



Instituto de Tecnologia  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

**Modelo de Tradução de Descritores e  
Requisitos de Isolamento Acústico em  
Edificações Residenciais com base na Teoria  
dos Conjuntos Fuzzy**

**TESE DE DOUTORADO**

Denilson Costa da Silva

2023

**Denilson Costa da Silva**

**Modelo de Tradução de Descritores e Requisitos de Isolamento Acústico em Edificações Residenciais com base na Teoria dos Conjuntos Fuzzy**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Maurício Furtado Maués

Belém, 05 de dezembro de 2023.

Na qualidade de autor da publicação, autorizo a Universidade Federal do Pará, a disponibilizar sem ressarcimento dos direitos autorais, o documento em meio eletrônico, na rede mundial de computadores, em formato digital PDF, para fins de leitura, impressão ou download, a título de divulgação da produção científica gerada pela Universidade.

---

**Denilson Costa da Silva**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISB**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará**  
**Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

S586m Silva, Denilson Costa da.

Modelo de tradução de descritores e requisitos de isolamento acústico em edificações residenciais com base na teoria dos conjuntos fuzzy / Denilson Costa da Silva. — 2023.

175 f.: il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Luiz Maurício Furtado Maués

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2023.

1. Tradução. 2. Descritores. 3. Requisitos de isolamento acústico. 4. Desempenho acústico na edificação. 5. Teoria dos conjuntos fuzzy. I. Título.

CDD 690

---

**Denilson Costa da Silva**

**Título**

**Modelo de Tradução de Descritores e Requisitos de Isolamento Acústico em Edificações Residenciais com base na Teoria dos Conjuntos Fuzzy**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor.

Belém, 05 de dezembro de 2023.

**Prof. Dr. Luiz Maurício Furtado Maués**  
Orientador  
Faculdade de Engenharia Civil – UFPA

Banca Examinadora

**Prof<sup>a</sup>. Dra. Stelamaris Rolla Bertoli**  
Examinadora Externa  
UNICAMP

**Prof<sup>o</sup>. Dr. José Alberto Silva de Sá**  
Examinador Externo  
Centro de Ciências Naturais e Tecnologia – UEPA

**Prof<sup>o</sup>. Dr. Gustavo da Silva Vieira de Melo**  
Examinador Externo  
Faculdade de Engenharia Mecânica - UFPA

**Prof<sup>o</sup>. Dr. Frederico Guilherme Pamplona Moreira**  
Examinador Interno  
Faculdade de Engenharia Civil – UFPA

Coordenador do Programa  
**Prof<sup>o</sup>. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira**  
Coordenador do PPGEC/ITEC/UFPA



## MODELO DE TRADUÇÃO DE DESCRITORES E REQUISITOS DE ISOLAMENTO ACÚSTICO EM EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS COM BASE NA TEORIA DOS CONJUNTOS FUZZY

AUTOR:

**DENILSON COSTA DA SILVA**

TESE SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 05 / 12 / 2023.

BANCA EXAMINADORA:



Documento assinado digitalmente  
**LUIZ MAURICIO FURTADO MAUÉS**  
Data: 11/12/2023 22:07:57-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

**Prof. Dr. Luiz Maurício Furtado Maués**



Documento assinado digitalmente  
**STELAMARIS ROLLA BERTOLI**  
Data: 18/12/2023 16:29:18-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

**Profª. Dra. Stelamaris Rolla Bertoli**  
Membro Externo (UNICAMP)

**JOSE ALBERTO SILVA DE**  
SA:21888779268

Assinado de forma digital por JOSE ALBERTO SILVA DE  
SA:21888779268  
Dados: 2023.12.14 09:50:36 -0300'

**Prof. Dr. José Alberto Silva de Sá**  
Membro Externo (UEPA)



Documento assinado digitalmente  
**GUSTAVO DA SILVA VIEIRA DE MELO**  
Data: 14/12/2023 11:01:42-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

**Profª. Dra. Gustavo da Silva Vieira de Melo**  
Membro Externo (UEPA)



Documento assinado digitalmente  
**FREDERICO GUILHERME PAMPLONA MOREIRA**  
Data: 14/12/2023 16:34:55-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

**Prof. Dr. Frederico Guilherme Pamplona Moreira**  
Membro Interno (UFPA)



Documento assinado digitalmente  
**DÊNIO RAMAM CARVALHO DE OLIVEIRA**  
Data: 29/02/2024 16:53:33-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Visto:

**Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira**  
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

Dedico este trabalho:

A minha mãe Julia Maria.  
Ao meu pai José Apolônio.  
Ao meu irmão Denys Silva.  
A minha esposa Larissa Magalhães.  
Aos meus filhos Lucas e Mateus.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser meu guia, por me fornecer força de vontade, por ser minha luz nos momentos de angústias e incertezas e por toda proteção. E a Nossa Senhora de Nazaré, pela sua bondosa intercessão.

A minha esposa Larissa Magalhães, pelo seu amor convertido em cuidados, apoio e incentivo diário.

Ao Professor Luiz Maurício Furtado Maués, por sua orientação segura, pela cobrança devida e comprometida, pelos conselhos, pela compreensão e pela amizade. O orientador é uma referência para este doutorando, por sua liderança, dedicação e senso de justiça.

Aos Professores Stelamaris Bertoli, Frederico Pamplona e Alberto Sá, pelas importantes contribuições no exame de qualificação.

Ao Professor Gustavo de Melo (PPGAU), que permitiu a minha participação na qualidade de aluno ouvinte, na disciplina Desempenho Acústico do Ambiente, além das contribuições na qualificação.

Da mesma forma, agradeço ao Professor Carlos Tavares (PPGEE-UFPA), pela disciplina Sistemas Fuzzy.

E a Professora Marcelle Mota (Faculdade de Computação-UFPA), pela disciplina Algoritmos.

Ao Professor Alcebíades Macedo, por todo ensinamento e apoio desde a minha fase de petiano.

Ao Professor Jorge Ichihara, por todo ensinamento durante a Graduação e Mestrado.

Ao Professor André Montenegro, pelas importantes contribuições para minha Graduação, Mestrado e Doutorado.

Ao Wylliam Bessa, pelo compartilhamento de dados e informações da sua pesquisa de mestrado.

Agradeço também aos demais colegas do grupo de pesquisa: Raísse Saraiva, Lisandra Blanco, André Brasil, Felipe Sá, Carol Caldas, Amanda Batista, Fabrício Oliveira e Renato Seixas, pelo bom convívio e compartilhamento de experiência profissional.

Aos professores da FAEC-Unifesspa: Lygia Policarpio, Rafaela Silveira, Antonio Nascimento, Saymon Santana, Adriane Franco, Mila Sampaio, Sabino Neto e Helio Scatena (*in memoriam*), pela boa convivência profissional e pelo importante apoio.

Um especial agradecimento a: Juliana Ribeiro, Jessica Ribeiro, Fabrício Assunção, Bárbara Padilha, Caio Macedo e Carolina Benone, por toda amizade e boa convivência.

Aos amigos da “Equipe”: Bruna Covre, Dimitri Oliveira, Renatta Covre, Igor Prado, Rafael Sampaio, Rodrigo Covre e Velasco Júnior.

Ao Danilo Milhomem, pelo apoio no primeiro trabalho com a Teoria dos Conjuntos Fuzzy.

Aos amigos de graduação: Michele Azulay e Rogério Nogueira, pela amizade e parceria nos estudos.

Ao amigo: Fábio Moraes, pela longa amizade e incentivo.

Ao Adelson Andrade e Olga Maria, pela importante rede de apoio voltada para meus filhos.

## RESUMO

A otimização do espalhamento de valores possíveis, dentro do contexto da tradução de descritores e requisitos de isolamento acústico em edificações residenciais, representa uma área de conhecimento ainda não explorada, e constitui uma lacuna do conhecimento dentro do tema incerteza de medição acústica em edificações. Neste sentido, esta tese tem por objetivo propor um modelo de tradução de descritores e requisitos de isolamento acústico em edificações residenciais com base na Teoria dos Conjuntos Fuzzy (TDRIAR-FUZZY). O referido modelo foi estruturado em 9 (nove) notações e, por definição é um fuzzificador de números fuzzy triangulares. O TDRIAR-FUZZY usa como dados de entrada os valores de número único de isolamento acústico aéreo (IAA) e de isolamento acústico de impacto (IAI). Essas entradas são transformadas em conjuntos fuzzy, por meio de funções de pertinência triangulares e, em seguida os conjuntos fuzzy são convertidos em números fuzzy. Tais números fuzzy são modelados como coeficientes de regressão linear fuzzy via programação linear, segundo o modelo de Tanaka, Uejima & Asai (1982). O conceito de regressão linear fuzzy é explorado com fins de otimização da dispersão de valores possíveis. A realização de um estudo piloto do TDRIAR-FUZZY permitiu a compreensão do mesmo e implementação de melhorias ao seu desenvolvimento. O modelo foi aplicado a um total de 15 elementos de partição vertical (paredes de vedação para IAA) e a 11 elementos de partição horizontal (pisos para IAI). Todas essas amostras foram compiladas a partir de pesquisas *in situ* e representam tipologias típicas de construção encontradas no Brasil. No contexto do IAA, os resultados obtidos consistem em equações que abrangem a tradução de  $D_{nT,w}$  para  $D_{nT,50}$ , de  $D_{nT,A100}$  para  $D_{nT,50}$  e de  $D_{nT,Atr100}$  para  $D_{nT,50}$ . Por outro lado, no IAI, o resultado envolve a equação de tradução de  $L'_{nT,w}$  para  $L'_{nT,50}$ . A validação dos resultados foi conduzida por meio do estudo da linearidade dos parâmetros das equações de tradução. Isso envolveu a avaliação do coeficiente de determinação, a análise do coeficiente de correlação e a avaliação do nível de significância dos parâmetros utilizando o teste F. Ao fim concluiu-se que o TDRIAR-FUZZY é capaz de reduzir resultados válidos, sendo um modelo replicável e passível de verificação.

Palavras-chave: Tradução; Descritores; Requisitos de isolamento acústico; Desempenho acústico na edificação; Teoria dos Conjuntos Fuzzy.

## ABSTRACT

The optimization of the spread of possible values, within the context of translating descriptors and acoustic isolation requirements in residential buildings, represents an unexplored area of knowledge and constitutes a knowledge gap within the theme of acoustic measurement uncertainty in buildings. In this sense, this thesis aims to propose a model for translating descriptors and acoustic isolation requirements in residential buildings based on Fuzzy Set Theory (TDRIAR-FUZZY). The mentioned model was structured with 9 (nine) notations and is, by definition, a fuzzifier of triangular fuzzy numbers. TDRIAR-FUZZY uses the single-number values of airborne sound insulation (ASI) and impact sound insulation (ISI) as input data. These inputs are transformed into fuzzy sets through triangular membership functions, and then the fuzzy sets are converted into fuzzy numbers. These fuzzy numbers are modeled as fuzzy linear regression coefficients by linear programming, following the Tanaka, Uejima & Asai model (1982). The concept of fuzzy linear regression is explored for the purpose of optimizing the spread of possible values. A pilot study of TDRIAR-FUZZY allowed for its understanding and the implementation of improvements to its development. The model was applied to a total of 15 vertical partition elements (IAA partition walls) and 11 horizontal partition elements (IAI floors). All these samples were compiled from in-situ research and represent typical construction typologies found in Brazil. In the context of IAA, the obtained results consist of equations that cover the translation from  $D_{nT,w}$  to  $D_{nT,50}$ , from  $D_{nT,A100}$  to  $D_{nT,50}$  and from  $D_{nT,Atr100}$  to  $D_{nT,50}$ . On the other hand, in IAI, the result involves the translation equation from  $L'_{nT,w}$  to  $L'_{nT,50}$ . The validation of the results was conducted through the study of the linearity of the parameters of the translation equations. This involved evaluating the coefficient of determination, analyzing the correlation coefficient, and assessing the significance level of the parameters using the F-test. In conclusion, it was found that TDRIAR-FUZZY is capable of producing valid results, being a replicable and verifiable model.

Keywords: Translation; Descriptors; Acoustic insulation requirements; Acoustic performance in buildings; Fuzzy Set Theory.

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....	22
1.1 Lacuna do Conhecimento.....	25
1.2 Questões de Pesquisa.....	26
1.3 Objetivo Geral e Específicos.....	27
1.4 Hipótese.....	27
1.5 Justificativa.....	27
1.6 Limitações da Pesquisa.....	30
CAPÍTULO 2 DESEMPENHO ACÚSTICO NAS EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS.....	31
2.1 Fundamentos da Acústica aplicados às Edificações.....	31
2.1.1 Espectro Sonoro e as Bandas de Frequência.....	33
2.1.2 Nível de Pressão Sonora.....	34
2.2 O Conceito de Desempenho Aplicado às Edificações.....	35
2.3 O Conceito de Desempenho Acústico em Edificações Residenciais.....	37
2.4 Isolamento Acústico.....	38
2.4.1 Transmissão Sonora.....	39
2.4.2 Tempo de Reverberação .....	42
2.4.3 Descritores de Isolamento Acústico Aéreo.....	44
2.4.4 Descritores de Isolamento Acústico de Impacto.....	47
2.4.5 Coeficiente de Adaptação de Espectro para Isolamento Acústico.....	49
2.4.6 Classificação de Número Único.....	52
2.4.7 Incerteza de Medição.....	53
2.4.8 Avaliação de Requisitos de Isolamento Acústico.....	56
2.4.9 Referencial Normativo no Brasil para Avaliação do Isolamento Acústico em Campo.....	59
2.4.10 Conceito de Tradução de Descritores e Requisitos acústicos aplicado ao Desempenho de Edificações Residenciais.....	61

2.4.11 Tradução das Relações Geométricas e dos Procedimentos de Ponderação.....	61
2.4.12 Pesquisas Relacionadas.....	63
CAPÍTULO 3 TEORIA DOS CONJUNTOS FUZZY.....	67
3.1 Conjuntos Fuzzy.....	68
3.2 Função de Pertinência.....	69
3.3 Operações entre Conjuntos Fuzzy.....	73
3.4 Números Fuzzy via $\alpha$ -Corte.....	75
3.5 Princípio de Extensão Fuzzy.....	77
3.6 Fuzzificação com Regressão Linear Fuzzy.....	79
3.7 Defuzzificação.....	83
CAPÍTULO 4 MÉTODO.....	85
4.1 Fundamentos.....	85
4.2 Classificação da Pesquisa .....	86
4.3 Delineamento da Pesquisa.....	88
4.3.1 Etapa 1 – Compreensão.....	88
4.3.2 Etapa 2 – Desenvolvimento do Modelo.....	90
4.3.3 Etapa 3 – Implementação.....	92
CAPÍTULO 5 DESENVOLVIMENTO DO MODELO.....	94
5.1 Compilação de Dados e Composição de Elementos Amostrais.....	94
5.1.1 Compilação de dados e Composição do Elemento de Partição de Isolamento Acústico Aéreo.....	94
5.1.2 Compilação de dados e Composição do Elemento de Partição de Isolamento Acústico de Impacto.....	99
5.2 Modelo Proposto.....	102
5.3 Estudo Piloto.....	107
5.3.1 Modelagem dos Dados de Entrada em X.....	107

5.3.2 Aplicação do TDRIAR-FUZZY.....	109
5.1.3 Análise das Saídas.....	114
CAPÍTULO 6 RESULTADOS E VALIDAÇÃO.....	116
6.1 Tradução de Descritores e Requisitos de Isolamento Acústicos.....	116
6.1.1 Tradução de Descritores e Requisitos de Isolamento Acústicos de $D_{nT,w}$ para $D_{nT,50}$ ....	116
6.1.2 Tradução de Descritores e Requisitos de Isolamento Acústicos de $D_{nT,A100}$ para $D_{nT,50}$ .....	117
6.1.3 Tradução de Descritores e Requisitos de Isolamento Acústicos de $D_{nT,Atr100}$ para $D_{nT,50}$ .....	118
6.1.4 Tradução de Descritores e Requisitos de Isolamento Acústicos de $L'_{nT,w}$ para $L'_{nT,50}$ ....	119
6.2 Validação.....	119
6.2.1 Validação da Tradução de $D_{nT,w}$ para $D_{nT,50}$ .....	120
6.2.2 Validação da Tradução de $D_{nT,A100}$ para $D_{nT,50}$ .....	124
6.2.3 Validação da Tradução de $D_{nT,Atr100}$ para $D_{nT,50}$ .....	124
6.2.4 Validação da Tradução de $L'_{nT,w}$ para $L'_{nT,50}$ .....	125
6.3 Análises.....	126
CAPÍTULO 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	130
7.1 Cumprimento dos Objetivos.....	130
7.2 Conclusões a respeito do TDRIAR-FUZZY.....	131
7.3 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	132
REFERÊNCIAS.....	133
APÊNDICE A – REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	
APÊNDICE B – CÁLCULOS DOS DESCRITORES DOS ELEMENTOS DE PARTIÇÃO VERTICAL	
APÊNDICE C – CÁLCULOS DOS DESCRITORES DOS ELEMENTOS DE PARTIÇÃO HORIZONTAL	

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Valores das bandas de frequência de oitava e um terço de oitava.....	34
Tabela 2.2 Espectros de nível de som para calcular os termos de adaptação para faixa de frequência de um terço de oitava.....	51
Tabela 2.3 Fator de conversão para diferentes níveis de confiança.....	54
Tabela 2.4 Valores de incerteza padrão para número único em isolamento acústico aéreo.....	55
Tabela 2.5 Valores de incerteza padrão para número único em isolamento acústico de impacto.....	55
Tabela 2.6 Equações lineares de tradução entre descritores para isolamento acústico aéreo.....	65
Tabela 2.7 Equações lineares de tradução entre descritores para isolamento acústico de impacto.....	66
Tabela 5.1 Composição do elemento de partição vertical – EPV.....	98
Tabela 5.2 Composição do elemento de partição horizontal – EPH.....	101
Tabela 5.3 Cálculo de $D_{nT,w}$ , $D_{nT,A100} = (D_{nT,w} + C)$ e $D_{nT,Atr100} = (D_{nT,w} + C_{tr})$ .....	108
Tabela 5.4 Valores modais e a incerteza expandida.....	109
Tabela 5.5 Números fuzzy intervalares.....	110
Tabela 5.6 Variáveis dependentes obtidas.....	111
Tabela 5.7 Variáveis dependentes ajustadas.....	114
Tabela 5.8 Análise intervalar a partir do princípio de extensão de Zadeh.....	115
Tabela 6.1 Equações de tradução estimadas de $D_{nT,w}$ para $D_{nT,50}$ .....	116
Tabela 6.2 Equações de tradução estimadas de $D_{nT,A100}$ para $D_{nT,50}$ .....	117
Tabela 6.3 Equações de tradução estimadas de $D_{nT,Atr100}$ para $D_{nT,50}$ .....	118
Tabela 6.4 Equações de tradução estimadas de $L'_{nT,w}$ para $L'_{nT,50}$ .....	119
Tabela 6.5 Validação da equação de tradução entre $D_{nT,w}$ e $D_{nT,50}$ .....	121

Tabela 6.6 Coeficientes de determinação e correlação das equações de tradução entre $D_{nT,w}$ e $D_{nT,50}$ .....	122
Tabela 6.7 Teste ANOVA para as equações de tradução de $D_{nT,w}$ para $D_{nT,50}$ .....	123
Tabela 6.8 Coeficientes de determinação e correlação das equações de tradução entre $D_{nT,100}$ e $D_{nT,50}$ .....	124
Tabela 6.9 Teste ANOVA para as equações de tradução entre $D_{nT,A100}$ e $D_{nT,50}$ .....	124
Tabela 6.10 Coeficientes de determinação e correlação das equações de tradução entre $D_{nT,Atr100}$ para $D_{nT,50}$ .....	125
Tabela 6.11 Teste ANOVA para as equações de tradução entre $D_{nT,Atr100}$ e $D_{nT,50}$ .....	125
Tabela 6.12 Coeficientes de determinação e correlação das equações de tradução entre $L'_{nT,w}$ para $L'_{nT,50}$ .....	125

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Limiar auditivo em função da frequência.....	33
Figura 2.2 Planta baixa da sala de emissão (origem) e sala de recepção.....	40
Figura 2.3 Caminho direto de transmissão e caminhos pelos flancos.....	41
Figura 2.4 Ensaio de isolamento de impacto.....	48
Figura 2.5 Tradução de descritores e requisitos acústicos.....	62
Figura 3.1 Função de pertinência triangular.....	70
Figura 3.2 Função de pertinência do exemplo .....	71
Figura 3.3 Verificação da convexidade do conjunto $\mu_A(x)$ .....	72
Figura 3.4 Representação dos $\alpha$ -cortes .....	76
Figura 3.5 Princípio de Extensão de Zadeh para função linear.....	79
Figura 3.6 Saída para coeficientes fuzzy.....	81
Figura 3.7 Saída para variáveis fuzzy.....	82
Figura 4.1 Delineamento da pesquisa.....	89
Figura 5.1 Esquematização de função injetora dos conjuntos crisp.....	103
Figura 5.2 Função de pertinência da partição II-B.....	110
Figura 5.3 Interface de configuração do Solver .....	112
Figura 5.4 Relatório de saída do Solver.....	113
Figura 6.1 Comparativo entre a tradução de $D_{nT,w}$ para $D_{nT,50}$ do TDRIAR-FUZZY com os observados na literatura.....	126
Figura 6.2 Comparativo entre a tradução de $D_{nT,A100}$ para $D_{nT,50}$ do TDRIAR-FUZZY com os observados na literatura.....	127
Figura 6.3 Comparativo entre a tradução de $D_{nT,Atr100}$ para $D_{nT,50}$ do TDRIAR-FUZZY com os observados na literatura .....	128

Figura 6.4 Comparativo entre a tradução de  $L'_{nT,w}$  para  $L'_{nT,50}$  do TDRIAR-FUZZY com os observados na literatura .....129

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1	Descritores para isolamento acústico aéreo.....	46
Quadro 2.2	Descritores para isolamento acústico de impacto.....	49
Quadro 2.3	Coefficientes de adaptação de espectro relevante para diferentes tipos de fontes de ruído.....	51
Quadro 2.4	Requisitos de isolamento acústico aéreo e de impacto entre edificações residenciais.....	57
Quadro 2.5	Descritores para verificação.....	59
Quadro 2.6	Requisitos de verificação de isolamento acústico aéreo e de impacto praticados no Brasil.....	60
Quadro 5.1	Compilação de dados de elementos de partição vertical baseados em Souza (2016) .....	95
Quadro 5.2	Compilação de dados de elementos de partição vertical baseados em Santana (2016) .....	95
Quadro 5.3	Compilação de dados de elementos de partição vertical baseados em Heissler (2018) .....	96
Quadro 5.4	Compilação de dados de elementos de partição vertical baseados em Pinto (2011) .....	96
Quadro 5.5	Compilação de dados de elementos de partição vertical baseados em Kuhn (2015) .....	97
Quadro 5.6	Compilação de dados de elementos de partição horizontal baseados em Souza (2016) .....	99
Quadro 5.7	Compilação de dados de elementos de partição horizontal baseados em Santana (2016) .....	99
Quadro 5.8	Compilação de dados de elementos de partição vertical baseados em Cornacchia (2009) .....	100

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAE	Coeficiente de Adaptação de Espectro
DAR	Desempenho Acústico nas Edificações Residenciais
NPS	Nível de Pressão Sonora
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
TCF	Teoria dos Conjuntos Fuzzy
TDRIAR	Tradução de Descritores e Requisitos de Isolamento Acústicos em Edificações Residenciais
TDRIAR-FUZZY	Tradução de Descritores e Requisitos de Isolamento Acústico em Edificações Residenciais com base na Teoria dos Conjuntos Fuzzy
EPV	Elemento de partição vertical
EPV	Elemento de partição horizontal
IAA	Isolamento acústico aéreo
IAI	Isolamento acústico de impacto
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
WHO	<i>World Health Organization</i>
ANOVA	Análise de variância

## LISTA DE SÍMBOLOS

$NPS$	Nível de pressão sonora
$W$	Nível de potência sonora
$T$	Tempo de reverberação
$\alpha$	Coefficiente de absorção sonora
$R'$	Índice de redução do som aparente
$C$	Coficiente de adaptação de espectro
$R_w$	Índice de redução do som aparente ponderado
$D_{nT}$	Diferença de nível padronizado
$D_{nT,w}$	Diferença de nível padronizado ponderado
$D_{nT,A100}$	Equivalente ao $D_{nT,w} + C$ - Diferença de nível padronizado ponderado mais o coeficiente de adaptação de espectro $C$ dentro da faixa de frequência de 100 a 3150Hz
$D_{nT,A100tr}$	Equivalente ao $D_{nT,w} + C_{tr}$ - Diferença de nível padronizado ponderado mais o coeficiente de adaptação de espectro $C_{tr}$ dentro da faixa de frequência de 100 a 3150Hz
$D_{nT,50}$	Diferença de nível padronizado ponderado mais o coeficiente de adaptação de espectro dentro da faixa de frequência de 50 a 5000Hz
$L'_{nT}$	Nível de pressão sonora de impacto padronizado
$L'_{nT,w}$	Nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado
$L'_{nT,A100}$	Equivalente ao $L'_{nT,w} + C_I$ - Nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado mais o coeficiente de adaptação de espectro $C_I$ dentro da faixa de frequência de 100 a 2500Hz
$L'_{nT,50}$	Nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado mais o coeficiente de adaptação de espectro dentro da faixa de frequência de 50 a 2500Hz
$U$	Incerteza expandida
$u$	Incerteza padrão
$Req$	Requisito mínimo de isolamento acústico

$f_A(x)$	Grau de pertinência de $x$ em $A$
$\mu_A(x)$	Função de pertinência
$\wedge$	Operador de intersecção fuzzy
$\alpha - corte$	Conjunto fuzzy $\alpha$ -corte
$[A]^\alpha$	Número fuzzy de um $\alpha$ -corte
$IE(A)$	Intervalo esperado de um conjunto fuzzy
$VE(A)$	Valor esperado de um conjunto fuzzy
$R$	Coefficiente de correlação
$R^2$	Coefficiente de determinação

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo Machimbarrena, Rasmussen e Fausti (2014), o problema da poluição sonora do ponto de vista ambiental é uma preocupação em nível internacional, e que vem demandando o desenvolvimento e implementação de políticas destinadas a conhecer, avaliar e mitigar o problema do ruído ambiental. O ruído é definido como som indesejável e desagradável (Gerges, 2000); em termos de ruído ambiental e os seus impactos na saúde humana têm sido evidenciados por pesquisadores e reconhecidos por diversas Organizações (Machimbarrena; Rasmussen, 2017; Schwela; Finegold; Gjestland, 2014).

A Organização Mundial da Saúde (*World Health Organization* - WHO) vem abordando o problema do ruído na comunidade desde 1980. É o que diz o relatório intitulado - *Guidelines for Community Noise* (Diretrizes para o ruído da comunidade), publicado em 1999 (WHO, 1999). No mesmo relatório, o ruído na comunidade (chamado também de ruído ambiental, ruído residencial ou ruído doméstico) é definido como o ruído emitido por todas as fontes, com exceção do ruído emitido no trabalho industrial. O relatório é um marco, pois reconhece o ruído na comunidade como um problema mundial e orienta autoridades nacionais, regionais e locais, quanto ao desenvolvimento de planos de ação para o controle das fontes de ruídos na comunidade em ambientes específicos (moradias, escolas e hospitais) com a finalidade de mitigar os efeitos adversos do ruído à saúde humana (WHO, 1999).

A Organização Internacional de Normalização (*International Organization for Standardization* - ISO) publicou em 1982, a série ISO 1996-1 (2016) onde são apresentadas as terminologias básicas para a descrição de ruído em ambientes comunitários, os procedimentos de mensuração e recomendações para os limites do ruído ambiental. Os documentos emitidos pela ISO, em termos de métodos de medição do ruído no ambiente, exercem uma ampla influência nas regulamentações e códigos nacionais em países da Europa, América do Sul (Machimbarrena; Rasmussen, 2017), Ásia (Höller, 2018), já os Estados Unidos da América e o Canadá seguem as prescrições da ASTM (*American Society for Testing and Materials*) (Berardi; Rasmussen, 2014; Höller, 2018).

Outro marco em 2002 foi a publicação da Diretiva nº2002/49/CE do Parlamento Europeu e da Comissão Europeia<sup>1</sup>, com referência à avaliação e gestão do ruído ambiente, cujo objetivo principal é “definir uma abordagem comum para evitar, prevenir e reduzir, numa base prioritária, os efeitos prejudiciais da exposição ao ruído ambiente incluindo o incômodo dela decorrente”. A Diretiva tem concentração em três áreas de ação: a elaboração de mapas de ruído para determinar a exposição ao ruído ambiental; a transparência quanto à informação ao público sobre o ruído ambiente e seus efeitos; e a preservação da qualidade do ruído ambiental com base nas boas práticas de prevenção e redução do ruído ambiental onde for necessário.

No Brasil, o problema do ruído ambiental é observado, institucionalmente, por meio da Constituição Federal de 1988 e do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). A Constituição Federal de 1988 dedica o capítulo VI ao meio ambiente e, por meio do Art. 225: “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 [...]” (BRASIL, 1988). O CONAMA através da resolução nº 01 de 1990, deliberou normas, critérios e padrões em respeito à preservação do meio ambiente. Tais critérios visam à preservação da saúde e do sossego público. Esses critérios adquirem caráter normativo e, portanto, força de lei por meio das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Este contexto apresentado demonstra que o ruído ambiental é um problema discutido em países de diferentes continentes. Portanto, configura um problema internacional e nacional. Ao focar no ruído ambiental em espaços fechados, a NBR 12179 (1992) prescreveu os critérios fundamentais para execução de tratamentos acústicos em recintos fechados. Patrício (2018) discute o ruído em espaço fechado por meio das condições de conforto acústico. Ao focar no ambiente da edificação do Brasil dentro desse contexto, a ABNT NBR 10.152 (1987) fixou os níveis de ruído compatíveis com o conforto acústico para diversos ambientes, a NBR 10.151 (2019), atualizada em 2019, fixou as condições exigíveis para avaliação da aceitabilidade do ruído em comunidades; especificou um método para a medição de ruído interno e externo à edificação, e a NBR 15575-4 (2021a) estabeleceu critérios de desempenho acústico em habitações.

---

<sup>1</sup> European Commission. Directive 2002/49/EC relating to the assessment and management of environmental noise (the Environmental Noise Directive – END). [https://ec.europa.eu/environment/noise/directive\\_en.htm](https://ec.europa.eu/environment/noise/directive_en.htm). Acessado em: 14 de junho de 2021.

Alonso *et al.* (2020) acrescentam que as políticas regulatórias de diversos países diferem na abordagem da questão do ruído na edificação. A diversificação foi evidenciada com base em um estudo em 24 países da Europa, onde atestou um alto grau de diversidade entre os descritores de isolamento de som e requisitos acústicos (Rasmussen, 2010; Rasmussen; Rindel, 2010).

Como emergiram os termos “descritores” e “isolamento acústico”, que são conceitos específicos dentro da acústica de edificação, cabe então a definição destes, de modo a direcionar ao problema de pesquisa. De acordo com Scholl, Wang e Wittstock (2011), o isolamento acústico na edificação tem em seu método 03 partes bem definidas: quantidade física; classificação de número único e; avaliação dos requisitos. Sendo assim, os descritores são constituídos pelas resultantes da quantificação física e da classificação de número único (Rasmussen; Rindel, 2010).

Conforme Neubauer e Kang (2011), a quantificação física baseia-se na medição da diferença de níveis de som considerando o sistema partição (parede, piso e demais fechamentos), sala emissora (origem) e sala receptora. Tal quantificação envolve método de medição, condições de medição, intervalo de frequências, resolução em frequência (banda de um terço de oitavas) e incerteza de resultados da medição. A quantificação física fornece a perda de transmissão nas várias faixas de frequências (tradicionalmente nas bandas de 100 a 3.150 Hz), então é calculada a média ponderada para classificação em um número único. Por fim, o número único é submetido à avaliação dos requisitos prescritos nos códigos de construção nacionais vigentes e que visam a garantir as condições prévias de saúde dos usuários (Scholl; Lang; Wittstock, 2011).

Com base em Gerretsen (2013), a relação entre os vários sistemas de ponderação tem que lidar com diferentes faixas de frequência, ou seja, tem que lidar tanto com as faixas tradicionais de frequência (100 – 3.150 Hz), quanto com as novas faixas propostas que compreendem o intervalo de 50 a 5.000 Hz. Além do mais, os vários sistemas de ponderação têm que lidar com os diversos procedimentos de avaliação, que são curvas de referência padronizada e fontes de espectros sonoros. Porém, não há uma relação matemática para todas essas variações, e os estudos publicados são baseados na experiência e na avaliação estatística (Gerretsen, 2013).

Machimbarrena e Fausti (2013) advertem que antes da proposição de esquemas de classificação acústica, é necessário proceder com o conceito de tradução de descritores e

requisitos de isolamento acústico em edificação. A definição deste conceito foi introduzida por Gerretsen (2013), e consiste na conversão de um descritor existente para um novo descritor. Este novo considera a união entre a faixa de frequência e o número único ponderado. É importante o registro de algumas publicações correlatas que antecederam Gerretsen (2013), tais como: Scholl, Wang e Wittstock (2011) e Monteiro *et al.* (2012).

### 1.1 Lacuna do Conhecimento

A lacuna apresentada por Gerretsen (2013) motivou o estudo de revisão sistemática da literatura (RSL) (ver Apêndice A), a respeito do tema tradução de descritores e requisitos de isolamento acústico em edificações residenciais (TDRIAR). Nesta RSL foi realizada uma ampla busca nas seguintes bases de dados: *Scopus*; *Science Direct*; *Web of Science*, o que possibilitou o rastreamento de 628 artigos. Após processo criterioso de filtragem, obtiveram-se 29 pesquisas correlatas ao tema, com destaque para 8 pesquisas: Scholl, Wang e Wittstock (2011); Monteiro *et al.* (2012); Gerretsen (2013); Machimbarrena e Fauti (2013); Dunbavin e Gerretsen (2014); Machimbarrena *et al.* (2016); Monteiro *et al.* (2017); Del Val *et al.* (2018).

No artigo de Gerretsen (2013), além da definição de tradução de descritores e requisitos acústicos, tem-se a proposta de tradução de descritores em duas etapas. A primeira trata da determinação da quantificação física com base nas relações geométricas das situações (volume e área) para as devidas suposições. A segunda trata da tradução da faixa de frequência e ponderação, considerando as correlações entre diferentes descritores e obtenção das equações de tradução correspondentes. Além do mais, é proposto a comparação dos requisitos e das classes acústicas após a tradução.

Dunbavin e Gerretsen (2014) forneceram equações de tradução entre alguns descritores de isolamento acústico aéreo e de impacto. Machimbarrena *et al.* (2016) e Del Val *et al.* (2018) estudaram a tradução de descritores de isolamento acústico de impacto e investigaram tal conceito aplicado ao isolamento acústico aéreo. Em todos esses autores, a tradução foi baseada na modelagem e análise estatística de um grande conjunto de dados. Monteiro *et al.* (2017) relatam que só há um estudo em nível nacional, realizado no Reino Unido, e que envolve uma grande grande medição em campo, de habitações recém construídas e nas mesmas especificações técnicas. Fato que demonstra a dificuldade de levantar um grande conjunto de dados para tal pesquisa.

A missão científica de curto período (Short term scientific mission - STSM), missão essa integrante do projeto - Construindo Acústica em toda a Europa (Building acoustics throughout Europe - COST Action TU0901), declarou que a tradução teórica, na melhor das hipóteses, fornece um valor médio, não sendo uma tarefa simples de realização. A dificuldade é em decorrência do espalhamento de valores<sup>2</sup>. O desafio assim, é saber o que é, e como lidar com esse espalhamento de valores. Dunbavin e Gerretsen (2014) e Monteiro *et al.* (2017) tentaram responder por meio de comparações estatísticas. É importante ressaltar que o espalhamento obtido na tradução utilizando um grande conjunto de dados, como feito em Monteiro *et al.* (2017), é maior do que o espalhamento obtido com o uso de uma amostra menor, a exemplo de Dunbavin e Gerretsen (2014).

Neste sentido, declara-se a seguinte lacuna do conhecimento: *ainda não há estudo de tradução de descritores e requisitos de isolamento acústico em edificações residenciais, considerando o conceito de otimização para investigação do espalhamento de valores.*

Para atender essa lacuna, esta tese propôs um modelo de tradução de descritores e requisitos de isolamento acústico em edificações residenciais com base na Teoria dos Conjuntos Fuzzy<sup>3</sup> (TCF). A lacuna da otimização mencionada é contemplada no modelo proposto via o conceito de Regressão Linear Fuzzy<sup>4</sup>.

## 1.2 Questões de Pesquisa

Com a apresentação do problema de pesquisa, faz-se os seguintes questionamentos:

- Como desenvolver um modelo com base na Teoria dos Conjuntos Fuzzy para fins de melhor compreensão do espalhamento de valores associado à tradução de descritores e requisitos aplicada ao isolamento acústico de edificações residenciais?

---

<sup>2</sup> Espalhamento de valores (tradução em inglês – spread of values) – Exemplo de um espalhamento de valores extraído de Dunbavin e Gerretsen (2014):  $D_{nr,w} + C_{tr} = 52dB \pm 1dB$ .

<sup>3</sup> Um conjunto fuzzy pode ser definido matematicamente atribuindo a cada indivíduo possível no universo do discurso um valor que representa seu grau de pertinência no conjunto fuzzy (Klir; Yuan, 1995).

<sup>4</sup> A Regressão Linear Fuzzy estima uma gama de valores possíveis que são representados por uma função de pertinência (distribuição de possibilidades). As funções de pertinência são formadas atribuindo-se um valor de pertinência específico (grau de pertencimento) a cada um dos valores estimados (Ross, 2004).

- Como otimizar a saída de equações lineares de tradução de descritores e requisitos de isolamento acústico em edificações residenciais em números fuzzy e de modo a permitir o estudo do espalhamento de valores possíveis?

### 1.3 Objetivo Geral e Específicos

A presente tese tem por objetivo geral propor um modelo de tradução de descritores e requisitos de isolamento acústico em edificações residenciais com base na Teoria dos Conjuntos Fuzzy (TDRIAR-FUZZY).

Como objetivos específicos, relacionam-se:

- Fuzzificar dados de descritores de isolamento acústico aéreo e de impacto;
- Avaliar a necessidade de defuzzificação das equações lineares fuzzy em equações lineares escalares (crisp);
- Fazer um comparativo entre os achados do modelo proposto e os achados por outros autores.

### 1.4 Hipótese

A hipótese formulada para a tese considera o conceito de regressão linear fuzzy em relação à lacuna de conhecimento. Sendo assim, a hipótese formulada é: o conceito de regressão linear fuzzy contribui para a tradução dos descritores e requisitos de isolamento acústico em edificações residenciais, por meio da otimização do espalhamento de valores possíveis.

### 1.5 Justificativa

Ao observar relevantes organizações (item 1) com políticas direcionadas à mitigação do problema do ruído ambiental, revela-se uma demanda social, fato que por si só; justifica a investigação do problema. E esse argumento ganha força com a observação dos efeitos adversos à saúde humana causados pela exposição ao ruído ambiental. WHO (2009) examina a relação entre o ruído noturno e a perturbação do sono e os efeitos na saúde e bem-estar. Nesta referência são apresentadas evidências para os seguintes efeitos: efeitos cardiovasculares; insônia; efeitos no desempenho; efeitos sobre distúrbios psíquicos. Em WHO (2011), é apresentada a quantificação de anos de vida saudáveis perdidos por meio da carga de doença causada pela

exposição ao ruído ambiental. As doenças relacionadas incluem doenças cardiovasculares, comprometimento cognitivo das crianças, distúrbios do sono e zumbidos.

A determinação dos valores resultantes do estudo de isolamento acústico na edificação busca atender a tal demanda social, uma vez que, estes são submetidos às prescrições vigentes nos códigos de construção nacionais e que visam a garantir as condições prévias de saúde e bem-estar dos usuários (Scholl; Lang; Wittstock, 2011). Isso pode ser melhor explicado através do exemplo extraído da NBR 15575-4 (2021a), que relaciona: classes de ruídos (Classe III); a localização da habitação (Habitação sujeita a ruído intenso de meios de transporte e de outras naturezas, desde que conforme a legislação); e os valores mínimos da diferença padronizada de nível ponderado da vedação externa de dormitório (valor mínimo de 40 dB).

Na opinião de Rasmussen (2010), é importante a definição de um isolamento acústico razoável, e que auxilie no estabelecimento de critérios objetivos na legislação, de modo que o desempenho percebido pelos ocupantes tenha boa correlação com o desempenho objetivo. O cumprimento deste objetivo, garante condições satisfatórias (Rasmussen, 2010). Sendo assim, estudos envolvendo a tradução de descritores e requisitos acústicos têm sua contribuição a dar, uma vez que, a combinação destes é favorável ao cumprimento de tal objetivo.

Além da demanda social, tem-se a demanda de pesquisa, constituída na lacuna do conhecimento (item 1.1). Dentro da RSL, a relação entre os 628 artigos rastreados e os 6 artigos que estruturaram a lacuna do conhecimento (Del Val *et al.*, 2018; Dunbavin; Gerretsen, 2014; Gerretsen, 2013; Machimbarrena *et al.*, 2016; Machimbarrena; Fausti, 2013; Monteiro *et al.*, 2017), possibilita a extração das seguintes informações: há um número significativo de pesquisas (628 artigos), com variados objetivos para atendimento da demanda social específica de cada país, o que indica a relevância do tema; o ano das publicações mostra que o problema vem sendo abordado recentemente, portanto atual; há poucas pesquisas abordando o problema, o que indica a necessidade de mais pesquisas de TDRIAR.

Dentre os benefícios possíveis acerca da implementação da TDRIAR, relaciona-se:

- A tradução matemática está de acordo com os dados coletados em campo (Monteiro *et al.*, 2017);
- A TDRIAR fornece equações úteis para estimação de requisitos atualizados (Machimbarrena *et al.*, 2016);

- A TDRIAR fornece a possibilidade de comparar de forma justa os sistemas de classificação existentes com um novo sistema harmonizado (Gerretsen, 2013);
- A TDRIAR permite que profissionais da acústica e formuladores de políticas de diferentes países comparem seus requisitos com os de outros países, o que subsidia melhorias futuras das regulamentações nacionais e desenvolvimento de novos sistemas de construção (Monteiro *et al.*, 2017).

A associação dos conceitos de TDRIAR e isolamento acústico na edificação impõe complexidade à pesquisa. O isolamento acústico na edificação impõe, por um lado, uma abordagem objetiva que é a determinação dos descritores (estímulo físico) e, de outro lado, uma abordagem subjetiva por meio da avaliação de requisitos acústicos (sensação auditiva), sendo que o primeiro tem comportamento dentro da escala linear, e o segundo dentro da escala logarítmica. Em termos de tradução entre os descritores e requisitos acústicos, as entradas e saídas têm um comportamento dentro da escala linear (Del Val *et al.*, 2018; Gerretsen, 2013; Monteiro *et al.*, 2017).

Em relação à condição de incerteza associada à tradução entre os descritores atuais e os novos, Machimbarrena *et al.* (2016) e Monteiro *et al.* (2017) salientam a necessidade de investigação de todas as correlações entre os descritores existentes e os novos, a fim de identificar em quais casos uma única equação pode ser usada para traduzir requisitos independentemente do sistema construtivo. Adicionalmente, é necessária a investigação do limite da tradução de um descritor para um novo descritor, considerando a variedade de construções típicas de cada país, as dimensões e quantidades usadas (Dunbavin; Gerretsen, 2014).

