 51,28 | 61          |
|                    | 24         | 48,90 | 53,75 | 57,47 | 63,18 | 61,59 | 58,74 | 60,84 | 61,19 | 60,15 | 60,53 | 59,55 | 58,60 | 57,18 | 57,08 | 53,38 | 50,78 | 62          |
|                    | 25         | 48,20 | 55,75 | 58,87 | 63,48 | 62,79 | 59,34 | 62,64 | 63,39 | 60,95 | 61,83 | 60,35 | 59,60 | 58,28 | 56,98 | 53,68 | 51,58 | 63          |
|                    | 26         | 48,40 | 55,55 | 58,77 | 64,58 | 63,69 | 60,34 | 62,44 | 63,19 | 61,15 | 61,53 | 60,55 | 59,80 | 58,58 | 58,28 | 54,58 | 51,98 | 63          |
|                    | 27         | 48,40 | 55,75 | 58,37 | 63,18 | 64,09 | 59,34 | 61,74 | 63,39 | 60,55 | 61,13 | 59,85 | 58,70 | 57,48 | 56,18 | 53,38 | 51,88 | 62          |
|                    | 28         | 46,90 | 54,85 | 56,37 | 62,58 | 62,69 | 59,44 | 61,14 | 62,49 | 60,05 | 60,53 | 58,95 | 57,90 | 57,08 | 55,58 | 52,28 | 50,28 | 63          |
|                    | 29         | 47,80 | 54,25 | 57,87 | 62,48 | 63,19 | 61,14 | 61,74 | 63,09 | 60,85 | 61,13 | 60,45 | 59,80 | 59,28 | 57,68 | 53,88 | 51,58 | 63          |
|                    | 30         | 47,80 | 54,05 | 58,07 | 62,38 | 62,19 | 60,34 | 61,44 | 63,19 | 60,05 | 60,73 | 59,35 | 57,90 | 56,38 | 54,78 | 52,18 | 50,88 | 62          |

Tabela D- 11: Conjunto de  $L'_{nT}$  [dB] (bandas 1/3 de oitavas) e ( $L'_{nT,w}$ ) [dB] para a posição (3,3) do piso da sala

| $L'_{nT}$          | $\tau$ [s] | 100   | 125   | 160   | 200   | 250   | 315   | 400   | 500   | 630   | 800   | 1000  | 1250  | 1600  | 2000  | 2500  | 3150  | $L'_{nT,w}$ |
|--------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| $L'_{nT}$<br>(3,3) | 1          | 50,80 | 56,75 | 58,87 | 66,88 | 62,59 | 61,14 | 62,34 | 62,99 | 61,55 | 62,13 | 59,75 | 59,80 | 57,28 | 54,98 | 52,78 | 50,98 | 63          |
|                    | 2          | 48,70 | 55,65 | 59,17 | 66,28 | 63,19 | 61,94 | 63,54 | 63,19 | 61,55 | 61,93 | 60,35 | 60,10 | 57,58 | 55,98 | 53,08 | 51,28 | 63          |
|                    | 3          | 51,20 | 55,05 | 58,77 | 66,58 | 62,39 | 60,64 | 62,94 | 62,69 | 61,25 | 61,73 | 60,35 | 59,80 | 57,08 | 56,08 | 53,48 | 51,28 | 63          |
|                    | 4          | 50,90 | 54,85 | 59,47 | 66,08 | 63,29 | 61,24 | 63,44 | 62,49 | 61,35 | 61,73 | 60,35 | 60,40 | 57,78 | 56,68 | 53,98 | 51,08 | 63          |
|                    | 5          | 50,80 | 56,55 | 58,37 | 66,28 | 63,19 | 60,74 | 63,44 | 61,59 | 61,35 | 61,53 | 60,55 | 60,00 | 57,38 | 56,18 | 53,78 | 51,18 | 63          |
|                    | 6          | 51,80 | 54,95 | 57,57 | 66,18 | 63,49 | 60,54 | 62,44 | 62,29 | 60,95 | 61,63 | 59,75 | 59,90 | 56,78 | 55,88 | 53,08 | 50,78 | 62          |
|                    | 7          | 48,10 | 56,45 | 58,97 | 65,28 | 63,89 | 60,94 | 63,34 | 61,79 | 61,25 | 61,93 | 60,45 | 59,70 | 56,98 | 55,68 | 53,58 | 51,08 | 63          |
|                    | 8          | 50,20 | 54,95 | 58,87 | 65,48 | 62,89 | 60,54 | 63,44 | 61,99 | 61,05 | 62,33 | 60,45 | 60,20 | 57,28 | 56,38 | 53,38 | 51,08 | 63          |
|                    | 9          | 52,10 | 55,65 | 58,87 | 66,18 | 62,69 | 61,04 | 63,04 | 62,19 | 61,55 | 62,03 | 60,95 | 60,30 | 57,58 | 56,48 | 53,88 | 51,28 | 63          |
|                    | 10         | 49,60 | 53,55 | 58,07 | 64,28 | 62,19 | 59,54 | 61,54 | 60,89 | 60,05 | 60,73 | 58,85 | 57,80 | 55,08 | 54,28 | 52,28 | 49,58 | 61          |
|                    | 11         | 50,70 | 54,95 | 57,67 | 64,38 | 63,09 | 59,34 | 62,14 | 61,39 | 60,65 | 61,33 | 59,55 | 59,10 | 56,58 | 55,58 | 53,38 | 50,58 | 62          |
|                    | 12         | 46,90 | 54,85 | 58,07 | 65,28 | 61,79 | 60,34 | 62,04 | 60,69 | 60,65 | 60,13 | 59,35 | 58,90 | 56,78 | 55,98 | 53,18 | 49,48 | 62          |
|                    | 13         | 48,80 | 54,55 | 56,97 | 64,38 | 61,29 | 59,64 | 61,14 | 60,59 | 60,15 | 60,73 | 58,75 | 58,00 | 55,18 | 54,48 | 52,28 | 50,58 | 61          |
|                    | 14         | 51,50 | 55,25 | 57,97 | 65,18 | 61,79 | 59,44 | 61,04 | 61,49 | 60,15 | 61,13 | 58,65 | 58,00 | 55,38 | 54,48 | 52,58 | 50,88 | 61          |
|                    | 15         | 50,90 | 55,75 | 59,07 | 64,98 | 62,89 | 59,84 | 62,84 | 61,39 | 60,65 | 60,93 | 59,75 | 59,30 | 56,58 | 55,98 | 53,68 | 51,18 | 62          |
|                    | 16         | 50,40 | 55,05 | 58,37 | 63,78 | 61,59 | 60,44 | 62,24 | 60,79 | 60,25 | 60,33 | 59,15 | 58,70 | 55,68 | 54,98 | 52,78 | 50,08 | 61          |
|                    | 17         | 48,00 | 54,95 | 57,27 | 64,58 | 60,69 | 60,34 | 61,64 | 60,59 | 59,75 | 60,03 | 58,35 | 58,10 | 55,48 | 54,48 | 52,48 | 49,78 | 61          |
|                    | 18         | 47,00 | 53,55 | 56,97 | 63,48 | 60,99 | 59,24 | 60,74 | 60,49 | 59,65 | 59,33 | 58,25 | 57,40 | 54,78 | 54,08 | 52,28 | 49,18 | 61          |
|                    | 19         | 48,50 | 55,65 | 58,17 | 65,18 | 61,79 | 60,24 | 62,74 | 61,79 | 60,25 | 61,63 | 59,85 | 58,90 | 56,18 | 55,48 | 53,38 | 50,78 | 62          |
|                    | 20         | 50,20 | 55,35 | 57,67 | 65,48 | 61,19 | 58,54 | 61,34 | 60,39 | 59,65 | 60,13 | 58,25 | 56,90 | 54,78 | 54,08 | 52,58 | 50,08 | 61          |
|                    | 21         | 48,30 | 54,45 | 57,17 | 65,28 | 61,09 | 58,34 | 60,94 | 59,79 | 59,15 | 60,03 | 58,35 | 57,60 | 54,98 | 54,48 | 52,58 | 49,68 | 61          |
|                    | 22         | 47,90 | 53,95 | 56,17 | 64,58 | 60,39 | 58,84 | 61,44 | 60,19 | 59,45 | 59,83 | 58,05 | 57,50 | 55,08 | 54,38 | 52,08 | 49,18 | 61          |
|                    | 23         | 47,90 | 53,95 | 57,57 | 64,78 | 62,09 | 60,54 | 62,84 | 61,29 | 60,55 | 60,43 | 59,25 | 59,20 | 56,48 | 55,68 | 53,28 | 50,38 | 62          |
|                    | 24         | 48,50 | 55,15 | 58,27 | 65,08 | 61,69 | 59,44 | 62,14 | 61,19 | 60,25 | 60,73 | 58,75 | 58,00 | 55,58 | 55,08 | 52,88 | 50,58 | 62          |
|                    | 25         | 51,30 | 53,75 | 58,97 | 65,48 | 62,49 | 60,34 | 62,04 | 60,99 | 60,15 | 60,63 | 59,35 | 58,50 | 55,88 | 55,58 | 53,18 | 49,78 | 62          |
|                    | 26         | 48,80 | 55,15 | 58,27 | 66,08 | 62,09 | 59,64 | 61,84 | 61,29 | 59,95 | 60,53 | 59,25 | 58,40 | 55,58 | 55,38 | 53,28 | 50,28 | 62          |
|                    | 27         | 49,20 | 55,75 | 57,77 | 64,48 | 62,49 | 59,74 | 61,74 | 60,99 | 60,25 | 60,53 | 58,75 | 57,60 | 54,78 | 54,58 | 52,98 | 50,38 | 61          |
|                    | 28         | 49,40 | 54,55 | 57,27 | 64,58 | 61,69 | 59,24 | 61,14 | 60,19 | 59,05 | 59,83 | 57,95 | 57,00 | 54,78 | 54,18 | 52,68 | 49,78 | 61          |
|                    | 29         | 49,80 | 55,05 | 57,67 | 65,78 | 62,69 | 59,54 | 61,24 | 61,19 | 60,25 | 60,13 | 58,75 | 58,20 | 55,28 | 54,88 | 52,78 | 49,78 | 61          |
|                    | 30         | 49,10 | 53,15 | 56,97 | 64,98 | 60,89 | 59,24 | 61,84 | 60,69 | 59,75 | 60,23 | 58,15 | 57,80 | 55,38 | 54,78 | 52,68 | 49,58 | 61          |