Conforme comentado no item 1.1, para apresentar uma resposta à incerteza de medição associada à tradução entre os descritores e requisitos acústicos, tem-se a adoção da Teoria dos conjuntos fuzzy (TCF). A TCF é constituída de conceitos de conjuntos, lógica e sistemas, e possui uma vasta coleção de axiomas, teoremas e propriedades capazes de suportar e modelar o problema de incerteza (Barros; Bassanezi; Lodwick, 2017; Pedrycz; Gomide, 1998; Zimmermann, 2001).

Neste sentido, a TCF emerge como conceito capaz de modelar a incerteza, conforme citação de Pedrycz e Gomide (1998): “Os conjuntos fuzzy surgiram como uma nova forma de

representar a incerteza. Como tal, eles naturalmente se envolveram em um fervor de disputas filosóficas e metodológicas com os proponentes da probabilidade e da estatística”.

Segundo Barros, Bassanezi e Lodwick (2017), as principais contribuições da TCF no estudo de incerteza é na descrição de certos fenômenos onde são utilizados graus representativos de qualificações, ou verdades parciais ou padronizações. Um exemplo são os níveis de desempenho acústico da vedação entre ambientes superior, intermediário e inferior, prescritos na NBR 15575-4 (2021a). Os níveis de desempenho no exemplo são graus de qualificações, exemplo típico “[...] cujas fronteiras podem ser consideradas incertas, isto é, definidas por meio de propriedades subjetivas ou atributos imprecisos” (Barros; Bassanezi; Lodwick, 2017).

## 1.6 Limitações da Pesquisa

Neste tópico são apresentadas as seguintes restrições do presente projeto de pesquisa:

- A pesquisa se restringe ao estudo da tradução de descritores e requisitos acústicos de isolamento acústico de edificações residenciais;
- O conceito de desempenho acústico de edificações residenciais será discutido pela seara do isolamento acústico. Não faz parte do escopo a discussão do desempenho pela seara da absorção sonora;
- Dos conceitos de isolamento acústico serão abordados na pesquisa o isolamento do som aéreo e isolamento do som de impacto. Não será contemplado o isolamento aéreo de fachada.

Neste capítulo, foi abordado o problema de pesquisa, direcionando a discussão de uma perspectiva mais ampla para uma abordagem específica, focalizando a acústica no contexto de edificações. Durante esse processo, foi identificado a lacuna no conhecimento existente e estabelecido objetivo geral quanto os objetivos específicos da pesquisa. Além disso, discutiu-se as justificativas para a realização da pesquisa e os elementos relacionados ao escopo, incluindo as questões de pesquisa, a hipótese e suas limitações.

## 2. DESEMPENHO ACÚSTICO NAS EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS

Neste capítulo pretende-se discutir o conceito de desempenho acústico nas edificações residenciais (DAR) pelo caminho do isolamento acústico. No DAR têm-se as bases necessárias para tratamento do assunto que é o problema de investigação: tradução de descritores e requisitos de isolamento acústicos em edificações residenciais.

### 2.1 Fundamentos da Acústica Aplicados às Edificações

No âmbito desta tese, os fundamentos da acústica são observados sob a ótica da ocorrência dos fenômenos acústicos em ambientes fechados, o que é típico em edificações, fato que exige uma abordagem específica, diferente da abordagem em ambiente aberto (campo livre).

A acústica é a parte da ciência que estuda o som (Jacobsen *et al.*, 2011). Seus fundamentos derivam da física ondulatória, os quais são cientificamente consolidados. Para esta tese, além do conceito de som, são inseridos o conceito de ruído, da percepção do som, as grandezas de quantificação do som (pressão sonora e potência sonora), espectro sonoro e as bandas de frequências.

Do ponto vista da física, Everest (2001) define o som como um movimento de onda. Borges e Rodrigues (2017) definem o som como uma onda mecânica, longitudinal e tridimensional. A natureza das ondas mecânicas é governada pelas Leis de Newton e sua propagação necessita de um meio material deformável ou elástico, o que inclui os gases, líquidos e sólidos (Halliday; Resnik; Walker, 2004). Quanto à direção de propagação e vibração da onda, esta é longitudinal, isto quer dizer que os pontos do meio material no qual a onda se propaga, vibram em paralelo à direção de propagação da onda. A propagação da onda sonora é em todas as direções, então é tridimensional quanto à sua dimensão (Borges; Rodrigues, 2017).

Ainda em Borges e Rodrigues (2017), o som em termos de movimento de onda é periódico (ou harmônico) quando as oscilações na trajetória da onda ocorrem repetidamente e em intervalos de tempos iguais. O intervalo de tempo em que o movimento do elemento oscilante começa a se repetir é definido como período ( $T$ ). A frequência da onda é o inverso do período ( $1/T$ ), e indica o número de oscilações por unidade de tempo e sua unidade de medida é o hertz (Hz) (Halliday; Resnik; Walker, 2004). A frequência indica a taxa de variação

completa de pressão, pois à medida que a onda se propaga, ocorrem pressões variáveis no ar (Gerges, 2000). Neste sentido, Gerges (2000) e Bistafa (2018) definem som como uma variação de pressão perceptível pelo sistema auditivo.

A definição e os argumentos físicos supracitados constituem o conceito objetivo do som. Por outro lado, a questão da percepção do som, levanta a definição subjetiva. Emerge então a definição de ruído. De acordo com Gerges (2000), o ruído é um tipo de som definido como indesejável e desagradável. Os termos indesejável e desagradável são inerentemente subjetivos e indicam uma conotação negativa ao ruído, devido ao incômodo e inconvenientes provocados pelos efeitos do mesmo (Bistafa, 2018).

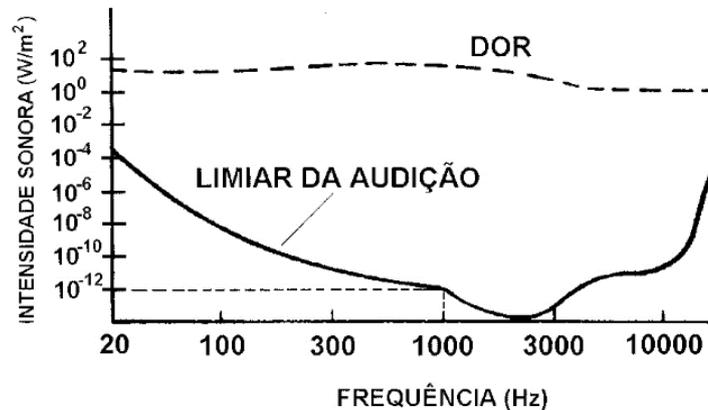
Segundo Borges e Rodrigues (2017), para a percepção do som emitido, é necessária a presença de um corpo material entre um corpo vibrante e o ouvido humano. Everest (2001) denomina de estímulo, o som emitido por uma fonte, e de sensação, a percepção do som resultante da excitação do mecanismo auditivo. Para que o ser humano tenha essa sensação auditiva é necessário que a propagação das ondas sonoras esteja compreendida dentro da faixa de frequência audível, que é entre 20 e 20.000 Hz. Além disso, a percepção também envolve uma larga faixa de intensidade sonora<sup>5</sup>, que abrange desde o limiar de audição até o limiar da dor. O comportamento do limiar auditivo é em função da frequência.

A Figura 2.1 mostra que existe um valor mínimo de sensibilidade auditiva e que esse valor depende da frequência sonora. Em 1.000 Hz, a intensidade sonora de  $10^{-12}$  W/m<sup>2</sup> pode causar a sensação auditiva. Ao elevar a intensidade para, aproximadamente,  $10^{12}$  W/m<sup>2</sup> vezes da sensação auditiva, causa a sensação de dor. De acordo com Gerges (2000), o limiar de audição varia de uma pessoa para outra, o que torna difícil a expressão em números de ordem de grandeza em escala linear. Em outras palavras, o limiar de audição a uma certa intensidade sonora, não varia proporcionalmente a esta intensidade.

---

<sup>5</sup> Segundo Borges e Rodrigues (2017), a intensidade sonora é um dos fenômenos que pode ser relacionado à sensação auditiva. Tal fenômeno diz respeito à relação da intensidade do estímulo sonoro e sensação humana. Neste sentido, mede o nível de intensidade sonora, grandeza esta que serve para medir a sensação sonora. A relação do nível de intensidade sonora com o ambiente fechado é por meio da absorção sonora. As variações do do nível de intensidade sonora até seu estado estacionário são controladas pela absorção das paredes. Se a energia absorvida é grande, o estado estacionário atinge a estabilidade numa pequena variação de tempo. Por outro lado, se a energia absorvida for pequena, a estabilidade é atingida em uma grande variação de tempo (Gerges, 2000).

Figura 2.1 – Limiar auditivo em função da frequência



Fonte: Borges e Rodrigues (2017)

### 2.1.1 Espectro Sonoro e as Bandas de Frequência

Segundo Jacobsen *et al.* (2011), os sons possuem características de banda larga, o que significa que cobrem uma ampla faixa de frequência. Bistafa (2018) complementa que o som do cotidiano é geralmente uma combinação de tons puros em diversas frequências, sendo os tons puros o som em uma única frequência. Neste sentido, a qualidade sonora depende da frequência, uma vez que, por meio dela, é possível distinguir um som grave e um som agudo. Os sons graves possuem frequência inferior a 200 Hz; os médios são compreendidos entre 200 e 2.000 Hz; e os agudos, acima de 2.000 Hz (Bistafa, 2018). Everest (2001) afirma que a qualidade do som (timbre) e o espectro sonoro estão relacionados, porém não são iguais.

Ainda em Everest (2001), o espectro sonoro constitui a forma da onda e relaciona o espectro audível às características específicas do ouvido humano, ou seja, de 20 Hz a 20 kHz. Sendo assim, o espectro sonoro informa o valor eficaz da pressão sonora para cada frequência presente no som (Bistafa, 2018). A análise da frequência é realizada com uso de filtros, os quais adotam a largura da banda constante em relação à frequência central. Neste sentido, os filtros mais explorados na literatura especializada são os filtros de banda de oitava e filtros de banda de um terço de oitavas (Jacobsen *et al.*, 2011).

A oitava é uma unidade fundamental nas escalas musicais e adota a relação 2:1 com relação à frequência. É composto da frequência de limite inferior; da frequência central; da frequência de limite superior. A frequência central é a média geométrica e a frequência inferior é metade da superior. A banda de um terço de oitava é uma banda de  $f_{sup} = 2^{\frac{1}{3}}f_{inf}$ , e também

dispõe de frequências inferior, central e superior (Jacobsen *et al.*, 2011). A Tabela 2.1 apresenta os valores das referidas bandas de frequências.

Tabela 2.1 – Valores das bandas de frequência de oitava e um terço de oitava

Número da banda	Frequência central da banda de oitava	Frequência central de um terço de oitava	Frequência inferior	Frequência superior
14		25	22	28
15	31,5	31,5	28	35
16		40	35	44
17		50	44	57
18	63	63	57	71
19		80	71	88
20		100	88	113
21	125	125	113	141
22		160	141	176
23		200	176	225
24	250	250	225	283
25		315	283	353
26		400	353	400
27	500	500	440	565
28		630	565	707
29		800	707	880
30	1000	1000	880	1130
31		1250	1130	1414
32		1600	1414	1760
33	2000	2000	1760	2250
34		2500	2250	2825
35		3150	2825	3530
36	4000	4000	3530	4400
37		5000	4400	5650
38		6300	5650	7070
39	8000	8000	7070	8800
40		10000	8800	11300
41		12500	11300	14140
42	16000	16000	14140	17600
43		20000	17600	22500

Fonte: NBR ISO 717-1:2021

### 2.1.2 Nível de Pressão Sonora

De acordo com Bistafa (2018), a grandeza física pressão sonora apresenta uma forte correlação com a sensação de intensidade do som, ou seja, avalia o quão é intenso o som ambiente. A sua unidade de medida é o decibel<sup>6</sup> (dB). A menor variação em percepção auditiva

<sup>6</sup> A escala decibel é uma escala logarítmica, e trata-se de uma escala de uma ampla gama de valores, o que torna mais perceptíveis determinados valores de interesse, o que justifica a sua adoção. Dentro da acústica tal escala descreve a proporção de valores de intensidade sonora, pressão e potência sonora. O decibel é um décimo de um bel. A unidade bel é em homenagem ao reconhecimento do trabalho de Alexander Graham Bell (Blotter; Sommerfeldt; Gee, 2015). A escala decibel apresenta uma correlação mais adequada com a audibilidade do que a escala absoluta (Gerges, 2000).

humana é 1 (um) dB. O dobro da pressão significa o acréscimo de 6 (seis) dB no nível de pressão sonora (Gerges, 2000). Neste sentido, o nível de pressão sonora é pertinente para avaliação de perturbação por fonte de ruídos (BISTAFA, 2018). Na Equação 2.1 tem-se a representação matemática do nível de pressão sonora, denotada por  $NPS$ , onde  $\Delta p$  é a variação de pressão instantânea medida em  $N/m^2$  (escala absoluta), e  $\Delta p_0$  é o padrão de referência igual a  $20 \times 10^{-6} N/m^2$  e corresponde ao limiar de audição em 1000 Hz.

$$NPS = 20 \log \left( \frac{\Delta p}{\Delta p_0} \right) \quad (2.1)$$

O  $NPS$  depende da distância da fonte e do ambiente em que é medido, porém o  $NPS$  não é uma característica da fonte. Uma grandeza capaz de caracterizar a fonte sonora é a potência sonora (Bistafa, 2018).

A potência sonora, denotada por  $W$  é a capacidade de uma determinada fonte de emitir energia sonora por unidade de tempo, constituindo uma característica intrínseca da fonte sonora (Bistafa, 2018). O nível de potência sonora (Equação 2.2) mede (em dB) a quantidade total de energia sonora por unidade de tempo gerada por uma determinada fonte a partir de  $W_f$ , que é a potência sonora (em watt) e de  $W_{ref}$ , que é o padrão de referência igual a  $10^{-12} W$ . (Blotter; Sommerfeldt; Gee, 2015).

$$W = 10 \log \left( \frac{W_f}{W_{ref}} \right) \quad (2.2)$$

Em termos de ambiente fechado,  $NPS$  e  $W$  contribuem para o isolamento acústico, por meio da perda de transmissão ou da diferença de nível de pressão sonora. Este último não depende somente das características intrínsecas dos materiais empregados na edificação, mas também dos pontos de medição dos  $NPS$ , volume do ambiente, orifícios existentes, sendo, portanto, parâmetro específico de ambiente fechado (Gerges, 2000).

## 2.2 O Conceito de Desempenho Aplicado às Edificações

A ISO 19208 (2016) lançou a definição de desempenho traduzido em requisitos qualitativos em função das condições de exposição. Para Lorenzi (2013), a percepção do significado de desempenho traduzida em requisitos, fez da publicação desta norma, um marco para o conceito de desempenho às edificações habitacionais. E apesar do tempo decorrido da

sua publicação, ainda é válida como base para a elaboração de normas de desempenho, tendo a Norma Brasileira de Desempenho como exemplo (Borges; Sabbatini, 2008).

Segundo a ISO 19208 (2016) e Mitidieri Filho e Helene (1998), o desempenho de uma edificação faz referência ao comportamento em utilização. A edificação é concebida como um produto e que deve atender as exigências do usuário. Tal produto deve, portanto, apresentar certas propriedades, a fim de cumprir sua função quando sujeito a certas influências e ações atuantes sobre a edificação durante sua vida útil, o que constitui as condições de exposição a que a edificação será submetida (Mitidieri Filho; Helene, 1998).

Segundo a ISO 19208 (2016), o conceito inclui requisitos de desempenho para edifícios ou suas partes sob condições especificadas para seus usuários, para os intervenientes internos e externos, além dos métodos de avaliação.

Borges e Sabbatini (2008) afirmam que o conceito de desempenho é tanto sistêmico quanto probabilístico. A natureza probabilística deste conceito é evidente ao considerarmos o exemplo do atendimento de uma necessidade específica de conforto acústico por parte do usuário em um intervalo de tempo determinado (evento).

O caráter sistêmico é observado na definição de Lorenzi (2013): “o desempenho de uma edificação está no equilíbrio entre o meio no qual está inserida, a função a qual se destina e a composição dos sistemas construtivos, durante sua vida útil”. Este equilíbrio é dinâmico e se estabelece entre a edificação e suas partes constituintes e o meio que a circunda (condições de exposição) (Mitidieri Filho; Helene, 1998).

O caráter sistêmico também é observado na definição da NBR 15757-1 (2021b) (Edificações habitacionais - Desempenho parte 1: Requisitos gerais): “comportamento em uso de uma edificação e de seus sistemas”. O comportamento em uso pode ser conhecido a partir dos requisitos recomendados para avaliação dos sistemas construtivos. A saber: requisito de segurança; habitabilidade; sustentabilidade (NBR 15757-1, 2021).

Desta forma, o caráter sistêmico mencionado encontra base na definição de Bertalanffy (2010): “um sistema pode ser definido como um complexo de elementos em interação”. Senge (2008), por sua vez, considera o sistema como um todo percebido, a partir do qual os diversos elementos constituintes do sistema mantêm-se juntos na medida em que estes afetam continuamente uns aos outros ao longo da dimensão temporal, atuando para o alcance de um propósito comum.

A NBR 15575-1 (2021b) apresenta as terminologias sistema, elementos e componentes para fins de desempenho, sobre o ponto de vista técnico:

- Sistema: “maior parte funcional do edifício. Conjunto de elementos e componentes destinados a atender a uma macrofunção que o define (por exemplo, fundação, estrutura, pisos, vedações verticais, instalações hidrossanitárias, cobertura).”
- Elemento: “parte de um sistema com funções específicas. Geralmente é composto por um conjunto de componentes (por exemplo, parede de vedação de alvenaria, painel de vedação pré-fabricado, estrutura de cobertura).”
- Componente: “unidade integrante de determinado sistema da edificação, com forma definida e destinada a atender funções específicas (por exemplo, bloco de alvenaria, telha, folha de porta).”

A ISO 19208 (2016) tipifica os padrões de desempenho na edificação: padrão de desempenho para o edifício inteiro (por exemplo, avaliação de desempenho térmico da edificação); padrão de desempenho para os espaços do edifício (por exemplo, requisitos de desempenho para banheiros); padrão de desempenho para os sub-sistemas do edifício (por exemplo, avaliação da carga de sistemas estruturais); padrão de desempenho para componentes e elementos do edifício (por exemplo, a janela figura o componente, esta fixada em uma parede acabada (elemento)).

Para atender os interesses desta tese, os elementos constituem as partições assumidas na forma de parede acabada ou laje acabada, ambas separadoras de dois ambientes, chamados de sala emissora e sala receptora. As partições são constituídas de componentes, no exemplo da laje acabada, os componentes são observados na massa de contrapiso, nas peças de revestimento cerâmico, no rejunte. Tanto as partições como seus componentes interagem entre si e com o ambiente externo para promover a macrofunção que é o isolamento acústico.

### 2.3 O Conceito de Desempenho Acústico em Edificações Residenciais

Com base na ISO 19208 (2016), o desempenho acústico nas edificações residenciais (DAR) é definido como o estudo do comportamento em uso da edificação e inclui requisitos acústico de desempenho, para edifícios ou suas partes sob condições especificadas para seus

usuários. O comportamento em uso faz referência aos elementos de partição, os quais devem apresentar certas características para o cumprimento de funções de controle de intervenientes internos e externos, tais como ruído interno ou externo, o tempo de reverberação e a inteligibilidade do som. Em última instância, os requisitos acústicos de desempenho são submetidos à avaliação.

Segundo Bistafa (2018) e Tie *et al.* (2020), o DAR é mensurado tanto do ponto de vista da absorção sonora, como do isolamento sonoro. A absorção sonora<sup>7</sup> consiste na energia dissipada no material e o isolamento, por sua vez, consiste na redução da energia sonora durante a transmissão do som em uma superfície (Rindel, 2018). Em termos de alinhamento com o objetivo desta tese, o conceito de isolamento acústico é abordado de forma ampla com vistas a sustentar as questões definidas.

Conforme Scholl, Wang e Wittstock (2011), a parte inicial do estudo do isolamento acústico requer a quantificação física e que envolve método de medição, condições de medição, alcance da frequência, resolução da frequência (banda de um terço de oitavas) e incerteza de resultados da medição. A quantificação física serve como entrada para o estudo adequado de número único, esta constitui uma etapa intermediária. Como o isolamento acústico está sujeito a requisitos legais, o número único é submetido às prescrições vigentes nos códigos de construção nacionais e que visam a garantir as condições prévias de saúde dos usuários (Scholl; Lang; Wittstock, 2011).

## 2.4 Isolamento Acústico

Segundo Neubauer e Kang (2011), o isolamento acústico na edificação como procedimento, baseia-se na diferença de níveis de som considerando o sistema partição, sala emissora e sala receptora. Para a discussão do conceito de isolamento sonoro, são citados os seguintes conceitos: transmissão sonora; tempo de reverberação; descritores acústicos;

---

<sup>7</sup> De acordo com Everest (2001) e Tie *et al.* (2020), a absorção sonora envolve a energia no interior do material e sua dissipação na forma de calor. A incidência de uma onda sonora em uma superfície (parede, por exemplo) que separa duas salas adjacentes é refletido parcialmente de volta para sala de emissão. Outra parte é dissipada na forma de calor no interior da superfície, que então se propaga parcialmente para outras superfícies conectadas e parcialmente, transmitido para sala receptora (RINDEL, 2018).

coeficiente de adaptação de espectro sonoro; classificação de número único; avaliação de requisitos de isolamento acústico.

#### 2.4.1 Transmissão sonora

A transmissão sonora contribui para o isolamento acústico, uma vez que parte da energia sonora oriunda de uma fonte situada em uma sala, é transmitida para outras salas adjacentes (Rindel, 2018). Com base em Scholl, Lang e Wittstock (2011), a transmissão sonora tem dois tipos: a transmissão de som aerotransportado (ou isolamento de som aéreo); a transmissão de som de impacto (ou isolamento de som de impacto).

Bistafa (2018) comenta em mais detalhes como ocorre esta transmissão tomando por exemplo, uma parede, como elemento de partição entre duas salas. Tal parede contribui com a redução da intensidade sonora transmitida, pois ocasiona a mudança do meio de propagação da onda, fazendo diminuir a transmissão sonora para o meio seguinte, sendo duas mudanças de meio de propagação da onda: ar-parede e parede-ar (Bistafa, 2018).

Em referência à energia sonora parcial que é transmitida para uma sala receptora, e considerando a potência da energia incidente em uma sala emissora  $W_1$ , e a potência irradiada para uma sala receptora  $W_2$ . Assim, a transmissão sonora considera o coeficiente de transmissão do som, definida pela razão entre a potência transmitida e a potência incidente, conforme a Equação 2.3 (Gerretsen, 1979).

$$\tau = \frac{W_2}{W_1} \quad (2.3)$$

A transmissão sonora considera o coeficiente de transmissão do som, definida pela razão entre a potência transmitida e a potência incidente (Gerretsen, 1979). Gerretsen (1979), o coeficiente de transmissão do som tem sua base nos estudos de Cremer<sup>8</sup>, Heckl<sup>9</sup> e Gösele<sup>10</sup>.

---

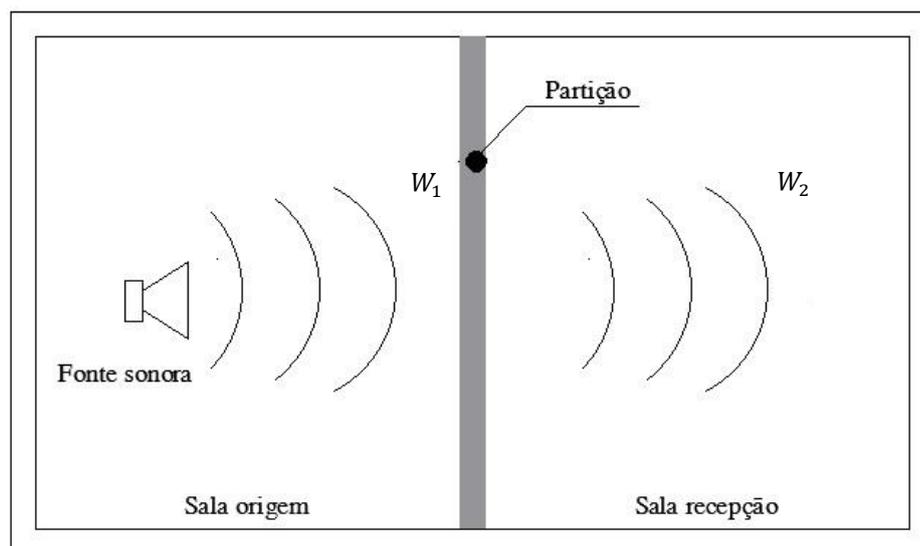
<sup>8</sup> CREMER, L. Theorie der Schalldämmung dünner Wände bei schrägem Einfall, Akust. Zeitschrift, 7 (1942) p. 81.

<sup>9</sup> HECKL, M. Die Schalldämmung von homogenen Einfachwänden endlicher Fläche, Acustica, 10 (1969) pp. 98-108.

<sup>10</sup> GÖSELE, K. Zue Luftschalldämmung von einschaligen Wänden und Decken, Acustica, 20 (1968) pp. 334-42.

Este coeficiente caracteriza a capacidade de transmissão (ou isolamento) de uma determinada partição; isto é, quanto menor o coeficiente, menor a intensidade sonora transmitida, e indica o quão é maior o isolamento da partição (Bistafa, 2018). A Figura 2.2 ilustra a definição de transmissão sonora.

Figura 2.2 Planta baixa da sala de emissão (origem) e sala de recepção



Fonte: Autor

O coeficiente supracitado subsidia o índice de redução do som  $R$  (Equação 2.4), no qual expressa a redução do som por meio da partição (Gerretsen, 1979). De acordo com Garg, Kumar e Maji (2016), o  $R$  constitui o desempenho do isolamento acústico de um determinado material medido em uma câmara de reverberação.

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (2.4)$$

De acordo com Hopkins (2007) e Rindel (2018), a mensuração da transmissão sonora em laboratório considera um conjunto de transmissão para medições de isolamento de som aerotransportado compreendendo duas salas; uma sala de emissão e uma sala de recepção separadas por uma partição ou elemento de teste. Sendo assim, em laboratório assume-se que todo o som é transmitido por meio da partição, o que constitui o caminho direto de transmissão, e que a superfície de transmissão em si não desempenha outro papel além de definir o espaço para as salas de emissão e recepção. O resultado de teste ideal de um conjunto de transmissão é aquele que pode ser repetido dentro do laboratório, replicável em um laboratório diferente,

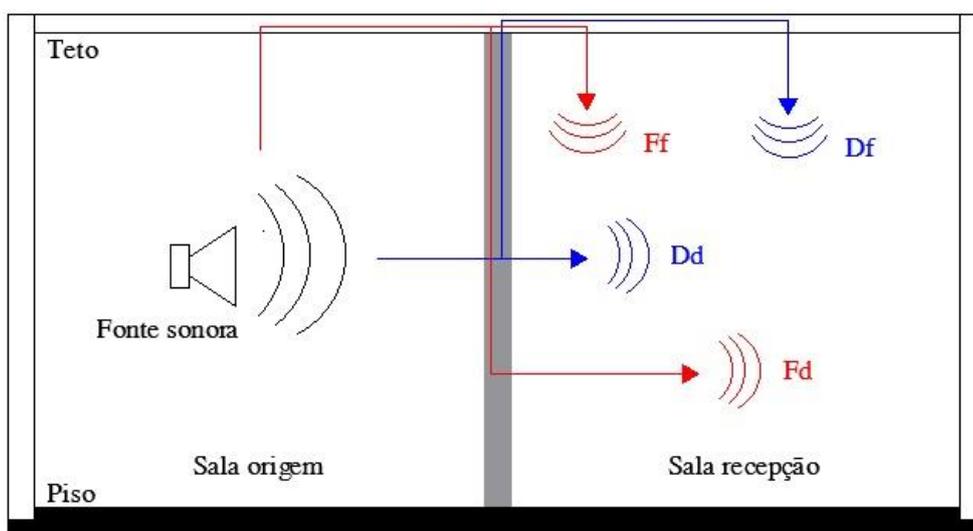
comparável em diferentes partições, passível de aplicação em campo para estimação do isolamento acústico (Hopkins, 2007).

Além do caminho direto de transmissão, tem-se também o caminho da transmissão sonora pelos flancos. A Figura 2.4 ilustra o mecanismo de transmissão. Esta abordagem foi introduzida por Gerretsen (1979), que considera o número de caminho de transmissão sonora a depender da excitação seja da partição, seja da excitação de outras estruturas de flanco.

Ainda em Gerretsen (1979), o mecanismo de transmissão, considera o caminho de transmissão direta, denotado por  $Dd$ , e os caminhos de transmissão pelos flancos, denotados por  $Ff$ ,  $Fd$  e  $Df$  (vide Figura 2.3):

- $Dd$  - caminhos de transmissão envolvendo transmissão direta de som entre a fonte e salas de recepção que não sejam através da partição. Esta transmissão pode ocorrer por meio de uma parede de preenchimento que é usada para alterar temporariamente o tamanho da abertura de teste. Em alguns laboratórios, a partição não cobre uma superfície completa da sala; portanto, também pode ocorrer através de paredes / pisos de laboratório que são adjacentes e no mesmo plano da abertura de teste;
- $Ff$  - caminhos de transmissão através da estrutura do laboratório (incluindo qualquer parede de enchimento) que fazem não entrar ou envolver a partição;

Figura 2.3 Caminho direto de transmissão e caminhos pelos flancos



Fonte: Adaptado de ISO 12354-1:2017

- Fd - caminhos de transmissão através da estrutura do laboratório (incluindo qualquer parede de enchimento) que envolvem fluxo de energia para a partição;
- Df - caminhos de transmissão através da estrutura do laboratório (incluindo qualquer parede de enchimento) que envolvem o fluxo de energia para fora da partição.

#### 2.4.2 Tempo de Reverberação

De acordo com Hopkins (2007), em termos de isolamento acústico, o tempo de reverberação é necessário para quantificar a absorção em uma sala ou o fator de perda total de uma sala; é necessário também para relacionar a potência sonora irradiada para uma sala com o nível médio de pressão sonora naquela sala.

O tempo de reverberação de Sabine (Wallace Clement Sabine<sup>11</sup>, pioneiro nos estudos de acústica em recintos) é definido como o tempo necessário para diminuição do som em 60 dB no interior de uma sala, a partir do estado estacionário (Everest, 2001; Hopkins, 2007; Rindel, 2018).

A Equação 2.5 demonstra o meio de obtenção do tempo de reverberação, onde  $V$  é o volume da sala em m<sup>3</sup>; e  $A$  é a área de absorção de som (absorção sonora) da sala de recepção, em m<sup>2</sup>.

$$T = \frac{0,16V}{A} \quad (2.5)$$

Para Everest (2001), o  $T$  mede o tempo entre o desligamento da fonte sonora e a extinção do som no ambiente. Em termos de nível de intensidade sonora, o  $T$  representa um decaimento do som em 1 milhão do valor inicial ( $10\log 1.000.000 = 60$  dB). Esse decaimento ocorre com as sucessivas reflexões na sala, onde o som perde intensidade devido à absorção. Em se tratando de nível de pressão sonora, representa um decaimento do som a um milésimo do valor inicial ( $20\log 1000 = 60$  dB) (Everest, 2001).

Segundo Hopkins (2007), esta definição é adequada para a curva de decaimento que ocorre em um campo difuso, onde o decaimento pode ser aproximado por uma única linha reta ao longo de todo o decaimento de 60 dB. Para medições em campos difusos, é apropriado usar

---

<sup>11</sup> SABINE, W. C. (1922). *Collected Papers on Acoustics*. Harvard University Press. Published 1964 by Dover Publications Inc., New York.

$T_{30}$  (declínio da reta especificado em 30 dB) para o tempo de reverberação. O  $T_{30}$ , é suficiente para a ligação entre a potência do som e o nível de pressão do som reverberante em um campo difuso. Em salas típicas, a faixa de frequência acústica do edifício frequentemente cobre os campos sonoros difusos, bem como aqueles que podem ser considerados não difusos (Hopkins, 2007).

Em campos não difusos, as curvas de decaimento geralmente não podem ser aproximadas por uma linha reta através toda a faixa de decaimento de 60 dB. Para fazer a ligação entre a potência do som e o nível de pressão do som reverberante, é necessário usar  $T_{10}$ ,  $T_{15}$  ou  $T_{20}$ .

Segundo a NBR ISO 3382-2 (2017), do ponto de vista prático, o que é explorado para avaliação do decaimento de 60 dB é o  $T_{20}$  e o  $T_{30}$ . O  $T$  pode ser avaliado com base em uma faixa dinâmica menor que 60 dB e extrapolado para um tempo de decaimento de 60 dB. Em seguida, é rotulado de acordo. Assim, se  $T$  for derivado do momento em que a curva de decaimento atinge pela primeira vez 5 dB e 25 dB abaixo do nível inicial, ele será denominado  $T_{20}$ . Se forem usados valores de decaimento de 5 dB a 35 dB abaixo do nível inicial, ele será rotulado como T30 NBR ISO 3382-2 (2017).

Na literatura também é observado o tempo de reverberação de Eyring<sup>12</sup>. Neste sentido, a equação de Eyring fornece estimativas razoáveis em salas onde há absorção de superfície uniforme e reflexões de superfície difusas, aplicável a qualquer valor de  $\alpha$ , o que cobre uma lacuna na equação de Sabine, esta considera que  $\alpha$  é suficientemente pequeno (Hopkins, 2007).

A equação 2.6 representa a fórmula proposta por Eyring, que considera o coeficiente médio de absorção  $\alpha_m$  (Equação 2.7).

$$TR = \frac{55,3 \cdot V}{-c \cdot S \cdot \ln(1 - \alpha_m)} \quad (2.6)$$

$$\alpha_m = \frac{1}{S} \sum_i S_i \alpha_i \quad (2.7)$$

A citação das equações de Sabine e Eyring se justifica, pois que têm sido historicamente exploradas para determinação do tempo de reverberação (Beranek, 2006). O

---

<sup>12</sup> EYRING, C. F. "Reverberation time in 'dead' rooms" J. Acoust. Soc. Am. (1930) 1,168.

mesmo autor pondera que ambas as equações podem ser utilizadas, desde que o coeficiente de Sabine<sup>13</sup> seja superior a 1.

Segundo Rindel (2018), para sala anecóica ( $\alpha_m = 1$ ), a equação de Eyring apresenta assertividade, enquanto a fórmula de Sabine apresenta falha. No entanto, em salas onde os elementos apresentam diferentes coeficientes de absorção, é recomendável usar a fórmula de Sabine. Vale ressaltar que a NBR ISO 16283-1 (2018) preconiza com respaldo na ISO 354:1985, o uso das equações de Sabine para medição do tempo de reverberação e avaliação da área equivalente de absorção de som.

#### 2.4.3 Descritores de Isolamento Acústico Aéreo

Segundo Rasmussen e Gerretsen (2014), o isolamento acústico aéreo trata do isolamento contra a transmissão de som no ar em uma edificação. Para Neubauer e Kang (2014), o isolamento acústico do ar constitui a diferença do nível de pressão sonora a partir da transmissão do som em uma partição. Garg, Kumar e Maji (2016), chama de isolamento acústico aéreo transportado e este assume importante propriedade de construção de elementos caracterizados em termos de perda de transmissão de som ou índice de redução de som.

Rindel (2018) discute o isolamento sonoro na partição entre duas salas origem e sala recepção, a partir da relação da transmissão sonora e os níveis de pressão sonora. O mesmo autor apresenta a discussão em torno da suposição dos campos sonoros difusos, onde considera a potência sonora incidente na sala emissora e a potência sonora irradiada na sala recepção. Tem-se a consideração da área de partição, esta é denotada por  $S$  e da a área de absorção de som (absorção sonora) equivalente da sala de recepção, em  $m^2$  e denotada por  $A$ .  $L_1$  e  $L_2$  são os níveis de pressão sonora com média espacial nas salas de emissão e recepção, respectivamente (Rindel, 2018).

A Equação 2.8 prescrita pela NBR ISO 16283-1 (2018), representa a forma de obtenção índice de redução do som em ensaios de campo. Em medição de campo onde o som

---

<sup>13</sup> A capacidade de absorção sonora de uma determinada superfície depende do coeficiente de absorção sonora ou coeficiente de absorção sonora de Sabine, em homenagem a Wallace Clement Sabine<sup>13</sup>, pioneiro nos estudos de acústica em recintos. O coeficiente de absorção sonora é definido como a razão entre a energia sonora não refletida e a energia sonora incidente em uma superfície. O coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ) é adimensional e pode assumir valores entre 0 e 1, onde o  $\alpha$  igual a 1 significa que toda energia sonora incidente foi absorvida pela superfície (RINDEL, 2018; TIE et al., 2020). Neste sentido, trata-se de uma medida de eficiência de uma superfície ou material na absorção do som (EVEREST, 2001).

não é somente transmitido pela partição, mas também pelos flancos, tem-se a o índice de redução do som aparente ( $R'$ ).

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \quad (2.8)$$

Machimbarrena e Fausti (2013) apresentam as vantagens e desvantagens desse descritor. Dentre as vantagens, tem-se: é uma medida robusta, longa experiência e consolidada em laboratório; sem dependência da direção e do tamanho da sala; não requer a referência  $T_0$ ; está relacionado a própria construção; é bem estabelecido em regulamentos em todo o mundo. Quanto as desvantagens: não considera as diferentes formas suficientes das salas; necessita de volume e área, muitas vezes não claramente definidos; confusão entre o elemento e a propriedade de campo; no campo, os flancos influenciam o resultado; não tem boa relação com a resposta subjetiva.

Os autores Rasmussen e Rindel publicaram em 2010 uma pesquisa abrangente a respeito dos descritores de isolamento acústico em habitações com base em regulamentos de 32 países da Europa (Rasmussen; Rindel, 2010). Eles categorizaram os descritores acústicos em: descritores básicos, que constitui a quantidade de número único; coeficientes de adaptação de espectro.

Dentro da NBR ISO 717-1 (2021), o  $R'$  recebe a conotação  $R'_w$  (índice de redução de som aparente ponderado), e é caracterizado como um descritor básico (Machimbarrena; Rasmussen; Fausti, 2014; Rasmussen; Rindel, 2010). O  $R'_w$  pode ser observado nos trabalhos de (Gibbs; Maluski, 2004; Ljunggren; Simmons; Hagberg, 2014; Monteiro *et al.*, 2017; Rindel, 1998; Scrosati *et al.*, 2013).

Para a atividade de caracterização do isolamento em edificações, o  $R'$  apresenta uma insuficiência que é o não reconhecimento da área  $S$  da partição problema. O problema está na possibilidade das salas de emissão e de recepção estarem localizadas com deslocamento, implicando assim em uma área muito pequena ou inexistente e, conseqüentemente, afetando o isolamento acústico (Rindel, 2018). Para isso, tem-se o parâmetro da diferença de nível normalizada ( $D_n$ ) (Equação 2.9), prescrita também pela NBR ISO 717-1 (2021), esta com a conotação  $D_{n,w}$  (diferença de nível normalizado ponderado) e caracteriza-se como descritor básico (Rasmussen; Rindel, 2010), onde  $A_0$  é a área de absorção de referência, em  $m^2$  (para quartos em moradias ou salas de tamanho comparável:  $A_0 = 10m^2$ ) (Scholl; Lang; Wittstock, 2011).

$$D_n = L_1 - L_2 - 10 \log \frac{A}{A_0} \quad (2.9)$$

Uma outra medida alternativa de solução da área de partição é a diferença de nível padronizada ( $D_{nT}$ ) (Equação 2.10). O  $D_{nT}$  considera a diferença de nível entre a fonte e a sala de recepção, e de modo que o  $T_2$  representa o tempo de reverberação da sala de recepção, e  $T_0$  é o tempo de reverberação de referência, em todas as frequências, para residências é de  $T_0 = 0,5s$  (Rindel, 2018; Scholl; Lang; Wittstock, 2011).

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{T_2}{T_0} \quad (2.10)$$

Machimbarrena e Fausti (2013), quanto as vantagens relaciona-se: tem boa relação com a resposta subjetiva; boa resposta para quartos não adjacentes ou áreas pequenas não necessita de determinação do volume da sala; fácil de usar, explicação simples; isolamento acústico correto vertical e horizontal. Para as desvantagens, tem-se: depende do tamanho da sala e direção; mais difícil de usar por profissionais da Arquitetura; em salas grandes, os resultados tendem a superestimar; difícil de comparar a medição com os requisitos; os dados de campo médios podem ser tendenciosos devido à inclusão de volumes atípicos; não é adequado para avaliação de perda de transmissão de partições; e levanta uma questão: 0,5s é correto para baixas frequências?

Na NBR ISO 717-1 (2021), o  $D_{nT}$  é convertido em  $D_{nT,w}$  (diferença de nível padronizado ponderado). Este também se caracteriza como descritor básico (Rasmussen; Rindel, 2010) e é explorado pelos autores: (Antônio; Mateus, 2015; Hopkins; Turner, 2005; Ljunggren; Simmons, 2018; Monteiro *et al.*, 2017; Santana *et al.*, 2017; Scrosati *et al.*, 2013).

O Quadro 2.1, com base em NBR ISO 16283-1 (2018) e NBR ISO 717-1 (2021), resume os descritores para isolamento acústico aéreo.

Quadro 2.1 – Descritores para isolamento acústico aéreo.

Descritores	Descritores ponderados	Definidos em:
$R'$ - índice de redução do som aparente	$R'_w$ - índice de redução de som aparente ponderado	NBR ISO 16283-1 (2018)
$D_n$ - diferença de nível normalizada	$D_{n,w}$ - diferença de nível normalizado ponderado	NBR ISO 717-1 (2021)
$D_{nT}$ - diferença de nível padronizada	$D_{nT,w}$ - diferença de nível padronizado ponderado	NBR ISO 16283-1 (2018)

Fonte: NBR ISO 717-1 (2021)

Em Scrosati *et al.* (2013), tem-se uma discussão a respeito de  $R'$ ,  $D_n$  e  $D_{nT}$ . Tanto  $R'$  como  $D_n$  tem a área de absorção equivalente como um termo de correção, e este é avaliada pelo tempo de reverberação, determinado a partir da equação do tempo de reverberação de Sabine. No caso de  $D_{nT}$ , o tempo de reverberação já está incluso no termo de correção, portanto, não se aplica a avaliação pela área de absorção.

#### 2.4.4 Descritores de Isolamento Acústico de Impacto

Segundo Bistafa (2018), o isolamento acústico de impacto trata do isolamento contra a transmissão de sons gerados por contato mecânico (queda de objetos, pisadas) sobre pisos ou lajes. O contato ou excitação localizado induz ao movimento vibratório do piso ou laje, fazendo desta superfície um irradiador de energia sonora em ampla faixa de frequência.