Tabela D- 12: Conjunto de  $L'_{nT}$  [dB] (bandas 1/3 de oitavas) e ( $L'_{nT,w}$ ) [dB] para a posição (3,4) do piso da sala

| $L'_{nT}$          | $\tau$ [s] | 100   | 125   | 160   | 200   | 250   | 315   | 400   | 500   | 630   | 800   | 1000  | 1250  | 1600  | 2000  | 2500  | 3150  | $L'_{nT,w}$ |
|--------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| $L'_{nT}$<br>(3,4) | 1          | 44,70 | 51,85 | 57,97 | 64,78 | 63,09 | 60,24 | 61,44 | 62,19 | 60,15 | 60,23 | 58,65 | 57,20 | 55,58 | 55,48 | 53,78 | 50,28 | 62          |
|                    | 2          | 46,30 | 53,55 | 59,07 | 64,28 | 62,99 | 60,84 | 61,64 | 62,79 | 61,05 | 60,73 | 59,55 | 57,60 | 55,98 | 55,68 | 54,28 | 50,98 | 62          |
|                    | 3          | 46,60 | 52,05 | 57,67 | 65,68 | 63,39 | 60,24 | 61,74 | 62,69 | 61,45 | 60,83 | 58,85 | 57,50 | 56,28 | 55,68 | 54,18 | 50,98 | 62          |
|                    | 4          | 45,80 | 52,85 | 57,77 | 63,58 | 63,09 | 58,34 | 59,94 | 61,09 | 59,35 | 59,23 | 57,35 | 55,60 | 53,98 | 53,28 | 52,18 | 48,78 | 60          |
|                    | 5          | 44,50 | 51,75 | 57,07 | 64,08 | 61,59 | 59,44 | 59,84 | 60,59 | 59,75 | 59,43 | 58,15 | 55,90 | 54,58 | 54,28 | 52,98 | 49,18 | 61          |
|                    | 6          | 45,30 | 51,75 | 56,27 | 64,18 | 60,39 | 59,04 | 59,84 | 60,99 | 59,15 | 58,83 | 58,35 | 57,10 | 55,38 | 54,78 | 53,28 | 48,88 | 61          |
|                    | 7          | 43,40 | 51,75 | 56,27 | 63,28 | 60,99 | 58,84 | 60,14 | 60,59 | 59,15 | 58,73 | 58,25 | 57,20 | 55,48 | 55,48 | 53,88 | 49,08 | 61          |
|                    | 8          | 45,90 | 52,95 | 57,87 | 66,38 | 63,29 | 60,64 | 60,94 | 62,19 | 60,35 | 60,23 | 58,75 | 57,50 | 55,58 | 55,48 | 53,58 | 50,08 | 62          |
|                    | 9          | 44,30 | 51,05 | 56,07 | 62,78 | 60,79 | 58,64 | 59,44 | 59,49 | 59,05 | 58,83 | 57,55 | 56,00 | 54,68 | 54,28 | 52,68 | 48,98 | 60          |
|                    | 10         | 43,00 | 50,95 | 56,07 | 62,78 | 60,49 | 58,74 | 59,54 | 59,29 | 58,45 | 58,03 | 57,25 | 55,60 | 54,58 | 53,48 | 51,48 | 47,48 | 60          |
|                    | 11         | 44,50 | 53,25 | 56,27 | 62,88 | 61,19 | 58,04 | 60,14 | 61,09 | 59,35 | 59,33 | 57,95 | 55,70 | 54,28 | 54,28 | 52,88 | 49,18 | 60          |
|                    | 12         | 44,40 | 53,55 | 57,57 | 62,98 | 63,39 | 60,04 | 61,04 | 61,79 | 59,75 | 59,83 | 58,85 | 57,30 | 55,88 | 55,38 | 53,68 | 49,98 | 61          |
|                    | 13         | 43,70 | 51,75 | 55,57 | 63,58 | 61,49 | 59,04 | 59,84 | 60,19 | 58,75 | 57,93 | 56,95 | 54,90 | 54,08 | 53,08 | 51,48 | 47,48 | 60          |
|                    | 14         | 41,90 | 51,25 | 55,47 | 61,88 | 60,49 | 57,74 | 58,64 | 59,79 | 57,95 | 57,83 | 56,05 | 53,90 | 52,58 | 53,38 | 52,18 | 47,68 | 59          |
|                    | 15         | 42,80 | 51,05 | 56,17 | 63,18 | 60,69 | 58,54 | 59,74 | 60,39 | 59,25 | 59,03 | 57,45 | 55,30 | 54,38 | 54,48 | 52,88 | 48,88 | 60          |
|                    | 16         | 43,80 | 52,35 | 57,07 | 64,38 | 61,49 | 59,84 | 60,74 | 61,49 | 59,45 | 59,13 | 58,25 | 56,60 | 55,38 | 54,78 | 53,08 | 49,08 | 61          |
|                    | 17         | 44,10 | 53,05 | 58,17 | 65,68 | 62,69 | 60,84 | 61,14 | 62,39 | 60,05 | 59,93 | 58,95 | 57,50 | 55,98 | 55,58 | 54,08 | 49,88 | 62          |
|                    | 18         | 44,60 | 52,15 | 56,67 | 64,48 | 61,59 | 59,54 | 59,94 | 60,99 | 59,55 | 59,53 | 57,75 | 55,50 | 53,98 | 54,88 | 53,08 | 49,58 | 61          |
|                    | 19         | 45,10 | 52,05 | 57,27 | 64,58 | 60,99 | 59,94 | 61,44 | 61,49 | 60,15 | 59,33 | 58,75 | 56,90 | 55,68 | 54,88 | 53,28 | 49,18 | 61          |
|                    | 20         | 45,10 | 51,95 | 56,77 | 65,48 | 61,79 | 60,34 | 61,64 | 62,09 | 60,35 | 59,33 | 58,45 | 56,20 | 55,38 | 54,58 | 52,08 | 49,28 | 61          |
|                    | 21         | 43,10 | 51,35 | 55,77 | 61,88 | 60,39 | 58,54 | 59,64 | 59,69 | 58,35 | 57,93 | 57,35 | 55,50 | 54,28 | 53,38 | 52,28 | 47,68 | 60          |
|                    | 22         | 41,80 | 51,15 | 55,77 | 61,78 | 59,49 | 57,54 | 58,04 | 59,29 | 57,45 | 57,13 | 55,65 | 53,80 | 52,48 | 53,38 | 51,78 | 47,08 | 59          |
|                    | 23         | 43,00 | 48,45 | 53,77 | 61,38 | 58,49 | 55,24 | 56,94 | 57,89 | 56,85 | 56,73 | 54,15 | 52,40 | 51,38 | 51,78 | 50,58 | 46,28 | 58          |
|                    | 24         | 41,10 | 49,65 | 52,07 | 59,38 | 55,59 | 52,64 | 54,94 | 55,99 | 55,65 | 55,33 | 53,05 | 50,50 | 49,68 | 50,08 | 49,78 | 44,28 | 56          |
|                    | 25         | 41,60 | 49,35 | 52,17 | 59,78 | 58,89 | 56,94 | 58,14 | 58,19 | 57,25 | 56,63 | 56,05 | 53,60 | 52,88 | 51,48 | 50,08 | 46,08 | 58          |
|                    | 26         | 42,20 | 50,95 | 55,57 | 61,58 | 60,89 | 58,34 | 59,04 | 58,89 | 58,65 | 58,23 | 56,95 | 54,60 | 53,48 | 53,28 | 52,28 | 47,88 | 59          |
|                    | 27         | 41,70 | 51,15 | 55,07 | 62,58 | 60,59 | 58,24 | 58,84 | 59,69 | 58,45 | 57,93 | 57,05 | 54,70 | 53,58 | 53,18 | 51,98 | 48,38 | 59          |
|                    | 28         | 40,80 | 49,35 | 52,17 | 59,18 | 56,89 | 54,54 | 56,24 | 56,19 | 56,25 | 56,43 | 55,45 | 52,80 | 51,08 | 51,08 | 50,18 | 46,08 | 57          |
|                    | 29         | 43,10 | 50,15 | 53,27 | 61,48 | 57,79 | 55,64 | 57,84 | 57,99 | 56,95 | 57,23 | 56,25 | 53,70 | 52,48 | 51,68 | 50,58 | 46,68 | 58          |
|                    | 30         | 42,70 | 49,25 | 52,97 | 61,48 | 57,19 | 54,44 | 56,74 | 56,69 | 57,15 | 57,33 | 55,75 | 53,60 | 52,38 | 52,28 | 51,28 | 46,88 | 58          |

Tabela D- 13: Conjunto de  $L'_{nT}$  [dB] (bandas 1/3 de oitavas) e ( $L'_{nT,w}$ ) [dB] para a posição (4,1) do piso da sala

| $L'_{nT}$          | $\tau$ [s] | 100   | 125   | 160   | 200   | 250   | 315   | 400   | 500   | 630   | 800   | 1000  | 1250  | 1600  | 2000  | 2500  | 3150  | $L'_{nT,w}$ |
|--------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| $L'_{nT}$<br>(4,1) | 1          | 56,20 | 63,95 | 64,47 | 69,28 | 68,19 | 67,84 | 67,24 | 67,09 | 64,95 | 65,13 | 64,95 | 60,70 | 59,78 | 59,18 | 57,38 | 54,38 | 66          |
|                    | 2          | 55,60 | 64,05 | 64,67 | 68,08 | 67,89 | 68,44 | 67,64 | 66,79 | 65,15 | 65,13 | 64,95 | 60,40 | 59,28 | 59,08 | 57,48 | 54,18 | 66          |
|                    | 3          | 56,30 | 64,25 | 63,97 | 68,38 | 67,19 | 67,94 | 68,04 | 67,09 | 65,15 | 65,03 | 64,45 | 60,80 | 59,78 | 58,88 | 57,28 | 54,38 | 66          |
|                    | 4          | 56,00 | 65,05 | 64,77 | 68,98 | 67,19 | 67,24 | 67,44 | 67,19 | 65,25 | 64,93 | 64,15 | 61,00 | 59,68 | 58,98 | 57,28 | 54,28 | 66          |
|                    | 5          | 56,80 | 63,65 | 65,27 | 67,78 | 68,69 | 67,24 | 67,74 | 66,59 | 65,35 | 65,13 | 64,25 | 60,60 | 59,78 | 59,08 | 57,28 | 54,18 | 66          |
|                    | 6          | 55,80 | 65,25 | 67,07 | 67,98 | 67,19 | 67,84 | 67,34 | 66,79 | 64,95 | 65,13 | 64,35 | 61,00 | 59,38 | 59,28 | 57,18 | 54,48 | 66          |
|                    | 7          | 55,90 | 65,25 | 64,17 | 70,08 | 67,99 | 67,14 | 66,84 | 67,09 | 65,15 | 65,33 | 64,45 | 60,60 | 59,08 | 58,98 | 57,08 | 54,28 | 66          |
|                    | 8          | 55,60 | 63,35 | 64,57 | 68,18 | 67,29 | 67,44 | 67,44 | 66,89 | 65,15 | 65,43 | 64,45 | 60,70 | 60,08 | 59,08 | 57,18 | 54,38 | 66          |
|                    | 9          | 57,10 | 62,95 | 65,17 | 69,58 | 67,69 | 67,24 | 67,34 | 67,19 | 64,95 | 65,33 | 64,25 | 60,80 | 59,88 | 59,18 | 57,28 | 54,38 | 66          |
|                    | 10         | 55,50 | 63,95 | 64,07 | 69,68 | 68,19 | 66,74 | 67,74 | 67,39 | 65,15 | 65,33 | 64,35 | 61,00 | 59,88 | 59,48 | 56,98 | 54,18 | 66          |
|                    | 11         | 56,80 | 64,55 | 64,67 | 69,18 | 66,89 | 68,04 | 67,24 | 66,69 | 65,25 | 65,53 | 64,55 | 60,70 | 59,68 | 59,28 | 56,98 | 54,38 | 66          |
|                    | 12         | 55,00 | 64,65 | 64,17 | 69,08 | 66,49 | 67,34 | 66,94 | 67,29 | 65,35 | 65,23 | 64,55 | 60,80 | 59,78 | 59,08 | 57,28 | 54,68 | 66          |
|                    | 13         | 55,00 | 63,85 | 64,77 | 69,28 | 68,59 | 67,64 | 68,04 | 67,59 | 65,45 | 65,43 | 64,65 | 61,00 | 59,78 | 59,28 | 57,18 | 54,28 | 66          |
|                    | 14         | 54,90 | 63,05 | 64,17 | 68,58 | 69,39 | 67,74 | 68,24 | 67,69 | 65,55 | 65,63 | 64,45 | 61,20 | 59,88 | 59,18 | 57,28 | 54,28 | 66          |
|                    | 15         | 55,80 | 63,55 | 65,07 | 68,38 | 69,49 | 67,14 | 67,44 | 67,69 | 65,35 | 65,33 | 64,35 | 60,90 | 59,98 | 59,18 | 57,08 | 54,28 | 66          |
|                    | 16         | 55,00 | 62,95 | 64,37 | 68,68 | 69,59 | 67,64 | 67,44 | 67,39 | 65,05 | 65,23 | 64,45 | 61,20 | 59,68 | 59,48 | 57,38 | 54,38 | 66          |
|                    | 17         | 55,40 | 60,95 | 64,97 | 67,58 | 69,39 | 67,24 | 67,94 | 67,29 | 64,85 | 65,73 | 64,35 | 61,10 | 59,48 | 59,18 | 57,38 | 54,38 | 66          |
|                    | 18         | 54,90 | 62,95 | 63,87 | 68,58 | 69,49 | 67,84 | 68,04 | 67,09 | 65,15 | 65,23 | 64,55 | 61,10 | 59,58 | 59,18 | 57,28 | 54,38 | 66          |
|                    | 19         | 55,90 | 62,75 | 64,97 | 68,48 | 68,79 | 67,34 | 66,94 | 66,39 | 65,05 | 65,33 | 64,45 | 61,00 | 59,88 | 59,38 | 57,28 | 54,48 | 66          |
|                    | 20         | 55,70 | 61,25 | 64,07 | 67,88 | 68,39 | 67,74 | 67,34 | 66,99 | 64,65 | 65,53 | 64,25 | 60,80 | 59,68 | 58,98 | 57,28 | 54,48 | 66          |
|                    | 21         | 55,30 | 61,65 | 64,67 | 66,78 | 68,79 | 67,44 | 67,04 | 67,29 | 65,05 | 65,33 | 64,65 | 61,00 | 59,68 | 59,48 | 57,48 | 54,78 | 66          |
|                    | 22         | 54,90 | 59,95 | 64,67 | 67,88 | 67,89 | 67,64 | 67,24 | 67,49 | 64,65 | 65,13 | 64,55 | 60,70 | 60,08 | 59,18 | 57,18 | 54,38 | 66          |
|                    | 23         | 56,40 | 63,55 | 64,67 | 68,88 | 67,39 | 67,14 | 67,24 | 66,99 | 64,95 | 65,33 | 64,55 | 60,80 | 60,18 | 59,58 | 57,38 | 54,38 | 66          |
|                    | 24         | 56,60 | 65,35 | 64,57 | 69,28 | 67,79 | 67,24 | 66,94 | 68,19 | 65,35 | 65,23 | 64,45 | 61,10 | 59,88 | 59,58 | 57,28 | 54,38 | 66          |
|                    | 25         | 56,40 | 61,35 | 65,27 | 69,48 | 67,69 | 66,14 | 67,34 | 67,19 | 65,25 | 65,23 | 64,35 | 61,00 | 59,48 | 59,18 | 57,18 | 54,28 | 66          |
|                    | 26         | 57,50 | 64,35 | 64,87 | 67,58 | 67,49 | 68,14 | 67,54 | 66,99 | 65,05 | 65,33 | 64,25 | 61,00 | 59,98 | 58,98 | 57,28 | 54,58 | 66          |
|                    | 27         | 56,40 | 63,25 | 66,17 | 68,18 | 67,09 | 67,24 | 67,44 | 67,89 | 64,75 | 65,23 | 64,05 | 60,90 | 59,68 | 59,38 | 57,28 | 54,38 | 66          |
|                    | 28         | 55,80 | 62,85 | 65,77 | 68,98 | 68,09 | 67,54 | 67,54 | 67,39 | 65,55 | 65,63 | 64,95 | 61,70 | 60,48 | 59,18 | 57,48 | 54,48 | 66          |
|                    | 29         | 55,30 | 62,75 | 65,47 | 69,18 | 67,69 | 68,14 | 67,34 | 67,39 | 64,85 | 65,23 | 64,45 | 61,20 | 60,18 | 59,48 | 57,28 | 54,48 | 66          |
|                    | 30         | 54,10 | 61,95 | 65,17 | 67,88 | 68,09 | 67,34 | 67,34 | 67,29 | 65,25 | 65,23 | 64,45 | 61,20 | 59,88 | 59,38 | 57,38 | 54,48 | 66          |

Tabela D- 14: Conjunto de  $L'_{nT}$  [dB] (bandas 1/3 de oitavas) e ( $L'_{nT,w}$ ) [dB] para a posição (4,2) do piso da sala