Segundo Hopkins (2007):

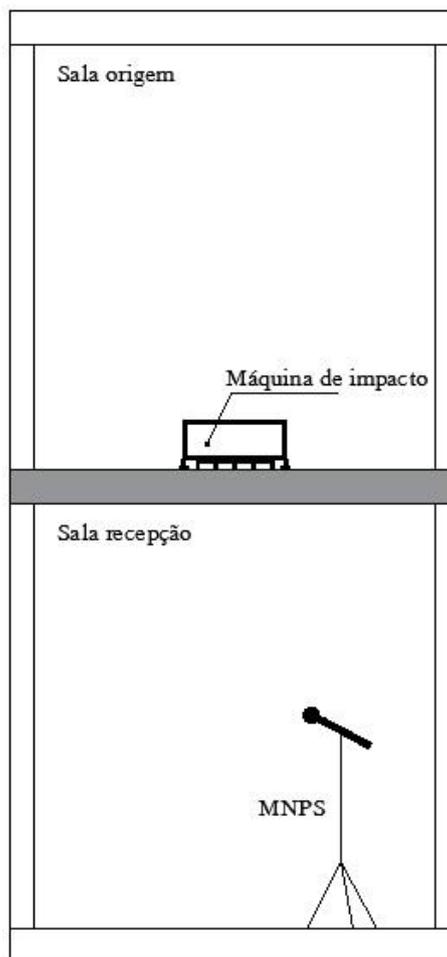
Existem muitas fontes de som transmitidas pela estrutura no chão, incluindo passos, impactos de crianças brincando, objetos caídos, cadeiras ou outros móveis sendo arrastados pelo chão e vibrações de máquinas, como máquinas de lavar ou serviços mecânicos. Algumas dessas fontes de impacto geram impulsos devido à queda de uma massa, como um objeto caído ou passos; estes apenas aplicam uma força e são frequentemente descritos como fontes de força. Outras fontes podem aplicar forças e / ou momentos à estrutura e gerar um impulso ou um sinal contínuo. Nenhuma fonte artificial pode representar com precisão todas essas fontes reais. Mesmo se nos restringirmos a representar impactos de passos, existe uma ampla gama de pesos corporais, estilos de caminhada, calçados e velocidades de impacto que precisaríamos identificar que tipo de passo a fonte de som transmitida pela estrutura deve representar (HOPKINS, 2007 Pag. 272).

Para medição em campo, a NBR ISO 16283-2 (2021) impõe a Equação 2.11 como meio de obtenção de  $L'_n$  (nível de pressão sonora de impacto normalizado), em que  $L'_n$  é definido usando uma área de absorção da sala recepção, denotada por  $A$ , assim como definido por uma área de absorção de referência  $A_0$ , de  $10\text{m}^2$  para a sala de recepção (Scholl; Lang; Wittstock, 2011).

$$L'_n = L_2 + 10 \log \frac{A}{A_0} \quad (2.11)$$

O  $L'_n$  mede a transmissão do som de impacto em uma sala receptora, oriunda da excitação do piso da sala emissora por uma máquina de impacto (*tapping machine*). A máquina de impacto tem uma linha de cinco martelos igualmente espaçados; cada martelo de aço tem massa de 0,5 Kg; o ruído é gerado a partir da queda livre do martelo de uma altura de 0,04m ou 40 mm; é operado 1 impacto por segundo, sendo 10 impactos ao todo (ver Figura 2.4).

Figura 2.4 Ensaio de isolamento de impacto



Fonte: Autor

Dentre as vantagens, tem-se: não requer a referência  $T_0$ ; bom para salas pequenas e normais; a absorção da sala levada em consideração; mais fácil de usar no processo de planejamento de construção; consolidado em laboratório. Por outro lado, as desvantagens são: confusão entre o elemento e a propriedade de campo; necessita de volume e área, muitas vezes não claramente definidos; não aconselhável com salas grandes devido à padronização para área de absorção equivalente (Machimbarrena; Fausti, 2013).

Dentro da NBR ISO 717-2 (2022) o  $L'_n$  é denotado como  $L'_{n,w}$  (nível de pressão sonora de impacto normalizado ponderado) e, segundo Rasmussem e Rindel (2010), é categorizado como descritor básico. Tal descritor é observado em (Del Val *et al.*, 2018; Kylliäinen, 2014; Ljunggren; Simmons; Hagberg, 2014; Rindel, 1998; Rindel; Rasmussen, 1996).

Alternativamente, tem-se o nível de pressão sonora de impacto padronizado,  $L'_{nT}$  (Equação 2.12). O  $L'_{nT}$  está prescrito pela NBR ISO 717-2 (2022), e considera o tempo de reverberação de referência,  $T_0$  igual a 0,5 s. Scholl, Lang e Wittstock (2011) e Rindel (2018), sugerem o  $L'_{nT}$ , pois este é corrigido para o tempo de reverberação na sala de recepção se for diferente de 0,5 s.

$$L'_{nT} = L_2 - 10 \log \frac{T_2}{T_0} \quad (2.12)$$

Dentre os itens que atribui vantagem para o  $L'_{nT}$ , relaciona-se: tem boa relação com a resposta subjetiva; boa resposta para quartos não adjacentes ou áreas pequenas não necessita de determinação do volume da sala; fácil de usar, explicação simples; isolamento acústico correto vertical e horizontal; boa solução para o controle de espectro. Contraditoriamente, as desvantagens são: os problemas no caso de diferenças entre o valor de referência e o  $T_{60}$  real; em salas grandes, os resultados tendem a superestimar; difícil transferência de dados de laboratório para dados de campo (Machimbarrena; Fausti, 2013).

Segundo Rasmussen e Rindel (2010), o  $L'_{nT,w}$  (nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado) é um descritor básico e preconizado pela NBR ISO 717-2 (2022). Tal descritor é explorado nos estudos de isolamento de impacto dos seguintes autores: (António; Mateus, 2015; Del Val *et al.*, 2018; Ljunggren; Simmons; Öqvist, 2017; Öqvist; LJUNGGREN; Johnsson, 2018; Santana *et al.*, 2017).

As informações no Quadro 2.2 foram extraídas da NBR ISO 16283-2 (2021), e resume os descritores para isolamento de som de impacto.

Quadro 2.2 – Descritores para isolamento acústico de impacto

Bandas de 1/1 ou 1/3 de oitavas	Faixa de 100 Hz a 3.150 Hz	Padrão
$L'_n$ - nível de pressão sonora de impacto normalizado	$L'_{n,w}$ - nível de pressão sonora de impacto normalizado ponderado	NBR ISO 717-2 (2022)
$L'_{nT}$ - nível de pressão sonora de impacto padronizado	$L'_{nT,w}$ - nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado	NBR ISO 717-2 (2022)

Fonte: NBR ISO 16283-2 (2021)

#### 2.4.5 Coeficiente de Adaptação de Espectro para Isolamento Acústico

Segundo a NBR ISO 717-1 (2021), o coeficiente de adaptação de espectro (CAE) considera diferentes fontes de ruído e permite a avaliação de diferentes curvas de isolamento de som com baixos valores em uma mesma banda de frequência. Rindel (2018) complementa

que o CAE caracteriza o isolamento de som como a diferença de nível ponderada A para ruído com espectro rosa ou espectro para ruído de tráfego rodoviário. A ponderação A é utilizada com fins de combinação dos níveis de pressão sonora de uma gama de frequências em um valor único (Hopkins, 2007).

Com base na NBR ISO 717-1 (2021), têm-se a Equação 2.13 para o cálculo dos coeficientes de adaptação de espectro em situações de IAA:

$$C_j = -10 \log \sum_{i=1}^n 10^{(L_{ij}-X_i)/10} - X_w \quad (2.13)$$

Onde,

$C_j$ : coeficiente de adaptação de espectro, e C, Ctr, C50 – 5000, Ctr, 50 - 3150;

$j$ : índice de espectro de som, 1 ou 2;

$i$ : índice para banda de um terço de oitava na faixa relevante, até  $n$ ;

$L_{ij}$ : nível do espectro  $j$  na banda de frequência  $i$ ;

$X_i$ : nível do espectro  $j$  na banda de frequência  $i$ ;

$X_w$ : quantidade de um número único calculada com a curva de referência deslocada.

E para as situações de IAI, e com base em NBR ISO 717-2 (2022), têm-se a Equação 2.14 para o cálculo dos coeficientes de adaptação de espectro:

$$C_i = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} - 15 - X_w \quad (2.14)$$

Onde,

$C_i$ : coeficiente de adaptação de espectro, e  $C_i$ , C50 – 2500 no caso de faixa de frequência estendida;

$i$ : nível de pressão do som de impacto medido na banda de frequência  $i$ , dado a 0,1 dB;

$X_w$ : quantidade de um número único calculada com a curva de referência deslocada.

O Quadro 2.3 relaciona as diversas fontes de ruído diferentes com os coeficientes de adaptação de espectro  $C$  e  $C_{tr}$ , conforme a NBR ISO 717-1 (2021). Essas informações auxiliam na determinação dos referidos coeficientes, e por consequência, auxiliam da avaliação do

isolamento acústico em relação a essas fontes de ruído. Além disso, a mesma norma dispõe (Tabela 2.2) as informações de  $L_{ij}$  (nível do espectro  $j$  na banda de frequência  $i$ ), para determinação dos coeficientes de adaptação nas bandas de terço de oitava: de 50 Hz ou 100 Hz até 3.150 Hz e de 50 Hz ou 100 Hz a 5.000 Hz, para o espectro C; de 50 Hz ou 100 Hz a 5.000 Hz para Ctr.

Quadro 2.3 – Coeficientes de adaptação de espectro relevante para diferentes tipos de fontes de ruído.

Fontes de ruído	Termo de adaptação de espectro relevante
Atividades diárias (conversas, música, rádio, TV) Crianças brincando Ferrovias de média e alto velocidade de tráfego Rodovias com tráfego > 80 km/h Avião a jato, distância próxima Fábricas emitindo principalmente ruídos em médias e altas frequências	C (espectro nº1 - ruído rosa ponderado A)
Tráfego urbano Ferrovias de baixa velocidade de tráfego Aeronave movida à hélice Avião à jato, longa distância Música em discotecas Fábricas emitindo principalmente ruídos em baixas e médias frequências	$C_{tr}$ (espectro nº2 - ruído de tráfego urbano ponderado A)

Fonte: Autor

Tabela 2.2 – Espectros de nível de som para calcular os termos de adaptação para faixa de frequência de um terço de oitava

Frequência de um terço de oitava (Hz)	C50 – 3.150	C50 – 5.000 ou C100 – 5.000	Ctr50 – 5.000 ou Ctr100 – 5.000
50	-40	-41	-25
63	-36	-37	-23
80	-33	-34	-21
100	-29	-30	-20
125	-26	-27	-20
160	-23	-24	-18
200	-21	-22	-16
250	-19	-20	-15
315	-17	-18	-14
400	-15	-16	-13
500	-13	-14	-12
630	-12	-13	-11
800	-11	-12	-9
1000	-10	-11	-8
1250	-9	-10	-9
1600	-9	-10	-10
2000	-9	-10	-11
2500	-9	-10	-13
3150	-9	-10	-15
4000		-10	-16
5000		-10	-18

Fonte: NBR ISO 717-1:2021

#### 2.4.6 Classificação de Número Único

Segundo Gerretsen (2013), a classificação de número único constitui a ponderação a ser aplicada para expressar o desempenho em um único número. Rindel (2018) destaca algumas finalidades: caracterizar em um único número o resultado medido de uma edificação; comparação rápida do isolamento acústico obtido com diferentes construções; especificar os requisitos do isolamento acústico.

Nos métodos NBR ISO 717-1 (2021) e NBR ISO 717-2 (2022), a determinação dos parâmetros tem base em uma curva de referência padronizada e na faixa de frequência de um terço de oitavas de 100 a 3.150 Hz. Em NBR ISO 717-1 (2021), a curva de referência possui 3 linhas retas com uma inclinação de 9 dB por oitava de 100 a 400 Hz, 3 dB por oitava de 400 a 1250 Hz e 0 dB por oitava de 1250 a 3.150 Hz. Diferente na NBR ISO 717-2 (2022), a curva de referência possui 3 linhas retas com uma inclinação de 0 dB por oitava de 100 a 315 Hz, -3 dB por oitava de 315 a 1000 Hz e de 0 dB por oitava de 1000 a 3.150 Hz.

Nos referidos métodos, a determinação dos parâmetros tem base em uma curva de referência padronizada e na faixa de frequência de um terço de oitavas de 100 a 3.150 Hz. O descritor é arredondado para o 0,1 dB mais próximo. A curva de referência (100 Hz a 3.150 Hz) é deslocada em incrementos de 1dB. As diferenças positivas entre a curva e o descritor são chamadas de deficiências (significa valores desfavoráveis) e passam por uma contagem, de modo que a soma das deficiências não exceda 32 dB. A classificação do valor único é determinada como o valor da curva de referência deslocado a 500 Hz. A partir de então, pode ser calculado os coeficientes de adaptação de espectro (como C e Ctr) para várias bandas de frequência.

O padrão americano ASTM E413-16 (2016) define a classificação de número único chamada classe de transmissão sonora (STC), relativa aos padrões de transmissão de som aéreo em edifícios. Nesta, a curva de referência abrange a faixa de frequência de 125 a 4000Hz, ou seja, não considera 100 Hz e, esta preconiza que o valor da perda de transmissão seja arredondado, em incrementos de 1 dB, para valores inteiros de dB mais próximo. A curva de referência é deslocada em incrementos de 1dB e as diferenças positivas entre a curva e a perda de transmissão são contadas, desde que a soma dos valores desfavoráveis não exceda 32 dB, e desde que, o desvio em qualquer banda de frequência não exceda 8 dB. A classificação STC é determinada como o valor da curva de referência deslocado em 500 Hz. E diferente do padrão

NBR ISO 717-1 (2021), não há coeficientes de adaptação de espectro para a classificação STC. O resultado é escrito STC<sub>xx</sub> (sem dB), onde xx é o valor do número único em dB.

O padrão ASTM E989-06 (2006), por sua vez, define a chamada classe de isolamento de impacto (IIC). A determinação de IIC é similar a determinação de STC. A curva de referência compreende a faixa de 100 a 3.150 Hz (similar a NBR ISO 717-2:2022). Os níveis de pressão sonora de impacto são arredondados para valores inteiros em dB mais próximos, em incrementos de 1 dB. Ocorre então o deslocamento na curva de referência (incremento de 1 dB) e a contagem das diferenças positivas entre a curva e a perda de transmissão, considerando que a soma dos valores desfavoráveis não exceda 32 dB, e desde que, o desvio em qualquer banda de frequência não exceda 8 dB. A classificação de IIC é determinada como o valor da curva de referência deslocado em 500 Hz. É diferente do padrão NBR ISO 717-2 (2022), não há coeficientes de adaptação de espectro para a classificação IIC. O resultado é escrito IIC<sub>xx</sub> (sem dB), onde xx é o valor do número único em dB.

#### 2.4.7 Incerteza de Medição

De acordo com Rindel (2018), os fundamentos da incerteza de medição acústica de edificação são encontrados na base GUM (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements*) e na ISO 12999-1:2020 (Acoustics — Determination and application of measurement uncertainties in building acoustics — Part 1: Sound insulation).

Segundo a JCGM 100 (2008, pag. 2), a definição de incerteza de medição é: “parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que poderia razoavelmente ser atribuído ao mensurando”. Rindel (2018) afirma que a medição caracteriza a dispersão do resultado de uma medição e pode ser o desvio padrão ou a meia largura de um intervalo ter um nível declarado de confiança.

Em Rindel (2018) são observados 3 importantes conceitos para o estudo da incerteza de medição acústica:

- Incerteza padrão – é a incerteza do resultado de uma medição expressa como desvio padrão;
- Incerteza expandida – é a quantidade que define um intervalo sobre o resultado de uma medição que pode abranger uma grande fração da distribuição de valores;

- Fator de conversão - fator utilizado como multiplicador da incerteza padrão para obter uma incerteza expandida. Isso depende de função de distribuição estatística, no nível de confiança para um teste considerado unilateral ou bilateral.

No que diz respeito a incerteza expandida, denotada por  $U$  (a ser explorada nesta tese), Rindel (2018) apresenta a sua forma de obtenção (Equação 2.15), onde  $K$  é o fator de conversão e  $u$  é a incerteza padrão, em dB.

$$U = K * u \quad (2.15)$$

O fator de conversão  $K$  é obtido a partir da leitura da Tabela 2.3, extraído da ISO 12999-1 (2020).

Tabela 2.3 – Fator de conversão para diferentes níveis de confiança

Fator de Conversão $K$	Nível de confiança para um teste bilateral (%)	Nível de confiança para um teste unilateral (%)
1,00	68	84
1,28	80	90
1,65	90	95
1,96	95	97,5
2,58	99	99,5
3,29	99,9	84

Fonte: ISO 12999-1 (2020)

Para os dois testes mencionados, é assumido uma distribuição gaussiana, e o resultado da medição é uma estimativa do resultado verdadeiro, que porventura, estará dentro de um intervalo. O fator de conversão depende do nível de confiança. No caso do teste bilateral, é aplicado quando um resultado de medição é relatado sem comparação com qualquer valor alvo. Por exemplo, com 90% de probabilidade, o resultado verdadeiro está dentro de um intervalo de  $\pm 1,65$  vezes o desvio padrão (a incerteza expandida). Por outro lado, no teste unilateral, o resultado medido é comparado com um requisito, para um fator de conversão igual a 1,28, significa que o limite (requisito) não é excedido em 90% de probabilidade (Rindel, 2018).

Com relação a incerteza padrão  $u$ , essa é aplicável em diferentes quantidades de número único. Na Tabela 2.4, tem os valores de incerteza padrão para valor de número único em isolamento aéreo, conforme a ISO 12999-1 (2020). Os valores se aplicam a situações em que o volume da sala receptora e a área de partição estão bem definidos. Para sala receptora, cuja onde o volume apresentado seja maior que 25 m<sup>3</sup>, é necessário realizar o cálculo das incertezas das medições. Uma sugestão na referida norma, é o cálculo de  $u$  pela Equação 2.16,

onde  $m$  é o número de medições independentes adicionais, e que pode ser medidas por outras pessoas e outros equipamentos.

$$u = \frac{0,9}{\sqrt{m}} \quad (2.16)$$

Tabela 2.4 – Valores de incerteza padrão para número único em isolamento acústico aéreo

Descritores	*Situação A $\sigma_{R95}$ (dB)	*Situação A $\sigma_R$ (dB)	**Situação B $\sigma_{situ}$ (dB)	***Situação C $\sigma_r$ (dB)
Rw, R'w, Dnw, DnT, w	2,0	1,2	0,9	0,4
(Rw, R'w, Dnw, DnT, w) + C100–3150	2,1	1,3	0,9	0,5
(Rw, R'w, Dnw, DnT, w) + C100–5000	2,1	1,3	1,1	0,5
(Rw, R'w, Dnw, DnT,w) + C50–3150	2,1	1,3	1,0	0,7
(Rw, R'w, Dnw, DnT,w) + C50–5000	2,1	1,3	1,1	0,7
(Rw, R'w, Dnw, DnT,w) + Ctr,100–3150	2,4	1,5	1,1	0,7
(Rw, R'w, Dnw, DnT,w) + Ctr,100–5000	2,4	1,5	1,1	0,7
(Rw, R'w, Dnw, DnT,w) + Ctr,50–3150	2,4	1,5	1,3	1,0
(Rw, R'w, Dnw, DnT,w) + Ctr,50–5000	2,4	1,5	1,0	1,0

\*A situação A é que um elemento de construção é caracterizado por medições laboratoriais.

\*\*A situação B é descrita pelo caso em que diferentes equipes de medição chegam ao mesmo local para realizar medições.

\*\*\*A situação C aplica-se ao caso em que a medição é simplesmente repetida no mesmo local pelo mesmo operador utilizando o mesmo equipamento.

Fonte: ISO 12999-1 (2020)

Para isolamento acústico de impacto, as incertezas padrão para diferentes quantidades de número único são fornecidas na Tabela 2.5. Os valores se aplicam a situações em que o volume da sala de recepção e a superfície do elemento de separação estão bem definidos. Se este não for o caso, as incertezas padrão pode ser maiores. Atualmente, não existem resultados disponíveis para a redução do nível de pressão sonora de impacto em condições in situ e em condições de repetibilidade (situações B e C). Sendo assim, as incertezas padrão para diferentes quantidades de número único são aplicáveis por  $\Delta L_w$  (ISO 12999-1, 2020).

Tabela 2.5 – Valores de incerteza padrão para número único em isolamento acústico de impacto

Descritores	*Situação A (dB)	**Situação B (dB)	***Situação C (dB)
Ln,w, L'n,w, L'nT,w	1,5 <sup>a</sup>	1,0	0,5
(Ln,w, L'n,w, L'nT,w) + CI	1,5 <sup>a</sup>	1,0	0,6
$\Delta L_w$	1,1	-	-

Fonte: ISO 12999-1 (2020)

#### 2.4.8 Avaliação de Requisitos de Isolamento Acústico

Segundo Rasmussen (2010) e Machimbarrena e Rasmussen (2017), o principal objetivo da implementação de regulamentos acústicos é, em geral, a proteção da saúde dos cidadãos seja nas suas residências, seja em outros ambientes (escola, ambiente de trabalho, nos espaços de lazer). Neste sentido os requisitos de isolamento acústico buscam garantir o conforto acústico, o que significa: ausência de som indesejado; sons desejados com o nível e qualidade certos; desenvolvimento de atividades sem incomodar outras pessoas (Rasmussen, 2010).

Os regulamentos acústicos típicos consideram valores-limite para isolamento de som aéreo, para isolamento de som aéreo de fachadas, isolamento de som de impacto e / ou níveis máximos de ruído em ambientes internos, limites de ruído para tráfego e equipamentos de serviço, bem como limites para tempo de reverberação e/ou área de absorção (Machimbarrena; Rasmussen, 2017). Rindel (2018) complementa que, os requisitos de isolamento acústico são discutidos nos regulamentos acústicos de construção nacionais e podem diferir de um país para o outro. As políticas regulatórias consideram diferentes tendências para os edifícios existentes para lidar com a questão do ruído. Isso é evidenciado tanto nos diferentes requisitos legais propostos, quanto nos diferentes descritores e índices de isolamento acústico praticados (Alonso *et al.*, 2020).

Os requisitos de isolamento acústicos são a expressão da somatória de uma quantidade de número único e o coeficiente de adaptação de espectro ou apenas a expressão da quantidade de número único (Rasmussen; Rindel, 2010). Rasmussen (2011) apresenta os seguintes exemplos de requisitos de isolamento acústico aéreo e de impacto:

$$\begin{array}{lll}
 D_{nT,w} \geq 55dB; & D_{nT,w} + C \geq 55dB; & D_{nT,w} + C_{50-3150} \geq 55dB. \\
 L'_{nT,w} \leq 50dB; & L'_{nT,w} + C_I \leq 50dB; & L'_{nT,w} + C_{I,50-2500} \leq 50dB.
 \end{array}$$

O Quadro 2.4 apresenta os requisitos de isolamento acústico aéreo e de impacto praticados em alguns países da América do Sul, da América do Norte e Europa, conforme as regulamentações nacionais. A América do Sul é representada pelos países Argentina, Brasil e Chile, pois somente estes países apresentam regulamentação para a acústica de edificação no continente em questão (Alonso *et al.*, 2020; Machimbarrena; Rasmussen, 2017). Além do mais, no que concerne o método de medição, as regulamentações destes seguem as recomendações da série ISO 140, o que possibilita o comparativo com os requisitos praticados por países da Europa. Vale ressaltar, que os países da Europa citados no Quadro 2.6, usam os descritores seja

de isolamento aéreo, seja de isolamento de impacto, similares ao utilizado no Brasil. A regulamentação nos países da América do Norte tem observância nas prescrições da ASTM, são os exemplos os EUA e Canadá.

Quadro 2.4 – Requisitos de isolamento acústico aéreo e de impacto entre edificações residenciais.

País	Requisitos acústico de isolamento aéreo [dB]	Requisitos de isolamento de impacto [dB]	Regulamentação
Argentina	$R'_w \geq 50$	$L'_{n,w} \leq 53$	IRAM 4044, 2015
Chile	$R_A / R'_A \geq 45$	$L'_{n,w} \leq 75$	OGUC, 2016
Brasil	$D_{nT,w} \geq 45$	$L'_{nT,w} \leq 80$	NBR 15575, 2021
Canadá	$STC \geq 55$	$IIC \geq 50$	NBC, 2015
EUA	$STC \geq 50$	$IIC50$	IBC, 2000
Áustria	$D_{nT,w} \geq 55$	$L'_{nT,w} \leq 48$	ÖNORM B 8115-2, 2006
Bélgica	$D_{nT,w} \geq 54$	$L'_{nT,w} \leq 58$	NBN S 01-400-1, 2008
Espanha	$D_{nT,A} \approx D_{nT,w} + C \geq 50$	$L'_{nT,w} \leq 65$	CTE, 1999
França	$D_{nT,w} + C \geq 53$	$L'_{nT,w} \leq 58$	NRA, 1999
Inglaterra	$D_{nT,w} + C_{tr} \geq 45$	$L'_{nT,w} \leq 62$	BR- Document E, 2014
Portugal	$D_{nT,w} \geq 50$	$L'_{nT,w} \leq 60$	Decreto Lei nº 96/2008

IRAM 4044 - Acústica-Protección contra el ruido en edificios, 2015  
 OGUC - Ordenanza General de la Ley General de Urbanismo y Construcciones, 2016  
 NBC - National Building Code of Canada, 2015  
 IBC - International building code, 2000  
 ÖNORM B 8115-2. Schallschutz und Raumakustik im Hochbau - Teil 2: Anforderungen an den Schallschutz (Sound insulation and room acoustics in building construction - Part 2: Requirements for sound insulation), 2006  
 NBN S 01-400-1. Akoestische criteria voor woongebouwen (Acoustic criteria for residential buildings), 2008  
 CTE - Código técnico de la edificación, 1999  
 NRA - Nouvelle Reglementation acoustique, 1999  
 BR - Building Regulations – Technical Guidance Document E – Sound, 2014  
 Decreto Lei nº 96/2008 – Ministério do Ambiente e Ordenamento do Território

Fonte: Regulamentações nacionais

Machimbarrena e Rasmussen (2017) afirmam que a maioria dos países da Europa tem uma longa tradição de requisitos regulamentares de isolamento acústico para residências, e portanto, desenvolveram requisitos mais rígidos, bem como técnicas de construção para cumprir tais requisitos (é o exemplo da França). Por outro lado, países com menos tradição neste campo apresentam requisitos menos rígidos, é o caso do Brasil. Fatores culturais e climatológicos também contribuem para prática diferente de requisitos de isolamento acústico de edifícios nos diferentes países. As diferenças encontradas nos regulamentos acústicos para habitação tanto dentro do mesmo continente como entre continentes demandam a necessidade de discussão, desenvolvimento e atualização otimizados da regulamentação da acústica de edifícios de acordo com as especificidades e necessidades de cada país (Machimbarrena; Rasmussen, 2017).

Os requisitos acústicos de isolamento entre edificações residenciais praticados têm um intervalo entre 45 a 55 dB para isolamento aéreo, enquanto os requisitos acústicos de isolamento de impacto, tem de 50 a 75 dB. No caso do Brasil, para o primeiro intervalo, o requisito de 45 dB para “parede entre unidades habitacionais autônomas (parede de geminação), no caso de pelo menos um dos ambientes ser dormitório”, está dentro do intervalo. Porém, o requisito de 80 dB para “sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas posicionadas em pavimentos distintos”, está fora do intervalo para isolamento de impacto.

#### 2.4.9 Referencial Normativo no Brasil para Avaliação do Isolamento Acústico em Campo

A NBR 15575-1 (2021b) segue as experiências e recomendações internacionais e estabelece requisitos (qualitativos), critérios ou premissas (quantitativos) e métodos de avaliação com fins de atendimento aos requisitos do usuário. Esta tem foco nos requisitos do usuário e prescreve o comportamento em uso da edificação e seus sistemas; e não prescreve como os sistemas são construídos.

Ainda com base em NBR 15575-1 (2021b), a lista de requisitos do usuário é organizada em requisitos de segurança, de habitabilidade e de sustentabilidade, e cada requisito é fragmentado em fatores. Com a consideração da extensão da lista de requisitos do usuário, esta norma foi dividida em 06 partes, a saber: Parte 1 – Requisitos gerais; Parte 2 – Sistemas estruturais; Parte 3 – Sistemas de pisos; Parte 4 – Sistemas de vedações verticais internas e externas; Parte 5 – Sistemas de coberturas; Parte 6 – Sistemas hidrossanitários.

O desempenho acústico é considerado um fator contido dentro do requisito do usuário de habitabilidade. Neste sentido, a edificação residencial (ou habitacional) deve apresentar:

“[...] isolamento acústico adequado das vedações externas, no que se refere aos ruídos aéreos provenientes do exterior da edificação habitacional, e isolamento acústico adequado entre áreas comuns e privativas e entre áreas privativas de unidades autônomas diferentes” (NBR 15575-1, 2021, pag. 25).

A NBR 15575-4 (2021) preconiza o método de mensuração em campo no território brasileiro através do método simplificado e do método da engenharia. O método simplificado realizado em campo é para situações em que não há disposição de instrumentação necessária para medir o tempo de reverberação, ou quando as condições de ruído de fundo não permitem obter este parâmetro.

Quanto ao método da engenharia realizado em campo, a NBR 15575-4 (2021) recorre à ISO 16283 (2014), para as devidas orientações de mensuração acústica nos sistemas de vedações verticais internas; e recorre à ISO 140-5 (1998), para os sistemas de vedações verticais externas; para ensaio de isolamento de ruído de impacto-padrão em sistema de pisos, descrito pela NBR ISO 16283-2 (2021), e preconizado para o Brasil por meio da NBR 15575-3 (2021). A aplicação do método da engenharia é observada nas pesquisas nacionais: (Carneiro; Oliveira, 2020; Ferreira Neto, 2009; Ferreira Neto; Bertoli, 2010; Michalski, 2011; Santana, 2016; Takahashi, 2016)

Neste sentido, consta na NBR 15575-4 (2021):

- Sistemas de vedações verticais internas: “determina, em campo, de forma rigorosa, o isolamento sonoro global entre unidades autônomas e entre uma unidade e áreas comuns, caracterizando de forma direta o comportamento acústico do sistema” NBR 15575-4 (2021);
- Sistemas de vedações verticais externas: “determina, em campo, de forma rigorosa, o isolamento sonoro global da vedação externa (conjunto fachada e cobertura, no caso de casas térreas e sobrados, e somente fachada nos edifícios multipiso), caracterizando de forma direta o comportamento acústico do sistema” NBR 15575-4 (2021).

Com relação aos descritores, estes são prescritos como parâmetros acústicos de verificação, conforme Quadro 2.5.

Quadro 2.5 – Descritores para verificação.

Descritores	Prescrita por:	Definidos em:	Aplicação
$D_{nT, w}$ - diferença de nível padronizado ponderado	NBR 15575-3, -4 (2021)	NBR ISO 16283-1 (2018)	Vedações verticais e horizontais internas, em edificações (paredes, etc.)
$D_{2m, nT, w}$ - diferença padronizada de nível ponderada a 2m de distância da fachada	NBR 15575-4 (2021)	ISO 140-5 (1998)	Vedações externas em edificações
$L'_{nT, w}$ - nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado	NBR 15575-3 (2021)	NBR ISO 717-2 (2022)	Sistema de piso

Fonte: NBR 15575-3, -4 (2021)

Ademais, discute-se os requisitos e critérios de avaliação de desempenho em sistemas de pisos entre unidades autônomas (NBR 15575-3, 2021) e sistemas de vedações verticais internas e externa entre unidades autônomas, e entre dependências de uma unidade e áreas comuns (NBR 15575-4, 2021). Requisitos e critérios são classificados em mínimo (M),

intermediário (I) e superior (S) de acordo com os intervalos do descritor, este mede o nível de desempenho. As informações são apresentadas no Quadro 2.6.

Quadro 2.6 – Requisitos de verificação de isolamento acústico aéreo e de impacto praticados no Brasil

Sistema	Elemento	Requisito [dB]	Nível de desempenho [dB]		
			(M)	(I)	(S)
SVVI	Parede entre unidades habitacionais autônomas (parede de geminação), nas situações em que não haja ambiente dormitório	$D_{nT,w}$	40 - 44	45 - 49	$\geq 50$
	Parede entre unidades habitacionais autônomas (parede de geminação), no caso de pelo menos um dos ambientes ser dormitório	$D_{nT,w}$	45 - 49	50 - 55	$\geq 55$
	Parede cega de dormitórios entre uma unidade habitacional e áreas comuns de trânsito eventual, como corredores e escadaria nos pavimentos	$D_{nT,w}$	40 - 44	45 - 49	$\geq 50$
	Parede cega de salas e cozinhas entre uma unidade habitacional e áreas comuns de trânsito eventual, como corredores e escadaria dos pavimentos	$D_{nT,w}$	30 - 34	35 - 39	$\geq 40$
	Parede cega entre uma unidade habitacional e áreas comuns de permanência de pessoas, atividades de lazer e atividades esportivas, como <i>home theater</i> , salas de ginástica, salão de festas, salão de jogos, banheiros e vestiários coletivos, cozinhas e lavanderias coletivas	$D_{nT,w}$	45 - 49	50 - 54	$\geq 55$
	Conjunto de paredes e portas de unidades distintas separadas pelo hall ( $D_{nT,w}$ obtida entre as unidades)	$D_{nT,w}$	40 - 44	45 - 49	$\geq 50$
SVH	Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas posicionadas em pavimentos distintos	$L'_{nT,w}$	66 - 80	56 - 65	$\leq 55$
	Sistema de piso de áreas de uso coletivo (atividades de lazer e esportivas, como <i>home theater</i> , salas de ginástica, salão de festas, salão de jogos, banheiros e vestiários coletivos, cozinhas e lavanderias coletivas) sobre unidades habitacionais autônomas	$L'_{nT,w}$	51 - 55	46 - 50	$\leq 45$

Fonte: Adaptado de NBR 15575-3; -4 (2021)

A NBR 15575-4 (2021) destaca os valores mínimos do descritor  $D_{2m,nT,w}$ , para vedação externa de dormitório, dividindo-os em três classes:

- Classe I – com valor mínimo de 20 dB, e é aplicável a “habitação localizada distante de fontes de ruído intenso de quaisquer naturezas”;
- Classe II – com valor mínimo de 25 dB, e é aplicável a “habitação localizada em áreas sujeitas a situações de ruído não enquadráveis nas classes I e III”;
- Classe III – com valor mínimo de 30 dB, e é aplicável a “habitação sujeita a ruído intenso de meios de transporte e de outras naturezas, desde que esteja de acordo com a legislação”.

#### 2.4.10 Conceito de Tradução de Descritores e Requisitos acústicos aplicada ao Desempenho de Edificações Residenciais

Segundo Gerretsen (2013), a definição de tradução de descritores acústicos consiste na conversão de um descritor em um novo descritor. Esse novo descritor deve considerar a união entre a faixa de frequência e o número único ponderado. Sendo assim, a tradução consiste em converter uma determinada quantidade, por exemplo converter  $R'$  em  $D_{nT}$ , e em seguida converter qualquer diferença na faixa de frequência e procedimento de ponderação, por exemplo converter  $D_{nT,w}$  em  $D_{nT,50}$ . Um objetivo da tradução é oferecer subsídios para realizar a harmonização dos descritores acústicos (Gerretsen, 2013).

Os descritores de isolamento acústico procuram resumir em um único valor o comportamento das várias soluções construtivas. No entanto, o isolamento acústico é uma função da frequência e, portanto, é estimado e medido em oitavas ou terços de oitavas. O fato de converter a informação expressa em frequências em um valor global acarreta algum tipo de hipótese, o que fará com que o valor global resultante reflita em maior ou menor medida a realidade a ser representada, neste caso o isolamento.

Machimbarrena e Fausti (2013) advogam em favor dos tradutores e seus benefícios do ponto de vista dos requisitos acústicos. A tradução dos requisitos reais para um novo descritor constitui uma alternativa adequada para avaliar o desempenho acústico de uma determinada edificação, bem como a satisfação dos usuários. A tradução também é importante para proposições de esquemas de classificação acústica, uma vez que, a mudança para um novo descritor auxilia no entendimento dos envolvidos com códigos de construção, a respeito dos efeitos do novo descritor nos códigos de construção (Machimbarrena e Fausti, 2013). A relevância dos tradutores também é relatada no projeto COST TU0901, dentre as quais surgiram as seguintes publicações: (Del Val *et al.*, 2018; Dunbavin; Gerretsen, 2014; Gerretsen, 2013; Monteiro *et al.*, 2017, 2012).

#### 2.4.11 Tradução das Relações Geométricas e dos Procedimentos de ponderação

Gerretsen (2013) propôs a tradução de descritores em duas etapas. A primeira considera as definições e equações acústicas básicas de construção. Trata-se de relações geométricas das situações (volume; área.) para as devidas suposições. O mesmo autor frisa que

esta etapa não depende da frequência e sugere as relações geométricas considerando o isolamento de som aéreo (Equação 2.17), o isolamento de som de impacto (Equação 2.18).

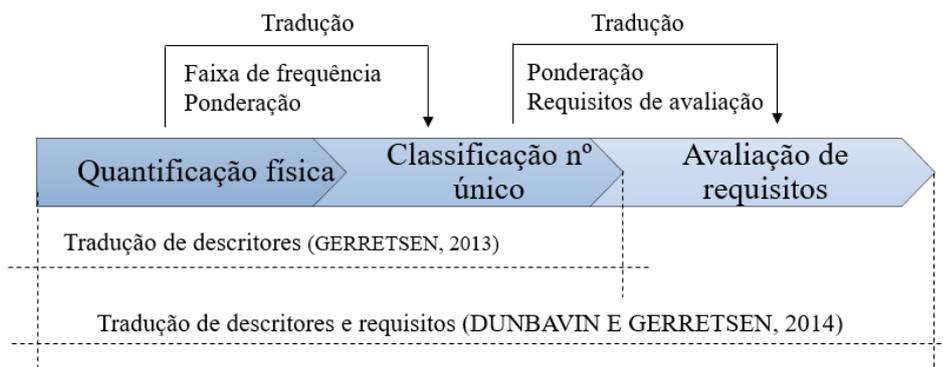
$$D_{nT} = R' + 10 \log \frac{0,16V}{T_0 S_s} \quad (2.17)$$

$$L'_{nT} = L_n - 10 \log \frac{0,16V}{T_0 A_0} \quad (2.18)$$

Segundo Gerretsen (2013), a depender da quantidade, é necessário saber o volume típico e mais a área típica da sala para cálculo da relação volume / área. O objetivo é estimar as variações nas relações locais (para cada país). Nas pesquisas observadas foram praticadas a estimativa global, usaremos  $V = 50m^3$  e  $V/S = 1,8m$  (Dunbavin; Gerretsen, 2014; Gerretsen, 2013).

O conceito de tradução de descritores procedimentos e requisitos de ponderação constitui a tradução da faixa de frequência e ponderação e consiste em determinar correlações entre diferentes descritores e obtenção das equações de tradução correspondentes. A relação entre os vários sistemas de ponderação tem que considerar diferentes faixas de frequência e procedimentos de avaliação. Neste sentido, a faixa comum para isolamento de som é 100-3.150 Hz (em alguns casos, bandas de oitava de 125 Hz a 2 kHz); enquanto a nova faixa de frequência é estendida (50Hz-5.000Hz) (Dunbavin; Gerretsen, 2014). Essa nova faixa foi estendida para atender as construções de moradias tradicionais (construção pesada) (Gerretsen, 2013). A Figura 2.5 ilustra a definição.

Figura 2.5 - Tradução de descritores e requisitos acústicos.



Fonte: Autor

De acordo com Rindel (2018) e Prato e Schiavi (2015), nos últimos anos, os padrões internacionais para medição de isolamento acústico foram revisados e culminou com a recomendação de extensão da faixa de frequência para 50 HZ e até 5.000 HZ. Uma das razões

é a crescente ocorrência de fontes de som com conteúdo em baixa frequência, como equipamentos técnico dentro e fora da edificação, o aumento do volume de tráfego e equipamentos de áudio e vídeo (Prato; Schiavi, 2015).

Para Gibbs e Maluski (2004), as frequências abaixo de 100 HZ, o isolamento acústico é uma interação complexa entre a estrutura e as salas conectadas, o que tem provocado mais investigações das dimensões da sala de recepção. Sendo assim, as medições de isolamento acústico em laboratório e em campo fornece repetibilidade e reprodutibilidade deficientes em baixas frequências, tornando difícil o estabelecimento de mecanismos de controle (Gibbs; Maluski, 2004).

A prática de tradução em baixas frequências foi observada por meio dos parâmetros  $D_{nT,50}$  Dunbavin e Gerretsen (2014) e Monteiro *et al.* (2017);  $L'_{nT,50}$  Dunbavin e Gerretsen (2014) e Monteiro *et al.* (2017). Tais frequências práticas compreendem a faixa de frequência de 50 HZ a 100 HZ, conforme observado em (Gibbs; Maluski, 2004; Prato; Schiavi, 2015; Rindel, 2018).

Dunbavin e Gerretsen (2014) sugeriram as seguintes equações de tradução considerando os requisitos mínimos para isolamento acústico aéreo (equações 2.19 a 2.21); para isolamento acústico de impacto (equações 2.22 a 2.23). Os requisitos mínimos de isolamento são denotados por *Req*:

$$D_{nT,w} \geq Req \quad D_{nT,50} \geq Req + 5,2 - 0,12(D_{nT,w} + 1) \quad (2.19)$$

$$D_{nT,A100} \geq Req \quad D_{nT,50} \geq Req + 1 + 5,2 - 0,12(D_{nT,w} + 2) \quad (2.20)$$

$$D_{nT,Atr100} \geq Req \quad D_{nT,50} \geq Req + 5 + 5,2 - 0,12(D_{nT,w} + 6) \quad (2.21)$$

$$L'_{nT,w} \leq Req \quad L'_{nT,50} \leq Req + 30 - 0,51(L'_{nT,w} + 2,3) \quad (2.22)$$

$$L'_{nT,A100} \leq Req \quad L'_{nT,A100} \leq Req \quad (2.23)$$

#### 2.4.12 Pesquisas Relacionadas

No artigo de Gerretsen (2013), além da definição de tradução de descritores e requisitos acústicos, tem-se a proposta de tradução de descritores em duas etapas. A primeira trata da determinação da quantificação física com base nas relações geométricas das situações (volume e área) para as devidas suposições. A segunda trata da tradução da faixa de frequência e ponderação, considerando as correlações entre diferentes descritores e obtenção das equações

de tradução correspondentes. Além do mais, é proposto a comparação dos requisitos e das classes acústicas após a tradução.

Dunbavin e Gerretsen (2014) forneceram equações de tradução entre alguns descritores de isolamento acústico de impacto. O modelo é similar à proposta de Gerretsen (2013), só que as quantidades foram calculadas com base em um grande conjunto de medições em campo. Na parte seguinte foi discutida a tradução estatística dos descritores usados atualmente nos novos descritores propostos.

Machimbarrena *et al.* (2016) investigaram como os descritores de isolamento acústico de impacto existentes se relacionam com os novos propostos, a fim de serem capazes de fazer traduções empíricas de descritores. Na pesquisa é usado um grande conjunto de medições em campo. Os autores examinam que não é correto o uso da mesma equação de tradução para todos os tipos de pisos, pois as tipologias de pisos leves e pesados geram equações diferentes.

A pesquisa de Monteiro *et al.* (2017) discute a tradução entre descritores harmonizados existentes e propostos para isolamento aéreo com base em medições em campo. A pesquisa foi realizada em duas etapas, sendo que a primeira etapa seguiu o procedimento proposto por Dunbavin e Gerretsen (2014). A Tradução foi baseada na análise estatística de um grande conjunto de dados. Foi estudado a relação entre a tradução dos descritores avaliados em baixas frequências e a tradução dos procedimentos de ponderação, mediante estudo de correlação, no que consiste na relação entre duas variáveis, representados em pares ordenados  $x$ , que é a variável independente (tradução dos procedimentos de ponderação), e  $y$ , que é a variável dependente (tradução dos descritores avaliados em baixas frequências). A referida relação é medida através do Coeficiente de Correlação de Pearson. O método possibilita a obtenção de equações lineares de tradução dos descritores avaliados em baixas frequências, equações estas obtidas por regressão linear simples, que engloba a construção de gráficos de dispersão e as equações de tradução propriamente ditas entre os pares de descritores.