| $L'_{nT}$          | $\tau$ [s] | 100   | 125   | 160   | 200   | 250   | 315   | 400   | 500   | 630   | 800   | 1000  | 1250  | 1600  | 2000  | 2500  | 3150  | $L'_{nT,w}$ |
|--------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| $L'_{nT}$<br>(4,2) | 1          | 51,90 | 64,65 | 63,27 | 70,88 | 67,89 | 66,44 | 67,84 | 66,89 | 65,25 | 65,73 | 64,45 | 60,80 | 59,88 | 59,08 | 57,28 | 54,28 | 66          |
|                    | 2          | 52,30 | 65,35 | 62,77 | 72,48 | 68,59 | 67,04 | 68,44 | 67,59 | 64,55 | 65,93 | 64,85 | 61,20 | 60,08 | 59,28 | 57,68 | 54,78 | 67          |
|                    | 3          | 50,80 | 63,15 | 64,07 | 71,68 | 68,79 | 67,64 | 68,74 | 67,49 | 65,25 | 65,23 | 64,85 | 61,00 | 59,58 | 58,98 | 57,68 | 54,68 | 67          |
|                    | 4          | 50,70 | 63,65 | 63,47 | 70,68 | 68,79 | 67,44 | 68,84 | 66,99 | 64,75 | 65,23 | 64,55 | 60,80 | 59,88 | 59,08 | 57,38 | 54,48 | 66          |
|                    | 5          | 51,60 | 64,85 | 64,07 | 69,48 | 68,99 | 67,14 | 68,14 | 66,99 | 65,85 | 64,63 | 64,75 | 61,30 | 60,08 | 59,48 | 57,28 | 54,38 | 66          |
|                    | 6          | 51,80 | 62,25 | 63,87 | 70,88 | 68,39 | 67,54 | 67,54 | 66,69 | 65,25 | 64,93 | 64,75 | 61,40 | 60,28 | 59,48 | 57,48 | 54,48 | 66          |
|                    | 7          | 51,70 | 65,25 | 63,37 | 69,98 | 68,69 | 66,84 | 67,64 | 66,99 | 65,75 | 64,73 | 65,15 | 61,00 | 60,08 | 59,68 | 57,68 | 54,68 | 66          |
|                    | 8          | 51,30 | 66,35 | 63,77 | 70,18 | 68,19 | 67,94 | 68,24 | 67,29 | 65,95 | 64,63 | 64,75 | 61,10 | 60,28 | 59,58 | 57,68 | 54,68 | 66          |
|                    | 9          | 51,40 | 64,35 | 63,17 | 71,38 | 68,79 | 66,84 | 68,64 | 66,89 | 65,75 | 64,53 | 64,85 | 61,50 | 60,08 | 59,18 | 57,48 | 54,78 | 67          |
|                    | 10         | 52,20 | 64,85 | 63,17 | 69,58 | 68,19 | 66,94 | 67,94 | 66,89 | 65,55 | 64,83 | 64,85 | 61,40 | 59,98 | 59,38 | 57,68 | 54,58 | 66          |
|                    | 11         | 51,40 | 66,45 | 63,77 | 71,28 | 68,99 | 66,84 | 67,84 | 67,09 | 65,85 | 65,13 | 65,15 | 61,20 | 59,98 | 59,08 | 57,58 | 54,78 | 67          |
|                    | 12         | 51,70 | 63,85 | 63,17 | 71,48 | 69,29 | 68,04 | 67,74 | 66,99 | 65,55 | 64,83 | 64,85 | 61,10 | 59,98 | 59,68 | 57,98 | 54,88 | 67          |
|                    | 13         | 52,10 | 63,95 | 62,77 | 72,48 | 68,39 | 67,14 | 67,84 | 67,19 | 65,95 | 65,03 | 64,95 | 61,40 | 60,08 | 59,68 | 57,88 | 54,88 | 67          |
|                    | 14         | 53,40 | 64,55 | 63,27 | 70,58 | 68,99 | 67,44 | 68,34 | 66,79 | 66,05 | 64,73 | 65,05 | 60,80 | 59,98 | 59,38 | 57,78 | 54,78 | 67          |
|                    | 15         | 52,40 | 65,35 | 63,27 | 70,38 | 69,29 | 67,74 | 67,84 | 67,39 | 66,05 | 65,13 | 64,85 | 61,20 | 60,08 | 59,48 | 57,48 | 54,58 | 67          |
|                    | 16         | 52,00 | 64,95 | 62,97 | 68,88 | 69,19 | 67,94 | 67,84 | 67,19 | 64,95 | 64,53 | 64,85 | 61,10 | 59,88 | 59,48 | 57,68 | 54,88 | 66          |
|                    | 17         | 51,20 | 66,15 | 63,37 | 69,18 | 67,99 | 66,94 | 68,14 | 67,09 | 65,35 | 64,53 | 65,05 | 61,40 | 60,28 | 59,28 | 57,38 | 54,88 | 66          |
|                    | 18         | 51,80 | 64,65 | 63,27 | 71,08 | 68,29 | 67,84 | 67,94 | 66,39 | 65,65 | 64,73 | 64,75 | 60,90 | 60,28 | 59,78 | 57,68 | 54,68 | 66          |
|                    | 19         | 52,20 | 64,75 | 63,47 | 71,88 | 69,99 | 67,34 | 68,24 | 66,89 | 65,65 | 64,33 | 64,65 | 61,40 | 59,88 | 59,38 | 57,78 | 54,88 | 67          |
|                    | 20         | 51,60 | 62,75 | 63,77 | 71,78 | 68,49 | 67,14 | 68,04 | 66,79 | 65,55 | 64,73 | 64,85 | 61,40 | 60,18 | 59,38 | 57,48 | 54,78 | 67          |
|                    | 21         | 51,70 | 64,65 | 63,17 | 71,38 | 68,89 | 68,24 | 68,44 | 67,69 | 66,05 | 64,83 | 65,25 | 61,30 | 60,38 | 59,48 | 57,48 | 54,68 | 67          |
|                    | 22         | 51,60 | 64,75 | 62,47 | 69,28 | 68,69 | 67,34 | 68,04 | 67,09 | 65,45 | 64,83 | 64,65 | 61,20 | 59,88 | 59,38 | 57,78 | 54,88 | 66          |
|                    | 23         | 51,60 | 65,35 | 62,67 | 70,68 | 68,79 | 67,04 | 67,74 | 67,09 | 65,25 | 64,53 | 64,35 | 61,20 | 59,78 | 59,18 | 57,38 | 54,68 | 66          |
|                    | 24         | 50,30 | 64,35 | 63,97 | 70,78 | 68,29 | 68,04 | 67,74 | 66,89 | 64,95 | 64,93 | 65,05 | 61,30 | 59,88 | 59,38 | 57,48 | 54,58 | 66          |
|                    | 25         | 50,40 | 66,35 | 63,67 | 71,18 | 68,99 | 67,54 | 67,84 | 66,29 | 65,25 | 65,83 | 64,85 | 60,80 | 60,18 | 59,28 | 57,18 | 54,48 | 66          |
|                    | 26         | 51,90 | 64,75 | 64,17 | 70,48 | 67,29 | 67,34 | 68,04 | 66,79 | 65,05 | 65,33 | 64,85 | 61,50 | 60,08 | 59,08 | 57,38 | 54,68 | 66          |
|                    | 27         | 50,80 | 66,65 | 63,47 | 69,88 | 67,89 | 67,54 | 68,44 | 67,09 | 65,05 | 65,53 | 65,05 | 61,40 | 59,88 | 59,18 | 57,68 | 54,68 | 66          |
|                    | 28         | 48,30 | 69,35 | 64,87 | 70,78 | 68,19 | 67,54 | 67,64 | 66,39 | 65,05 | 65,53 | 65,35 | 61,40 | 59,88 | 59,18 | 57,58 | 54,68 | 66          |
|                    | 29         | 50,80 | 64,85 | 62,77 | 72,28 | 69,39 | 67,54 | 67,94 | 67,49 | 65,75 | 65,83 | 64,75 | 61,10 | 59,78 | 59,18 | 57,48 | 54,78 | 67          |
|                    | 30         | 51,40 | 62,65 | 63,27 | 72,58 | 68,49 | 67,14 | 67,94 | 66,99 | 65,65 | 65,13 | 65,25 | 61,40 | 60,18 | 59,18 | 57,58 | 54,58 | 67          |