Del Val *et al.* (2018) realizaram um estudo para tradução de descritores harmonizados existentes e propostos para isolamento de som de impacto, e com modelo similar ao de Monteiro *et al.* (2017). Um diferencial neste artigo é a investigação da independência das equações de tradução obtidas quanto ao tipo de construção. Sendo assim, concluiu-se que as equações de tradução obtidas são dependentes do tipo de construção quando a frequência de avaliação diferente os métodos de faixa e classificação são considerados em ambos os descritores.

De acordo com Dunbavin e Gerretsen (2014), a avaliação estatística da tradução entre os descritores atuais e os novos confirma, para a situação considerada, a tradução teórica / empírica em média, mas também indica claramente a dispersão em torno desta média. Essas dispersões precisam ser consideradas para ver as consequências práticas de uma mudança. Porém, essas dispersões impõem uma condição de incerteza, conforme a versão da ISO 12999-1 (2020), a qual define incerteza como: “parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando”.

Outrossim, as equações lineares de tradução dos descritores avaliados em baixas frequências observadas nos trabalhos de Monteiro *et al.* (2017) e Del Val *et al.* (2018), impõem também uma condição de incerteza. Scholl, Wang e Wittstock (2011) explicam que a inclusão de bandas de 1/3 de oitava com frequências centrais de 50 a 80 Hz em classificações de número único são as grandes incertezas nessas bandas de frequência, em decorrência do comportamento modal dos campos sonoros transmitidos pela estrutura e aerotransportados.

Dunbavin e Gerretsen (2014) e Monteiro *et al.* (2017) forneceram equações de tradução entre alguns descritores de isolamento acústico aéreo (ver Tabela 2.6) , e Del Val *et al.* (2018) forneceram equações de tradução entre descritores de isolamento acústico de impacto (Tabela 2.7). Nos dois tipos de isolamento, as quantidades foram calculadas com base em um grande conjunto de medições em campo.

Tabela 2.6 – Equações lineares de tradução entre descritores para isolamento acústico aéreo

$x$	$y$	Dunbavin e Gerretsen (2014)	$D_{nT,50}$ Monteiro et al. (2017)	$D_{nT,100}$ Monteiro et al. (2017)
$R'_W$		$y = 0,88 * x + 4,2$	$y = 0,63 * x + 20,23$	$y = 0,83 * x + 9,60$
$R'_W + C$			$y = 0,71 * x + 16,89$	$y = 0,90 * x + 7,40$
$R'_W + C_{(50-3150HZ)}$			$y = 0,89 * x + 7,77$	$y = 0,85 * x + 12,30$
$D_{nT,W}$		$y = 0,88 * x + 5,08$	$y = 0,71 * x + 14,77$	$y = 0,92 * x + 3,63$
$D_{nT,W} + C_{tr}$		$y = 0,88 * x + 9,48$	$y = 0,85 * x + 12,02$	$y = x + 5,83$
$D_{nT,W} + C$		$y = 0,88 * x + 5,96$	$y = 0,80 * x + 11,02$	$y = x + 1$
$D_{nT,A_{(100-5KHZ)}}$			$y = 0,79 * x + 10,64$	$y = x + 0,23$

Fonte: Dunbavin e Gerretsen (2014) e Monteiro *et al.* (2017)

Tabela 2.7 – Equações lineares de tradução entre descritores para isolamento acústico de impacto

$x$	$y$	$L'_{nT,w}$	$L'_{nT,50}$	$L'_{nT,100}$
$L'_w$	$y = 0,90 * x + 2,7$	$y = 0,31 * x + 38,3$	$y = 0,55 * x + 21,8$	
$L'_{n,w}$	$y = 0,92 * x + 3,5$	$y = 0,33 * x + 37,6$	$y = 0,60 * x + 20,4$	
$L'_{n,w} + C_{I50}$	$y = 0,32 * x + 35,3$	$y = 0,91 * x + 4,7$	$y = 0,60 * x + 18,5$	
$L'_{nT,w}$		$y = 0,39 * x + 35,0$	$y = 0,65 * x + 17,9$	
$L'_{nT,w} + C_I$	$y = 1,07 * x - 2,7$	$y = 0,81 * x + 12,0$	$y = x$	

Fonte: Del Val *et al.* (2018)

Neste capítulo, foram explorados os conceitos que englobam o problema de pesquisa no universo da Engenharia de Construção Civil. Para conceituar a tradução de descritores e requisitos acústicos, foi necessário estabelecer uma cadeia de conceitos que começou com a definição de desempenho acústico em edificações. Isso envolveu a compreensão do isolamento acústico, descritores acústicos, requisitos acústicos e culminou com a consideração do conceito de incerteza de medição de descritores acústicos.

No final, observa-se que o conceito de tradução de descritores e requisitos acústicos em edificações é uma área recente, com poucas publicações disponíveis. Isso torna oportuno o desenvolvimento adicional com o objetivo de avançar no conhecimento nesse domínio.

### 3. TEORIA DOS CONJUNTOS FUZZY

O filósofo polonês Jan Lukasiewicz estudou o conceito de multivalência, e introduziu o conceito de grau de pertinência em 03 valores (0,  $\frac{1}{2}$  e 1) e aplicou a gama de valores verdade para todos os números reais no intervalo entre 0 e 1. Este conceito foi um avanço ao estudo da lógica, haja vista que a lógica clássica (lógica aristotélica) opera no binário 1 (verdadeiro) e 0 (falso).

O matemático e cientista da computação Lotfi Asker Zadeh deu seguimento aos estudos de Jan Lukasiewicz, e em 1965 publicou a Teoria dos Conjuntos Fuzzy (Zadeh, 1965), com intuito de dar tratamento matemático a termos incertos ou imprecisos como “aproximadamente”, “muito”, “em torno de”. É desta necessidade de resolver problemas com características ambíguas e vagas que surge a teoria dos conjuntos fuzzy (Kosko, 1993).

Segundo Zadeh (1965):

"A noção de um conjunto fuzzy fornece um ponto de partida conveniente para a construção de uma estrutura conceitual que se assemelha em muitos aspectos à estrutura usada no caso de conjuntos comuns, mas é mais geral do que o último e, potencialmente, pode provar ter um escopo muito mais amplo de aplicabilidade, particularmente nos campos de classificação de padrões e processamento de informações. Essencialmente, tal estrutura fornece uma maneira natural de lidar com problemas em que a fonte de imprecisão é a ausência de critérios de classe claramente definidos adesão em vez da presença de variáveis aleatórias." (Zadeh, 1965, livre tradução, pag. 339).

Neste sentido, a Teoria dos Conjuntos Fuzzy emergiu como conceito capaz de modelar a incerteza inerente aos problemas cotidianos (Barros; Bassanezi; Lodwick, 2017; Kosko, 1993; Pedrycz; Gomide, 1998; Zimmermann, 2001).

Segundo Barros, Bassanezi e Lodwick (2017), a palavra inglesa fuzzy significa incerto, vago, impreciso, subjetivo, nebuloso, difuso. No entanto, nenhuma dessas traduções em português completa o sentido amplo da palavra fuzzy, o que tem dificultado o consenso do uso do termo em pesquisas correlatas. No Brasil, por exemplo é observado o uso dos termos nebuloso e difuso. Nesta tese é utilizado o termo fuzzy.

Sendo assim, neste capítulo pretende apresentar os conceitos necessários e suficientes dentro da TCF, de modo a dar sustentação teórica ao modelo proposto.

### 3.1 Conjuntos Fuzzy

Segundo Nicoletti e Camargo (2011), na teoria clássica dos conjuntos, os termos conjuntos, elementos e pertinência de elementos são consideradas noções primitivas, ou seja, sem definição. Sendo assim, os conjuntos crisp (conjuntos clássicos) podem ser caracterizados como uma coleção de objetos distintos que compartilham alguns aspectos comuns, que os qualificam a pertencer ao conjunto, sendo os objetos que formam o conjunto, pode ser chamado de elementos do conjunto. A noção de pertinência de elementos considera a indicação de determinado objeto  $x$  seja elemento de um conjunto  $A$  qualquer ( $X \in A$ ), dado a enumeração de seus elementos, ou seja,  $a_1, a_2, \dots, a_n$ , usualmente escrito como  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  (Klir; Yuan, 1995; Nicoletti; Camargo, 2011; Zimmermann, 2001).

Para Klir e Yuan (1995), a suposição básica sobre a qual a lógica clássica tem base é que toda proposição é verdadeira ou falsa. Isto pode ser observado em uma proposição  $P$  qualquer que é satisfeita por seus elementos. Uma representação adequada é:  $A = \{X|P(x)\}$ , onde todos os elementos do conjunto de  $U$  ( $U$  denota o conjunto universo do discurso) para os quais a proposição  $P(x)$  é verdadeira. Nesta representação é necessário que, para qualquer  $X \in U$ , a proposição de  $P(x)$  seja verdadeira ou falsa (Nicoletti; Camargo, 2011).

A dicotomia constituída na relação verdadeira ou falsa; sim ou não; tem uma significação nos conjuntos crisp. Tais conjuntos impõe uma decisão binária: pontuação 1 para indicar a presença ou pertencimento pleno dos casos a um conjunto e pontuação 0 ou não pertencimento pleno a um conjunto (Betarelli Junior; Ferreira, 2018; Klir; Yuan, 1995).

A formalização matemática do conceito dos conjuntos crisp é por meio de sua função característica, na qual discrimina quais os elementos do universo de discurso de  $U$  são elementos do conjunto  $A$  (Barros; Bassanezi; Lodwick, 2017; Nicoletti; Camargo, 2011). Segue as formalizações 3.1 e 3.2:

$$\chi_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\chi_A: U \rightarrow \{0,1\} \quad (3.2)$$

Ainda em Barros, Bassanezi e Lodwick (2016),  $\chi_A$  é uma função cujo domínio é  $U$  e a imagem está contida em  $\{0,1\}$ , com  $\chi_A = 1$  (elemento  $x$  está em  $A$ ) e  $\chi_A = 0$  (elemento  $x$  não está em  $A$ ).

Para os casos de imprecisão da pertinência entre elementos e conjuntos, é plausível a afirmativa que o elemento do conjunto universo se enquadra melhor as características do conjunto (BARROS; BASSANEZI; LODWICK, 2017). Zadeh (1965) formalizou as imprecisões usando os subconjuntos fuzzy, o que permitiu uma espécie de “relaxamento” no conjunto imagem da função característica de um conjunto.

Sendo assim, a definição de conjuntos fuzzy, segundo Zadeh (1965): “Um conjunto fuzzy  $A$  em  $X$  é caracterizado por uma função de pertinência  $f_A(x)$  que associa a cada ponto em  $X$  um número real  $[0,1]$ , com o valor de  $f_A(x)$  em  $x$  representando o "grau de pertinência" de  $x$  em  $A$ ”.

### 3.2 Função de Pertinência

Ao considerar o conjunto universo crisp  $X$  com elementos genéricos  $x$ , um conjunto Fuzzy  $A$  é caracterizado por uma função de pertinência  $\mu_A(x)$  definida em  $X$ , este é dado por um conjunto crisp de pares ordenados  $A = \{x, \mu_A(x)\}, x \in X$ , onde  $\mu_A(x)$  informa o grau de pertinência que cada elemento  $x$  (Gupta; Jin; Homma, 2003; Klir; Yuan, 1995). O grau de pertinência expressa o grau de compatibilidade de um elemento com o conceito representado pelo conjunto fuzzy (Nicoletti; Camargo, 2011). Tem-se a definição matemática de função de pertinência por meio das equações 3.3 e 3.4:

$$\mu_A: X \rightarrow [0,1] \quad (3.3)$$

$$A = \{(x, \mu_A(x)) : x \in X\} \quad (3.4)$$

Sendo assim, o conjunto  $X$  pode ser um conjunto discreto constituído de elementos discretos, ou um conjunto contínuo constituído de elementos contínuos (Gupta; Jin; Homma, 2003). Segue a equação 3.5 dos referidos conjuntos:

$$A = \begin{cases} \sum_{x \in X} \mu_A(x_i)/x_i, & \text{se } X \text{ for um conjunto discreto} \\ \int_X \mu_A(x)/x, & \text{se } X \text{ for um conjunto contínuo} \end{cases} \quad (3.5)$$

Segundo Nicoletti e Camargo (2011), o que caracteriza um conjunto fuzzy é a tabulação de uma lista contendo todos os elementos do conjunto, juntamente com os seus respectivos graus de pertinência. Na expressão (3.5), a barra (/) não significa divisão e sim a união dos elementos com seus respectivos graus de pertinência ao conjunto. O objetivo com a operação desta é conhecer o grau de pertinência de cada elemento, compreendendo que o grau

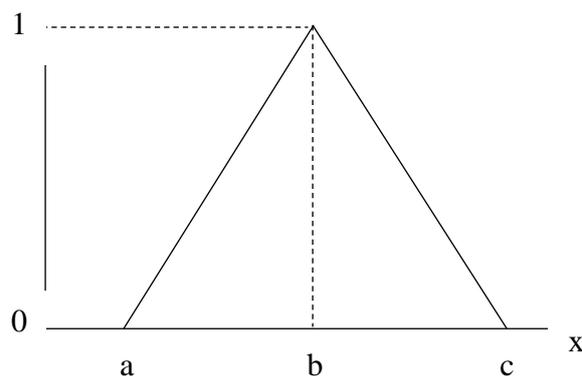
de pertinência  $\mu_A(x_i)$  indica o quanto o elemento  $x_i$  pertence ao conjunto nebuloso. Ao considerar que cada conjunto é unicamente definido por uma determinada função de pertinência, será determinada uma função de pertinência a fim de medir o grau de pertinência (Klir; Yuan, 1995).

Esta pesquisa explora o conceito de função de pertinência triangular. Logo, somente a essa função de pertinência é citada neste referencial. Mesmo assim, é válido ressaltar que na literatura especializada são apresentados outros tipos de funções de pertinência, tais como: trapezoidal; gaussiana; sigmoide.

A função de pertinência triangular tem a forma de um triângulo, e é descrita por parâmetros denotados por  $\{a, b, c\}$  (Figura 3.1), onde  $a$  e  $c$  estão nos extremos opostos do eixo  $x$ , e cuja pertinência é igual a zero. O parâmetro  $b$  está na no centro do eixo  $x$  e tem pertinência igual a 1. A função de pertinência triangular é descrita conforme a Equação 3.6:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a \leq x \leq b \\ \frac{c-b}{c-x} & \text{se } b \leq x \leq c \\ 0 & \text{se } c \leq x \end{cases} \quad (3.6)$$

Figura 3.1 – Função de pertinência triangular.

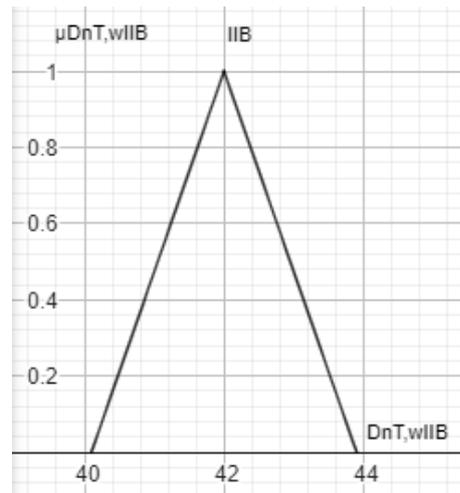


Fonte: Autor

Segundo Pedrycz e Gomide (1998) um conjunto fuzzy é considerado normal, quando o valor máximo (ou supremum) da função de pertinência for 1, ou seja:  $\text{Sup}_x A(x) = 1$ . Como exemplo, considere a função de pertinência  $\mu_A(x)$  na forma algébrica e gráfica (figura 3.2).

$$\mu_A(x) = \begin{cases} ax + b \text{ (esq)} \therefore \frac{1}{1,9}x + \left(-\frac{40,1}{1,9}\right) \therefore \frac{x - 40,1}{1,9}, 40,1 < x \leq 42dB \\ ax + b \text{ (dir)} \therefore -\frac{1}{1,9}x + \frac{43,9}{1,9} \therefore \frac{-x + 43,9}{1,9}, 42 < x \leq 43,9dB \end{cases}$$

Figura 3.2 – Função de pertinência do exemplo



Fonte: Autor

O valor máximo é geralmente referido como altura de  $A$ ,  $hgt(A)$ . Portanto, dizer que um determinado conjunto fuzzy é normal é equivalente a dizer que sua altura é igual a 1. Caso, o valor máximo for menor que 1, então o conjunto fuzzy é dito subnormal (Pedrycz; Gomide, 1998).

Para verificação da normalidade, calcula-se os graus de pertinências a partir das funções de pertinências, considerando os valores dentro do intervalo do domínio dos três parâmetros para função de pertinência triangular. Eis os cálculos para o conjunto fuzzy, sendo possível observar que maior grau de pertinência é 1 em  $\mu_A(42)$ , fato que atesta a normalidade do conjunto  $\mu_A(x)$ .

$$\mu_A(40,1) = \frac{40,1 - 40,1}{1,9} = 0,00$$

$$\mu_A(42) = \frac{42 - 40,1}{1,9} = 1,00$$

$$\mu_A(43,9) = \frac{-43,9 + 43,9}{1,9} = 0,00$$

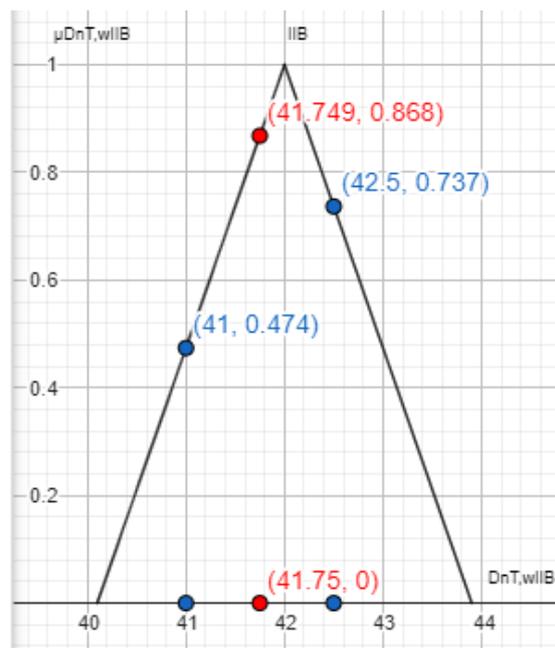
As funções de pertinência praticadas devem atender a condição de convexidade:  $\mu_A[\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2] \geq \min[\mu_A(x_1), \mu_A(x_2)]$ , onde  $\lambda \in [0,1]$  e  $x_1, x_2 \in X$ .

Para verificar a convexidade do conjunto exemplo, estuda-se os pontos quaisquer  $x_1 = 41$  e  $x_2 = 42,5$  (pontos na cor azul), dentro do intervalo do domínio  $[40,1; 43,9]$ . Com a aplicação da propriedade para convexidade, considera-se  $\lambda = 0,5 \in [0, 1]$  (argumento para ponto médio do segmento de reta em um espaço euclidiano). Pela leitura no gráfico (Figura 3.3), a projeção de  $\mu_A(x) = 41,75$  no eixo  $x$  (pontos na cor vermelho) é de  $\mu_A(x) \cong 0,868 \geq 0,473$ . Portanto, foi confirmada a convexidade de  $\mu_A(x)$ .

$$\mu_A(x)[0,5 * 41 + (1 - 0,5) * 42,5] \geq \min[0,473; 0,736]$$

$$\mu_A(x)[41,75] \geq 0,473$$

Figura 3.3 – Verificação da convexidade do conjunto  $\mu_A(x)$



Fonte: Autor

Quando o conjunto suporte é um conjunto convexo e de números reais, tem-se a seguinte propriedade para todo  $x \in [a,b]$ :  $\mu_A(x) \geq \mu_A(a) \wedge \mu_A(b)$ .

Em Pedrycz e Gomide (1998), também é observado as definições de suporte e de núcleo de um conjunto fuzzy em A. O suporte de A, envolve os elementos de  $x$  que pertencem ao conjunto fuzzy A, e que tem grau de pertinência não nulo. O núcleo, por sua vez, envolve

todos os elementos de  $x$  que possui grau de pertinência 1 em  $A$ . A representação matemática das definições de suporte e núcleo estão em 3.7 e 3.8, respectivamente.

$$Supp(A) = \{x \in X | A(x) > 0\} \quad (3.7)$$

$$Core(A) = \{x \in X | A(x) = 1\} \quad (3.8)$$

### 3.3 Operações entre Conjuntos Fuzzy

O estudo da interação dos sistemas lineares que envolve o problema de TDRIAR, implica em diversas operações, que devem ser executadas em conformidade com as regras de operação de tais sistemas. De acordo com Simões e Shaw (2007), quando os sistemas ou modelos matemáticos dos sistemas, são expressos em números e conjuntos, há a necessidade de determinação das regras de interação entre eles, o que justifica o estudo de operações entre conjuntos e seus universos de discurso.

Para atender aos interesses de desenvolvimento do modelo proposto, discute-se a intersecção de conjuntos fuzzy. Em Simões e Shaw (2007) são discutidas operações entre conjuntos fuzzy no mesmo universo de discurso e operações entre conjuntos fuzzy em universos de discurso diferentes. Com relação as operações no mesmo universo de discurso, seja dois conjuntos fuzzy  $A$  e  $B$  definidos dentro do universo do discurso  $U$  e com funções de pertinência  $\mu_A(x)$  e  $\mu_B(x)$ , respectivamente. Então a intersecção entre  $A$  e  $B$  é o maior conjunto dentro do universo de discurso  $U$  e, como trata da parte comum dos conjuntos  $A$  e  $B$ , resulta sempre menor que qualquer um dos conjuntos individuais  $A$  e  $B$ . Logo, a função de pertinência da intersecção entre  $A$  e  $B$  é definida pela equação 3.9.

$$\mu_{(A \cap B)}(x) = \{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, x \in U \quad (3.9)$$

Outro conceito fundamental é a norma-t ou norma triangular. Segundo Simões e Shaw (2007), a norma-t é uma operação binária e generaliza a intersecção por meio do seu operador de intersecção fuzzy ( $\wedge$  operador mínimo). O operador  $\wedge$  efetua um mapeamento entre duas funções de pertinência fuzzy, cada uma no intervalo  $[0,1]$ . Tal mapeamento consiste em: o produto cartesiano entre as entradas  $A(x): X \rightarrow [0,1]$  e  $B(x): X \rightarrow [0,1]$ , constituído no

domínio  $[0,1]^2$ , resulta no mapeamento de  $A \cap B(x): X \rightarrow [0,1]$ , constituído na imagem  $[0,1]$ . A equação 3.10 formaliza a norma-t.

$$\mu_{(A \cap B)}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \leq [\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (3.10)$$

Por outro lado, as operações entre conjuntos fuzzy em universos de discurso diferentes, tem-se os universos de discurso diferentes (ou espaços)  $U$  e  $V$ , onde o conjunto  $A$  (definido pela sua função de pertinência  $\mu_A(x), x \in U$ ) e o conjunto  $B$  (definido pela sua função de pertinência  $\mu_B(y), y \in V$ ), ao juntar  $A$  e  $B$  de modo a formar um par ordenado  $(x, y)$ , define, portanto, um produto cartesiano. Como os conjuntos  $A$  e  $B$  são caracterizados pelas suas respectivas funções de pertinência, seu produto cartesiano constitui uma matriz discreta. Sendo assim, o produto cartesiano é uma intersecção entre conjuntos fuzzy em universos de discurso diferentes e pode ser calculada pela norma-t, conforme a equação 3.11 (Simões e Shaw, 2007).

$$p_{(x,y)} = [\mu(x), \mu(y)], x \in A, y \in B \quad (3.11)$$

Um outro importante conceito discutido é o de relação. A relação constitui a ligação de cada elemento de entrada do conjunto  $A$  com cada elemento de saída do conjunto  $B$ , logo a relação contém todos os pares ordenados do produto cartesiano; isto é, um conjunto de pares ordenados podem ser modelados, considerando os valores de entradas  $e$  e saídas  $s$ . As entradas  $x_e[k]$  estão no universo  $U$  e  $y_s[k]$  estão no universo  $V$ , onde  $k = 1, 2, 3, \dots, N$ , representam todos os possíveis valores de ocorrência de  $U$  e  $V$ . O conjunto de ligações é representado em uma matriz, de modo que essa liga o universo de entradas, que são valores de pertinência associados a cada par ordenado  $(x_i, y_j)$ , ao universo de saída (valor contido em  $[0,1]$ ). Tal valor de saída é denominada de intensidade de mapeamento ou força de ligação. Portanto, a relação é definida por  $R \subset U \times V$ , onde  $R$  é definida em um conjunto  $X \subset U$  a outro conjunto  $Y \subset V$ , formado assim uma matriz relacional  $U \Rightarrow V$ , sendo esta responsável por determinar uma correlação fixa entre entrada e saída (Simões e Shaw, 2007).

### 3.4 Números Fuzzy via $\alpha$ -Corte

De acordo com Pedrycz e Gomide (1998), qualquer conjunto fuzzy pode ser considerado uma família de conjuntos fuzzy, fato essencial na representação de tais conjuntos fuzzy, onde qualquer conjunto fuzzy pode ser decomposto em outros. Neste sentido, é abordada nesta tese a representação de conjuntos fuzzy em números fuzzy via  $\alpha$ -corte.

Segundo Pedrycz e Gomide (1998), os números difusos são responsáveis pela modelagem de quantidades imprecisas, o que tornam úteis na representação de sistemas complexos. Essas quantidades imprecisas assumem quantidades aproximadas, tais como: “em torno de”; “próximo de”.

Todo número real é considerado um número fuzzy particular, cuja função de pertinência é a sua função característica. Por definição, os números fuzzy podem ser considerados como mapeamentos dos conjuntos de números reais para o intervalo unitário, sendo necessário satisfazer as seguintes condições:

- Os  $\alpha$ -cortes de  $A$  são todos não vazios, com o  $0 \leq \alpha \leq 1$ ;
- Os  $\alpha$ -cortes de  $A$  são todos intervalos fechados de  $\mathbb{R}$ ;
- $suppA = \{x \in \mathbb{R}: \mu_A(x) > 0\}$  é limitado.

Conforme observado nas condicionantes relacionadas, tem-se o conceito de  $\alpha$ -corte ( $\alpha$ -cuts) ou  $\alpha$ -níveis. O  $\alpha$ -corte torna possível a representatividade dos números fuzzy (Klir; Yuan, 1995). Os mesmos autores afirmam que o conceito de  $\alpha$ -corte é um dos mais importantes dentro dos conjuntos fuzzy. Para a sua definição, denota-se o  $\alpha$ -corte de  $A$  em  $A_\alpha$ , este é um conjunto que consiste daqueles elementos do universo  $X$  cujos valores de pertinência excedem o nível  $\alpha$ . Tal definição é formalizada pela equação 3.12.

$$A_\alpha = \{x | A(x) \geq \alpha\} \quad (3.12)$$

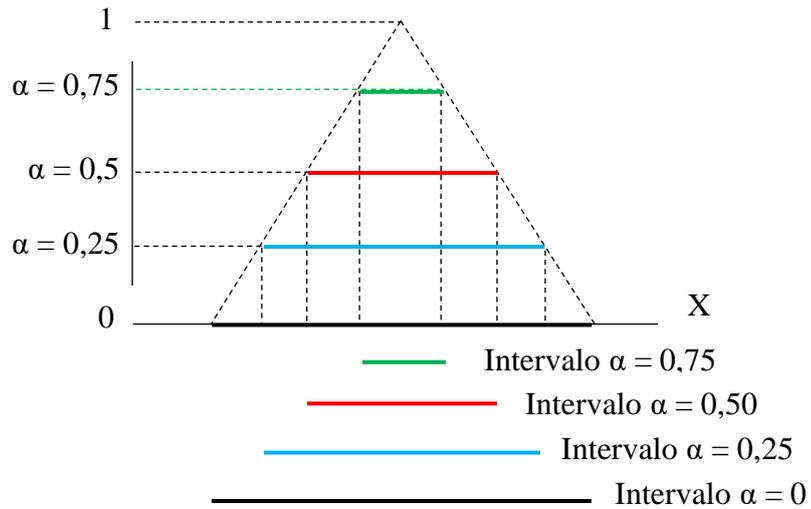
O maior nível  $\alpha=1$ , determina o conjunto de elementos de  $X$  pertence totalmente a  $A$ ; quanto o menor o nível de  $\alpha$ , mais elementos são admitidos aos  $\alpha$ -cortes correspondentes, ou seja, se  $\alpha_1 > \alpha_2$  então  $A_{\alpha_1} \subset A_{\alpha_2}$ . Sendo assim, qualquer conjunto fuzzy pode ser decomposto em uma série de  $\alpha$ -cortes, mediante o uso da equação 3.13. Esse argumento é ilustrado pela figura 3.4.

$$A(x) = \sup_{\alpha \in [0,1]} [\alpha A_\alpha(x)] \quad (3.13)$$

Neste sentido, a denotação dos  $\alpha$ -cortes de um conjunto fuzzy  $A$  é observada na equação 3.14.

$$[A]^\alpha = [a_1^\alpha, a_2^\alpha] \quad (3.14)$$

Figura 3.4 – Representação dos  $\alpha$ -cortes



Fonte: Adaptado de Klir e Yuan (1995)

Para atender os interesses em *prol* da pesquisa, é importante determinar um intervalo representativo para os conjuntos fuzzy. Isto pode ser determinado a partir dos conceitos de intervalo esperado e valor esperado, propostos por Dubois e Prade (1987).

O intervalo esperado  $IE(A)$  de um conjunto  $A = \{x, \mu_A(x)\}, x \in R$ , sujeito a função de pertinência  $\mu_A(x), x \in R$ , é definido por (equação 3.15), em que os valores de  $IE^-(A)$  e  $IE^+(A)$  são obtidos a partir do cálculo das integrais de Riemann (equação 3.16) e (equação 3.17).

$$IE(A) = [IE^-(A), IE^+(A)] \quad (3.15)$$

$$IE^-(A) = \int_0^1 \alpha [\mu_A^-(x)]^\alpha d\alpha \quad (3.16)$$

$$IE^+(A) = \int_0^1 \alpha [\mu_A^+(x)]^\alpha d\alpha \quad (3.17)$$

O valor esperado  $VE(A)$  é equivalente ao valor modal da função de pertinência  $\mu_A(x), x \in R$ , e é obtido por meio da equação 3.18.

$$VE(A) = \frac{IE^-(A) + IE^+(A)}{2} \quad (3.18)$$

### 3.5 Princípio de Extensão Fuzzy

Segundo Klir e Yuan (1995), o princípio de extensão fuzzy permite a tradução de conceitos baseados em conjuntos em contrapartidas fuzzy. Em outras palavras, este possibilita a extensão de conceitos matemáticos não-fuzzy em fuzzy (Barros; Bassanezi; Lodwick, 2017; Pedrycz; Gomide, 1998; Zimmermann, 2001).

Para atender o interesse desta pesquisa, apresenta-se o princípio de extensão de Zadeh, este explora dois conceitos importantes: a possibilidade de um valor de entrada é propagada diretamente para a possibilidade de sua imagem; quando a combinação de múltiplas entradas mapeia o mesmo valor de saída, a possibilidade da saída é obtida pela combinação das possibilidades dessas entradas através do operador sup.

Barros, Bassanezi e Lodwick (2017) apresentam a definição matemática do princípio de extensão de Zadeh: Seja a função  $f: X \rightarrow Z$ , esta com objetivo de indicar a imagem de um conjunto  $A$  de  $X$  por meio de  $f$ . A extensão de Zadeh de  $f$  considera a função  $f^*$ , que aplicada em  $A$ , fornece o conjunto fuzzy  $f^*(A)$  de  $Z$ . Logo, é esperado que imagem do conjunto  $A$ , seja um conjunto fuzzy de  $Z$  e com função de pertinência dada pela equação 3.19:

$$\mu_{f^*(A)}(z) = \begin{cases} \text{Sup}_{f^{-1}(z)} \mu_A(x) & \text{se } f^{-1}(z) \neq \emptyset \\ 0 & \text{se } f^{-1}(z) = \emptyset \end{cases} \quad (3.19)$$

sendo  $f$  uma função bijetora, em que  $f^{-1}$  é a função inversa de  $f$ .  $\{x: f(x) = z\} = \{f^{-1}(z)\}$ .

Vale lembrar que a função bijetora se caracteriza na relação entre dois conjuntos  $X$  e  $Y$ , onde cada elemento do conjunto domínio  $X$ , não possui uma imagem exclusiva dele no conjunto contradomínio  $Y$ . Diferentemente, da função injetora em que cada elemento do conjunto domínio  $X$ , possui uma imagem exclusiva dele no conjunto contradomínio  $Y$ .

Ainda com base em Barros, Bassanezi e Lodwick (2017), para função  $f$  ser injetora, então  $z = f(x)$  pertence ao subconjunto fuzzy  $f(A)$ , com mesmo grau  $\alpha$  com que  $x$  pertence

a  $A$ . Seja  $f: X \rightarrow Z$  uma função injetora e  $A$  um subconjunto fuzzy de  $X$ , finito ou enumerável dada pela equação 3.20:

$$\hat{f}(A) = \sum_{i=1}^{\infty} \mu_A(x_i)/f(x_i) \quad (3.20)$$

Desse modo, pode-se deduzir a imagem de  $A$  por  $f$  do conhecimento das imagens de  $x_i$  por  $f$ . Observamos ainda que o grau de pertinência de  $z_i=f(x_i)$  em  $\hat{f}(A)$  é o mesmo de  $x_i$  em  $A$ .

Barros, Bassanezi e Lodwick (2017), no princípio de extensão de Zadeh para conjuntos fuzzy com suporte enumerável e finito ainda estende o conceito de uma função aplicada um conjunto clássico de  $X$ , ou seja  $f: X \rightarrow Z$ . A função de pertinência de  $A$  e sua função característica. A extensão de Zadeh aplicada ao conjunto  $A$  é o conjunto  $\hat{f}(A)$  de  $Z$ . Sua função característica é a equação 3.21.

$$\mu_{\hat{f}(A)}(Z) = \sup_{\{x: f(x)=z\}} \chi_A(x) \quad (3.21)$$

Sendo assim, a função de pertinência do conjunto fuzzy  $\hat{f}(A)$  coincide com a função característica do conjunto crisp  $f(A)$ . Tem-se então a equação 3.22.

$$\hat{f}(A) = f(A) = \{f(a): a \in A\} \quad (3.22)$$

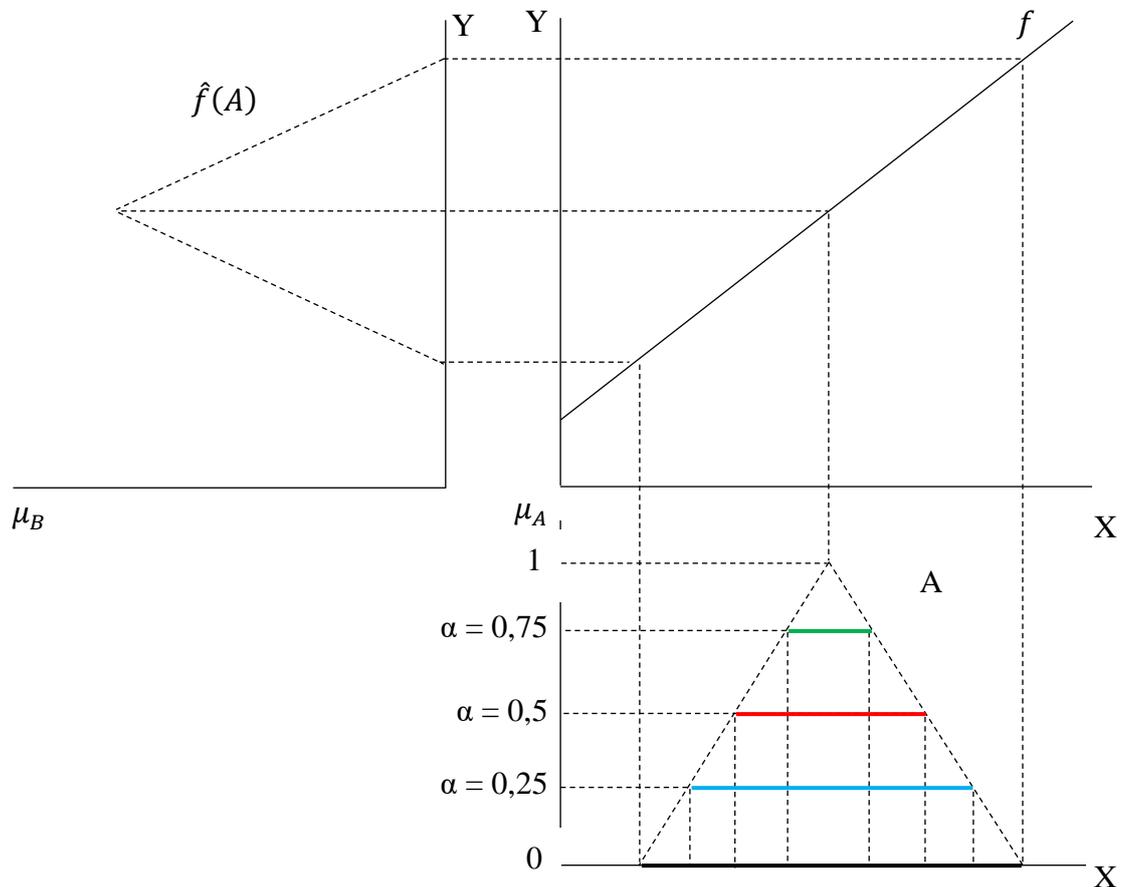
De acordo com Lodwick e Dubois (2015) Barros, Bassanezi e Lodwick (2017) , ao relacionar os  $\alpha$ -cortes com o princípio de extensão de Zadeh, se  $A$  for um conjunto crisp, então  $[A]^\alpha = A$  para todo  $\alpha \in ]0,1]$ . Para tal, tem-se a equação 3.23, onde  $\alpha = 0$  significa o fechamento do suporte  $A$  (ver ilustração figura 3.5).

$$[\hat{f}(A)]^\alpha = [f(A)]^\alpha = f(A) = f([A]^\alpha) \quad (3.23)$$

Para uma função contínua  $f: X \rightarrow Z$ , sendo  $A$  um conjunto fuzzy de  $X$ , tem-se a equação 3.24, que indica que os  $\alpha$ -cortes do conjunto fuzzy, obtidos pelo princípio de Extensão de Zadeh, coincidem com as imagens dos  $\alpha$ -níveis pela função crisp (ver ilustração figura 3.5).

$$[\hat{f}(A)]^\alpha = f([A]^\alpha) \quad (3.24)$$

Figura 3.5 – Princípio de Extensão de Zadeh para função linear.



Fonte: Adaptado de Barros, Bassanezi e Lodwick (2017)

### 3.6 Fuzzificação com Regressão Linear Fuzzy

Tanaka, Uejima & Asai (1982) introduziram um modelo de regressão baseado em programação linear usando um modelo linear fuzzy com os parâmetros triangulares fuzzy simétricos, conforme a equação 3.25, onde  $Y$  é uma saída fuzzy  $A_i$  é o  $i$ -ésimo coeficiente fuzzy (geralmente um número fuzzy). Os componentes fuzzy são assumidos como números fuzzy triangulares simétricos. Consequentemente, os coeficientes podem ser caracterizados por suas funções de pertinências,  $\mu_{\tilde{A}}(x)$ .

$$Y = f(x, \tilde{A}) = A_0 + A_1x_1 + A_2x_2 + \dots + A_nx_n \quad (3.25)$$

Em regressão linear fuzzy, a diferença entre os valores observados e estimados é em decorrência da ambiguidade (incerteza) inerente ao sistema. A saída para uma entrada específica é um intervalo de valores possíveis, ou seja, a saída pode assumir qualquer um desses valores possíveis. Portanto, a regressão difusa é de natureza possibilística (Ross, 2004). Com a regressão possibilística, o modelo de Tanaka, Uejima & Asai (1982) minimiza a imprecisão do modelo, por meio da minimização do espalhamento dos coeficientes fuzzy, esses sujeitos à inclusão de todos os dados fornecidos Shapiro (2005).

No modelo Tanaka, Uejima & Asai (1982), o fuzzificador triangular utiliza números fuzzy triangulares, com centro no ponto de entrada. O número fuzzy triangular segue a mesma definição inserida no item 3.2.1. Assim os números  $a$ ,  $b$  e  $c$  definem um número fuzzy triangular  $\tilde{A}$ . Sendo assim, pode-se escrever os números fuzzy triangulares, onde  $p$  é o valor modal de  $a$ , e  $c$  é um parâmetro positivo e constitui o espalhamento (range) do valor modal, conforme a equação 3.26.

$$\mu_A(a_i) = \begin{cases} 1 - \frac{|p_i - a_i|}{c_i} & \text{se } p_i - c_i \leq x_i \leq p_i + c_i \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.26)$$

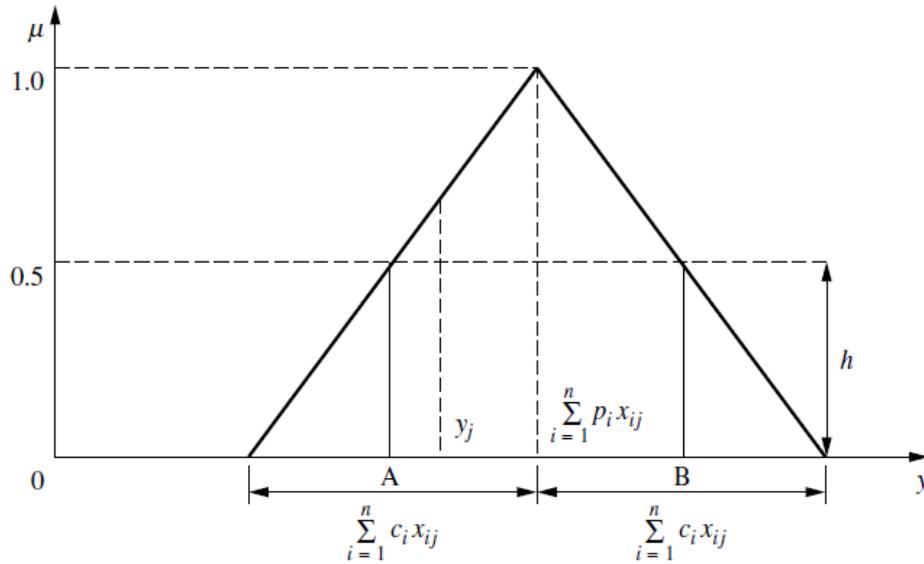
Assim, a função de pertinência para o parâmetro fuzzy de saída é mostrada na equação 3.27.

$$\mu_Y(y) = \begin{cases} 1 - \frac{|y - \sum_{i=1}^n p_i x_i|}{\sum_{i=1}^n c_i |x_i|}, & \text{se } x_i \neq 0 \\ 1, & \text{se } x_i = 0 \text{ e } y = 0 \\ 0, & \text{se } x_i = 0 \text{ e } y \neq 0 \end{cases} \quad (3.27)$$

Tanaka, Uejima & Asai (1982) ainda propuseram a a solução do modelo de regressão transformando-o em um problema de programação linear, tanto para os casos em que apenas os coeficientes são fuzzy, assim como para os casos em que as variáveis são fuzzy.

Para dados não difusos, o objetivo do modelo de regressão é determinar os parâmetros de otimização, tais que o conjunto de saída fuzzy  $\mu_Y(y)$ , esteja associado a um valor de pertinência maior que o parâmetro de ajuste  $h$ ,  $\mu_{Y_j}(y_j) \geq h, j = 1, \dots, m$  sendo este especificado pelo modelador e, por característica, à medida que  $h$  aumenta, a imprecisão da saída aumenta. A figura 3.6 ilustra o comportamento dos parâmetros mencionados.

Figura 3.6 – Saída para coeficientes fuzzy.



Fonte: Ross (2004)

Sendo assim, a programação linear para os dados não fuzzy, conta com a função objetivo de minimização (equação 3.28) e sujeitas às restrições (equações 3.29 e 3.30), onde  $x_{0j} = 1$ , para  $j = 1, \dots, m$ .

$$FO = \min \left\{ mc_0 + \sum_{j=1}^m \sum_{i=0}^n c_i x_{ij} \right\} \quad (3.28)$$

$$y_j \geq \sum_{i=1}^n p_i x_{ij} - (1-h) \sum_{i=1}^n c_i x_{ij} \quad (3.29)$$

$$y_j \leq \sum_{i=1}^n p_i x_{ij} + (1-h) \sum_{i=1}^n c_i x_{ij} \quad (3.30)$$

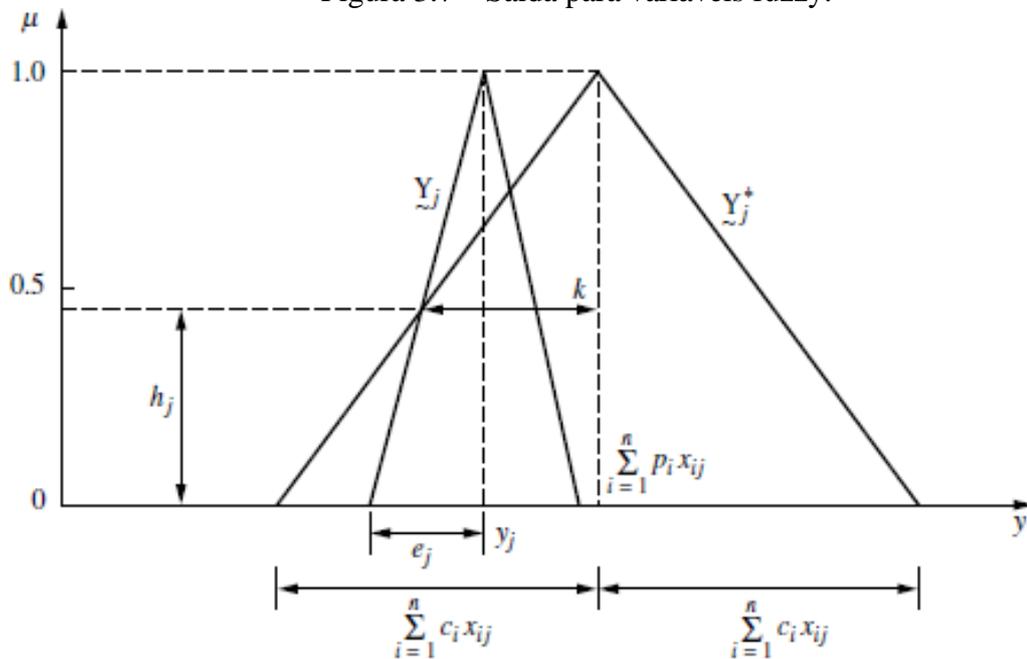
No caso envolvendo dados fuzzy, a saída é mais bem representada por um número fuzzy  $Y_j = (y_j, e_j)$ , onde  $y_j$  é o valor médio e  $e_j$ , a ambiguidade na saída. Assim, a função de pertinência da saída é (equação 3.31):

$$\mu_{Y_j}(y) = 1 - \frac{|y_j - y|}{e_j} \quad (3.31)$$

Em dados fuzzy, tem-se  $h_j \geq H$ , onde  $H$  é um grau de ajuste e é uma escolha do usuário. Essa restrição minimiza a dispersão (figura 3.7). A equação para obtenção de  $h_j$  é exposta a seguir (equação 3.32):

$$h_j = 1 - \frac{|y - \sum_{i=1}^n p_i x_i|}{\sum_{i=1}^n c_i |x_i| - e_j} \quad (3.32)$$

Figura 3.7 – Saída para variáveis fuzzy.



Fonte: Ross (2004)

Ao aplicar a programação linear, tem-se a seguinte função objetivo (3.33) e sujeitas às restrições (3.34) e (3.35):

$$FO_f = \min \left\{ mc_0 + \sum_{j=1}^m \sum_{i=0}^n c_i x_{ij} \right\} \quad (3.33)$$

$$y_j \geq \sum_{i=1}^n p_i x_{ij} - (1 - H) \sum_{i=1}^n c_i x_{ij} + (1 - H) e_j \quad (3.34)$$

$$y_j \leq \sum_{i=1}^n p_i x_{ij} + (1 - H) \sum_{i=1}^n c_i x_{ij} - (1 - H) e_j \quad (3.35)$$

### 3.7 Defuzzificação

Segundo Ross (2004), a defuzzificação é um processo em que se representa um conjunto fuzzy por um número real. Ortega (2001), diz que a defuzzificação é uma tradução da distribuição de possibilidades definida pela saída de uma quantidade fuzzy em uma quantidade escalar (crisp). Na maioria dos casos que se trabalha com sistemas fuzzy tem-se que a saída resulta em um conjunto fuzzy. Na literatura pode-se observar diversos métodos de defuzzificação.

**Método da máxima pertinência** – na literatura também é denominado como método da altura e considera os cortes individuais dos conjuntos fuzzy. O valor de saída é obtido a partir do somatório dos produtos dos valores do centro dos conjuntos fuzzy de saída pelas respectivas alturas dos conjuntos “cortados” após o processo de inferência. Na sequência, este somatório é dividido pelo somatório das alturas dos conjuntos fuzzy “cortados” (PEDRYCZ; GOMIDE, 1998).

**Método do Centróide** – é semelhante à média aritmética para a distribuição de frequências para uma dada variável. Neste, o centróide dá a média das áreas de todas as figuras representadas pelo seu grau de pertinência de um conjunto fuzzy Barros, Bassanezi e Lodwick (2017).

Ainda de acordo com Barros, Bassanezi e Lodwick (2017), em um contexto de estudo relacionado à TCF, compreendendo os módulos de fuzzificação, inferência e defuzzificação, há situações específicas, especialmente quando se utiliza o método de Takagi-Sugeno, no qual a saída se configura como uma equação linear. Nestes casos, é possível suprimir o módulo de defuzzificação.

Neste capítulo, discutiu-se o conceito fundamental que serve como a base para a intervenção no problema de pesquisa. Dentro do universo da TCF, discutiu-se as funções de pertinência, estas responsáveis na conversão de números nítidos (escalares) em conjuntos fuzzy. Além disso, abordou-se o conceito de números fuzzy, que é responsável por modelar conjuntos fuzzy dentro de intervalos predefinidos, permitindo a representação da incerteza de medição. Destacou-se também o conceito de regressão linear fuzzy, uma abordagem que envolve a modelagem de números fuzzy como coeficientes de regressão fuzzy. Essa técnica é valiosa quando se deseja analisar relações lineares entre variáveis em um contexto de incerteza de medição. Todos esses conceitos convergem para o processo de fuzzificação, que consiste na

transformação de números nítidos em números fuzzy, capacitando a representação da incerteza nos dados. Por fim, o capítulo abordou a defuzzificação, que é a etapa oposta da fuzzificação e envolve a conversão de números fuzzy em valores nítidos, permitindo a obtenção de resultados para análises.

## 4. MÉTODO

Este capítulo está estruturado em fundamentos, classificação da pesquisa, delineamento da pesquisa e a proposição do modelo. Nos itens que antecedem a proposição do modelo, são apresentados os conceitos necessários à fim de assegurar a proposição, quanto ao método científico.

### 4.1 Fundamentos

Segundo Marconi e Lakatos (2023), a pesquisa “é um procedimento formal, com método de pensamento reflexivo, que requer tratamento científico e se constitui no caminho para conhecer a realidade ou para descobrir verdades parciais”.

Para Demo (2013) a pesquisa é o meio pelo qual se descobre a realidade; é um processo interminável, considerando o pressuposto que a realidade não é desvendada na superfície. A pesquisa dedicada a montagem de um quadro de referência é chamada de pesquisa teórica. As investigações voltadas para face experimental e observações dos fenômenos é dita pesquisa empírica (Demo, 2013).

Ainda em Demo (2013), a pesquisa prática é voltada para os testes de posições teóricas ou possíveis ideias. Köche (2015), por sua vez, indica o caráter prático: “conhecer as coisas, os fatos, os acontecimentos e fenômenos, para tentar estabelecer uma previsão do rumo dos acontecimentos que cercam o homem e controlá-los. Com esse controle pode ele melhorar sua posição em face ao mundo e criar, através do uso da tecnologia, condições melhores para a vida humana”.

De acordo com Marconi e Lakatos (2023), as ciências são caracterizadas pelo uso do método científico. Para Prodanov e Freitas (2013), a finalidade da ciência é a busca do conhecimento e o método científico é o conjunto de procedimentos intelectuais e técnicos aplicados com fins de atingir o conhecimento; é uma linha de raciocínio adotados no processo de pesquisa (Prodanov e Freitas, 2013).

Em Marconi e Lakatos (2023), o método é o conjunto de atividades racionais e sistemáticas que traçam o caminho a ser seguido pelo pesquisador e permite o alcance dos objetivos da pesquisa. Os mesmos autores separam o método em método de abordagem e

método de procedimento. Sendo o método de abordagem seguído em indutivo, dedutivo, hipotético-dedutivo ou dialético. O interesse dessa pesquisa é voltado para o método de abordagem hipotético-dedutivo, que por definição de Marconi e Lakatos (2023), tem início na identificação de uma lacuna do conhecimento, e posteriormente, formulam-se hipóteses, e pelo processo de inferência dedutiva, testa-se a predição da ocorrência de fenômenos compreendidos pelas hipóteses.

O método de procedimento faz referência a técnica. A definição de técnica: “é um conjunto de preceitos ou processos de que serve uma ciência ou arte; é a habilidade para usar esses preceitos ou normas, a parte prática” (Marconi e Lakatos, 2023). Tal método constitui procedimentos mais concretos da pesquisa, sendo subdivididos em: histórico, comparativo, monográfico, estatístico, tipológico, funcionalista, estruturalista. Os procedimentos técnicos são tratados em mais detalhes no item seguinte – classificação da pesquisa.

#### 4.2 Classificação da Pesquisa

Silva e Menezes (2005) e Prodanov e Freitas (2013) classificam a pesquisa em 4 itens: do ponto de vista da sua natureza; do ponto de vista de seus objetivos; do ponto de vista da abordagem do problema; do ponto de vista dos procedimentos técnicos.

Do ponto de vista da natureza do estudo, a pesquisa é aplicada, uma vez que, este tipo de estudo caracteriza-se por seu interesse prático, isto é, que os resultados sejam aplicados ou utilizados na solução de problemas que ocorrem na realidade (Silva e Menezes, 2005; Prodanov e Freitas, 2013). No caso da pesquisa, tem o objetivo de gerar conhecimento aplicáveis ao Método da Engenharia e dirigidos à solução específica em edificações residenciais.

Para atingir seus objetivos, esta pesquisa possui caráter explicativo. Por definição, a pesquisa explicativa visa identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos; requer o registro, a análise, classificação e interpretação dos fenômenos observados; nas ciências naturais requer pesquisa experimental; o escopo considera identificação, manipulação e controle de variáveis (Silva e Menezes, 2005; Prodanov e Freitas, 2013). O caráter explicativo se justifica pelo o uso de procedimentos técnicos experimentais, a fim de possibilitar a manipulação e o controle das variáveis, no intuito de identificar qual a variável independente (tradução dos procedimentos de ponderação) que determina a causa da variável dependente (tradução dos descritores avaliados em baixas frequências); pela

mensuração de variáveis quantitativas e análise em termos de classificação de número único dos descritores de isolamento acústico (fenômeno).

Quanto à forma de abordagem do problema, é utilizada a pesquisa quantitativa, uma vez que, considera em tudo que é quantificável; requer o uso de técnicas estatísticas (Silva e Menezes, 2005; Prodanov e Freitas, 2013). Prodanov e Freitas (2013) apresentam alguns caracteres que diferenciam abordagem quantitativa de qualitativa. Neste sentido, a abordagem quantitativa da proposta de pesquisa, possui os seguintes os seguintes caracteres:

- O foco da pesquisa é responder ao final, o quanto é mensurável a TDRIAR a partir da TCF;
- O uso da TCF tem bases nas raízes filosóficas da lógica;
- A associação entre o modelo conceitual do problema e sua validação são mediante a experimentação;
- As metas de investigação são constituídas nas previsões das variáveis selecionadas;
- O estudo da amostra é robusto; amplo, e o dimensionamento da mesma e mais a amostragem, lhe confere representatividade.

Com relação aos procedimentos técnicos, segundo Prodanov e Freitas (2013), são as ações destinadas a obtenção dos dados para realização da pesquisa. Neste sentido, a presente tese apresentou 2 (dois) procedimentos técnicos: pesquisa bibliográfica, por meio da compilação e composição de dados (observada em detalhes no subitem 4.4); pesquisa experimental, por meio da proposição de modelo e experimentação (observada em detalhes no subitem 4.5).

A pesquisa bibliográfica é um procedimento técnico de levantamento de dados, pois trata-se de um apanhado geral sobre as principais pesquisas realizadas, revestidas de importância, capazes de fornecer dados atuais e relevantes acerca do tema (Marconi e Lakatos, 2019).

A pesquisa experimental, por sua vez, fundamenta-se na definição de um objeto de estudo, construção das hipóteses e o pesquisador trabalha na manipulação dos possíveis fatores (variáveis) referentes ao fenômeno observado, e avalia as relações preditas pelas hipóteses. Neste tipo de pesquisa é característico o estudo da relação causa e efeito, mediante a manipulação *a priori* das variáveis independentes e o controle das variáveis dependentes

(Köche, 2015). A variável independente ( $X$ ) é aquela que afeta outra variável; é o fator manipulável pelo pesquisador, na tentativa de atestar tanto a relação do fator com um fenômeno observado ou a ser descoberto, como a influência exercida no resultado. A variável dependente ( $Y$ ), por sua vez, é a variável afetada; é o fator que varia à medida que o pesquisador modifica a variável independente (Marconi e Lakatos, 2023).

Segundo Barbetta, Reis e Bornia (2010), em pesquisas experimentais são comuns a manipulação, de forma planejada, de determinados fatores (variáveis independentes), a fim de verificar o efeito que essa manipulação provoca em determinada variável dependente (ou resposta). Os mesmos autores apresentam terminologias que são inerentes ao plano experimental: fatores: algo controlável que pode afetar o desempenho do processo; tratamento ou condição experimental: uma particular combinação de níveis de fatores incluídos no modelo; replicação: repetição dos ensaios em cada condição experimental; aleatorização: carácter aleatório para a alocação dos tratamentos nas unidades experimentais.

### 4.3 Delineamento da Pesquisa

O delineamento da pesquisa (Figura 4.1) está estruturado em 03 (três) etapas, denominadas de compreensão, desenvolvimento do modelo e implementação, seguidas em sub-etapas. E em cada sub-etapa, tem-se os métodos de procedimentos.

#### 4.3.1 Etapa 1 – Compreensão

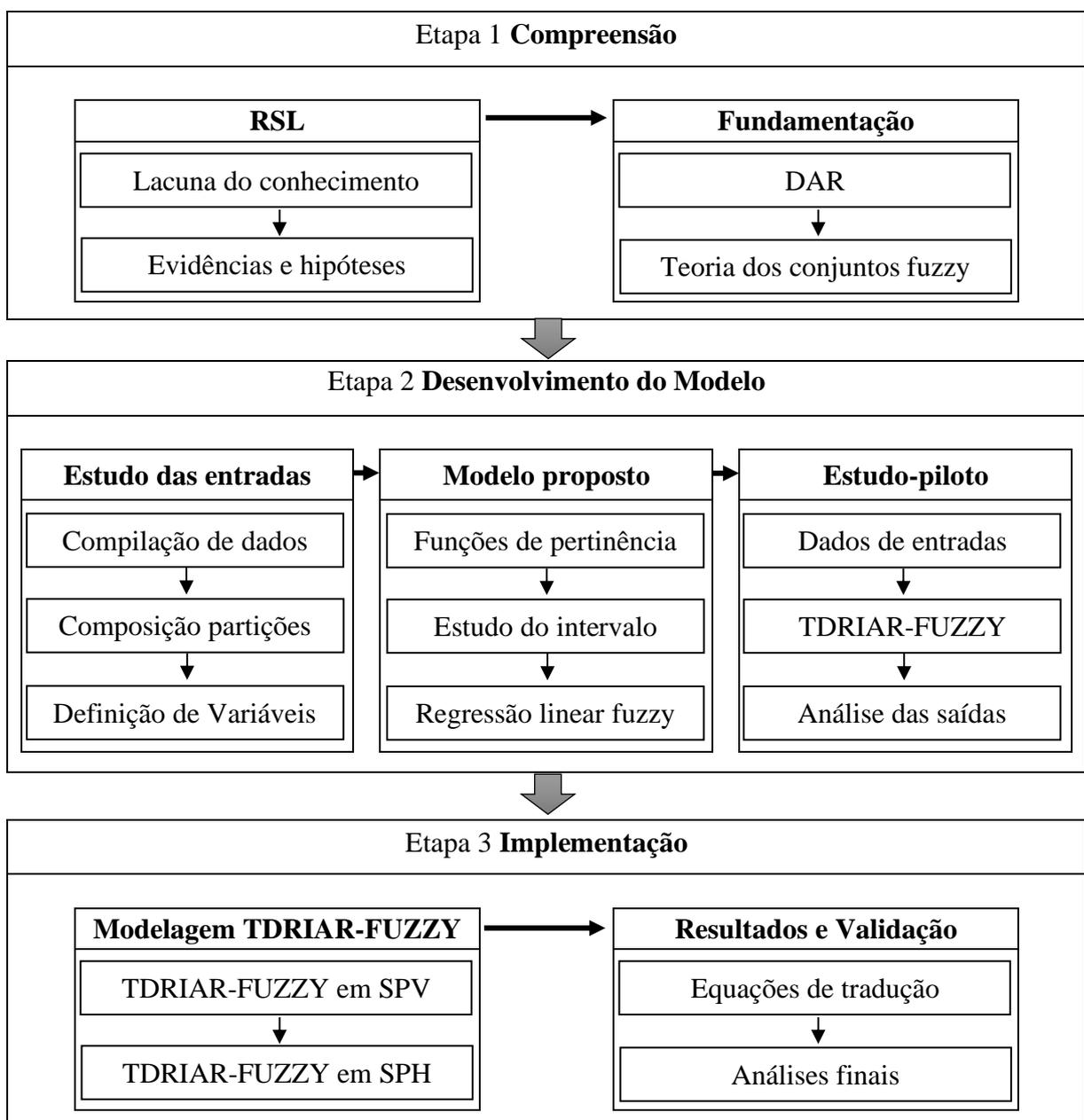
Esta etapa correspondeu a aquisição de conhecimento a respeito do escopo do estudo, requisitos necessários para o desenvolvimento do modelo de solução proposto. Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, se enquadra como pesquisa bibliográfica. Como forma de implementar a pesquisa bibliográfica, foi utilizado a revisão sistemática da literatura (RSL).

**Revisão sistemática da literatura** - com relação as justificativas para a realização de uma RSL, Sauders *et al* 2012 *apud* Morandi e Camargo (2015) sugerem que todo projeto de pesquisa considere a RSL como etapa constituinte do método. Do ponto de vista do pesquisador, é importante que este esteja suficientemente informado do que foi pesquisado, como foi pesquisado, os resultados obtidos e o que não foi pesquisado (Morandi; Camargo, 2015). Neste sentido, a RSL se justifica, pois ela possibilita: (a) identificar, agregar e sintetizar as evidências acerca dos benefícios e limitações de um determinado assunto (Fabbri *et al.*, 2013; Kitchenham,

2004; Kitchenham *et al.*, 2009; Kitchenham; Charters, 2007); (b) identificar eventuais lacunas do conhecimento do assunto, a fim de sugerir oportunidades de pesquisa (Kitchenham, 2004; Kitchenham; Charters, 2007; Morandi; Camargo, 2015); (c) fornecer uma base conceitual (Kitchenham, 2004; Morandi; Camargo, 2015). Neste sentido, a RSL foi realizada com as finalidades de levantamento de lacuna do conhecimento, e de levantamento de fontes de evidências e hipóteses.

A Figura 4.1 sintetiza o delineamento da pesquisa.

Figura 4.1 Delineamento da pesquisa



Fonte: Autor

**Fundamentação** - ainda se tratando de aquisição de conhecimento por parte do pesquisador, realizou-se uma revisão de literatura, a fim de entender o domínio de aplicação conceitual do assunto - desempenho acústico na edificação. Para tal foi dedicado o capítulo 2. Da mesma, foi revisado o assunto – Conjuntos Fuzzy, buscando compreender seu domínio de aplicação conceitual. Este assunto foi tratado no capítulo 3. As respectivas revisões foram realizadas com base em consultas em publicações de periódicos, artigos de congressos, livros, teses, dissertações, notas de aulas e normas técnicas.

#### 4.3.2 Etapa 2 – Desenvolvimento do Modelo

Uma vez ciente da lacuna do conhecimento que envolve a avaliação acústica de edificações residenciais, bem como o domínio da teoria que embasam o modelo proposto de solução, é imperativo a elaboração de um modelo conceitual capaz de abstrair o problema estudado. Neste sentido, o desenvolvimento do modelo de tradução de descritores e requisitos de isolamento acústico em edificações residenciais com base na teoria dos conjuntos fuzzy, doravante TDRIAR-FUZZY, considera as seguintes subetapas: modelagem fuzzy; mapeamento das equações de tradução e testes finais do modelo.

**Estudo das entradas** - em termos de método científico, essa subetapa diz respeito a população e amostra. A população é o conjunto de elementos que apresentam características em comum, no caso desta pesquisa, a população assume as características comuns entre as partições, tais como: tipo de tijolo; espessura do revestimento; etc. Os elementos (partição e salas adjacentes) são as unidades de análise. A população é finita, quando esta possuir um número fixo de elementos ou observações e infinita quando esta possuir uma quantidade infinita de elementos ou ainda quando possui uma população finita com número significativo de elementos. A amostra, por sua vez, é a parte da população em estudo.

Sendo assim, a população e amostra diz respeito ao levantamento de todos os dados e informações, que porventura, servem de dados de entrada para o modelo. Como trata-se de um modelo de regressão linear fuzzy, foi necessário a definição das variáveis independentes e dependentes. Assim, as atividades desenvolvidas foram: compilação de dados; composição de partições e cálculos; definição das variáveis.

Compilação de dados – foi aplicado a pesquisa bibliográfica como meio de levantamento de dados pertinentes. Sendo assim, foi realizada uma compilação de dados de

características físicas e geométricas das amostras envolvendo isolamento acústico aéreo (IAA) e isolamento acústico de impacto (IAI). Em mais detalhes é discutido no item 4.1.7.

Composição de partições – foram realizadas composições de amostras de acordo seus caracteres. Para uma partição ser admitida na composição, foi observada a similaridade das características físicas e geométricas dos componentes (componente constituído de mesmo material e mesmas dimensões de altura, comprimento e largura); a similaridade das características físicas e geométricas do elemento de partição (revestimento com mesmo material constituinte e mesma espessura de revestimento); as características geométricas da partição (área); as características geométricas (volume) da sala receptora que compõem o sistema de vedação. Para IAA, foi levantada a diferença de nível padronizado  $D_{nT}$  dentro da banda de frequência de um terço de oitava. E para IAI, foi levantado o nível de pressão sonora de impacto padronizado  $L'_{nT}$ , também entro da banda de frequência de um terço de oitava. Por fim, as composições para IAA e IAI, foram denominadas, respectivamente, de composição do elemento de partição vertical (EPV) e elemento de partição horizontal (EPH).

Definição de variáveis – diz respeito a definição das variáveis de entrada do modelo. Deste modo, definiu-se a quais as variáveis independentes  $X$ , tanto para IAA, quanto para o IAI. Assim, para IAA, as variáveis  $X$ :  $D_{nT,w}$ ,  $D_{nT,A100}(= D_{nT,w} + C)$  e  $D_{nT,Atr}(= D_{nT,w} + C_{tr})$ , conforme Dunbavin e Gerretsen (2014). E para IAI, as variáveis  $X$ :  $L'_{nT,w}$  e  $L'_{nT,A100}(= L'_{nT,w} + C_I)$ . De forma análoga, para as variáveis dependentes  $Y$  foram definidas  $D_{nT,50}$ , para IAA e  $L'_{nT,50}$ , para IAI. Quanto à definição do range, este foi somente para variáveis independentes. Sua determinação teve por base o estudo da incerteza expandida, considerando o fator de abrangência e mais a incerteza padrão para valores de número único, tanto para IAA, quanto para IAI.

**Modelo proposto** - este subtópico trata da proposição do modelo TDRIAR-FUZZY. Como o referido modelo é um fuzzificador de números fuzzy triangulares, então a sua elaboração foi estruturada em: formulação das funções de pertinência; estudo do intervalo; regressão linear fuzzy.

Funções de pertinência – esta foi dedicada a transformação dos conjuntos crisp (escalar) em conjuntos fuzzy. O resultado foi a determinação das funções de pertinência, o que permitiu a observação dos graus de pertinência dos conjuntos fuzzy que constiuem as variáveis independentes.

Estudo do intervalo – esse teve por objetivo definir os intervalos constituintes das funções de pertinência. Para o estudo do intervalo, os conjuntos fuzzy foram transformados em números fuzzy via  $\alpha$ -cortes. Para assegurar tal transformação, foi realizada, preliminarmente, os testes de normalidade e convexidade. A representação dos  $\alpha$ -cortes permitiu o uso de propriedades de operações aritméticas. A definição do intervalo foi mediante o conceito de intervalo e valor esperado Dubois e Prade (1987). Nesta etapa, assumiu-se a hipótese dos números fuzzy triangulares para modelagem do intervalo fechado.

Regressão linear fuzzy – foi aplicado o modelo de regressão linear fuzzy, proposto por Tanaka, Uejima & Asai (1982), com a finalidade de minimizar (otimizar) o espalhamento dos coeficientes fuzzy. A minimização foi estudada em um problema de programação linear, no qual foi experimentado pelo método Simplex dentro do solver do Microsoft Excel®. A programação incluiu a elaboração de uma função objetivo (equação) e mais as restrições (inequações).

**Estudo piloto** - fez-se um estudo prático com uma partição da composição do EPV, envolvendo a tradução de  $D_{nT,w}$  para  $D_{nT,50}$ . O estudo piloto teve por objetivo avaliar as saídas do modelo.

Modelagem dos dados de entrada – procedeu-se com os cálculos dos descritores definidos para variáveis independentes  $X$ .

Aplicação do TDRIAR-FUZZY – diz respeito a aplicação, propriamente dita, do modelo TDRIAR-FUZZY. Na oportunidade, foram aplicadas as nove notações. A aplicação finalizou com a programação linear.

Análise das saídas - esta consistiu na conversão de equações lineares fuzzy em equações lineares escalares (crisp). Isto foi estudado pela igualdade, no qual indica que os  $\alpha$ -cortes do conjunto fuzzy obtido através do Princípio da Extensão de Zadeh, da função  $f(x)$  em um determinado conjunto fuzzy, coincidem com as imagens da referida função.

#### 4.3.3 Etapa 3 – Implementação

Esta etapa consistiu na aplicação do modelo TDRIAR-FUZZY. Sendo assim, procedeu-se com o estudo da amostra, o que contempla a formação de grupos de EVVI e EVH,

coleta e tratamento de dados. As saídas do tratamento de dados servem como entrada para o modelo TDRIAR-FUZZY. Por fim, a implementação considera o plano amostral.

**Modelagem TDRIAR-FUZZY** - a modelagem consiste no uso dos dados e informações resultantes do tratamento de dados, e aplicação destes como dados de entrada no modelo TDRIAR-FUZZY. É recomendável iniciar a modelagem de maneira simples, com crescentes níveis de detalhes, à medida que, se procede o seu desenvolvimento até o alcance da plenitude da modelagem e, conseqüentemente, dos resultados. Sendo assim, tem-se as seguintes modelagens:

TDRIAR-FUZZY em EPV – tratou-se das aplicações do TDRIAR-FUZZY nas composições SPV.

TDRIAR-FUZZY em EPH – tratou-se das aplicações do TDRIAR-FUZZY nas composições SPH.

**Resultados e Validação** - Consiste na apresentação das equações de tradução e mais o estudo de validação. Para validação, foi aplicado o teste de linearidade, que envolveu o estudo do coeficiente de determinação e o coeficiente de correlação. Esta prática foi observada nos trabalhos correlatos de Dunbavin e Gerretsen (2014), Scholl, Wang e Wittstock (2011) e Monteiro *et al.* (2017).

Equações de tradução – com a aplicação do TDRIAR-FUZZY, o resultado (saída do modelo) consiste em uma equação linear.

Análises finais – trata-se da validação da pesquisa e reflexões a partir: da comparação dos resultados com os publicados na literatura especializada; do atestado do cumprimento dos objetivos; da documentação das contribuições do método; do encaminhamento de diretrizes para uso do modelo.

Este capítulo foi dedicado à exposição e fundamentação do método adotado nesta pesquisa, visando assegurar sua adequação com os preceitos do método científico.

## 5. DESENVOLVIMENTO DO MODELO

Neste capítulo é discutido o desenvolvimento do modelo em 3 subitens: compilação de dados e composição dos elementos amostrais; proposição do modelo e; estudo piloto.

### 5.1 Compilação de Dados e Composição de Elementos Amostrais

Este subitem se enquadra dentro do conceito de método científico em pesquisa bibliográfica. Neste sentido, fez-se uma compilação de dados de trabalhos científicos no que tange ao desempenho acústico em edificações residenciais no Brasil, seguímento em isolamento acústico aéreo e isolamento acústico de impacto. Tais trabalhos são teses e dissertações oriundas de programas de pós-graduação nacionais, além de artigos de periódicos. Em situações específicas, também foi selecionado trabalhos de conclusão de curso de graduação.

#### 5.1.1 Compilação de dados e Composição do Elemento de Partição de Isolamento Acústico Aéreo

A dissertação de Souza (2016) intitulada “avaliação dos sistemas construtivos usuais quanto aos requisitos acústicos segundo a Norma ABNT NBR 15575 – desempenho das edificações” e apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção civil da Universidade Federal do Ceará, foram compiladas cinco amostras (partições distintas), considerando as características físicas e geométricas tanto do componente, quanto do elemento de partição.

Originalmente, as amostras denominadas de II-B e IV-B, são paredes constituídas de bloco cerâmico de 9 cm e revestida em gesso com 1 cm de espessura em ambas as faces, o que resulta em uma espessura final de 11 cm. A amostra VII-B, se diferencia pela espessura do revestimento, 2 cm, resultando em uma espessura final de 13 cm. A partição III-B é constituída por um componente cerâmico de 10 cm de largura, revestido com uma camada de argamassa de 2,5 cm em cada face. Isso resulta em uma espessura final de 15 cm. Por outro lado, a partição VI-B é revestida com uma camada de gesso de 1 cm em cada face, alcançando uma espessura final de 12 cm. O quadro 5.1 concentra tais informações.

Quadro 5.1 – Compilação de dados de elementos de partição vertical baseados em Souza (2016)

Partição	Caracteres
II-B	Componente: tijolo cerâmico 9 cm de largura, com assentamento do tijolo no modo cutelo; Elemento de partição: material utilizado para revestimento: gesso; espessura do revestimento em cada face: 1 cm; espessura final do elemento de partição (cm): 11 cm
III-B	Componente: tijolo cerâmico 10 cm de largura, com assentamento do tijolo no modo cutelo; Elemento de partição: material utilizado para revestimento: argamassa; espessura do revestimento em cada face: 2,5 cm; espessura final do elemento de partição (cm): 15 cm
IV-B	Componente: tijolo cerâmico 9 cm de largura, com assentamento do tijolo no modo cutelo; Elemento de partição: material utilizado para revestimento: gesso; espessura do revestimento em cada face: 1 cm; espessura final do elemento de partição (cm): 11 cm
VI-B	Componente: tijolo cerâmico 10 cm de largura, com assentamento do tijolo no modo cutelo; Elemento de partição: material utilizado para revestimento: gesso; espessura do revestimento em cada face: 1 cm; espessura final do elemento de partição (cm): 12 cm
VII-B	Componente: tijolo cerâmico 9 cm de largura, com assentamento do tijolo no modo cutelo; Elemento de partição: material utilizado para revestimento: placa de gesso; espessura do revestimento em cada face: 2 cm; espessura final do elemento de partição (cm): 13 cm

Fonte: Souza (2016)

A amostra originalmente denominada VVI-2, foi compilada da dissertação de Santana (2016), intitulado “desempenho acústico das edificações segundo a NBR 15575 (2013): desempenho das vedações e validação dos requisitos normativos com base na opinião dos usuários”. A VVI-2 é composta por tijolos cerâmicos de 9 cm de largura, revestidos em argamassa de 2 cm em cada face, resultando em uma espessura total de 13 cm (ver quadro 5.2).

Quadro 5.2 – Compilação de dados de elementos de partição vertical baseados em Santana (2016)

Partição	Caracteres
VVI-2	Componente: tijolo cerâmico 9 cm de largura, com assentamento do tijolo no modo cutelo; Elemento de partição: material utilizado para revestimento: argamassa; espessura do revestimento em cada face: 2 cm; espessura final do elemento de partição (cm): 13 cm

Fonte: Santana (2016)

No quadro 4.3, têm-se as amostras originalmente identificadas por LP4 e LP6, estas foram compiladas da dissertação de Heissler (2018), intitulada “análise comparativa do isolamento acústico em diferentes geometrias: ensaios em campo e simulações computacionais” e apresentada ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Ambas as partições compartilham características semelhantes. Seus elementos constituintes consistem em tijolos cerâmicos de 19 cm de largura,

com revestimento de argamassa de 1 cm em cada face. Assim, a espessura final do elemento de partição é de 21 cm (ver quadro 5.3).

Quadro 5.3 – Compilação de dados de elementos de partição vertical baseados em Heissler (2018)

Partição	Caracteres
LP-4	Componente: tijolo cerâmico 19 cm de largura, com assentamento do tijolo no modo cutelo; Elemento de partição: material utilizado para revestimento: argamassa; espessura do revestimento em cada face: 1 cm; espessura final do elemento de partição (cm): 21 cm
LP-6	Componente: tijolo cerâmico 19 cm de largura, com assentamento do tijolo no modo cutelo; Elemento de partição: material utilizado para revestimento: argamassa; espessura do revestimento em cada face: 1 cm; espessura final do elemento de partição (cm): 21 cm

Fonte: Heissler (2018)

Pinto (2011) é autor da dissertação “determinação experimental e numérica da redução sonora aérea em paredes de alvenaria utilizadas em habitações” e apresentada no Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria. Desta dissertação foram compilados 5 elementos de partições, conforme o quadro 5.4. Todas as partições são compostas por tijolo cerâmico estrutural de 14x19x29 cm e revestidas em argamassa com espessura de 1,5 cm em cada face, totalizando a parede acabada em 17cm.

Quadro 5.4 – Compilação de dados de elementos de partição vertical baseados em Pinto (2011)

Partição	Caracteres
PAE17/8B	Componente: tijolo cerâmico estrutural 14 cm de largura, com assentamento do tijolo no modo cutelo; Elemento de partição: material utilizado para revestimento: argamassa; espessura do revestimento em cada face: 1,5 cm; espessura final do elemento de partição (cm): 17 cm
PAE17/10B	Componente: tijolo cerâmico estrutural 14 cm de largura, com assentamento do tijolo no modo cutelo; Elemento de partição: material utilizado para revestimento: argamassa; espessura do revestimento em cada face: 1,5 cm; espessura final do elemento de partição (cm): 17 cm
PAE17/10C1	Componente: tijolo cerâmico estrutural 14 cm de largura, com assentamento do tijolo no modo cutelo; Elemento de partição: material utilizado para revestimento: argamassa; espessura do revestimento em cada face: 1,5 cm; espessura final do elemento de partição (cm): 17 cm
PAE17/10C2	Componente: tijolo cerâmico estrutural 14 cm de largura, com assentamento do tijolo no modo cutelo; Elemento de partição: material utilizado para revestimento: argamassa; espessura do revestimento em cada face: 1,5 cm; espessura final do elemento de partição (cm): 17 cm
PAE17/10C3	Componente: tijolo cerâmico estrutural 14 cm de largura, com assentamento do tijolo no modo cutelo; Elemento de partição: material utilizado para revestimento: argamassa; espessura do revestimento em cada face: 1,5 cm; espessura final do elemento de partição (cm): 17 cm

Fonte: Pinto (2011)

Kuhn (2015), por sua vez, em seu trabalho de conclusão de curso de Engenharia Civil pelo Centro Universitário Univates, intitulada “análise do desempenho acústico de edificação habitacional de âmbito social conforme a nbr 15.575”. Esse trabalho teve apoio técnico do Instituto Tecnológico em Desempenho da Construção Civil (*itt Performance*). As amostras de Kuhn (2015) apresentaram caracteres semelhantes as observadas em Pinto (2011); ou seja, o componente tijolo cerâmico estrutural com 14 cm de largura, revestimento em argamassa com espessura de 1,5 cm em cada face, parede com espessura final de 17cm (quadro 5.5).

Quadro 5.5 – Compilação de dados de elementos de partição vertical baseados em Kuhn (2015)

Partição	Caracteres
Kuhn 1	Componente: tijolo cerâmico estrutural 14 cm de largura, com assentamento do tijolo no modo cutelo; Elemento de partição: material utilizado para revestimento: argamassa; espessura do revestimento em cada face: 1,5 cm; espessura final do elemento de partição (cm): 17 cm
Kuhn 2	Componente: tijolo cerâmico estrutural 14 cm de largura, com assentamento do tijolo no modo cutelo; Elemento de partição: material utilizado para revestimento: argamassa; espessura do revestimento em cada face: 1,5 cm; espessura final do elemento de partição (cm): 17 cm

Fonte: Kuhn (2015)

A tabela 5.1 exhibe os valores compilados de  $D_{nT}$  dentro da faixa de frequência de 100 a 3.150 Hz dentro da banda de um terço de oitava. Esses dados resultam de ensaios de campo realizados por meio do método da engenharia, seguindo os princípios estabelecidos pelas normas ISO 16283 (2014) e ISO 16032 (2004). Para cada partição, foram compiladas informações sobre a área da partição e o volume da sala receptora adjacente. Essa é uma parte complementar a compilação de dados, segundo os autores relacionados.

Tabela 5.1 – Composição do elemento de partição vertical – EPV

Frequência de um terço de oitava (Hz)	II-B	III-B	IV-B	VI-B	VII-B	VVI2	LP4	LP6	PAE17/ 8B	PAE17 /10B	PAE17/ 10C1	PAE17/ 10C2	PAE17 /10C3	Kuhn 1	Kuhn 2
100	28,80	32,70	38,10	28,20	20,20	28,80	37,8	35,2	18,3	23,7	31,5	32,20	31,6	36,55	36,20
125	36,90	31,90	32,20	40,40	21,90	37,50	50,9	41,0	30,7	28,8	26,4	29,90	36,9	43,68	35,94
160	42,00	33,20	31,30	37,90	25,90	38,00	43,6	33,6	33,8	34,5	33,1	30,80	37,9	41,11	27,69
200	37,80	37,50	34,80	35,70	32,10	38,00	45,3	37,7	34,8	37,8	33,1	32,40	36,2	41,55	39,22
250	37,80	37,50	36,10	36,20	33,30	39,40	42,1	39,4	31,9	36,8	33,8	36,10	36,9	37,12	33,01
315	34,30	34,10	36,40	35,70	40,70	40,10	41,7	37,2	34,0	35,4	29,6	32,90	37,6	36,63	35,38
400	35,10	37,00	37,60	34,60	43,30	38,60	44,0	37,0	34,9	38,0	30,6	34,10	38,3	36,64	35,84
500	37,40	38,70	36,70	35,40	44,50	40,60	47,2	40,2	38,2	38,9	33,9	35,70	40,3	38,13	37,47
630	37,50	37,70	39,70	36,60	45,90	42,80	48,5	43,3	39,1	40,5	34,5	38,30	41,2	40,21	37,92
800	39,90	36,10	41,40	38,90	49,80	44,30	50,1	45,0	40,0	42,3	34,0	40,40	43,0	42,50	38,58
1000	42,30	37,30	43,40	40,50	50,90	43,80	50,6	47,2	41,7	44,1	36,2	42,50	44,5	44,97	41,16
1250	45,00	41,90	45,40	42,90	51,60	45,50	51,4	49,7	43,4	46,1	39,4	44,70	46,5	46,72	43,80
1600	46,20	47,70	46,30	44,30	52,80	46,70	52,5	50,3	45,5	47,4	42,5	46,20	48,9	47,63	44,24
2000	48,30	49,70	46,80	43,70	51,70	45,60	52,4	49,5	45,1	47,5	41,4	46,70	49,1	47,51	43,77
2500	49,50	48,00	47,00	41,40	48,30	43,30	53,9	50,2	44,0	46,4	41,8	44,80	47,6	47,11	41,46
3150	51,20	47,10	45,90	39,00	48,70	39,50	54,0	50,3	42,1	45,2	42,1	43,50	45,7	45,46	37,52
Área de partição (m <sup>2</sup> )	9,50	16,05	10,94	18,03	12,74	-	9,80	14,30	9,50	9,50	7,55	11,13	11,13	10,97	7,95
Volume sala receptora (m <sup>3</sup> )	24,00	41,73	32,30	50,48	35,67	-	45,70	53,20	53,10	53,10	21,28	39,22	63,76	65,66	27,3

Fonte: Autores relacionados

### 5.1.2 Compilação de dados e Composição do Elemento de Partição para Isolamento Acústico de Impacto

No estudo conduzido por Souza (2016), foram compiladas informações referentes a quatro partições horizontais. Todas elas são compostas por lajes nervuradas, sendo que as partições IV-C, VIII-C e X-C apresentam a mesma espessura de 21 cm, incluindo a espessura da mesa de 4 cm. A exceção é a partição III-C, que possui uma espessura de 19 cm. No que diz respeito à face exterior, a maioria das partições conta com revestimento em porcelanato e contrapiso de 5 cm, exceto a X-C, que possui revestimento em cerâmica. Todas as partições apresentam uma face interior com forro em gesso acartonado. Quanto à espessura final, todas as partições alcançam uma espessura total de 31 cm (ver quadro 5.6).

Quadro 5.6 – Compilação de dados de elementos de partição horizontal baseados em Souza (2016)

Partição	Caracteres
III-C	Componente: laje nervurada de 19 cm de largura mais a mesa de 6 cm; Elemento de partição: face exterior: porcelanato de 1 cm e mais contrapiso de 5 cm (face exterior); face interior: forro de gesso acartonado; espessura final do elemento de partição (cm): 31 cm
IV-C	Componente: laje nervurada de 21 cm de largura mais a mesa de 4 cm; Elemento de partição: face exterior: porcelanato de 1 cm e mais contrapiso de 5 cm (face exterior); face interior: forro de gesso acartonado; espessura final do elemento de partição (cm): 31 cm
VIII-C	Componente: laje nervurada de 21 cm de largura mais a mesa de 4 cm; Elemento de partição: face exterior: porcelanato de 1 cm e mais contrapiso de 5 cm (face exterior); face interior: forro de gesso acartonado; espessura final do elemento de partição (cm): 31 cm
X-C	Componente: laje nervurada de 21 cm de largura mais a mesa de 4 cm; Elemento de partição: face exterior: cerâmica de 1 cm e mais contrapiso de 5 cm (face exterior); face interior: forro de gesso acartonado; espessura final do elemento de partição (cm): 31 cm

Fonte: Souza (2016)

De Santana (2016) foi compilada a partição VH-1. A referida partição é em laje nervurada com 25 cm de espessura. A face exterior dispõe de 1 cm de revestimento cerâmico mais 5 cm de contrapiso. A espessura total é de 31 cm, conforme é observado no quadro 5.7.