Tabela D- 15: Conjunto de  $L'_{nT}$  [dB] (bandas 1/3 de oitavas) e  $(L'_{nT,w})$  [dB] para a posição (4,3) do piso da sala

| $L'_{nT}$          | $\tau$ [s] | 100   | 125   | 160   | 200   | 250   | 315   | 400   | 500   | 630   | 800   | 1000  | 1250  | 1600  | 2000  | 2500  | 3150  | $L'_{nT,w}$ |
|--------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| $L'_{nT}$<br>(4,3) | 1          | 52,40 | 64,45 | 66,27 | 69,38 | 67,69 | 68,24 | 68,14 | 67,99 | 67,45 | 65,43 | 64,15 | 61,40 | 61,18 | 59,78 | 57,98 | 55,38 | 67          |
|                    | 2          | 53,20 | 66,15 | 66,27 | 70,58 | 68,89 | 68,94 | 67,74 | 67,99 | 67,25 | 65,63 | 64,05 | 60,50 | 60,98 | 59,48 | 57,78 | 54,98 | 67          |
|                    | 3          | 53,60 | 67,15 | 65,67 | 70,08 | 68,99 | 68,44 | 68,14 | 67,89 | 66,95 | 65,33 | 64,35 | 60,60 | 60,78 | 59,58 | 57,88 | 55,18 | 67          |
|                    | 4          | 53,00 | 66,05 | 66,27 | 70,48 | 68,09 | 69,34 | 68,64 | 68,19 | 67,45 | 65,83 | 64,25 | 60,50 | 60,78 | 59,38 | 57,68 | 55,08 | 67          |
|                    | 5          | 53,90 | 67,55 | 65,97 | 69,58 | 68,19 | 68,44 | 67,64 | 67,89 | 67,45 | 65,33 | 64,05 | 60,90 | 60,78 | 59,28 | 57,58 | 54,98 | 67          |
|                    | 6          | 54,30 | 62,65 | 66,07 | 73,28 | 67,59 | 68,54 | 68,24 | 67,69 | 67,15 | 65,43 | 64,55 | 60,70 | 60,68 | 59,48 | 57,78 | 54,98 | 67          |
|                    | 7          | 51,90 | 62,15 | 66,07 | 71,58 | 67,39 | 68,94 | 68,44 | 68,09 | 67,15 | 65,43 | 64,85 | 61,00 | 61,38 | 59,68 | 57,88 | 55,18 | 67          |
|                    | 8          | 52,20 | 65,05 | 66,27 | 70,88 | 68,49 | 69,24 | 68,44 | 68,29 | 67,65 | 66,03 | 64,55 | 61,10 | 60,88 | 59,68 | 57,98 | 55,08 | 67          |
|                    | 9          | 52,80 | 66,35 | 65,67 | 70,78 | 68,59 | 68,44 | 67,64 | 67,39 | 67,25 | 65,73 | 64,35 | 60,50 | 60,88 | 59,78 | 57,68 | 55,08 | 67          |
|                    | 10         | 53,20 | 64,85 | 65,47 | 69,28 | 67,89 | 69,44 | 68,14 | 67,59 | 67,55 | 66,03 | 64,45 | 60,40 | 61,28 | 59,38 | 57,78 | 54,78 | 67          |
|                    | 11         | 53,40 | 62,05 | 65,17 | 71,78 | 67,49 | 69,74 | 68,34 | 67,79 | 67,55 | 65,93 | 64,25 | 60,60 | 61,38 | 59,58 | 57,58 | 54,88 | 67          |
|                    | 12         | 52,20 | 62,75 | 65,57 | 70,38 | 68,59 | 69,14 | 68,74 | 67,89 | 67,25 | 66,13 | 64,45 | 60,80 | 61,48 | 59,58 | 57,98 | 54,88 | 67          |
|                    | 13         | 53,10 | 63,65 | 65,87 | 70,38 | 68,79 | 69,44 | 68,04 | 67,69 | 67,25 | 65,33 | 64,75 | 60,60 | 60,88 | 59,58 | 57,48 | 54,78 | 67          |
|                    | 14         | 53,10 | 65,45 | 66,07 | 69,88 | 68,19 | 68,84 | 67,94 | 67,69 | 67,35 | 65,63 | 64,55 | 60,90 | 60,68 | 59,48 | 57,68 | 55,08 | 67          |
|                    | 15         | 53,60 | 64,45 | 66,07 | 68,48 | 66,39 | 68,14 | 67,94 | 67,69 | 67,15 | 66,33 | 64,65 | 61,00 | 61,18 | 59,48 | 57,68 | 54,98 | 67          |
|                    | 16         | 53,20 | 63,55 | 64,17 | 69,48 | 67,59 | 69,04 | 67,94 | 67,89 | 67,65 | 66,03 | 64,25 | 61,10 | 60,88 | 59,58 | 57,68 | 54,88 | 67          |
|                    | 17         | 53,40 | 65,65 | 64,97 | 68,48 | 67,99 | 69,54 | 68,14 | 68,29 | 66,75 | 65,03 | 64,75 | 60,60 | 61,28 | 59,68 | 57,78 | 54,78 | 67          |
|                    | 18         | 54,00 | 63,75 | 65,37 | 69,58 | 68,39 | 69,44 | 68,74 | 68,59 | 67,05 | 65,83 | 64,15 | 60,80 | 60,88 | 59,48 | 57,68 | 55,08 | 67          |
|                    | 19         | 53,60 | 62,35 | 66,27 | 68,88 | 69,89 | 68,74 | 68,64 | 67,69 | 66,75 | 65,93 | 64,25 | 61,00 | 60,88 | 59,58 | 57,58 | 55,18 | 67          |
|                    | 20         | 53,10 | 64,95 | 65,37 | 69,38 | 68,79 | 69,04 | 68,54 | 67,59 | 66,85 | 65,63 | 63,95 | 61,00 | 61,08 | 59,68 | 57,68 | 55,38 | 67          |
|                    | 21         | 54,30 | 64,85 | 64,87 | 70,88 | 68,49 | 69,34 | 68,44 | 67,49 | 66,75 | 65,53 | 63,85 | 60,80 | 61,08 | 59,78 | 57,58 | 55,08 | 67          |
|                    | 22         | 54,60 | 64,15 | 65,07 | 69,68 | 68,69 | 68,94 | 68,84 | 68,39 | 66,95 | 65,73 | 64,65 | 60,80 | 60,78 | 59,58 | 57,58 | 55,08 | 67          |
|                    | 23         | 54,30 | 63,55 | 63,97 | 71,28 | 68,09 | 68,64 | 68,14 | 68,09 | 67,25 | 65,63 | 63,85 | 60,60 | 61,08 | 59,68 | 57,58 | 55,08 | 67          |
|                    | 24         | 53,90 | 62,15 | 65,37 | 69,88 | 69,49 | 68,94 | 68,34 | 67,79 | 67,15 | 65,63 | 64,45 | 61,40 | 61,38 | 59,58 | 57,68 | 55,18 | 67          |
|                    | 25         | 54,00 | 63,25 | 65,47 | 69,88 | 68,59 | 69,04 | 68,14 | 68,49 | 67,45 | 65,93 | 63,85 | 61,30 | 61,18 | 59,68 | 57,78 | 55,08 | 67          |
|                    | 26         | 53,50 | 63,95 | 65,47 | 69,98 | 69,19 | 69,34 | 68,74 | 67,69 | 67,15 | 65,03 | 64,25 | 61,20 | 60,98 | 59,68 | 57,78 | 54,98 | 67          |
|                    | 27         | 53,40 | 62,95 | 65,97 | 70,28 | 68,59 | 69,94 | 68,44 | 67,99 | 66,95 | 65,63 | 64,15 | 60,90 | 60,98 | 59,48 | 57,58 | 54,98 | 67          |
|                    | 28         | 54,10 | 64,85 | 64,77 | 70,78 | 68,59 | 69,14 | 68,74 | 68,09 | 66,65 | 65,33 | 64,25 | 60,80 | 60,98 | 59,48 | 57,78 | 55,08 | 67          |
|                    | 29         | 53,90 | 63,85 | 64,77 | 70,08 | 68,09 | 69,34 | 67,64 | 67,79 | 67,15 | 65,63 | 63,75 | 60,90 | 60,78 | 59,68 | 57,58 | 55,28 | 67          |
|                    | 30         | 53,60 | 62,95 | 65,57 | 67,88 | 68,99 | 68,54 | 68,04 | 67,89 | 67,85 | 65,63 | 64,25 | 60,70 | 60,88 | 59,68 | 57,68 | 55,48 | 67          |