Quadro 5.7 – Compilação de dados de elementos de partição horizontal baseados em Santana (2016)

Partição	Caracteres
VH-1	Componente: laje nervurada de 25 cm de espessura; Elemento de partição: face exterior: cerâmica de 1 cm e mais contrapiso de 5 cm (face exterior); face interior: não informado; espessura final do elemento de partição (cm): 31 cm

Fonte: Santana (2016)

Para a amostra de IAI, foi explorado a dissertação de mestrado de Cornacchia (2009), intitulada “Investigação in-situ do isolamento sonoro ao ruído de impacto em edifícios residenciais”, pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal de Santa Catarina. Deste trabalho foram compiladas 6 partições, conforme o quadro 5.8.

Quadro 5.8 – Compilação de dados de elementos de partição vertical baseados em Cornacchia (2009)

Partição	Caracteres
NV-1	Componente: laje nervurada de 24 cm de espessura; Elemento de partição: face exterior: cerâmico; face interior: não informado; espessura final do elemento de partição (cm): 32 cm
NV-5	Componente: laje nervurada de 22 cm de espessura; Elemento de partição: face exterior: contrapiso; face interior: não informado; espessura final do elemento de partição (cm): 30 cm
NV-8	Componente: laje nervurada de 25 cm de espessura; Elemento de partição: face exterior: contrapiso; face interior: não informado; espessura final do elemento de partição (cm): 35 cm
NV-9	Componente: laje nervurada de 25 cm de espessura; Elemento de partição: face exterior: cerâmico; face interior: não informado; espessura final do elemento de partição (cm): 33 cm
NV-11	Componente: laje nervurada de 24 cm de espessura; Elemento de partição: face exterior: cerâmico; face interior: não informado; espessura final do elemento de partição (cm): 32 cm
NV-14	Componente: laje nervurada de 25 cm de espessura; Elemento de partição: face exterior: contrapiso; face interior: não informado; espessura final do elemento de partição (cm): 35 cm

Fonte: Cornacchia (2009)

Todas as partições são constituídas por lajes nervuradas, com NV-8, NV-9 e NV-14 apresentando a mesma espessura de laje de 25 cm. NV-1 possui 24 cm de espessura, NV-5 tem 22 cm, e NV-11 possui 24 cm de espessura de laje. A face exterior de NV-1, NV-9 e NV-11 é revestida com cerâmica, enquanto as demais possuem contrapiso. Quanto à espessura final do elemento de partição, NV-1 e NV-11 têm 32 cm, NV-8 e NV-14 têm 35 cm, NV-5 tem 30 cm e NV-9 tem 33 cm.

A tabela 5.2 apresenta os valores compilados de  $L'_{nT}$  dentro da faixa de frequência de 100 a 3.150 Hz dentro da banda de um terço de oitava, assim como a área do elemento de partição horizontal e volume da sala receptora.

Tabela 5.2 – Composição do elemento de partição horizontal – EPH

Frequência de um terço de oitava (Hz)	III-C	IV-C	VIII-C	X-C	VH1	NV-1	NV-5	NV-8	NV-9	NV-11	NV-14
100	56,1	53,9	45,1	44,3	56,6	44,90	49,30	59,00	61,80	53,30	46,00
125	52,3	54,7	45,9	48,6	64,0	56,70	59,60	56,80	67,70	59,50	56,90
160	61,3	57,9	46,9	54,9	60,6	60,80	62,60	59,60	66,00	61,70	58,00
200	61,0	60,1	41,9	54,3	63,0	61,60	62,90	59,40	64,70	61,70	58,10
250	61,3	60,6	43,8	57,5	64,0	62,20	68,50	59,40	65,50	64,60	60,70
315	63,7	62,7	45,9	58,4	72,6	62,00	69,60	62,80	68,40	66,20	63,70
400	63,8	64,8	45,4	61,2	73,3	63,40	69,80	66,10	70,70	66,30	66,70
500	64,9	65,1	46,7	62,5	71,1	64,20	71,00	66,10	68,70	67,90	69,50
630	65,0	64,2	46,0	62,7	69,5	65,00	73,00	66,70	71,30	69,70	68,00
800	65,8	64,1	44,4	63,5	68,7	65,70	73,00	68,20	71,20	73,40	69,40
1000	66,8	64,9	44,9	63,9	69,9	67,90	71,80	68,20	71,20	71,80	67,80
1250	67,5	66,0	45,8	63,6	71,1	69,80	73,20	68,20	72,90	75,30	66,80
1600	67,4	66,7	45,0	64,2	71,8	73,40	74,40	69,40	73,60	78,30	66,60
2000	68,6	68,4	46,6	63,9	71,4	75,60	76,50	73,30	74,30	79,80	67,20
2500	70,9	71,7	47,0	66,6	71,3	76,80	75,50	76,70	74,90	78,40	67,80
3150	71,9	72,5	48,3	68,5	71,6	76,10	73,10	76,60	75,40	79,30	67,70
Área de partição (m <sup>2</sup> )	11,48	18,92	4,40	12,37	-	-	-	-	-	-	-
Volume sala receptora (m <sup>3</sup> )	30,00	53,00	10,60	29,60	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autores relacionados

## 5.2 Modelo Proposto

O TDRIAR-FUZZY foi desenvolvido e com propósito de minimizar a imprecisão do modelo de tradução, por meio da minimização dos coeficientes de dispersão. Tais coeficientes são assumidos como números fuzzy triangulares, conforme Tanaka, Uejima & Asai (1982).

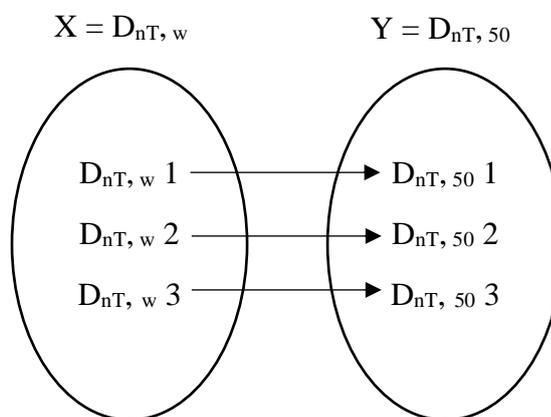
A adoção da TCF nesta tese considerou o pressuposto teórico, em que uma entrada específica constituída de intervalo de valores, produz uma determinada saída constituída de intervalo de valores possíveis. Sendo assim, admitiu-se que a condição de imprecisão de modelos de TDRIAR pode ser analisada através de um intervalo fuzzy, sendo que um número dentro desse intervalo possui maior possibilidade de ocorrência (máxima pertinência), do que os demais números.

Para o referido pressuposto teórico, fez-se as seguintes considerações para o TDRIAR-FUZZY:

- o par ordenado crisp  $(X, Y)$  tem uma relação de dependência linear fuzzy (mudanças na variável independente  $X$  afetam a variável dependente  $Y$ ). Os descritores ponderados assumem a variável  $X$  independente. Os descritores ponderados em baixa frequência assumem a variável  $Y$  dependente. Sendo assim, ao conhecer alguns valores específicos  $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_k, Y_k)$ , pode-se estimar  $(X, Y)$ .
- as funções de pertinência de conjuntos contínuos são assumidas como variáveis contínuas. Então foi admitida a função de pertinência triangular, no caso de conjuntos contínuos, a reta é representada pela própria função de pertinência. Assume a forma de função linear por partes. O pressuposto considera que o " $b$ " da função assume o valor com a máxima pertinência ( $Sup_x = 1$  dentro da faixa de frequência de 500Hz) e os espalhamentos  $b - a$  e  $b - c$  são admitidos como simétricos.
- ao considerar que cada conjunto é unicamente definido por uma determinada função de pertinência. Tal equação é uma função injetora, esta é adequada para os conjuntos caracterizados, onde cada elemento do conjunto domínio  $X$ , possui uma imagem exclusiva dele no conjunto contradomínio  $Y$ . Portanto, o conjunto

A qualquer é um conjunto fuzzy com suporte enumerável ou finito:  $A = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ . A Figura 5.1 faz a ilustração.

Figura 5.1 - Esquemática de função injetora dos conjuntos crisp



Fonte: Autor

Dado o pressuposto teórico, o modelo TDRIAR-FUZZY buscou fuzzificar dados do problema (inerentes crisp), por meio de 9 (nove) notações. As denotações de 1 a 5, são dedicadas a transformação dos dados (escalar) crisp em conjuntos fuzzy. E as notações de 6 a 8 concentraram-se na transformação de conjuntos fuzzy em números fuzzy. A nona notação é dedicada a otimização linear fuzzy.

- Notação 1 - todos os conjuntos fuzzy apresentados são subconjuntos dos números reais.
- Notação 2 - o conjunto fuzzy recebe a denotação *descriptor* (a palavra descriptor, significando que a própria terminologia do descriptor acústico estudado será o conjunto fuzzy, logo:  $descriptor = \{x, \mu_{descriptor}(x)\}, x \in X$ .
- Notação 3 -  $\mu_{descriptor}(x) \in [0,1]$  é a função de pertinência do *descriptor* estimado para um número real  $x$ .
- Notação 4 - para a função de pertinência triangular  $\mu_{descriptor}(x; a, b, c) \in [0,1]$ , onde  $\mu_{descriptor}(a) = \mu_{descriptor}(c) = 0$  e  $\mu_{descriptor}(b) = 1$ .

O estudo da variável independente demanda estudos de operações entre conjuntos no mesmo universo de discurso. Para isso, tem-se a *norma - t* (Equação 3.10), cuja denotação é:

- Notação 5 – para as operações entre conjuntos no mesmo universo de discurso  $X$ , tem-se a *norma - t*:  $\mu_{descriptor}(x) = \mu_{descriptor}(a) \wedge \mu_{descriptor}(b)$  para  $X \in [a, b]$ .

Considere um exemplo cuja variável independente  $X$  de tradução dos procedimentos de ponderação é admitida como conjunto crisp  $X$ , e neste exemplo assume o descriptor  $D_{nT,w}$ . O valor de  $D_{nT,w}$  é de 39 dB. Admite-se também uma incerteza espandida para  $D_{nT,w}$ , resultando em um espalhamento no valor de 3 dB.

Para a notação 2, tem-se seguinte definição para o exemplo. O conjunto fuzzy  $A$  qualquer  $D_{nT,wA} = \{39, \mu_{DnT,wA}(39)\}, x \in X$ . Na prática, o valor crisp de  $D_{nT,w} = 39dB$ , é transformado em  $D_{nT,w}$  “próximo de 39dB”.

Para a notação 3, tem-se:  $\mu_{DnT,wA}(39) \in [0,1]$ .

Para a notação 4, é considerado o valor modal denotado por  $D_{nT,wA}$  no valor de 39 dB, o espalhamento (*range*) no valor de 3 dB, cuja função de pertinência é denotada por  $\mu_{DnT,wA}$ . Aplicando a diferença entre o valor modal e o espalhamento ( $= 39 - 3 = 36dB$ ), este valor obtido assume o vértice "a" e grau de pertinência  $\mu_{DnT,wA}(36) = 0$ ; o valor modal de 39dB dentro da faixa de frequência de 500 Hz, constitui o vértice "b" e com grau de pertinência  $\mu_{DnT,wA}(39) = 1$ . Com a soma entre o valor modal e o *range*, obtem-se o valor de 42dB, este assume o vértice "c", cujo grau de pertinência é  $\mu_{DnT,wA}(42) = 0$ .

Para a aplicação da notação 5, tem-se o cálculo das funções de pertinências (equação 4.1) associadas a partir da formulação das equações da reta pela esquerda e direita da função de pertinência triangular.

$$\mu_{DnT,wA}(x) = ax + b \text{ (Trecho à esquerda)}$$

$$0 = a * 36 + b \wedge 1 = a * 39 + b$$

$$b = 1 - 39 * a$$

$$36 * a + (1 - 39 * a) = 0$$

$$a = \frac{1}{3}$$

$$b = -\frac{36}{3}$$

$$\mu_{DnT,wA}(x) = ax + b \text{ (Trecho à direita)}$$

$$1 = a * 39 + b \wedge 0 = a * 42 + b$$

$$a = -\frac{1}{3}$$

$$b = \frac{42}{3}$$

Sendo assim, as funções de pertinências  $\mu_{DnT,w}(x)$  são:

$$\mu_{DnT,wA}(x) = \begin{cases} ax + b \text{ (esq)} \therefore \frac{1}{3}x + \left(-\frac{36}{3}\right) \therefore \frac{x - 36}{3}, 36 < x \leq 39dB \\ ax + b \text{ (dir)} \therefore -\frac{1}{3}x + \frac{42}{3} \therefore \frac{-x + 42}{3}, 39 < x \leq 42dB \end{cases} \quad (5.1)$$

Para definição dos intervalos constituintes das funções de pertinência, o modelo considera o conceito dos  $\alpha$ -cortes, onde sua representação impõe um limite do domínio do conjunto baseado no valor do  $\alpha$ . Sendo assim, os conjuntos resultantes contêm todos os elementos do domínio que possuem um grau de pertinência  $\mu_{(x)} \geq \alpha$ . Sendo, o modelo inclui a seguinte denotação:

- Notação 6 - os números fuzzy são denotados pelos  $\alpha$ -cortes:  $[descriptor]^\alpha = \{x \in U: \mu_{descriptor}(x) \geq \alpha\}$  para  $0 \leq \alpha \leq 1$ .

Para o estudo dos limites do domínio, o modelo considera o intervalo esperado e valor esperado Dubois e Prade (1987).

- Notação 7 – o intervalo esperado para determinado domínio é:  $IE(descriptor) = [IE^-(descriptor), IE^+(descriptor)], x \in R$ .
- Notação 8 – o valor esperado para determinado domínio é:  $VE(descriptor), x \in R$ .

Dando continuidade ao exemplo, a aplicação da notação 6 foi precedida do cálculo do intervalo de projeção pelos  $\alpha$ -cortes, considerando:

$$\alpha = \frac{x - a}{b - a} = \frac{x - 36}{3} \therefore x = 3 * \alpha + 36 \quad \text{(Trecho à esquerda)}$$

$$\alpha = \frac{c - b}{c - x} = \frac{-x + 42}{3} \therefore x = -3 * \alpha + 42 \quad \text{(Trecho à direita)}$$

Assim, com a aplicação da notação 6, tem-se:

$$[D_{nT,WA}]^\alpha = [3\alpha + 36, -3\alpha + 42] \quad (5.2)$$

Aplicando o intervalo de projeções, tem-se:

$$\begin{aligned} [D_{nT,WA}]^0 &= [3 * 0 + 36; -3 * 0 + 42] = [36, 42] \\ [D_{nT,WA}]^{0,1} &= [3 * 0,1 + 36; -3 * 0,1 + 42] = [36,3; 41,7] \\ [D_{nT,WA}]^{0,2} &= [3 * 0,2 + 36; -3 * 0,2 + 42] = [36,6; 41,4] \\ [D_{nT,WA}]^{0,3} &= [3 * 0,3 + 36; -3 * 0,3 + 42] = [36,9; 41,1] \\ [D_{nT,WA}]^{0,4} &= [3 * 0,4 + 36; -3 * 0,4 + 42] = [37,2; 40,8] \\ [D_{nT,WA}]^{0,5} &= [3 * 0,5 + 36; -3 * 0,5 + 42] = [37,5; 40,5] \\ [D_{nT,WA}]^{0,6} &= [3 * 0,6 + 36; -3 * 0,6 + 42] = [37,8; 40,2] \\ [D_{nT,WA}]^{0,7} &= [3 * 0,7 + 36; -3 * 0,7 + 42] = [38,1; 39,9] \\ [D_{nT,WA}]^{0,8} &= [3 * 0,8 + 36; -3 * 0,8 + 42] = [38,4; 39,6] \\ [D_{nT,WA}]^{0,9} &= [3 * 0,9 + 36; -3 * 0,9 + 42] = [38,7; 39,3] \\ [D_{nT,WA}]^1 &= [3 * 1 + 36; -3 * 1 + 42] = [39; 39] \end{aligned}$$

Aplicando as notações 7 e 8, obtiveram-se:

$$IE^-(D_{nT,WA}) = \int_0^1 a + (b - a) \alpha \, d\alpha = \frac{36 + 39}{2} = 37,5dB$$

$$IE^+(D_{nT,WA}) = \int_0^1 a + (b - a) \alpha \, d\alpha = \frac{39 + 42}{2} = 40,5dB$$

$$VE(D_{nT,WA}) = \frac{37,5 + 40,5}{2} = 39dB$$

O valor esperado  $VE(D_{nT,WA})$  confirmou a igualdade com o valor modal. E o intervalo esperado mostrou uma redução no domínio do intervalo, em relação ao intervalo inicial obtido no conjunto fuzzy. As resultantes indicam que o conjunto fuzzy  $D_{nT,WA}$ , cuja pertinência é  $(36; 39; 42)$ , foi convertido em um número fuzzy  $(37,5; 39; 40,5)$ . Esse número fuzzy permanece com valor modal de  $39dB$  e seu domínio pode ser observado em  $[D_{nT,WA}]^{0,5}$ .

Para a otimização linear fuzzy, o modelo assume que para o coeficiente de regressão linear fuzzy associado a variável  $x_i$ , possui função de pertinência triangular, o que possibilita a escrita de forma única para cada  $\tilde{A}$  por:  $\tilde{A} = (IE^-(A); VE(A); IE^+(A))$ , em que os parâmetros  $IE^-(A)$ ,  $VE(A)$ ,  $IE^+(A)$  representam  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , respectivamente.

Conforme observado no cálculo de  $VE(A)$  (valor modal) na notação 8, a função de pertinência triangular é simétrica, logo pode ser representada por  $(r, VE(A))$ , em que o espalhamento  $c_i$  é obtido por  $r = IE^+(A) - VE(A)$ . Portanto, tem-se a seguinte notação:

- Notação 9 – os coeficientes de regressão linear fuzzy é:  $\tilde{A} = (c_i, VE(descriptor))$ , em que:  $x \in R$ ;  $\tilde{A}$  é um número fuzzy;  $\tilde{y}$  é a imagem de  $x$  associada ao número fuzzy  $\tilde{A}$ .

A aplicação da notação 9, resulta em um  $c_i = 1,5$ . Como o descritor é um valor de número único e constituído de variável discreta, é recomendável o  $c_i = 2$ . Assim, pode-se definir os seguintes coeficientes de regressão linear fuzzy (equação 5.4) e; levando em consideração tais coeficientes fuzzy, pode escrever a equação 5.5, sendo uma formulação útil, pois retrata explicitamente o valor modal e os espalhamentos dos parâmetros difusos.

$$\tilde{A} = \{39,2\} = \{\tilde{A}: 39 - 2 \leq \tilde{A} \leq 39 + 2\} \quad (5.4)$$

$$Y = A_0 + \sum_{j=1}^n A_1 x_{ij} = (a_0, c_0) + \sum_{j=1}^n (a_j, c_j) x_{ij} \quad (5.5)$$

Para resolução da equação 5.5, nesta tese é explorada a programação linear, conforme Tanaka, Uejima & Asai (1982).

### 5.3 Estudo Piloto

Para realização do estudo piloto, utilizou-se o elemento de partição vertical II-B. Na aplicação do TDRIAR-FUZZY, teve-se o cuidado de mostrar os cálculos em seus detalhes, possibilitando ao leitor uma melhor abstração do modelo proposto.

#### 5.3.1 Modelagem dos Dados de Entrada em $X$

Neste subitem é dado enfoque para o cálculo da variável independente  $X$ , que servem de dados de entrada para o TDRIAR-FUZZY. A tabela 5.3 apresentam os cálculos dos descritores conforme as prescrições na NBR ISO 717-1: 2021. Os cálculos dos descritores dos demais elementos de partição vertical (Tabela 5.1) são apresentados no Apêndice B. Assim como, dos descritores dos elementos de partição horizontal (Tabela 5.2), no Apêndice C.

Tabela 5.3 – Cálculo de  $D_{nT,w}$ ,  $D_{nT,A100} = (D_{nT,w} + C)$  e  $D_{nT,Atr100} = (D_{nT,w} + C_{tr})$ 

Frequência de um terço de oitava (Hz)	$D_{nT} *$	$D_{nT} **$	Valores de Referência (Hz)	Curva ajustada $D_{nT,w}$	Diferenças (+)	Espectro n°1	$L_{i1} - D_{nT}$	$10^{(L_{i1}-D_{nT})/10}$	Espectro n°2	$L_{i1} - D_{nT}$	$10^{(L_{i1}-D_{nT})/10}$
100	28,80	28,86	33,0	23,0	-5,86	-29,00	-57,86	1,63759E-06	-20,00	-48,86	1,30078E-05
125	36,90	36,96	36,0	26,0	-10,96	-26,00	-62,96	5,06062E-07	-20,00	-56,96	2,01467E-06
160	42,00	42,06	39,0	29,0	-13,06	-23,00	-65,06	3,12036E-07	-18,00	-60,06	9,86743E-07
200	37,80	37,86	42,0	32,0	-5,86	-21,00	-58,86	1,30078E-06	-16,00	-53,86	4,11343E-06
250	37,80	37,86	45,0	35,0	-2,86	-19,00	-56,86	2,0616E-06	-15,00	-52,86	5,1785E-06
315	34,30	34,36	48,0	38,0	3,64	-17,00	-51,36	7,31483E-06	-14,00	-48,36	1,4595E-05
400	35,10	35,16	51,0	41,0	5,84	-15,00	-50,16	9,64282E-06	-13,00	-48,16	1,52828E-05
500	37,40	37,46	52,0	<b>42,0</b>	4,54	-13,00	-50,46	8,9992E-06	-12,00	-49,46	1,13293E-05
630	37,50	37,56	53,0	43,0	5,44	-12,00	-49,56	1,10714E-05	-11,00	-48,56	1,39381E-05
800	39,90	39,96	54,0	44,0	4,04	-11,00	-50,96	8,02055E-06	-9,00	-48,96	1,27117E-05
1000	42,30	42,36	55,0	45,0	2,64	-10,00	-52,36	5,81037E-06	-8,00	-50,36	9,20882E-06
1250	45,00	45,06	56,0	46,0	0,94	-9,00	-54,06	3,9283E-06	-9,00	-54,06	3,9283E-06
1600	46,20	46,26	56,0	46,0	-0,26	-9,00	-55,26	2,97992E-06	-10,00	-56,26	2,36703E-06
2000	48,30	48,36	56,0	46,0	-2,36	-9,00	-57,36	1,8374E-06	-11,00	-59,36	1,15932E-06
2500	49,50	49,56	56,0	46,0	-3,56	-9,00	-58,56	1,39381E-06	-13,00	-62,56	5,54886E-07
3150	51,20	51,26	56,0	46,0	-5,26	-9,00	-60,26	9,42332E-07	-15,00	-66,26	2,36703E-07
							Soma	6,7759E-05		Soma	0,000110613
							-10Lg(soma)	41,69032761		-10Lg(soma)	39,56192977
							C	0		Ctr	-2
								<b>42dB</b>			<b>40dB</b>

Fonte: Adaptado de NBR ISO 717-1 (2021)

 $D_{nT} *$ : valores compilados $D_{nT} **$ : valores ajustados baseados na equação de Durbavin e Gerretsen (2014)

Diferenças (+): 27,09 dB &lt; 32,00 dB

Incremento: -10

A tabela 5.4 relaciona as frequências de um terço de oitava dentro da faixa de frequência de 100 e 3.150 Hz. O  $D_{nT}$  \* apresenta os valores compilados. O  $D_{nT}$  \*\* apresenta valores ajustados baseados na equação 2.22 de Dunbavin e Gerretsen (2014). Para a aplicação da equação 2.22, foi considerado o valor de compromisso que é volume da sala receptora  $V = 52,5m^3$  e mais a razão  $V/S = 2,5m$  (proposição de Dunbavin e Gerretsen (2014) e a estimativa razoável de tempo de reverberação para salas mobiliadas, que é  $T = 0,5s$ . A obtenção do  $D_{nT,w}$ , foi por meio do ajuste de curva, que mediante o incremento de  $-10$ , possibilitou a obtenção do valor mais próximo e menor que  $32 dB$ , que é  $27,09 dB$  (diferenças (+)). Isso resultou em um  $D_{nT,w} = 42dB$ . As diferenças entre os valores tabelados para o espectro nº 1 e os valores de  $D_{nT}$  \*\*, possibilitaram o cálculo do  $D_{nT,A100} = 42dB$ . Esse mesmo método serviu para a obtenção do  $D_{nT,Atr100} = 40dB$ .

Ainda na tabela 5.4, tem-se o espalhamento para cada valor modal relacionado. A determinação do espalhamento tem por base o cálculo da incerteza expandida  $U$ . Foi considerado o fator de conversão  $K = 1,96$  para um nível de confiança de 95% do teste bilateral (quadro 2.4). O valor da incerteza padrão  $k = 0,9$  também foi considerado. Para a partição IIB, foi utilizada a equação 2.21, devido o volume da sala receptora de  $24 m^3$ , não atendendo assim, o item 7.2 da norma ISO 12999-1 (2020). Portanto, foi considerado o mínimo de medição adicional  $m = 1$ , resultando assim, em  $k = 0,9$ . Assim, ao aplicar a equação 2.20, obteve-se a seguinte incerteza expandida:  $U = 1,76$ .

Tabela 5.4 – Valores modais e a incerteza expandida

Descritores	$U$
$D_{nT,w}$	(42,00dB $\pm$ 1,76)
$D_{nT,A100}$	(42,00dB $\pm$ 1,76)
$D_{nT,Atr100}$	(40,00dB $\pm$ 1,76)

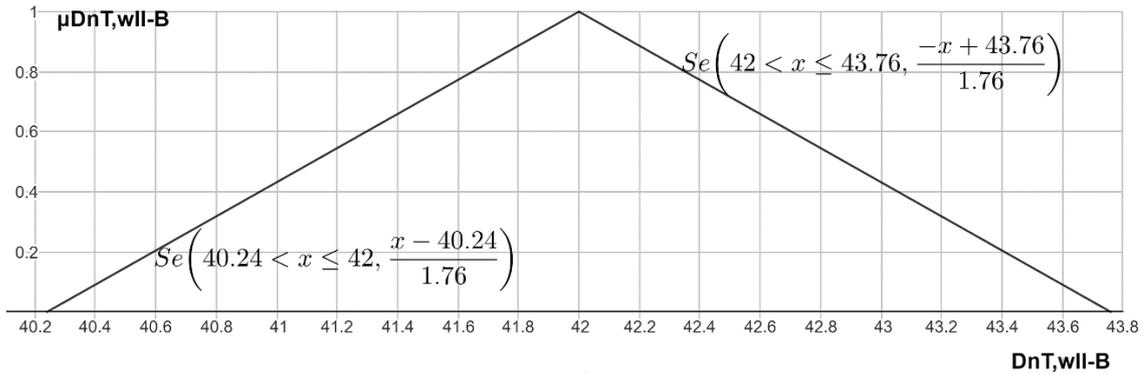
Fonte: Autor

### 5.3.2 Aplicação do TDRIAR-FUZZY

Este subitem trata da aplicação do modelo proposto na partição IIB. Com a aplicação das notações de 1 a 5, obteve-se as funções de pertinências associadas (equação 5.6). Também é apresentada a função de pertinência obtida na forma gráfica (figura 5.2). Percebe-se que o  $D_{nT,w} = 42dB$  é aplicado como valor de máxima pertinência (figura 5.2) e a incerteza expandida assume como o espalhamento na função de pertinência (equação 5.6).

$$\mu_{D_{nT,wIIB}}(x) = \begin{cases} ax + b \text{ (esq)} \div \frac{1}{1,76}x + \left(-\frac{40,24}{1,76}\right) \div \frac{x - 40,24}{1,76}, 40,24 < x \leq 42dB \\ ax + b \text{ (dir)} \div -\frac{1}{1,76}x + \frac{43,76}{1,76} \div \frac{-x + 43,76}{1,76}, 42 < x \leq 43,76dB \end{cases} \quad (5.6)$$

Figura 5.2 – Função de pertinência da partição II-B



Fonte: Autor

Em sequência, procedeu-se com o cálculo do intervalo de projeção pelos  $\alpha$ -cortes. Para tanto, aplicou-se a notação 6. Tem-se a formulação (na sequência) dos pares ordenados com base no intervalo de projeção pelos  $\alpha$ -cortes para a  $D_{nT,wIIB}$  (ver tabela 5.5).

Tabela 5.5 – Números fuzzy intervalares

$[D_{nT,wIIB}]^\alpha$	$[1,76\alpha + 40,24; -1,76\alpha + 43,76]$
$[D_{nT,wIIB}]^0$	$[40,24; 43,76]$
$[D_{nT,wIIB}]^{0,1}$	$[40,42; 43,58]$
$[D_{nT,wIIB}]^{0,2}$	$[40,59; 43,41]$
$[D_{nT,wIIB}]^{0,3}$	$[40,77; 43,23]$
$[D_{nT,wIIB}]^{0,4}$	$[40,94; 43,06]$
$[D_{nT,wIIB}]^{0,5}$	$[41,12; 42,88]$
$[D_{nT,wIIB}]^{0,6}$	$[41,30; 42,70]$
$[D_{nT,wIIB}]^{0,7}$	$[41,47; 42,53]$
$[D_{nT,wIIB}]^{0,8}$	$[41,65; 42,35]$
$[D_{nT,wIIB}]^{0,9}$	$[41,82; 42,18]$
$[D_{nT,wIIB}]^1$	$[42; 42]$

Fonte: Autor

Em seguida, com a aplicação das notações 7, 8, obteve-se o seguinte número fuzzy (41;42;43). E segundo a notação 9, obteve-se os coeficientes de regressão linear fuzzy  $\tilde{A} = \{39,2\} = \{\tilde{A}: 39 - 2 \leq \tilde{A} \leq 39 + 2\}$ .

Conforme o comentário a respeito da equação 5.5, a sua aplicação é mediante programação linear. Em Ross (2004), a programação é explorada via método Simplex. Neste método, a equação 5.5 é assumida como uma função objetivo. Também é necessário a determinação das restrições associadas a variável dependente. Para tanto, foi cálculo o  $D_{nT,50}$ .

O cálculo de  $D_{nT,50}$  foi com base nas equações 2.20, 2.21 e 2.22. Foram respeitadas as condicionantes, no que tange a consideração do requisito mínimo. Assim, por se tratar de um sistema de partição de sala-sala, têm-se o requisito mínimo de 40dB, conforme preconizado pela NBR 15575-3 (2021). Para a determinação de  $D_{nT,50}$  a partir de  $D_{nT,w}$  no valor de 41 dB, por exemplo, considerou-se o requisito  $Req = 40dB$ , configurando a condição em que o  $D_{nT,w} > Req$ ; para configurar a condição  $D_{nT,w} = Req$ , o requisito adotado foi  $Req = 41dB$ , configurando a condição em que o  $D_{nT,w} \geq Req$ . Os resultados de  $D_{nT,50}$  também constam na tabela 5.6.

Tabela 5.6 – variáveis dependentes obtidas

Partição	$D_{nT,w}$	$\geq Req$	$D_{nT,50}$
II-B	41,00	40,00	40,16
	42,00	40,00	40,04
	43,00	40,00	39,92
	41,00	41,00	41,16
	42,00	42,00	42,04
	43,00	43,00	42,92

Fonte: Autor

Assim, tem-se a função objetivo de minimização (equação 5.7) constando o número de possibilidades e mais o somatório de  $D_{nT,wIIB}$ :

$$Mín = mc_0 \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n c_i x_{ij} = mc_0 + (41 + 42 + 43 + 41 + 42 + 43)c_1 = 6c_0 + 252c_1 \quad (5.7)$$

E como são 6 possibilidades, então a função objetivo está sujeita à 12 restrições e mais à condicionante de não-negatividade:

$$p_0 + 41p_1 - 0,5c_0 - 20,5c_1 \leq 40,16$$

$$\begin{aligned}
 p_0 + 42p_1 - 0,5c_0 - 21c_1 &\leq 40,04 \\
 p_0 + 43p_1 - 0,5c_0 - 21,5c_1 &\leq 39,92 \\
 p_0 + 41p_1 - 0,5c_0 - 20,5c_1 &\leq 41,16 \\
 p_0 + 42p_1 - 0,5c_0 - 21c_1 &\leq 42,04 \\
 p_0 + 43p_1 - 0,5c_0 - 21,5c_1 &\leq 42,92 \\
 p_0 + 41p_1 + 0,5c_0 + 20,5c_1 &\geq 40,16 \\
 p_0 + 42p_1 + 0,5c_0 + 21c_1 &\geq 40,04 \\
 p_0 + 43p_1 + 0,5c_0 + 21,5c_1 &\geq 39,92 \\
 p_0 + 41p_1 + 0,5c_0 + 20,5c_1 &\geq 41,16 \\
 p_0 + 42p_1 + 0,5c_0 + 21c_1 &\geq 42,04 \\
 p_0 + 43p_1 + 0,5c_0 + 21,5c_1 &\geq 42,92 \\
 c_0, c_1 &\geq 0
 \end{aligned}$$

A função objetivo, as restrições e o método de solução pelo simplex foram configuradas no solver do Microsoft Excel®, conforme figura 5.3.

Figura 5.3 (a) Interface de configuração do Solver

Parâmetros do Solver

Definir Objetivo:

Para:  Máx.  Mín.  Valor de:

Alterando Células Variáveis:

Sujeito às Restrições:

- \$I\$10 <= \$K\$10
- \$I\$11 <= \$K\$11
- \$I\$12 <= \$K\$12
- \$I\$13 <= \$K\$13
- \$I\$14 <= \$K\$14
- \$I\$15 >= \$K\$15
- \$I\$16 >= \$K\$16
- \$I\$17 >= \$K\$17
- \$I\$18 >= \$K\$18
- \$I\$19 >= \$K\$19
- \$I\$20 >= \$K\$20
- \$I\$9 <= \$K\$9

Tornar Variáveis Irrestritas Não Negativas

Selecionar um Método de Solução:

Método de Solução

Selecione o mecanismo GRG Não Linear para Problemas do Solver suaves e não lineares. Selecione o mecanismo LP Simplex para Problemas do Solver lineares. Selecione o mecanismo Evolutionary para problemas do Solver não suaves.

Ajuda Resolver Fechar

Fonte: Autor

E com a simulação, a saída obtida foi a seguinte estimativa de equação linear  $Y = 5,08 + 0,85X$ , onde  $A_0(5,08; 0,0)$  e  $A_1(0,85; 0,07)$ , conforme mostra o relatório figura 5.5. No campo restrições tem-se uma lista de intervalos representados pelas cores. Por exemplo a cor verde representa o intervalo de saída (valor da célula)  $[39,11; 42,04]$ . Este intervalo está para o valor modal  $D_{nT,w} = 42dB$ . Ao substituir na equação obtida, temos:  $y = 0,85 * (42) + 5,08 = 40,78dB$ . O resultado mostra que  $40,78dB$  está contido no intervalo. Essa verificação foi aplicada aos demais intervalos.

Figura 5.4 Relatório de saída do Solver

	A	B	C	D	E	F
14	Célula do Objetivo (Mín.)					
15		<b>Célula</b>	<b>Nome</b>	<b>Valor Original</b>	<b>Valor Final</b>	
16	\$N\$5	z	Equação	17,58139535	17,58139535	
17						
18	Células Variáveis					
19		<b>Célula</b>	<b>Nome</b>	<b>Valor Original</b>	<b>Valor Final</b>	<b>Número Inteiro</b>
20	\$H\$5	PO		5,08	5,08	Conting.
21	\$I\$5	CO		0,00	0,00	Conting.
22	\$J\$5	P1		0,85	0,85	Conting.
23	\$K\$5	C1		0,07	0,07	Conting.
24						
25	Restrições					
26		<b>Célula</b>	<b>Nome</b>	<b>Valor da Célula</b>	<b>Fórmula</b>	<b>Status</b>
27	\$I\$10	R2	Equação	39,11	\$I\$10<=\$K\$10	Não-associação
28	\$I\$11	R3	Equação	39,92	\$I\$11<=\$K\$11	Associação
29	\$I\$12	R4	Equação	38,30	\$I\$12<=\$K\$12	Não-associação
30	\$I\$13	R5	Equação	39,11	\$I\$13<=\$K\$13	Não-associação
31	\$I\$14	R6	Equação	39,92	\$I\$14<=\$K\$14	Não-associação
32	\$I\$15	R7	Equação	41,16	\$I\$15>=\$K\$15	Não-associação
33	\$I\$16	R8	Equação	42,04	\$I\$16>=\$K\$16	Não-associação
34	\$I\$17	R9	Equação	42,92	\$I\$17>=\$K\$17	Não-associação
35	\$I\$18	R10	Equação	41,16	\$I\$18>=\$K\$18	Associação
36	\$I\$19	R11	Equação	42,04	\$I\$19>=\$K\$19	Associação
37	\$I\$20	R12	Equação	42,92	\$I\$20>=\$K\$20	Associação
38	\$I\$9	R1	Equação	38,30	\$I\$9<=\$K\$9	Não-associação
39						

Fonte: Autor

Ademais, foi realizado o ajuste da estimativa fuzzy. Nesta oportunidade, foi considerado o coeficiente de imprecisão  $e_i$ . Foi preservada a função objetivo e fez alguns ajustes nas restrições. Os dados são apresentados na tabela 5.7.

Tabela 5.7 – variáveis dependentes ajustadas

Partição	$D_{nT,w}$	$\geq Req$	$D_{nT,50}$	$(D_{nT,50}; e_i)$
II-B	41,00	40,00	40,16	(40,16; 1,86)
	42,00	40,00	40,04	(40,04; 0,93)
	43,00	40,00	39,92	(39,92; 0,00)
	41,00	41,00	41,16	(41,16; 2,86)
	42,00	42,00	42,04	(42,04; 2,93)
	43,00	43,00	42,92	(42,92; 3,00)

Fonte: Autor

$$p_0 + 41p_1 - 0,5c_0 - 20,5c_1 + (1 - 0,5)1,86 \leq 39,23$$

$$p_0 + 42p_1 - 0,5c_0 - 21c_1 + (1 - 0,5)0,93 \leq 39,57$$

$$p_0 + 43p_1 - 0,5c_0 - 21,5c_1 + (1 - 0,5)0,00 \leq 39,92$$

$$p_0 + 41p_1 - 0,5c_0 - 20,5c_1 + (1 - 0,5)2,86 \leq 39,73$$

$$p_0 + 42p_1 - 0,5c_0 - 21c_1 + (1 - 0,5)2,93 \leq 40,57$$

$$p_0 + 43p_1 - 0,5c_0 - 21,5c_1 + (1 - 0,5)3,00 \leq 41,42$$

$$p_0 + 41p_1 + 0,5c_0 + 20,5c_1 - (1 - 0,5)1,86 \geq 41,09$$

$$p_0 + 42p_1 + 0,5c_0 + 21c_1 - (1 - 0,5)0,93 \geq 40,51$$

$$p_0 + 43p_1 + 0,5c_0 + 21,5c_1 - (1 - 0,5)0,00 \geq 39,92$$

$$p_0 + 41p_1 + 0,5c_0 + 20,5c_1 - (1 - 0,5)2,86 \geq 42,59$$

$$p_0 + 42p_1 + 0,5c_0 + 21c_1 - (1 - 0,5)2,93 \geq 43,51$$

$$p_0 + 43p_1 + 0,5c_0 + 21,5c_1 - (1 - 0,5)3,00 \geq 44,42$$

$$c_0, c_1 \geq 0$$

Após nova simulação, a nova saída obtida foi a seguinte estimativa de equação linear  $Y = 5,08 + 0,88X$ , onde  $A_0(5,08; 0,0)$  e  $A_1(0,88; 0,14)$ .

### 5.3.3 Análise das Saídas

Para análise das saídas, a reta estimada  $Y = 5,08 + 0,85X$  foi aplicada na igualdade  $[\hat{f}(D_{nT,w})]^\alpha = ([D_{nT,w}]^\alpha)$ , e sua resultante é um novo intervalo de projeções. Isto foi obtido a partir do Princípio de extensão de Zadeh (tabela 5.8).

$$[D_{nT,wIIB}]^\alpha = [1,76\alpha + 40,24; -1,76\alpha + 43,76]$$

$$\hat{f}([D_{nT,wIIB}]^\alpha) = [f(1,76\alpha + 40,24); f(-1,76\alpha + 43,76)]$$

$$\hat{f}([D_{nT,wIIB}]^\alpha) = [0,85 * (1,76\alpha + 40,24) + 5,08; 0,85 * (-1,76\alpha + 43,76) + 5,08]$$

$$\hat{f}([D_{nT,wIIB}]^\alpha) = [1,50\alpha + 39,28; -1,50\alpha + 42,28]$$

Tabela 5.8 – Análise intervalar a partir do princípio de extensão de Zadeh

$\hat{f}([D_{nT,wIIB}]^\alpha)$	$[1,50\alpha + 39,28; -1,50\alpha + 42,28]$
$\hat{f}([D_{nT,wIIB}]^0)$	$[39,28; 42,28]$
$\hat{f}([D_{nT,wIIB}]^{0,1})$	$[39,43; 42,13]$
$\hat{f}([D_{nT,wIIB}]^{0,2})$	$[39,58; 41,98]$
$\hat{f}([D_{nT,wIIB}]^{0,3})$	$[39,73; 41,83]$
$\hat{f}([D_{nT,wIIB}]^{0,4})$	$[39,88; 41,68]$
$\hat{f}([D_{nT,wIIB}]^{0,5})$	$[40,03; 41,53]$
$\hat{f}([D_{nT,wIIB}]^{0,6})$	$[40,18; 41,38]$
$\hat{f}([D_{nT,wIIB}]^{0,7})$	$[40,33; 41,23]$
$\hat{f}([D_{nT,wIIB}]^{0,8})$	$[40,48; 41,08]$
$\hat{f}([D_{nT,wIIB}]^{0,9})$	$[40,63; 40,93]$
$\hat{f}([D_{nT,wIIB}]^1)$	$[40,78; 40,78]$

Fonte: Autor

Ainda sobre a tabela 5.8, tem-se então o suporte em  $[D_{nT,wIIB}]^0 = [40,24; 43,76]$  que valida o intervalo do domínio definido no item 5.3. Pela função estimada fuzzy  $y = 0,85 * x + 5,08$  é projetado em  $D_{nT,50IIB}$ , o conjunto suporte  $\hat{f}([D_{nT,wIIB}]^0) = [39,28; 42,28]$ . Outra observação é  $[D_{nT,wIIB}]^1 = [42,42]$ , onde a igualdade dentro do intervalo, indica a máxima pertinência em  $D_{nT,wIIB} = 42 \text{ dB}$ .

A utilização da equação da reta estimada projeta  $\hat{f}([D_{nT,wIIB}]^1) = [40,78; 40,78]$  em  $D_{nT,50IIB}$ , destacando sua máxima pertinência. Esse fato coincide com a aplicação  $y = 0,85 * (42\text{dB}) + 5,08 = 40,78\text{dB}$ . Com esta verificação, conclui-se a defuzzificação. Vale ressaltar que a equação estimada ajustada também foi submetida ao processo de defuzzificação, justificando assim a obtenção de duas equações.

Com esses argumentos, e com base em Barros, Bassanezi e Lodwick (2017), a saída do TDRIAR-FUZZY é semelhante a saída do método de inferência de Takagi-Sugeno, que é uma equação linear. Nestes casos, a etapa de defuzzificação torna-se desnecessária Barros, Bassanezi e Lodwick (2017).

## 6. RESULTADOS E VALIDAÇÃO

Neste capítulo são expostos os resultados da pesquisa, com o propósito de apresentá-los e validar sua consistência. Adicionalmente, realiza-se uma discussão detalhada desses resultados, visando assegurar a concordância entre as conclusões alcançadas e o objetivo geral.

### 6.1 Tradução de Descritores e Requisitos de Isolamento Acústicos

Conforme demonstrado no estudo piloto, para cada partição tem duas saídas (equação não fuzzy e equação fuzzy). Neste sentido são apresentadas as equações de tradução estimadas para cada partição estudada.

#### 6.1.1 Tradução de Descritores e Requisitos de Isolamento Acústicos de $D_{nT,w}$ para $D_{nT,50}$

A tabela 6.1 relaciona as 15 partições e suas respectivas equações que indicam a tradução de  $D_{nT,w}(x)$  para  $D_{nT,50}(y)$ .

Tabela 6.1 – Equações de tradução estimadas de  $D_{nT,w}$  para  $D_{nT,50}$

Partição	(x)	$D_{nT,50}(y)$	
		Estimativa fuzzy	Estimativa fuzzy ajustada
II-B		$y = 0,85x + 5,08$	$y = 0,88x + 5,08$
III-B		$y = 0,87x + 5,08$	$y = 0,88x + 5,08$
IV-B		-	$y = 0,05x + 41,76$
VI-B		$y = 0,87x + 5,08$	$y = 0,88x + 5,08$
VII-B		-	-
VVI2		$y = 0,83x + 5,08$	$y = 0,88x + 5,08$
PAE17-8B		$y = 0,86x + 5,08$	$y = 0,88x + 5,08$
PAE17-10B	$D_{nT,w}$	$y = 0,84x + 5,08$	$y = 0,88x + 5,08$
PAE17-10C1		-	-
PAE17-10C2		$y = 0,86x + 5,08$	$y = 0,88x + 5,08$
PAE17-10C3		-	$y = 0,05x + 41,76$
LP-4		-	-
LP-6		-	-
Kuhn-1		-	$y = 0,05x + 41,76$
Kuhn-2		$y = 0,86x + 5,08$	$y = 0,88x + 5,08$

Fonte: Autor

Todas as equações apresentam coeficiente angular positivo, caracterizando-as como função crescente. Isto significa que, à medida que cresce o valor de  $D_{nT,w}$ , também cresce o valor de  $D_{nT,50}$ . Nas equações com dados de entrada não fuzzy, observa-se uma variabilidade (0,04; 0,84; 0,85; 0,86; 0,87) entre os coeficientes angulares e uma predominância do coeficiente linear de 5,08. Nas equações com dados de entrada fuzzy, observa-se uma predominância tanto do coeficiente angular de 0,88, como do coeficiente linear de 5,08. A ausência de resultados observada se dá por dois motivos: o valor de  $D_{nT,w}$  ficou abaixo do requisito mínimo (é o caso da partição PAE17-10C1); pelo considerável intervalo entre  $D_{nT,w}$  e o requisito mínimo, o que atingiu umas partições parcialmente (é o caso da partição IV-B, PAE17-10C3 e Kuhn-1), e outras totalmente (é o caso da partição VII-B, LP-4 e LP-6). Esse fato resultou em coeficiente angular igual a zero, impossibilitando a formulação da equação.

#### 6.1.2 Tradução de Descritores e Requisitos de Isolamento Acústicos de $D_{nT,A100}$ para $D_{nT,50}$

Os resultados da tradução de  $D_{nT,A100}$  para  $D_{nT,50}$  constam na tabela 6.2. Todas as equações são crescentes.

Tabela 6.2 – Equações de tradução estimadas de  $D_{nT,A100}$  para  $D_{nT,50}$

Partição	(x)	$D_{nT,50}$ (y)	
		Estimativa fuzzy	Estimativa fuzzy ajustada
II-B		$y = 0,87x + 5,96$	$y = 0,88x + 5,96$
III-B		$y = 0,87x + 5,96$	$y = 0,88x + 5,96$
IV-B		$y = 0,83x + 5,96$	$y = 0,88x + 5,96$
VI-B		$y = 0,87x + 5,96$	$y = 0,88x + 5,96$
VII-B		-	-
VVI2		$y = 0,83x + 5,96$	$y = 0,88x + 5,96$
PAE17-8B		$y = 0,87x + 5,96$	$y = 0,88x + 5,96$
PAE17-10B	$D_{nT,A100}$	$y = 0,85x + 5,96$	$y = 0,88x + 5,96$
PAE17-10C1		-	-
PAE17-10C2		$y = 0,87x + 5,96$	$y = 0,88x + 5,96$
PAE17-10C3		$y = 0,83x + 5,96$	$y = 0,88x + 5,96$
LP-4		-	-
LP-6		-	-
Kuhn-1		$y = 0,83x + 5,96$	$y = 0,88x + 5,96$
Kuhn-2		-	-

Fonte: Autor

A variabilidade é observada somente entre os coeficientes angulares para os dados de entrada não fuzzy. Para os demais, observou-se coeficientes exclusivos. É o que mostra o coeficiente angular de 0,88 nas equações para os dados de entrada fuzzy. É o que mostra também o coeficiente linear 5,96, exclusivos em todas as equações na referida tabela. A ausência de resultados observada nas partições LP-4 e LP-6 é pelo considerável intervalo entre  $D_{nT,A100}$  e o requisito mínimo. E o  $D_{nT,A100}$  registrado para as partições PAE17-10C1 e Kuhn-2, ficou abaixo do requisito mínimo.

### 6.1.3 Tradução de Descritores e Requisitos de Isolamento Acústicos de $D_{nT,Atr100}$ para $D_{nT,50}$

O comportamento crescente da reta também é observado nas equações resultantes de tradução de  $D_{nT,Atr100}$  para  $D_{nT,50}$  (tabela 6.3). O coeficiente linear de 9,48 é observado na maioria das equações, salvo a partição IV-B, que apresentou o coeficiente linear de 11,38. Nas equações com dados de entrada não fuzzy, os coeficientes angulares observados são 0,85, 0,86 e 0,87. Para o caso das equações com dados de entrada fuzzy, os coeficientes angulares são 0,83, 0,86 e 0,88.

Tabela 6.3 – Equações de tradução estimadas de  $D_{nT,Atr100}$  para  $D_{nT,50}$

Partição	(x)	$D_{nT,50}$ (y)	
		Estimativa fuzzy	Estimativa fuzzy ajustada
II-B		$y = 0,87x + 9,48$	$y = 0,88x + 9,48$
III-B		-	-
IV-B		$y = 0,86x + 9,48$	$y = 0,83x + 11,38$
VI-B		-	-
VII-B		-	-
VVI2		$y = 0,85x + 9,48$	$y = 0,86x + 9,48$
PAE17-8B		-	-
PAE17-10B	$D_{nT,Atr100}$	-	-
PAE17-10C1		-	-
PAE17-10C2		-	-
PAE17-10C3		$y = 0,85x + 9,48$	$y = 0,86x + 9,48$
LP-4		-	-
LP-6		$y = 0,83x + 9,48$	$y = 0,86x + 9,48$
Kuhn-1		$y = 0,85x + 9,48$	$y = 0,86x + 9,48$
Kuhn-2		-	-

Fonte: Autor

O considerável intervalo entre  $D_{nT,Atr100}$  e o requisito mínimo implicou na não formulação da equação para a partição LP-4. E nas seguintes partições, o  $D_{nT,Atr100}$  ficou abaixo do requisito mínimo: III-B; IV-B; VII-B; PAE17-8B; PAE17-10B; PAE17-10C1; PAE17-10C2; Kuhn-2.

#### 6.1.4 Tradução de Descritores e Requisitos de Isolamento Acústicos de $L'_{nT,w}$ para $L'_{nT,50}$ .

A tabela 6.4 apresenta os resultados da tradução de  $L'_{nT,w}$  para  $L'_{nT,50}$ . Os resultados são relativos as 11 partições estudadas. É possível observar a exclusividade do coeficiente angular de 0,49 em todos os resultados. Em se tratando de coeficiente linear, observa-se a variabilidade tanto nas equações de entrada não fuzzy (29,83; 30,83; 31,33; 33,83), como nas equações de entrada fuzzy (30,83; 32,83; 33,83; 34,83). Os valores de  $L'_{nT,w}$  registrados em VH1 e em NV-9, valores esses acima do requisito mínimo, justificam a ausência de resultados. No caso das partições VIII-C e X-C, em cada foi registrado coeficiente angular igual a zero.

Tabela 6.4 – Equações de tradução estimadas de  $L'_{nT,w}$  para  $L'_{nT,50}$

Partição	(x)	$L'_{nT,50}$ (y)	
		Estimativa fuzzy	Estimativa fuzzy ajustada
VH1		-	-
III-C		$y = 0,49x + 30,83$	$y = 0,49x + 32,83$
IV-C		$y = 0,49x + 31,33$	$y = 0,49x + 33,83$
VIII-C		-	-
X-C		-	-
NV-1	$L'_{nT,w}$	$y = 0,49x + 31,33$	$y = 0,49x + 33,83$
NV-5		$y = 0,49x + 29,83$	$y = 0,49x + 30,83$
NV-8		$y = 0,49x + 30,83$	$y = 0,49x + 32,83$
NV-9		-	-
NV-11		$y = 0,49x + 29,83$	$y = 0,49x + 30,83$
NV-14		$y = 0,49x + 31,83$	$y = 0,49x + 34,83$

Fonte: Autor

## 6.2 Validação

Para validação das equações de tradução, observou-se os conceitos praticados para validação em outros estudos dentro do tema. Dunbavin e Gerretsen (2014) e Scholl, Wang e Wittstock (2011) utilizaram o coeficiente de determinação para análise da equação linear;

Monteiro *et al.* (2017), por sua vez, explorou o coeficiente de correlação linear e mais o teste de significância. Tais conceitos estatísticos relacionados constituem o chamado teste de linearidade ou teste de resposta linear.

De acordo com Walpole *et al.* (2009), em certos tipos de situações experimentais, o pesquisador deve ter a capacidade de obtenção de resultados repetidos para cada valor de  $x$ . Tais repetições permitem obter informações quantitativas relacionadas à adequabilidade do modelo.

Sweeney, Williams e Anderson (2016) indicam que a avaliação da linearidade é mediante a regressão linear simples usando o método dos mínimos quadrados, fornecendo uma equação de regressão estimada que minimiza a soma de desvios quadráticos entre os valores observados da variável dependente e os valores estimados da variável dependente. Para tal, aqui é utilizada a equação de tradução estimada obtida na defuzzificação (item 5.1.6), lembrando que o modelo envolveu regressão linear fuzzy.

### 6.2.1 Validação da Tradução de $D_{nT,w}$ para $D_{nT,50}$

O coeficiente de determinação, que por definição é uma medida da qualidade do ajuste da equação de regressão estimada. Pode ser interpretada como a proporção da variabilidade da variável dependente que é explicada pela equação de regressão estimada (SWEENEY, WILLIAMS E ANDERSON, 2016).

A determinação do coeficiente de determinação, designado por  $R^2$ , foi precedida da determinação da soma dos quadrados dos resíduos  $SQRes = \sum(y_i - y)^2$ , a soma dos quadrados total  $SQTot = \sum(y_i - \bar{Y})^2$  e da soma dos quadrados da regressão  $SQReg = \sum(y - \bar{Y})^2$ . Na tabela 6.5 é tratado a respeito da tradução de  $D_{nT,w}$  para  $D_{nT,50}$ .

Na referida tabela, são apresentados os dados oriundos dos cálculos abrangendo as equações referidas. No item  $i$ , na linha 1 tem-se as variáveis independentes  $x_i = 40dB$  e dependentes  $y_i = 40,28dB$ , essas representam  $D_{nT,w}$  e  $D_{nT,50}$ , respectivamente. Ao aplicar a equação de tradução estimada (na tabela 6.1) temos,  $y = 0,87(40) + 5,08 = 39,88dB$ . Assim, o erro (resíduo) de usar  $y$  para estimar  $y_i$  é  $y_i - y = 40,28 - 39,88 = 0,40$ . O resíduo elevado ao quadrado,  $(0,40)^2 = 0,16$ .

Esse procedimento foi aplicado ao restante da amostra, e após a efetuação do somatório, obteve-se o  $SQRes = 34,10$ . A coluna seguinte é a do desvio, essa foi obtida através da diferença entre cada variável dependente  $y_i$  e sua média aritmética amostral  $\bar{Y} = 41,07$ . Tal diferença indica a medida do erro envolvido no uso da média amostral como estimativa. Desse modo, tem-se a soma dos quadrados correspondente  $SQTot = 53,04$ . E finalmente, com a  $SQReg = 43,92$ , mediu-se o quanto os valores de  $y$  se afastam da média amostral  $\bar{Y}$ .

Tabela 6.5 – Validação da equação de tradução entre  $D_{nT,w}$  e  $D_{nT,50}$ 

$i$	$x_i$	$y_i$	$y$	Resíduo $y_i - y$	$(y_i - y)^2$	Desvio $y_i - \bar{Y}$	$(y_i - \bar{Y})^2$	$(y - \bar{Y})^2$
1	40,00	40,28	39,88	0,400	0,16	-0,79	0,62	1,42
2	41,00	40,16	40,75	-0,590	0,35	-0,91	0,83	0,10
3	40,00	40,28	39,88	0,400	0,16	-0,79	0,62	1,42
4	41,00	41,16	40,75	0,410	0,17	0,09	0,01	0,10
5	40,00	40,28	39,88	0,400	0,16	-0,79	0,62	1,42
6	41,00	41,16	40,75	0,410	0,17	0,09	0,01	0,10
7	40,00	40,28	39,88	0,400	0,16	-0,79	0,62	1,42
8	41,00	40,16	40,75	-0,590	0,35	-0,91	0,83	0,10
9	42,00	40,04	41,62	-1,580	2,50	-1,03	1,06	0,30
10	40,00	40,28	39,88	0,400	0,16	-0,79	0,62	1,42
11	41,00	41,16	40,75	0,410	0,17	0,09	0,01	0,10
12	42,00	42,04	41,62	0,420	0,18	0,97	0,94	0,30
13	42,00	40,04	41,62	-1,580	2,50	-1,03	1,06	0,30
14	43,00	40,00	42,49	-2,490	6,20	-1,07	1,14	2,02
15	42,00	42,04	41,62	0,420	0,18	0,97	0,94	0,30
16	43,00	42,92	42,49	0,430	0,18	1,85	3,42	2,02
17	44,00	43,80	43,36	0,440	0,19	2,73	7,45	5,25
18	40,00	40,28	39,88	0,400	0,16	-0,79	0,62	1,42
19	41,00	40,16	40,75	-0,590	0,35	-0,91	0,83	0,10
20	42,00	40,04	41,62	-1,580	2,50	-1,03	1,06	0,30
21	40,00	40,28	39,88	0,400	0,16	-0,79	0,62	1,42
22	41,00	41,16	40,75	0,410	0,17	0,09	0,01	0,10
23	42,00	42,04	41,62	0,420	0,18	0,97	0,94	0,30
24	40,00	40,28	39,88	0,400	0,16	-0,79	0,62	1,42
25	41,00	40,16	40,75	-0,590	0,35	-0,91	0,83	0,10
26	42,00	40,04	41,62	-1,580	2,50	-1,03	1,06	0,30
27	40,00	40,28	39,88	0,400	0,16	-0,79	0,62	1,42
28	41,00	41,16	40,75	0,410	0,17	0,09	0,01	0,10
29	42,00	42,04	41,62	0,420	0,18	0,97	0,94	0,30
30	43,00	42,92	42,49	0,430	0,18	1,85	3,42	2,02
31	44,00	43,80	43,36	0,440	0,19	2,73	7,45	5,25
32	43,00	42,920	42,49	0,430	0,18	1,85	3,42	2,02
33	44,00	43,800	43,36	0,440	0,19	2,73	7,45	5,25
34	43,00	40,000	42,49	-2,490	6,20	-1,07	1,14	2,02
35	43,00	40,000	42,49	-2,490	6,20	-1,07	1,14	2,02
$\Sigma$	1455,00	1437,4			34,10		53,04	43,92
	$\Sigma x_i$	$\Sigma y_i$			$SQRes$		$SQTot$	$SQReg$

Fonte: Autor

Assim, o  $R^2$  foi obtido pelo quociente  $SQReg/SQTot$ , resultando em  $R^2 = 0,8281$ . A leitura com esse coeficiente é que esse representa a porcentagem da soma dos quadrados total que pode ser explicada usando-se a equação estimada de tradução. Em outras palavras, 82,81% da variabilidade de  $D_{nT,50}$  pode ser explicada usando a referida equação de tradução estimada, o que é satisfatório para a necessidade de validação do modelo, o que não excluiu a necessidade de avaliar o  $R^2$  das demais equações.

Outra medida de avaliação é o coeficiente de correlação, designado por  $R$ , e é uma medida descritiva da intensidade da associação linear entre duas variáveis,  $x$  e  $y$ . Os valores de  $R$  estão sempre entre  $-1$  e  $+1$ . Valores de  $R$  próximos de 1 indicam que  $x$  e  $y$  estão linearmente relacionados. Do contrário, os valores de  $R$  próximos de zero indicam que  $x$  e  $y$  não estão linearmente relacionados (SWEENEY, WILLIAMS E ANDERSON, 2016).

A obtenção de  $R$  é mediante o cálculo da raiz quadrada de  $R^2$ . Sendo assim, o coeficiente  $R$  obtido foi  $R = \sqrt{0,8281} = 0,9100$ . Como esse coeficiente está mais próximo de 1, é um indicativo de uma boa relação linear entre  $x$  e  $y$ , sendo aceitável para a pesquisa. Com os testes das demais equações (tabela 6.6) é possível discutir a validação das equações.

Tabela 6.6 – Coeficientes de determinação e correlação das equações de tradução entre  $D_{nT,w}$  e  $D_{nT,50}$

Tradução	$R^2$	$R$
$y = 0,05x + 41,76$	5,0619	2,2499
$y = 0,83x + 5,08$	2,1909	1,4802
$y = 0,84x + 5,08$	1,5077	1,2279
$y = 0,85x + 5,08$	1,0529	1,0261
$y = 0,86x + 5,08$	0,8263	0,9090
$y = 0,87x + 5,08$	0,8281	0,9100
$y = 0,88x + 5,08$	1,0582	1,0287

Fonte: Autor

O coeficiente apresentado pelas equações  $y = 0,05x + 41,76$  e  $y = 0,83x + 5,08$  são discrepantes, o que as descartam da validação. Outras equações descartadas apresentaram coeficientes acima, embora próximos, é o caso das equações  $y = 0,85x + 5,08$  e  $y = 0,88x + 5,08$ . A equação  $y = 0,87x + 5,08$  apresentou  $R^2$  e  $R$  abaixo e mais próximo de 1 (conforme apreciado nos parágrafos anteriores). E como último estágio da validação, a última equação foi submetida ao teste de significância. Monteiro *et al.* (2017) relaciona alguns coeficientes de correlação para partições leves e pesadas, sendo, portanto uma fonte de comparação. Ao

considerar as partições pesadas, Monteiro *et al.* (2017), obteve um  $R = 0,96$ , o que é aproximado ao  $R = 0,91$  obtido nesta pesquisa.

Sweeney, Williams e Anderson (2016) sugerem um teste de hipótese a fim de verificar se as equações são significativas. Neste sentido, tem-se o teste  $F$  de Snedecor-Fisher, este aplicado com fins de teste da significância da regressão. O teste tem base no conceito de ANOVA. A resultante é o  $F_{calculado}$ , este obtido mediante a razão entre o quadrado médio da regressão ( $QMReg$ ) e o quadrado médio dos resíduos ( $QMRes$ ).

Como o estudo envolve uma variável independente, tem-se  $QMReg = SQReg/1 = SQReg$ . O  $QMRes$  possui o grau de liberdade  $n - 2$ , justificados pelos 2 parâmetros (1 coeficiente angular e 1 coeficiente linear), logo sua obtenção é por meio de  $QMRes = SQRes/n - 2$ .

O enunciado das hipóteses considera a hipótese de igualdade  $H_0$  (coeficiente angular igual a zero) e a hipótese alternativa  $H_a$  (coeficiente angular maior que zero). Para determinar a relação  $x$  e  $y$  como estatisticamente significativa, tem-se que rejeitar a hipótese  $H_0$ . São duas regras de rejeição: o critério do *valor - p*, se o *valor - p*  $\leq \alpha$ ; o critério do valor crítico, se  $F_{calculado} \geq F_{crítico}$ .

O  $F_{crítico}$  se baseia em uma distribuição  $F$  com 1 grau de liberdade no numerador e  $n - 2$  graus de liberdade no denominador. Para a hipótese verdadeira de  $H_0$ , o  $F_{calculado}$  tem que estar próximo de 1. E em caso contrário, para a hipótese falsa de  $H_0$ , o  $F_{calculado}$  tem que ser um valor elevado, e que leva à conclusão de que a relação entre  $x$  e  $y$  é significativa.

Exposto a fundamentação do teste  $F$ , tem-se os resultados por meio do teste ANOVA (tabela 6.7). A hipótese  $H_0$ , que assume o coeficiente angular igual a zero foi rejeitada em todos os testes. Isso é mostrado pelos 2 critérios de rejeição: o *valor - p*  $= 0,000 \leq \alpha = 0,05$  (nível de significância de 5%). Este nível de significância foi considerado com base no nível de confiança de 95% aplicado no teste ANOVA. A adoção deste nível de confiança tem base em Monteiro *et al.* (2017).

Tabela 6.7 – Teste ANOVA para as equações de tradução de  $D_{nT,w}$  para  $D_{nT,50}$

Tradução	$QMReg$	$QMRes$	$F_{cal}$	$F_{crit}$	<i>Valor - p</i>
$y = 0,87x + 5,08$	43,921	1,033	42,504	4,17	0,000

Fonte: Autor

O teste ANOVA mostrou que a condição é atendida  $F_{calculado} = 42,504 \geq F_{crítico} = 4,17$ , indicando assim que a equação  $y = 0,87x + 5,08$  é significativa. Com o atestado da significância e mais os coeficientes válidos de  $R^2$  e  $R$ , propõe-se como equação de tradução de  $D_{nT,w}$  para  $D_{nT,50}$ , a equação  $y = 0,87x + 5,08$ .

### 6.2.2 Validação da Tradução de $D_{nT,A100}$ para $D_{nT,50}$

Dos coeficientes de determinação e correlação (tabela 6.8), a equação  $y = 0,83x + 5,96$  apresentou os coeficientes  $R^2 = 0,8360$  e  $R = 0,9144$ , sendo adequada para a validação.

Tabela 6.8 – Coeficientes de determinação e correlação das equações de tradução entre  $D_{nT,100}$  e  $D_{nT,50}$

Tradução	$R^2$	$R$
$y = 0,83x + 5,96$	0,8360	0,9144
$y = 0,85x + 5,96$	0,7998	0,8943
$y = 0,87x + 5,96$	1,5080	1,2280
$y = 0,88x + 5,96$	2,1412	1,4633

Fonte: Autor

Com a aplicação do teste ANOVA (tabela 6.9), observou-se que houve rejeição da hipótese  $H_0$ , sendo que o  $F_{calculado} = 16,609$ , para o nível de significância de 95%, foi superior ao  $F_{crítico} = 4,08$ . Assim pode-se afirmar que a referida equação é significativa. Portanto, esta é sugerida como equação de tradução de  $D_{nT,A100}$  para  $D_{nT,50}$ .

Tabela 6.9 – Teste ANOVA para as equações de tradução entre  $D_{nT,A100}$  e  $D_{nT,50}$

Tradução	$QMReg$	$QMRes$	$F_{cal}$	$F_{crít}$	Valor - p
$y = 0,83x + 5,96$	86,124	2,020	16,609	4,08	0,000

Fonte: Autor

### 6.2.3 Validação da Tradução de $D_{nT,Atr100}$ para $D_{nT,50}$

A mesma leitura para a tradução de  $D_{nT,Atr100}$  para  $D_{nT,50}$ . Com a equação  $y = 0,87x + 9,48$  foi obtido os melhores coeficientes  $R^2 = 0,8842$  e  $R = 0,9403$  (tabela 6.10).

Tabela 6.10 – Coeficientes de determinação e correlação das equações de tradução entre  $D_{nT,Atr100}$  para  $D_{nT,50}$

Tradução	$R^2$	$R$
$y = 0,83x + 9,48$	1,7000	1,3038
$y = 0,85x + 9,48$	0,7561	0,8695
$y = 0,86x + 9,48$	0,6861	0,8283
$y = 0,87x + 9,48$	0,8842	0,9403
$y = 0,88x + 9,48$	1,3503	1,1620
$y = 0,83x + 11,38$	1,0326	1,0162

Fonte: Autor

E com a aplicação do teste ANOVA (tabela 6.11), foi constatada a significância da referida equação. Portanto, propõe-se esta como equação de tradução entre  $D_{nT,Atr100}$  para  $D_{nT,50}$ .

Tabela 6.11 – Teste ANOVA para as equações de tradução entre  $D_{nT,Atr100}$  e  $D_{nT,50}$

Tradução	$QMReg$	$QMRes$	$F_{cal}$	$F_{crit}$	Valor - p
$y = 0,87x + 9,48$	33,270	1,769	22,198	4,17	0,000

Fonte: Autor

#### 6.2.4 Validação da Tradução de $L'_{nT,w}$ para $L'_{nT,50}$

A equação sugerida para tradução de  $L'_{nT,A100}$  para  $L'_{nT,50}$  é  $y = 0,49x + 31,83$ . Essa sugestão tem base nos coeficientes  $R^2 = 0,9939$  e  $R = 0,9770$  (tabela 6.12) e no teste ANOVA (tabela 6.13), no qual provou a significância da referida equação.

Tabela 6.12 – Coeficientes de determinação e correlação das equações de tradução entre  $L'_{nT,w}$  para  $L'_{nT,50}$

Tradução	$R^2$	$R$
$y = 0,49x + 29,83$	0,3042	0,5515
$y = 0,49x + 30,83$	0,3062	0,5534
$y = 0,49x + 31,33$	0,5644	0,7513
$y = 0,49x + 31,83$	0,9939	0,9770
$y = 0,49x + 32,83$	2,3673	1,5386
$y = 0,49x + 33,83$	4,4263	2,1039
$y = 0,49x + 34,83$	7,1710	2,6779

Fonte: Autor

Tabela 6.13 – Teste ANOVA para as equações de tradução entre  $L'_{nT,w}$  para  $L'_{nT,50}$ 

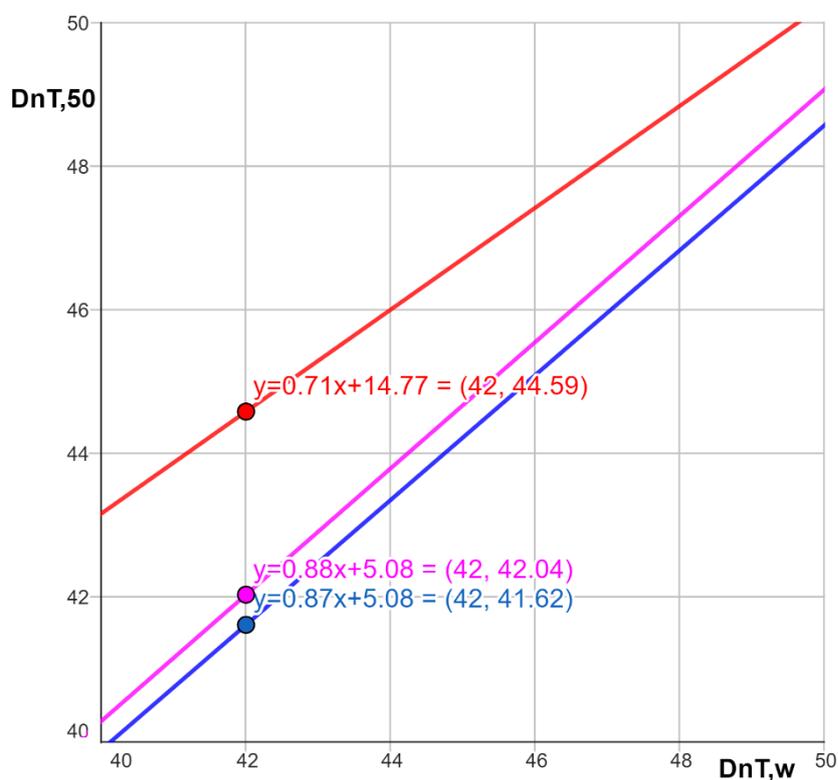
Tradução	$QMReg$	$QMRes$	$F_{cal}$	$F_{crit}$	Valor - $p$
$y = 0,49x + 31,83$	121,770	6,134	19,850	4,08	0,000

Fonte: Autor

### 6.3 Análises

A figura 6.1, apresenta forma gráfica da equação de tradução  $y = 0,87x + 5,08$  (cor azul) oriunda do TDRIAR-FUZZY. Ao atribuir um valor de  $D_{nT,w} = 42dB$   $x$ , correspondente a  $x$ , obtem-se  $D_{nT,50} = 41,62dB$ . A literatura destaca a equação  $y = 0,88x + 5,08$  de Dunbavin e Gerretsen (2014) (cor magenta), e a equação  $y = 0,71x + 14,77$  de Monteiro *et al.* (2017) (cor vermelho).

Figura 6.1 – Comparativo entre a tradução de  $D_{nT,w}$  para  $D_{nT,50}$  do TDRIAR-FUZZY com os observados na literatura



Fonte: Autor

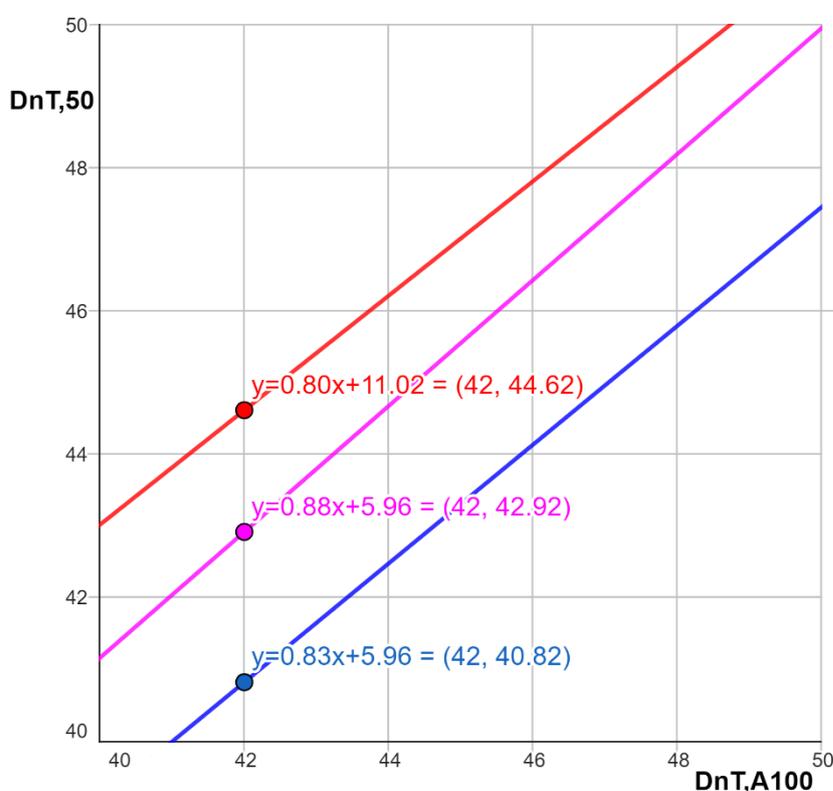
Os coeficientes angulares aproximados entre 0,87 (TDRIAR-FUZZY) e 0,88, de Dunbavin e Gerretsen (2014), justificam o aproximado paralelismo entre ambas. O coeficiente angular de 0,71, de Monteiro *et al.* (2017) e o coeficiente linear 14,77 maior que os demais,

faz com que a reta em vermelho se aproxime das demais retas, à medida que, aumentamos o valor de  $D_{nT,w}$ .

Em termos de número único, o TDRIAR-FUZZY entregou o mesmo resultado que Dunbavin e Gerretsen (2014),  $D_{nT,50} = 42dB$ , o que é um indício de assertividade do modelo. Uma contribuição para tal igualdade foi a adoção do valor de compromisso proposto por Dunbavin e Gerretsen (2014), volume da sala receptora  $V = 52,5m^3$  e a razão  $V/S = 2,5m$ . Em comparação ao modelo de Monteiro *et al.* (2017)  $D_{nT,50} = 45dB$ , onde foi adotado um valor de compromisso de  $V = 35,3m^3$  e a razão  $V/S = 3,8m$ , o modelo pesquisado apresentou um comportamento de  $-3dB$ .

A figura 6.2, apresenta a ilustração gráfica da equação sugerida de tradução  $y = 0,83x + 5,96$ . Para análise comparativa, tem-se as equações  $y = 0,88x + 5,96$  de Dunbavin e Gerretsen (2014) (cor magenta), e a equação  $y = 0,80x + 11,02$  de Monteiro *et al.* (2017) (cor vermelho).

Figura 6.2 – Comparativo entre a tradução de  $D_{nT,A100}$  para  $D_{nT,50}$  do TDRIAR-FUZZY com os observados na literatura

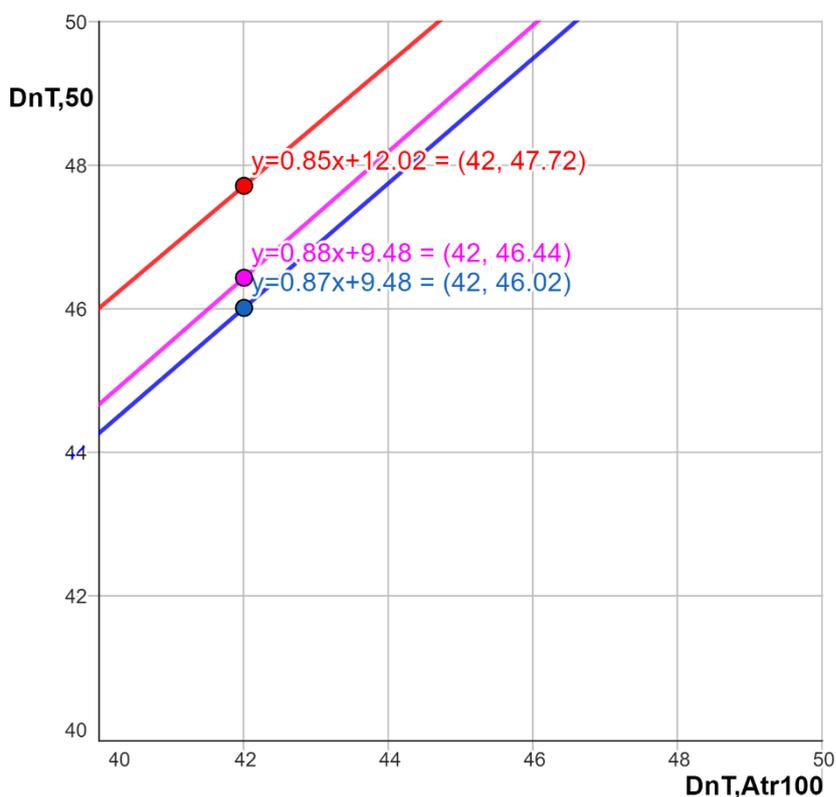


Fonte: Autor

A equação proveniente do TDRIAR-FUZZY, mostra o par cartesiano (42; 40,82), o que significa que a partir de  $D_{nT,A100} = 42dB$ , o número único de  $D_{nT,50} = 41dB$ , diferente em  $-2dB$  em relação ao modelo de Dunbavin e Gerretsen (2014);  $-4dB$  em comparação a relação a Monteiro *et al.* (2017)

A resultante do TDRIAR-FUZZY, mostrou o par cartesiano (42; 46,02); já a equação de Dunbavin e Gerretsen (2014),  $y = 0,88x + 9,48$ , apresentou o par cartesiano (42; 46,44); enquanto a equação de Monteiro *et al.* (2017),  $y = 0,85x + 12,02$ , resultou em (42; 47,72). O número único de  $D_{nT,50} = 46dB$ , por questão de arredondamento, é igual a Dunbavin e Gerretsen (2014), e  $-2dB$  em comparação a relação a Monteiro *et al.* (2017).

Figura 6.3 – Comparativo entre a tradução de  $D_{nT,Atr100}$  para  $D_{nT,50}$  do TDRIAR-FUZZY com os observados na literatura

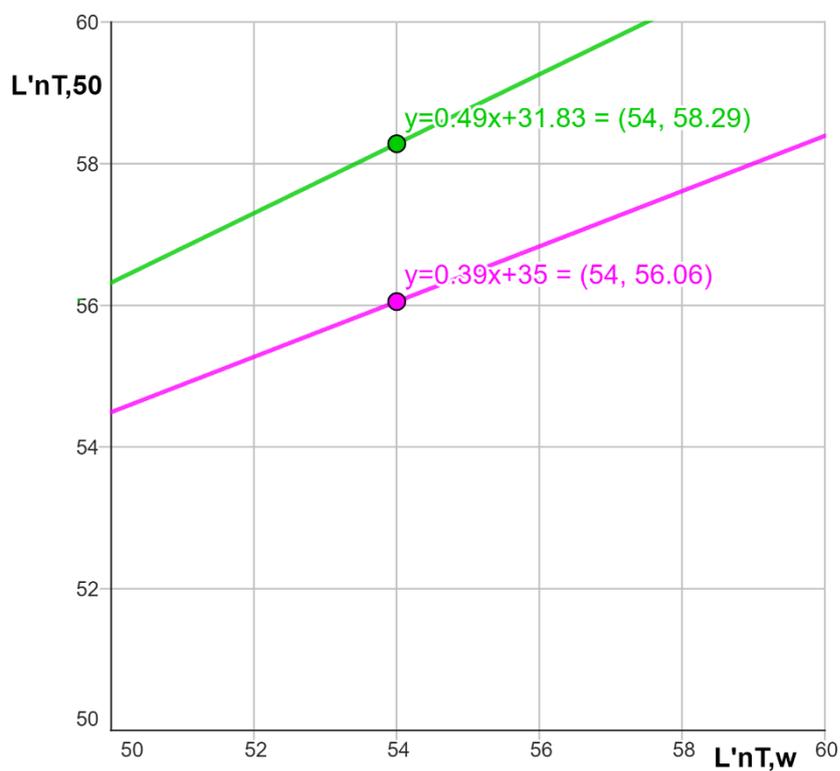


Fonte: Autor

A figura 6.4 apresenta a equação proposta na forma gráfica para tradução de  $L'_{nT,w}$  para  $L'_{nT,50}$  (cor verde), juntamente com a equação observada em Del Val (2018) (cor magenta). O número único  $L'_{nT,w} = 54dB$ , aplicado na equação de tradução proposta resultou em  $L'_{nT,50} = 58,29dB$ . Enquanto na equação de Del Val (2018), resultou em  $L'_{nT,50} = 56,06dB$ .

Uma diferença de  $2dB$  entre ambas. Essa diferença aumenta, à medida que, aumentamos o  $L'_{nT,w}$ . Isso se justifica pela maior inclinação da nossa equação (maior coeficiente angular) e menor coeficiente linear, em relação a equação de Del Val (2018).

Figura 6.4 – Comparativo entre a tradução de  $L'_{nT,w}$  para  $L'_{nT,50}$  do TDRIAR-FUZZY com os observados na literatura



Fonte: Autor

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são tratadas as considerações finais da pesquisa por meio do atestado do cumprimento dos objetivos da pesquisa, das conclusões à cerca do modelo e das sugestões para trabalhos futuros

### 7.1 Cumprimento dos Objetivos

Nesta tese foi desenvolvido um modelo de tradução de descritores e requisitos de isolamento acústico em edificações residenciais, utilizando como base a Teoria dos Conjuntos Fuzzy. O modelo proposto, denominado TRDIAR-FUZZY, é composto por 9 notações e, por definição, atua como um fuzzificador de números fuzzy triangulares. A aplicação prática do TRDIAR-FUZZY, juntamente com os resultados obtidos e a validação desses resultados, atestam o cumprimento do objetivo geral da pesquisa.

Dos resultados obtidos, foram apresentadas as seguintes equações de tradução: a equação  $y = 0,87x + 5,08$ , que traduz  $D_{nT,w}$  para  $D_{nT,50}$ ; a equação  $y = 0,83x + 5,96$  de  $D_{nT,A100}$  para  $D_{nT,50}$ ; a equação  $y = 0,87x + 9,48$  para  $D_{nT,Atr100}$  para  $D_{nT,50}$  e; a equação  $y = 0,49x + 31,83$  responsável por traduzir  $L'_{nT,w}$  para  $L'D_{nT,50}$ .

De forma complementar, foi atestado o cumprimento dos objetivos específicos ao considerar que:

- A aplicação das funções de pertinência desempenhou um papel fundamental na representação dos descritores e requisitos acústicos aéreos e de impacto, permitindo a sua transformação em conjuntos fuzzy. Esses conjuntos, por sua vez, foram sujeitos a uma conversão subsequente, que os traduziu em números fuzzy. Estes números foram posteriormente assumidos como coeficientes de regressão linear em um processo de otimização. Este conjunto de procedimentos, abrangendo a modelagem inicial, conversão e utilização dos números fuzzy como coeficientes de regressão, caracteriza o processo de fuzzificação.
- Observou-se que a etapa de defuzzificação revelou-se desnecessária para o escopo do estudo. Ao empregar o princípio de extensão de Zadeh, foi possível avaliar que a aplicação da equação fuzzy estimada no intervalo de projeções

(alfa cortes) gera um intervalo com conjunto de suporte e máxima pertinência, semelhante à aplicação direta da equação fuzzy estimada.

- Por meio das equações mencionadas anteriormente, tornou-se viável conduzir uma análise comparativa, estabelecendo uma base para a discussão do assunto. Essa análise se baseou na comparação dos resultados obtidos com o nosso modelo com os modelos desenvolvidos por Dunbavin e Gerretsen (2014) e Monteiro et al. (2017) no que diz respeito ao IAA; bem como com o modelo de Del Val et al. (2018) para o IAI.

## 7.2 Conclusões a respeito do TDRIAR-FUZZY

O TDRIAR-FFUZZY se estabelece como um modelo replicável, visto que apresentou um ajuste satisfatório, mesmo com um número limitado de amostras. Esse resultado destaca a relevância do modelo para pesquisas futuras, particularmente devido as dificuldades associadas à coleta de um grande volume de amostras homogêneas em campo (in situ).

O modelo é passível de verificação. Este demonstrou um ajuste adequado em situações em que o descritor (variável independente  $x$ ) estava próximo do seu requisito mínimo, resultando em um coeficiente angular diferente de zero. Um exemplo disso é a situação em que a partição II-B apresenta  $D_{nT,w} = 42dB$  e  $dB Req = 40dB$ . No entanto, quando há um distanciamento significativo entre esses valores, o modelo não se ajusta bem, resultando em um coeficiente angular igual a zero, como exemplificado pela partição LP-4 com  $D_{nT,w} = 50dB$  e  $Req = 40dB$ . Isso indica a necessidade de investigação para um melhor ajuste.

De modo a responder à questão de pesquisa: Como desenvolver um modelo com base na Teoria dos Conjuntos Fuzzy para fins de melhor compreensão do espalhamento de valores associado à tradução de descritores e requisitos aplicada ao isolamento acústico de edificações residenciais? Em resposta, têm-se o processo de fuzzificação. Isto exige qualidade na modelagem dos dados de entrada, tanto na determinação do valor de número único, como na determinação do valor da incerteza (espalhamento). Além disso, exige também domínio conceitual das funções de pertinência e dos testes de verificação. Tudo isso garante a qualidade da transformação dos números crisp em números fuzzy.