Tabela D- 16: Conjunto de  $L'_{nT}$  [dB] (bandas 1/3 de oitavas) e ( $L'_{nT,w}$ ) [dB] para a posição (4,4) do piso da sala

| $L'_{nT}$          | $\tau$ [s] | 100   | 125   | 160   | 200   | 250   | 315   | 400   | 500   | 630   | 800   | 1000  | 1250  | 1600  | 2000  | 2500  | 3150  | $L'_{nT,w}$ |
|--------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| $L'_{nT}$<br>(4,4) | 1          | 53,80 | 63,95 | 63,87 | 70,78 | 68,79 | 68,74 | 69,34 | 68,59 | 65,15 | 66,03 | 64,85 | 61,40 | 60,38 | 59,88 | 58,58 | 55,58 | 67          |
|                    | 2          | 53,80 | 64,15 | 64,67 | 71,78 | 68,69 | 68,24 | 68,54 | 67,99 | 66,25 | 65,83 | 64,75 | 61,30 | 60,48 | 59,88 | 58,18 | 55,28 | 67          |
|                    | 3          | 54,50 | 64,35 | 64,47 | 70,18 | 68,49 | 68,54 | 68,74 | 68,49 | 65,95 | 66,03 | 65,15 | 61,10 | 60,48 | 60,28 | 58,18 | 55,48 | 67          |
|                    | 4          | 54,50 | 63,55 | 64,37 | 70,78 | 68,19 | 67,34 | 68,14 | 67,89 | 65,75 | 66,43 | 65,15 | 61,20 | 60,38 | 59,98 | 58,48 | 55,58 | 67          |
|                    | 5          | 52,40 | 65,15 | 64,17 | 70,58 | 68,69 | 66,44 | 68,24 | 67,79 | 66,05 | 65,93 | 64,95 | 61,50 | 60,28 | 60,08 | 58,28 | 55,68 | 67          |
|                    | 6          | 53,20 | 66,65 | 65,17 | 71,78 | 68,39 | 67,04 | 68,24 | 67,39 | 65,75 | 66,53 | 65,25 | 61,50 | 60,58 | 60,18 | 58,58 | 55,68 | 67          |
|                    | 7          | 52,50 | 63,15 | 64,17 | 68,38 | 68,19 | 67,34 | 68,84 | 68,69 | 65,65 | 66,33 | 65,45 | 61,30 | 60,18 | 60,08 | 58,38 | 55,78 | 67          |
|                    | 8          | 51,80 | 65,95 | 64,07 | 69,18 | 68,79 | 67,04 | 68,74 | 67,99 | 65,85 | 65,93 | 64,65 | 60,60 | 60,38 | 60,08 | 58,48 | 55,68 | 67          |
|                    | 9          | 52,80 | 66,05 | 64,17 | 70,18 | 68,69 | 67,34 | 68,54 | 68,19 | 65,95 | 66,13 | 65,25 | 61,30 | 60,48 | 60,18 | 58,48 | 55,98 | 67          |
|                    | 10         | 52,10 | 65,25 | 63,97 | 70,48 | 68,39 | 66,54 | 68,54 | 68,09 | 66,05 | 65,73 | 64,95 | 61,00 | 60,08 | 60,18 | 58,28 | 55,58 | 67          |
|                    | 11         | 54,40 | 65,05 | 63,77 | 69,48 | 70,19 | 68,24 | 67,54 | 68,09 | 66,05 | 65,73 | 65,15 | 61,60 | 60,48 | 60,38 | 58,48 | 56,08 | 67          |
|                    | 12         | 52,50 | 67,25 | 64,37 | 68,98 | 68,49 | 67,74 | 67,94 | 68,29 | 65,85 | 66,23 | 65,55 | 61,20 | 60,38 | 59,98 | 58,48 | 55,58 | 67          |
|                    | 13         | 51,80 | 67,15 | 64,47 | 68,98 | 68,59 | 66,94 | 67,24 | 68,79 | 66,35 | 66,03 | 65,35 | 61,40 | 60,38 | 60,08 | 58,58 | 55,68 | 67          |
|                    | 14         | 53,00 | 64,85 | 64,57 | 71,18 | 68,69 | 67,04 | 68,44 | 68,49 | 65,35 | 66,13 | 65,35 | 61,50 | 60,68 | 60,48 | 58,48 | 56,18 | 67          |
|                    | 15         | 53,90 | 64,45 | 64,47 | 69,38 | 69,09 | 67,24 | 68,54 | 67,89 | 65,95 | 66,43 | 64,95 | 61,40 | 60,68 | 60,28 | 58,48 | 55,88 | 67          |
|                    | 16         | 54,30 | 65,55 | 62,97 | 69,48 | 68,39 | 66,94 | 68,94 | 68,49 | 65,85 | 65,83 | 65,35 | 61,40 | 60,48 | 60,28 | 58,28 | 55,78 | 67          |
|                    | 17         | 54,10 | 65,25 | 63,57 | 69,98 | 68,19 | 67,24 | 68,74 | 67,89 | 66,15 | 66,13 | 65,55 | 61,60 | 60,58 | 60,18 | 58,38 | 55,78 | 67          |
|                    | 18         | 54,40 | 64,25 | 64,87 | 69,68 | 69,69 | 67,64 | 67,54 | 67,09 | 66,55 | 66,33 | 65,35 | 61,50 | 60,28 | 60,08 | 58,48 | 55,88 | 67          |
|                    | 19         | 53,80 | 65,05 | 64,67 | 70,28 | 67,89 | 67,94 | 68,74 | 68,09 | 66,15 | 66,23 | 65,05 | 61,60 | 60,58 | 60,38 | 58,48 | 55,78 | 67          |
|                    | 20         | 54,30 | 66,55 | 63,97 | 68,28 | 69,39 | 67,14 | 68,64 | 67,69 | 65,95 | 66,23 | 65,45 | 61,30 | 60,58 | 59,98 | 58,58 | 55,98 | 67          |
|                    | 21         | 52,60 | 67,05 | 63,07 | 68,68 | 68,89 | 67,44 | 69,24 | 67,99 | 65,35 | 65,63 | 65,05 | 61,70 | 60,18 | 60,08 | 58,38 | 55,68 | 67          |
|                    | 22         | 52,80 | 66,05 | 64,47 | 71,08 | 68,39 | 67,44 | 68,44 | 67,69 | 66,05 | 66,33 | 64,95 | 61,40 | 60,68 | 60,08 | 58,28 | 55,48 | 67          |
|                    | 23         | 54,10 | 64,95 | 64,27 | 69,88 | 68,89 | 67,04 | 68,04 | 67,69 | 66,25 | 66,13 | 65,25 | 61,20 | 60,38 | 60,08 | 58,48 | 55,68 | 67          |
|                    | 24         | 52,10 | 64,95 | 64,07 | 69,88 | 67,59 | 67,24 | 68,04 | 67,59 | 66,05 | 66,33 | 64,75 | 61,10 | 60,38 | 59,98 | 58,28 | 56,08 | 67          |
|                    | 25         | 51,90 | 65,05 | 64,17 | 71,28 | 67,39 | 67,34 | 68,54 | 67,99 | 66,25 | 65,73 | 65,05 | 61,40 | 60,48 | 59,98 | 58,28 | 55,78 | 67          |
|                    | 26         | 53,60 | 65,85 | 63,67 | 70,58 | 68,69 | 67,24 | 68,64 | 67,69 | 66,65 | 65,83 | 64,65 | 61,20 | 60,48 | 60,28 | 58,48 | 55,88 | 67          |
|                    | 27         | 52,60 | 68,05 | 63,47 | 69,58 | 68,49 | 67,94 | 68,64 | 68,49 | 66,45 | 66,13 | 65,05 | 61,60 | 60,58 | 60,18 | 58,48 | 55,88 | 67          |
|                    | 28         | 50,80 | 68,45 | 64,37 | 68,58 | 68,09 | 68,04 | 68,34 | 67,99 | 66,25 | 66,33 | 65,35 | 61,70 | 60,48 | 60,28 | 58,18 | 55,68 | 67          |
|                    | 29         | 53,80 | 63,55 | 64,67 | 70,38 | 67,59 | 67,84 | 68,34 | 67,89 | 66,15 | 66,13 | 65,25 | 61,50 | 60,28 | 60,08 | 58,18 | 55,78 | 67          |
|                    | 30         | 54,90 | 64,95 | 64,77 | 68,48 | 67,59 | 67,94 | 68,44 | 67,49 | 65,95 | 66,13 | 65,15 | 61,20 | 60,18 | 59,78 | 58,28 | 55,88 | 67          |

Tabela D- 17: Conjunto de  $L'_{nT}$  [dB] (bandas 1/3 de oitavas) e ( $L'_{nT,w}$ ) [dB] para a os níveis extremos em cada banda

| $L'_{nT}$ | 100   | 125   | 160   | 200   | 250   | 315   | 400   | 500   | 630   | 800   | 1000  | 1250  | 1600  | 2000  | 2500  | 3150  | $L'_{nT,w}$ |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| Max.      | 57,50 | 69,35 | 67,07 | 73,28 | 70,19 | 69,94 | 69,34 | 68,79 | 67,85 | 67,53 | 67,65 | 66,80 | 65,68 | 64,68 | 60,88 | 56,18 | 70          |
| Mín       | 40,80 | 48,45 | 52,07 | 54,38 | 54,29 | 52,24 | 54,94 | 55,99 | 55,65 | 55,33 | 53,05 | 50,50 | 49,68 | 50,08 | 49,78 | 44,28 | 56          |

# ANEXO A

## MÁQUINA PADRÃO DE IMPACTO

### A.1 Introdução

A máquina de impactos TM01 LS0x do fabricante 01dB, se apresenta sob a forma de uma unidade compacta, leve mas robusta, cuja concepção se baseia em um chassi de alumínio. Os martelos são de aço inoxidável temperado, garantindo a não deformação do martelo mesmo após muitos anos de uso. O conjunto pesa apenas 10 [kg], com a bateria. A unidade funciona ligada à rede, mas pode ser também alimentada por uma bateria interna recarregável. A máquina pode ser ligada manualmente ou a distância com a ajuda de um controle remoto sem fio.

A unidade compreende os cinco martelos requeridos, de peso de 500 [g] cada, com uma altura de 40 [mm] e 100 [ms] entre cada impacto. Um sistema de serviço de garantia o mantém a boa frequência de impacto a todo momento e por toda temperatura. Um nível de bolha de ar fixado acima da máquina permite ao usuário administrar a direção da queda vertical.

A orientação de cada martelo é particularmente cuidada com o auxílio de materiais autolubrificantes a fim de não serem prejudicados pela poeira. Além disso, a orientação é claramente visível e acessível a fim de evitar qualquer acúmulo de poeira no interior do capô.

A velocidade de rotação é controlada por um sistema óptico e uma informação visual de maneira luminosa e auditiva por mudança de cadência que indica se a frequência da batida está de acordo com as exigências da norma. Estando assegurado que a excitação gerada pelo sistema está de acordo com as exigências da norma, o usuário poderá então se concentrar na medição.

## A.2 Especificações

**Normas de referência:** ISO 140 partes VI, VII e VIII, ISO 717, DIN 52210, BS 5821, ASTM E-492, ASTM E-1007, NBR 15575.

**Conformidade CE:** EN50081-1 e EN50082-1.

**Características dos martelos:** Número: 5; Material: Aço inoxidável; Peso: 500 [g] +/- 6 [g]; Diâmetro: 30 [mm] +/- 0,2 [mm]; Distância de separação: 100 [mm]; Altura de queda nominal: 40 [mm]; Cadência: 10 impactos por segundo; Sequência: 1, 3, 5, 2, 4.

**Dimensões totais:** C x A x P: 650x215x275 [mm] (25,6x8,6x10,8”).

**Peso:** 10,2 [kg]/22,5 [lb].

**Pés de estabilização:** Número: 3.

**Alimentação elétrica:** Carregador externo, Entrada 100-240 [V] AC, 50/60 [Hz], 1,0 [A], Consumo: 40 [W] Máx.

### A.3 Certificado de conformidade



## MANUFACTURER'S CERTIFICATE OF CONFORMANCE

### Tapping Machine TM01

Certificate No: TP02146/09/15

Serial No: TP02146

This is to certify that the tapping machine, identified above, has been tested before dispatch and conforms to the requirements of the following Standards:

BS EN ISO 140-7:1998

BS EN ISO 140-8:1998

The results of the above test are retained on file and can be inspected upon request.  
The following items were checked for conformance with the requirements of the Standards:

|                                               |                 |
|-----------------------------------------------|-----------------|
| <i>Mass of hammers</i>                        | <i>complies</i> |
| <i>Strike velocity of hammers</i>             | <i>complies</i> |
| <i>Diameter of hammer heads</i>               | <i>complies</i> |
| <i>Radius of curvature of hammer heads</i>    | <i>complies</i> |
| <i>Falling direction of hammers</i>           | <i>complies</i> |
| <i>Strike rate of hammers</i>                 | <i>complies</i> |
| <i>Time between successive hammer impacts</i> | <i>complies</i> |
| <i>Average time between impacts</i>           | <i>complies</i> |

---

Equipment supplied by: Sound Solutions Products Ltd.

Test carried out by: Thomas Attwood TechIOA MIDiagE

Signature:

Date of Test: 17/09/2015