Outra questão de pesquisa: Como otimizar a saída de equações lineares de tradução de descritores e requisitos de isolamento acústico em edificações residenciais em números fuzzy e de modo a permitir o estudo do espalhamento de valores possíveis? Em resposta, a otimização

ocorre por meio da minimização do espalhamento dos coeficientes fuzzy. O emprego da regressão linear fuzzy no modelo proporcionou vantagens significativas à pesquisa. A principal delas reside na capacidade de fornecer uma estimativa de saída em forma de intervalo, o que permite uma análise mais abrangente das estimativas. Essa análise da saída se realiza por meio da aplicação da equação linear estimada, o que permite avaliar se o valor estimado de  $y$  está contido ou não dentro do intervalo previamente definido. Isso torna o modelo mais flexível e adequado para investigações que envolvem a estimativa de resultados. Com isso, declara-se que o modelo tem uma adequada contribuição para lacuna do conhecimento destacada na pesquisa.

### 7.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

Ao fim, sugere-se como trabalhos futuros:

- A aplicação do TDRIAR-FUZZY em estudo de tradução de descritores e requisitos de isolamento acústico em fachadas de edificação;
- Como foi utilizado o método de Dunbavin e Gerretsen (2014) para a determinação das variáveis dependentes, sugere o observar o comportamento do TDRIAR-FUZZY, segundo a exploração de outro método;
- Estudo de defuzzificação das equações de tradução por meio de outro(s) método(s);
- A abrangência de estudos de aplicação do modelo em outros temas de desempenho na edificação (conforme os temas abordados na NBR 15575-1 (2021)).

## REFERÊNCIAS

ALONSO, A. et al. Acoustical retrofit of existing residential buildings : Requirements and recommendations for sound insulation between dwellings in Europe and other countries worldwide. v. 174, n. November 2019, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. ASTM E989 - 06. **Standard Classification for Determination of Impact Insulation Class (IIC)**, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. ASTM E413-16. **Classification for Rating Sound Insulation**, 2016.

ANTÓNIO, J.; MATEUS, D. Influence of low frequency bands on airborne and impact sound insulation single numbers for typical Portuguese buildings. **Applied Acoustics**, v. 89, p. 141–151, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10152. **Níveis de ruídos para conforto acústico**, p. 1–4, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12179. **Tratamento acústico em recintos fechados**, v. 1, p. 0–9, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10151. **NBR 10.151 Acústica - Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade - Procedimentos**, p. 4 pg, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575-4. **Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE**, 2021a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575-1. **Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais**, 2021b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 717-1. **Acústica - Classificação de isolamento acústico em edificações e elementos de edificações — Parte 1: Isolamento a ruído aéreo**, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 717-2. **Acústica - Classificação de isolamento acústico em edificações e elementos de edificações — Parte 2: Isolamento a ruído de impacto**, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 16283-1. **Acústica - Medição de campo do isolamento acústico nas edificações e nos elementos de edificações — Parte 1: Isolamento a ruído aéreo**, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 16283-1. **Acústica - Medição de campo do isolamento acústico nas edificações e nos elementos de edificações — Parte 2: Isolamento a ruído de impacto**, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 3382-2. **Acústica - Medição de parâmetros de acústica de salas - Parte 2: Tempo de reverberação em salas comuns**, 2017.

BARROS, L. C. DE; BASSANEZI, R. C.; LODWICK, W. A. **A First Course in Fuzzy Logic, Fuzzy Dynamical Systems, and Biomathematics**. Berlin: Springer, 2017.

BERANEK, L. L. Analysis of Sabine and Eyring equations and their application to concert hall audience and chair absorption. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 120, n. 3, p. 1399–1410, 2006.

BERARDI, U.; RASMUSSEN, B. Acoustic classification of dwellings - A comparison between national schemes in Europe and the situation in the U.S. **Proceedings of Meetings on Acoustics**, v. 21, n. 1, 2014.

BERTALANFFY, L. VON. **Teoria Geral dos Sistemas**. 5. ed. Petrópolis: Editora Vozes, 2010.

BETARELLI JUNIOR, A. A.; FERREIRA, S. DE F. **Introdução à análise qualitativa comparativa e aos conjuntos Fuzzy (fsQCA)**. Brasília: ENAP, 2018.

BISTAFA, S. R. **Acústica Aplicada ao Controle do Ruído**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2018.

BLOTTER, J. D.; SOMMERFELDT, S. D.; GEE, K. L. Chapter 26 acoustics. In: **Mechanical Engineers' Handbook**. 4. ed. Utah: John Wiley & Sons, Inc, 2015.

BORGES, A. N.; RODRIGUES, C. G. **Introdução a Física Acústica**. 1. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2017.

BORGES, C. A. DE M.; SABBATINI, F. H. **O conceito de desempenho de edificações e a sua importância para o setor da construção civil no Brasil**. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP*. São Paulo: [s.n.].

CARNEIRO, P. C. S.; OLIVEIRA, R. D. Thermal and acoustical performance of building systems: Study of tools that assist NBR15,575/2013 Brazilian building standard compliance assessment. *Revista Materia*, v. 25, n. 1, 2020.

CORNACCHIA, G. M. M. **Investigação In-Situ do Isolamento Sonoro ao Ruído de Impacto em Edifícios Residenciais**. Dissertação de Mestrado- Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, São Florianópolis, SC, 2009.

DEL VAL, L. et al. Translation between existing and proposed harmonized impact sound insulation descriptors and alignment within a proposed common acoustic classification scheme for buildings. *Applied Acoustics*, v. 129, p. 204–216, 2018.

DEMO, P. **Introdução à metodologia da ciência**. – 2. ed. – 21. reimpr. – São Paulo : Atlas, 2013.

DUNBAVIN, P.; GERRETSEN, E. How to Translate Sound Insulation Descriptors and Requirements. In: **Building acoustics throughout Europe Volume 1: Towards a common framework in building acoustics throughout Europe**. Copenhagen, Denm: COST TU0901, 2014. p. 65–79.

EVEREST, F. A. **Master Handbook of Acoustics**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2001.

FABBRI, S. C. P. F. et al. Externalising tacit knowledge of the systematic review process. *IET Software*, v. 7, n. 6, p. 298–307, 2013.

FERREIRA NETO, M. DE F. **Nível de conforto acústico: uma proposta para edifícios residenciais**. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, SP, 2009.

FERREIRA NETO, M. DE F.; BERTOLI, S. R. Desempenho acústico de paredes de blocos e tijolos cerâmico: uma comparação entre Brasil e Portugal. *Ambiente Construído*, v. 10, n. 4, p. 169–180, 2010.

GARG, N.; KUMAR, A.; MAJI, S. Measurement Uncertainty in Airborne Sound Insulation and Single-Number Quantities: Strategy and Implementation in Indian Scenario. **Mapan - Journal of Metrology Society of India**, v. 31, n. 1, p. 43–55, 2016.

GERGES, S. N. Y. **Ruído: Fundamentos e Controle**. 2. ed. Florianópolis: Gerges, S.N.Y., 2000.

GERRETSEN, E. Calculation of the sound transmission between dwellings by partitions and flanking structures. **Applied Acoustics**, v. 12, n. 6, p. 413–433, 1979.

GERRETSEN, E. European variety of descriptors for building acoustic performance and translation into proposed harmonized descriptors. **42nd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering 2013, INTER-NOISE 2013: Noise Control for Quality of Life**, v. 2, p. 1459–1466, 2013.

GERRETSEN, E.; SCAMONI, F. ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF VARIOUS SOUND INSULATION DESCRIPTORS ( QUANTITY , RATING , FREQUENCY RANGE ) - FIRST OVERVIEW. 2010.

GIBBS, B. M.; MALUSKI, S. Dwellings at Low Frequencies. **Building Acoustics**, v. 11, n. 1, p. 61–78, 2004.

GUPTA, M.; JIN, L.; HOMMA, N. **Static and Dynamic Neural Networks: From Fundamentals to Advanced Theory**. New Jersey: JOHN WILEY, 2003.

HALLIDAY, D.; RESNIK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física 2**. ed 4 vol 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

HEISSLER, R. F. **Análise Comparativa do Isolamento Acústico em Diferentes Geometrias: Ensaios em Campo e Simulações Computacionais**. Dissertação de Mestrado- Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, São Leopoldo, RS, 2018.

HÖLLER, C. Review and comparison of ASTM and ISO standards on sound transmission in buildings. **INTER-NOISE 2018 - 47th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Impact of Noise Control Engineering**, n. September, 2018.

HOPKINS, C. **Sound insulation**. 5. ed. Burlington: Elsevier, 2007.

HOPKINS, C.; TURNER, P. Field measurement of airborne sound insulation between rooms with non-diffuse sound fields at low frequencies. **Applied Acoustics**, v. 66, n. 12, p. 1339–1382, 2005.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 1996-1.

**Description and measurement of environmental noise - Part 1 Basic quantities and procedures**, v. 2014, n. 5, p. 13, 2016.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 16283. **Acoustics — Measurement of sound insulation in buildings and of building elements — Part 4: Field measurements of airborne sound insulation between rooms**, v. 1998, p. 30, 2014.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 12999-1.

**Determination and application of measurement uncertainties in building acoustics - Part 1: Sound insulation**, v. 2014, 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO/IEC Guide 98, Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM), 1995.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO 19208. **ISO 19208 Performance standards in building: principles for their preparation and factors to be considered**. Genève: 2016.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION ISO 16283-2. ISO 16283-2. **Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 7: Field measurements of impact sound insulation of floors**, v. 2015, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION ISO 12354-1: ISO 12354-1. **Building acoustics — Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements — Part 1: Airborne sound insulation between rooms**, v. 2017, 2017.

JACOBSEN, F. et al. **FUNDAMENTALS OF ACOUSTICS AND NOISE CONTROL - Lecture note**. [s.l.] Department of Electrical Engineering, Technical University of Denmark, 2011.

KITCHENHAM, B. **Procedures for performing systematic reviews** joint technical report **TR/SE-0401 (Keele) – 0400011 T.1 (NICTA)**'. Software Engineering Group – Department of Computer Science – Keele University and Empirical Software Engineering – National ICT Australia Ltd. Keele: [s.n.].

KITCHENHAM, B. et al. Systematic literature reviews in software engineering - A systematic literature review. **Information and Software Technology**, v. 51, n. 1, p. 7–15, 2009.

KITCHENHAM, B.; CHARTERS, S. **Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering** EBSE Technical Report **EBSE-2007-01**. [s.l: s.n.].

KLIR, G.; YUAN, B. **Fuzzy sets and fuzzy logic: Theory and applications**. New Jersey: Prentice Hall, 1995. v. 20

KOSKO, B. **Fuzzy thinking: the new science of fuzzy logic**. New York: Hyperion, 1993.

KÖCHE, J. C. Fundamentos de metodologia científica: teoria da ciência e iniciação à pesquisa. 34. ed. Petrópolis: Vozes, 2015.

KYLLIÄINEN, M. The measurement uncertainty of single-number quantities for rating the impact sound insulation of concrete floors. **Acta Acustica united with Acustica**, v. 100, n. 4, p. 640–648, 2014.

**KUHN, E. M. Análise do Desempenho Acústico de Edificação Habitacional de Âmbito Social conforme a NBR 15.575**. Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Civil, Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, RS, 2015.

LJUNGGREN, F.; SIMMONS, C. Airborne sound insulation between dwellings, from 50 vs. 100 Hz – A compilation of Swedish field surveys. **Applied Acoustics**, v. 133, n. December 2017, p. 58–63, 2018.

LJUNGGREN, F.; SIMMONS, C.; HAGBERG, K. Correlation between sound insulation and occupants' perception - Proposal of alternative single number rating of impact sound. **Applied Acoustics**, v. 85, p. 57–68, 2014.

LJUNGGREN, F.; SIMMONS, C.; ÖQVIST, R. Correlation between sound insulation and occupants' perception – Proposal of alternative single number rating of impact sound, part II. **Applied Acoustics**, v. 123, p. 143–151, 2017.

LODWICK, W. A.; DUBOIS, D. Interval linear systems as a necessary step in fuzzy linear systems. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 281, p. 227–251, 2015.

LORENZI, L. S. **Análise crítica e proposições de avanço nas metodologias de ensaios experimentais de desempenho à luz da ABNT NBR 15575 (2013) para edificações habitacionais de interesse sociais térreas / Luciani Somensi Lorenzi**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

MACHIMBARRENA, M. et al. 22nd International Congress on Acoustics Acoustics for the 21 st Century Translation between existing impact sound insulation descriptors , based on a large set of in situ measurements. v. 015003, 2016.

MACHIMBARRENA, M.; FAUSTI, P. **EN BUSCA DE UN MARCO COMÚN EUROPEO EN MATERIA DE AISLAMIENTO ACÚSTICO EN VIVIENDAS : INTERCAMBIO DE EXPERIENCIAS Y DIFICULTAD DE CONSENSO**. 44º Congresso Español de Acústica - EAA European Symposium on Environmental Acoustic and Noise Mapping. **Anais...**Valladolid: 2013

MACHIMBARRENA, M.; RASMUSSEN, B. Acoustic regulations for housing and schools in Europe and South America – A pilot study in 2016. v. 015013, p. 015013, 2017.

MACHIMBARRENA, M.; RASMUSSEN, B.; FAUSTI, P. Evolución del marco normativo internacional en acústica de la edificación. **FIA2014 IX Congreso Iberoamericano de Acústica-Actas del Congreso**, n. December, p. 51–70, 2014.

MARCONI, M. A; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 9. ed. – [2. Reimpr.]. - São Paulo: Atlas, 2023.

MICHALSKI, R. L. X. N. **Metodologias para medição de isolamento sonoro em campo e para expressão da incerteza de medição na avaliação do desempenho acústico de edificações**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

MITIDIERI FILHO, C. V. M.; HELENE, P. R. L. **Avaliação de Desempenhp de Componentes e Elementos Construtivos Inovadores Destinados a Habitações. Proposições Específicas à Avaliação do Desempenho Estrutural**. São Paulo: [s.n.].

MONTEIRO, C. et al. Translation between existing and proposed harmonized airborne sound insulation descriptors: A statistical approach based on in-situ measurements. **Applied Acoustics**, v. 116, p. 94–106, 2017.

- MONTEIRO, C. R. A. et al. Comparative analysis of airborne sound insulation field measurements using different ISO 717-1 performance descriptors - Lightweight separating walls and floors. **Proceedings - European Conference on Noise Control**, v. 2017, n. April 2016, p. 1202–1207, 2012.
- MORANDI, M. I. W. M.; CAMARGO, L. F. R. **Revisão sistemática da literatura In: Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Bookman ed. Porto Alegre: [s.n.].
- NEUBAUER, R. O.; KANG, J. What describes the airborne sound insulation in technical and subjective regard? **Proceedings of Forum Acusticum**, n. October 2014, p. 1783–1787, 2011.
- NEUBAUER, R. O.; KANG, J. Airborne sound insulation in terms of a loudness model. **Applied Acoustics**, v. 85, p. 34–45, 2014.
- NICOLETTI, M. DO C.; CAMARGO, H. DE A. **Fundamentos da Teoria de Conjuntos Fuzzy**. São Carlos: EdUFSCar, 2011.
- OLIVEIRA JUNIOR, H. A. **Inteligência Computacional: Aplicada à Administração, Economia e Engenharia em Matlab**. São Paulo: Thomson Le, 2007.
- ÖQVIST, R.; LJUNGGREN, F.; JOHNSON, R. Walking sound annoyance vs. impact sound insulation from 20 Hz. **Applied Acoustics**, v. 135, n. January, p. 1–7, 2018.
- PATRÍCIO, J. **Acústica nos Edifícios**. 7ª ed., revista e aumentada, Lisboa: Publindústria, 2018.
- PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F. **An Introduction to Fuzzy Sets**. Cambridge: MIT, 1998.
- PINTO, R. B. **Determinação Experimental e Numérica da Redução Sonora Aérea em Paredes de Alvenaria Utilizadas em Habitações**. Dissertação de Mestrado- Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Santa Maria (RS), 2011.
- PRATO, A.; SCHIAVI, A. Sound insulation of building elements at low frequency: A modal approach. **Energy Procedia**, v. 78, p. 128–133, 2015.
- PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. – Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

RASMUSSEN, B. Sound insulation between dwellings - Requirements in building regulations in Europe. **Applied Acoustics**, v. 71, n. 4, p. 373–385, 2010.

RASMUSSEN, B. Sound insulation between dwellings - Overview of the variety of descriptors and requirements in Europe. **Proceedings of Forum Acusticum**, p. 1793–1798, 2011.

RASMUSSEN, B.; GERRETSEN, E. Proposal for an Acoustic Classification Scheme for Housing. In: **COST Action TU0901 – Building acoustics throughout Europe. Volume 1: Towards a common framework in building acoustics throughout Europe**. Copenhagen, Denm: COST Action TU0901, 2014. v. 1p. 81–100.

RASMUSSEN, B.; RINDEL, J. H. Sound insulation between dwellings - Descriptors applied in building regulations in Europe. **Applied Acoustics**, v. 71, n. 3, p. 171–180, 2010.

RINDEL, J. H. Acoustic Quality and Sound Insulation between Dwellings. **Building Acoustics**, v. 5, n. 4, p. 291–301, 1998.

RINDEL, J. H. **Sound Insulation in Buildings**. Boca Raton: CRC Press, 2018. v. 1

RINDEL, J. H.; RASMUSSEN, B. Some consequences of including low frequencies in the evaluation of floor impact sound. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 100, n. 4, p. 2769–2769, 1996.

ROSS, J. T. **Fuzzy Logic with Engineering Applications**, John Wiley & Sons Ltd, 2004.

SAMPAIO, R. F.; MANCINI, M. C. Estudos de Revisão Sistemática: Um Guia para Síntese Críteriosa da Evidência Científica. **Revista Brasileira de Fisioterapia**, v. 11, n. 1, p. 83–89, 2007.

SANTANA, W. B. **Desempenho Acústico das Edificações Segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013): Desempenho das Vedações e Validação dos Requisitos Normativos com Base na Opinião dos Usuários**. Dissertação de Mestrado Universidade Federal do Pará, Instituto der Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Belém, PA, 2016.

SANTANA, W. B. et al. Rating of acoustic performance levels of NBR 15575 (2013) based on user perception: A case study in the Brazilian Amazon. **Building Acoustics**, v. 24, n. 4, p. 239–254, 2017.

SCHOLL, W.; LANG, J.; WITTSTOCK, V. Rating of sound insulation at present and in future. the revision of ISO 717. **Acta Acustica united with Acustica**, v. 97, n. 4, p. 686–698, 2011.

SCHWELA, D. H.; FINEGOLD, L. S.; GJESTLAND, T. Progress on environmental noise policies from 2008-2013 in Asia and the world. **INTERNOISE 2014 - 43rd International Congress on Noise Control Engineering: Improving the World Through Noise Control**, n. November, 2014.

SCROSATI, C. et al. Uncertainty analysis by a Round Robin Test of field measurements of sound insulation in buildings: Single numbers and low frequency bands evaluation - Airborne sound insulation. **Noise Control Engineering Journal**, v. 61, n. 3, p. 291–306, 2013.

SENGE, P. **A Quinta Disciplina**. 23. ed. [s.l.] Editora Best Seller, 2008.

SHAPIRO, A. F. *Fuzzy Regression Models*. Penn State University, 2005.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação** – 4. ed. rev. atual. – Florianópolis: UFSC, 2005. 138p.

SOUZA, T. B. **Avaliação dos sistemas construtivos usuais quanto aos requisitos acústicos segundo à norma ABNT NBR 15575 – desempenho das edificações**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Fortaleza, 2016.

SUGENO, M.; YASUKAWA, T. A Fuzzy-Logic-Based Approach to Qualitative Modeling. **IEEE TRANSACTIONS ON FUZZY SYSTEMS**, v. 1, p. 7–31, 1993.

TAKAHASHI, V. F. DE M. **Desempenho Acústico De Edificações: Ferramenta Computacional Para Avaliação**. [s.l.] Universidade de Campinas, 2016.

TANAKA, H., UEJIMA, S. AND ASAI, K. **Linear Regression Analysis with Fuzzy Model**, IEEE Transactions Systems Man, and Cybernetics, vol. SMC - 12, 903 - 907, nº 6, 1982.

TIE, T. S. et al. Sound absorption performance of modified concrete: A review. **Journal of Building Engineering**, v. 30, n. November 2019, p. 101219, 2020.

WHO. Guidelines for Community Noise. n. April, 1999.

WHO. NIGHTNOISE GUIDELINES FOR EUROPE. 2009.

WHO. **Burden of disease from Burden of disease from.** [s.l: s.n.].

ZADEH, A. Z. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, p. 338–353, 1965.

ZIMMERMANN, H.-J. **Fuzzy Set Theory and Its Applications.** [s.l.] Springer, 2001. v. 13

## APÊNDICE A – REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Kitchenham (2004) e Kitchenham e Charters (2007) definem RSL como: “um meio de identificar, avaliar e interpretar as pesquisas disponíveis relevantes para uma determinada questão de pesquisa, ou tópico, ou fenômeno de interesse”. Para Sampaio e Mancini (2007), a RSL “é uma forma de pesquisa que utiliza como fonte de dados a literatura sobre determinado tema”. De acordo com Morandi e Camargo (2015): “são estudos secundários utilizados para mapear, encontrar, avaliar criticamente, consolidar e agregar os resultados de estudos primários relevantes acerca de uma questão ou tópico de pesquisa específico”. Os estudos primários, são os estudos individuais que servem de entradas da RSL. Enquanto que, o estudo secundário é constituído da própria RSL (KITCHENHAM, 2004).

A palavra sistemática faz referência a forma de condução da pesquisa. Condução este segundo método que considera a busca explícita e sistematizada, apreciação crítica dos estudos primários e síntese da informação selecionada (SAMPAIO; MANCINI, 2007). Para Morandi e Camargo (2015), trata-se de um método explicativo, planejado, responsável e justificável, de modo a permitir que a pesquisa seja isenta de viés, rigorosa, auditável, replicável e atualizável.

Com relação as justificativas para a realização de uma RSL, Saunders *et al* 2012 *apud* Morandi e Camargo (2015) sugerem que todo projeto de pesquisa considere a RSL como etapa constituinte do método. Do ponto de vista do pesquisador, é importante que este esteja suficientemente informado do que foi pesquisado, como foi pesquisado, os resultados obtidos e o que não foi pesquisado (MORANDI; CAMARGO, 2015). Neste sentido, a RSL se justifica, pois ela possibilita: (a) identificar, agregar e sintetizar as evidências acerca dos benefícios e limitações de um determinado assunto (FABBRI *et al.*, 2013; KITCHENHAM, 2004; KITCHENHAM *et al.*, 2009; KITCHENHAM; CHARTERS, 2007); (b) identificar eventuais lacunas do conhecimento do assunto, a fim de sugerir oportunidades de pesquisa (KITCHENHAM, 2004; KITCHENHAM; CHARTERS, 2007; MORANDI; CAMARGO, 2015); (c) fornecer uma base conceitual (framework) (KITCHENHAM, 2004; MORANDI; CAMARGO, 2015).

Com relação aos processos da RSL, destaca-se as fases propostas por Kitchmann (2004), a saber: planejamento da pesquisa; condução; relatório da pesquisa. No planejamento é considerado a identificação da necessidade de revisão, especificação de questões de pesquisa, desenvolvimento e avaliação de protocolo de revisão. A fase de condução da pesquisa contempla a identificação da pesquisa, seleção de estudos primários, avaliação da qualidade dos

estudos primários, extração de dados e monitoramento e síntese dos dados. Por fim, na fase de relatório são especificados os mecanismos de disseminação da pesquisa, o formato do relatório e a avaliação do relatório.

Fabbri *et al.* (2013) propuseram 04 (quatro) fases para RSL, tendo como base Kitchmann (2004): (a) fase de planejamento, que compreende a definição do protocolo da RSL, uma pesquisa piloto e a definição de um formulário de extração de dados; (b) fase de seleção inicial, que compreende a pré-seleção de estudos primários, a verificação de possíveis novas palavras-chave e, conseqüentemente, novas *strings* de busca, visando o aprimoramento da busca e coleta do maior número de artigos pertinentes; (c) fase de seleção final e extração, que abrange a seleção final dos estudos primários e extração de dados; (d) fase de síntese, que finalmente considera a análise dos dados e elaboração de relatório. Vale ressaltar que a proposta de Fabbri *et al.* (2013) é iterativa, pois solicita iterações dentro de cada fase (intra-fase) e iterações entre as fases (interfase). Além disso, solicita em todo processo as atividades de verificação e filtros.

A necessidade de realização da RSL está em levantar uma lacuna do conhecimento dentro do tema, como forma de atestar o ineditismo da pesquisa, requisito desta tese de doutorado. Além disso, poder construir uma base conceitual adequada e suficiente para sustentação do método proposto nesta tese.

A RSL seguiu as etapas sugeridas por Fabbri *et al.* (2013). O estudo teve auxílio do *software* StArt (State of the Art through Systematic Review) (Figura 1), *software* este desenvolvido por pesquisadores do Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software da Universidade Federal de São Carlos. O Start é útil para estudos de RSL, pois suporta todas as fases da mesma, além de oferecer funções de armazenamento e gerenciamento de dados. A seleção deste *software*, se deve ao fato que, a parte lógica é compatível com as fases propostas por (FABBRI *et al.*, 2013), bem como as iterações, filtros e verificações requeridas.

O planejamento teve como foco a elaboração do protocolo. Para tal foi necessário estudo preliminar de artigos de modo a estruturar o protocolo com os itens necessários e suficientes para atingir o objetivo da RSL. No estudo preliminar foi observado os metadados de alguns artigos previamente selecionados no *google* acadêmico para estrututuração das buscas e seleção seleção inicial dos artigos primários, tais como: palavras-chave praticadas; os periódicos envolvidos; as indexações dos periódicos nas bases de dados. Com isso, pode-se

definir as palavras-chave, bem como as bases de dados para busca e seleção inicial dos artigos primários.

O Quadro A1 apresenta o protocolo. Este foi elaborado dentro do ambiente Start, logo o roteiro seguiu o formulário dentro do *software*. O objetivo da RSL, bem como a questão já estavam previamente determinadas. Com o estudo preliminar, definiu-se 04 (quatro) palavras-chave e 03 (três) bases de dados para a primeira busca. Posteriormente, foram incluídas mais 04 (quatro) palavras-chave para a segunda busca. Optou-se pela busca de artigos somente no idioma inglês, considerando a prática universal dentro das bases de dados e periódicos internacionais, além de que, cada artigo possui no mínimo título, resumo e palavras-chave escrito em inglês, independente do idioma praticado no corpo do texto.

Quadro A1- Protocolo da RSL

<b>Objetivo:</b> Estudar o estado da arte do assunto: avaliação de desempenho acústico de edificações residenciais	
<b>Questão:</b> Quais as informações pertinentes para avaliar o desempenho acústico de edificações residenciais?	
<b>Palavras-chave</b>	(i) Building; (ii) Acoustic; (iii) Performance; (iv) Evaluation; (v) Dwelling; (vi) Sound insulation; (vii) Descriptors; (viii) Low frequencies; (ix) Airbone sound insulation, (x) Impact sound insulation
<b>Crítérios de seleção das fontes:</b> A base indexa arquivos do assunto de interesse	
<b>Idioma</b>	Inglês
<b>Método de pesquisa das fontes:</b> Estudo preliminar de palavras-chave; execução de busca em bases de dados; exportação de arquivos em formato Bibtex (ou outro formato, caso necessário); importação dos arquivos para o Start; procedimentos de inclusão e exclusão de artigos, conforme critérios de seleção previamente definidos	
<b>Lista de fontes:</b>	(i) Web of Science; (ii) Scopus; (iii) Science Direct
<b>Crítérios de inclusão (I) e exclusão (E) de estudos primários:</b>	(I) desenvolveu e/ou adaptou um método de avaliação de desempenho acústico em edificações residenciais, considerando os descritores de isolamento acústico.

	(I) aplicou um método de avaliação de desempenho acústico em edificações residenciais, considerando os descritores de isolamento acústico em baixas frequências. (E) não satisfazer os dois critérios de inclusão (E) artigos de revisão
<b>Extração de dados:</b>	a) Relatar o tipo de isolamento acústico. b) Relatar o descritor acústico abordado e o termo de adaptação do espectro acústico. c) Relatar o espaço amostral. d) Relatar a faixa de frequência estudada. e) Relatar os requisitos acústicos adotado. f) Relatar as grandezas estatísticas analisadas.

Ainda a respeito do protocolo (Quadro A1), os campos critérios de inclusão e exclusão de estudos primários e extração de dados, foram preenchidos e refinados conforme a aquisição de conhecimento do assunto pelo pesquisador. Neste sentido, algo favorável foi o acompanhamento da disciplina Desempenho Acústico do Ambiente, ofertada pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo – PPGAU – UFPA.

Com relação a seleção inicial de artigos primários, na data 05/05/2020, foi realizada a primeira busca, com uso das palavras-chave *acoustic, building, performance e evaluation*. As palavras-chave foram estruturadas em *strings* de busca (ver Quadro 2) e introduzidas nas 03 (três) bases de dados. Em cada base de dados, foi respeitada as recomendações presentes nos tutoriais com relação a estruturação de strings. Para todas as buscas foram configuradas o modo de busca avançada, sem restrição de tempo de publicação e somente artigos de periódicos. Com a leitura dos metadados dos artigos coletados, percebeu-se a necessidade de buscas mais específicas, o que acarretou na seleção de novas palavras-chave (*dwelling, sound insulation, descriptors e low frequencies, airborne sound insulation, impact sound insulation*, conforme relacionadas no protocolo). Sendo assim, a segunda busca foi realizada na data 17/01/2021, com uso das novas palavras-chave e com as mesmas configurações de busca praticadas na primeira busca e a terceira busca, na data 20/01/2021. O Quadro A2 apresenta em detalhes as *strings* praticadas nas respectivas bases, o total de saídas de artigos de cada busca.

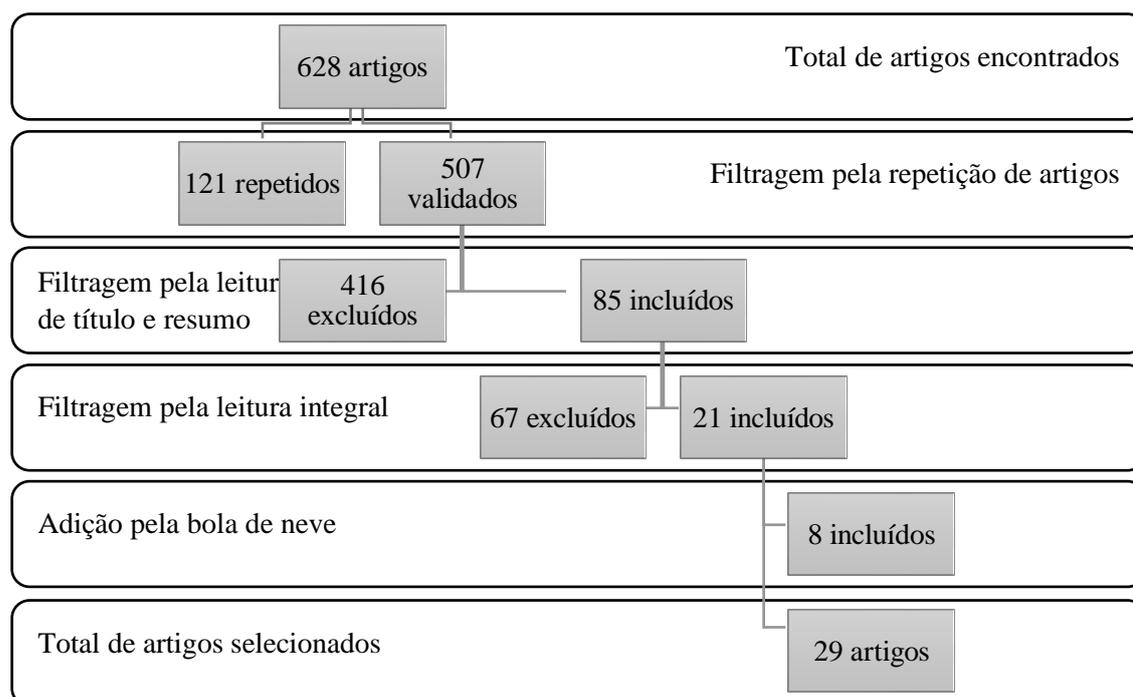
Quadro A2- Bases e Strings de busca

Base	String de entrada	Saídas
Web of Science	(TS = (Building* AND Acoustic* AND Performance* AND Evaluation*)) AND IDIOMA: (English) AND TIPOS DE DOCUMENTO: (Article) Índices=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, ESCI Tempo estipulado=Todos os anos	161
	(TS = (Building* AND Acoustic* AND Dwelling* AND ("Sound insulation*" OR Descriptors* OR "Low frequencies*"))) AND IDIOMA: (English) AND TIPOS DE DOCUMENTO: (Article) Índices=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, ESCI Tempo estipulado=Todos os anos	27
	((TS = (Building* AND ("Airbone sound insulation*" OR "Impact sound insulation*") AND ("Low frequency*" OR "Low-frequency*" OR "Low frequencies*")))) AND IDIOMA: (English) AND TIPOS DE DOCUMENTO: (Article) Índices=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, ESCI Tempo estipulado=Todos os anos	9
Scopus	TITLE-ABS-KEY (*building AND *acoustic AND *performance AND *evaluation) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, "English"))	190
	TITLE-ABS-KEY (*building AND *acoustic AND *dwelling AND ("*sound insulation" OR *descriptors OR "*low frequencies")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, "English"))	64
	TITLE-ABS-KEY ("*Airbone sound insulation" OR "*Impact sound insulation") AND ("*low frequency" OR "*low-frequency" OR "*low frequencies") AND "*building" AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar"))	53
Science Direct	Title, abstract, keywords: building AND acoustic AND performance AND evaluation	106
	Title, abstract, keywords: building AND acoustic AND dwelling AND ("sound insulation" OR descriptors OR "low frequencies")	14

	Title, abstract, keywords: ("Airbone sound insulation" OR "Impact sound insulation") AND ("low frequency" OR "low-frequency" OR "low frequencies") AND "building"	4
--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---

A somatória de todas as saídas resultou em 628 artigos. As saídas de cada busca foram exportadas em arquivos no formato *Bibtex*. Posteriormente, os arquivos foram carregados (*upload*) no ambiente Start. Os 628 artigos coletados passaram pelo processo de filtragem. A primeira filtragem aplicada foi a averiguação de artigos duplicados. No ato do carregamento dos arquivos, foi acionada a configuração para verificação automática de artigos duplicados. Sendo assim, foram levantados 121 artigos duplicados, e com a diferença, 507 artigos foram submetidos a segunda filtragem, a leitura de títulos e resumos. A figura A1 sintetiza as informações do processo de filtragem.

Figura A1 Processo de filtragem



Na segunda filtragem, foram aplicados os critérios dispostos no campo do protocolo - critérios de inclusão e exclusão de estudos primários. A observância da aplicação, de no mínimo, um dos itens é critério para aceitação final do artigo. Por outro lado, a não observância de nenhum dos itens, é critério para exclusão. Um recurso do Start praticado nesta etapa, foi a abertura de uma interface em cada artigo, onde pode-se fazer a leitura de título, resumo e palavras-chave, além de fazer a análise do *score* do artigo. Tal *score* considera o cálculo por

ocorrência da palavra-chave definida no protocolo dentro do título de cada artigo (5 pontos), no resumo (3 pontos) e nas palavras-chave (2 pontos). Ao final desta fase, foram selecionados 85 artigos para leitura na íntegra, e com a diferença, foram excluídos 416 artigos. O número expressivo de exclusões, se deve ao fato que, nos 507 artigos analisados nesta fase, há aplicações em edificações para diversos fins, tais como: residenciais; comerciais; hospitalares; escolares; etc, e os critérios de inclusão consideram somente edificações para fins residenciais, objeto deste projeto de tese.

Em relação a seleção final e extração, esta fase é executada no *Start* na configuração extração e corresponde a terceira filtragem. Procedeu-se com a leitura dos 85 artigos na íntegra e de forma criteriosa e crítica. O critério considerado nesta fase foi a observância de conceitos relacionados ao desempenho acústico em edificações residenciais, o que inclui os descritores básicos de isolamento de som aéreo e de impacto, termos de adaptação de espectro, isolamento acústico em baixas frequências, requisitos normativos, etc. Neste sentido, foram selecionados 21 artigos e, pela diferença, 64 artigos excluídos. Ademais, foi considerado a busca bola de neve (*snowballing* no *Start*), a partir da apreciação de listas de referências bibliográficas dos artigos selecionados. Com a bola de neve foram adicionados 8 artigos selecionados, totalizando em 29 artigos finais.

Apêndice B - Partição III-B - Cálculo de  $D_{nT,w}$ ,  $D_{nT,A100} = (D_{nT,w} + C)$  e  $D_{nT,Atr100} = (D_{nT,w} + C_{tr})$ 

Frequência de um terço de oitava (Hz)	$D_{nT} *$	$D_{nT} **$	Valores de Referência (Hz)	Curva ajustada $D_{nT,w}$	Diferenças (+)	Espectro nº1	$L_{i1} - D_{nT}$	$10^{(L_{i1}-D_{nT})/10}$	Espectro nº2	$L_{i1} - D_{nT}$	$10^{(L_{i1}-D_{nT})/10}$
100	32,7	32,76	33,0	22,0	-10,76	-29,00	-61,76	6,6712E-07	-20,00	-52,76	5,29912E-06
125	31,9	31,96	36,0	25,0	-6,96	-26,00	-57,96	1,60031E-06	-20,00	-51,96	6,37095E-06
160	33,2	33,26	39,0	28,0	-5,26	-23,00	-56,26	2,36703E-06	-18,00	-51,26	7,48521E-06
200	37,5	37,56	42,0	31,0	-6,56	-21,00	-58,56	1,39381E-06	-16,00	-53,56	4,40762E-06
250	37,5	37,56	45,0	34,0	-3,56	-19,00	-56,56	2,20904E-06	-15,00	-52,56	5,54886E-06
315	34,1	34,16	48,0	37,0	2,84	-17,00	-51,16	7,65957E-06	-14,00	-48,16	1,52828E-05
400	37,0	37,06	51,0	40,0	2,94	-15,00	-52,06	6,22593E-06	-13,00	-50,06	9,86743E-06
500	38,7	38,76	52,0	<b>41,0</b>	2,24	-13,00	-51,76	6,6712E-06	-12,00	-50,76	8,39855E-06
630	37,7	37,76	53,0	42,0	4,24	-12,00	-49,76	1,05731E-05	-11,00	-48,76	1,33108E-05
800	36,1	36,16	54,0	43,0	6,84	-11,00	-47,16	1,924E-05	-9,00	-45,16	3,04933E-05
1000	37,3	37,36	55,0	44,0	6,64	-10,00	-47,36	1,8374E-05	-8,00	-45,36	2,91209E-05
1250	41,9	41,96	56,0	45,0	3,04	-9,00	-50,96	8,02055E-06	-9,00	-50,96	8,02055E-06
1600	47,7	47,76	56,0	45,0	-2,76	-9,00	-56,76	2,10962E-06	-10,00	-57,76	1,67573E-06
2000	49,7	49,76	56,0	45,0	-4,76	-9,00	-58,76	1,33108E-06	-11,00	-60,76	8,39855E-07
2500	48,0	48,06	56,0	45,0	-3,06	-9,00	-57,06	1,96881E-06	-13,00	-61,06	7,83798E-07
3150	47,1	47,16	56,0	45,0	-2,16	-9,00	-56,16	2,42217E-06	-15,00	-62,16	6,08421E-07
							Soma	9,28334E-05		Soma	0,000147514
							-10Lg(soma)	40,32295937		-10Lg(soma)	38,31167129
							C	-1,0		Ctr	-3
								<b>40</b>			<b>38</b>

Fonte: Adaptado de NBR ISO 717-1 (2021)

 $D_{nT} *$ : valores compilados $D_{nT} **$ : valores ajustados baseados na equação de Dunbavin e Gerretsen (2014)

Diferenças (+): 28,79 dB &lt; 32,00 dB

Incremento: -11

Apêndice B - Partição IV-B - Cálculo de  $D_{nT,w}$ ,  $D_{nT,A100} = (D_{nT,w} + C)$  e  $D_{nT,Atr100} = (D_{nT,w} + C_{tr})$ 

Frequência de um terço de oitava (Hz)	$D_{nT} *$	$D_{nT} **$	Valores de Referência (Hz)	Curva ajustada $D_{nT,w}$	Diferenças (+)	Espectro nº1	$L_{i1} - D_{nT}$	$10^{(L_{i1}-D_{nT})/10}$	Espectro nº2	$L_{i1} - D_{nT}$	$10^{(L_{i1}-D_{nT})/10}$
100	38,9	38,94	33,0	25,0	-13,94	-29,00	-67,94	1,6077E-07	-20,00	-58,94	1,27704E-06
125	33,0	33,04	36,0	28,0	-5,04	-26,00	-59,04	1,24797E-06	-20,00	-53,04	4,96826E-06
160	32,1	32,14	39,0	31,0	-1,14	-23,00	-55,14	3,0634E-06	-18,00	-50,14	9,68733E-06
200	35,6	35,64	42,0	34,0	-1,64	-21,00	-56,64	2,16872E-06	-16,00	-51,64	6,8581E-06
250	36,9	36,94	45,0	37,0	0,06	-19,00	-55,94	2,54803E-06	-15,00	-51,94	6,40036E-06
315	37,2	37,24	48,0	40,0	2,76	-17,00	-54,24	3,76881E-06	-14,00	-51,24	7,51976E-06
400	38,4	38,44	51,0	43,0	4,56	-15,00	-53,44	4,5311E-06	-13,00	-51,44	7,18132E-06
500	37,5	37,54	52,0	<b>44,0</b>	6,46	-13,00	-50,54	8,83495E-06	-12,00	-49,54	1,11225E-05
630	40,5	40,54	53,0	45,0	4,46	-12,00	-52,54	5,57448E-06	-11,00	-51,54	7,01785E-06
800	42,2	42,24	54,0	46,0	3,76	-11,00	-53,24	4,74465E-06	-9,00	-51,24	7,51976E-06
1000	44,2	44,24	55,0	47,0	2,76	-10,00	-54,24	3,76881E-06	-8,00	-52,24	5,97316E-06
1250	46,2	46,24	56,0	48,0	1,76	-9,00	-55,24	2,99367E-06	-9,00	-55,24	2,99367E-06
1600	47,1	47,14	56,0	48,0	0,86	-9,00	-56,14	2,43335E-06	-10,00	-57,14	1,93288E-06
2000	47,6	47,64	56,0	48,0	0,36	-9,00	-56,64	2,16872E-06	-11,00	-58,64	1,36837E-06
2500	47,8	47,84	56,0	48,0	0,16	-9,00	-56,84	2,07111E-06	-13,00	-60,84	8,24526E-07
3150	46,7	46,74	56,0	48,0	1,26	-9,00	-55,74	2,66811E-06	-15,00	-61,74	6,702E-07
							Soma	5,27467E-05		Soma	8,33151E-05
							-10Lg(soma)	42,77805022		-10Lg(soma)	40,7927613
							C	-1,0		Ctr	-3
								43			41

Fonte: Adaptado de NBR ISO 717-1 (2021)

 $D_{nT} *$ : valores compilados $D_{nT} **$ : valores ajustados baseados na equação de Dunbavin e Gerretsen (2014)

Diferenças (+): 29,24 dB &lt; 32,00 dB

Incremento: -8

Apêndice B - Partição VI-B - Cálculo de  $D_{nT,w}$ ,  $D_{nT,A100} = (D_{nT,w} + C)$  e  $D_{nT,Atr100} = (D_{nT,w} + C_{tr})$ 

Frequência de um terço de oitava (Hz)	$D_{nT} *$	$D_{nT} **$	Valores de Referência (Hz)	Curva ajustada $D_{nT,w}$	Diferenças (+)	Espectro nº1	$L_{i1} - D_{nT}$	$10^{(L_{i1}-D_{nT})/10}$	Espectro nº2	$L_{i1} - D_{nT}$	$10^{(L_{i1}-D_{nT})/10}$
100	28,2	28,26	33,0	21,0	-7,26	-29,00	-57,26	1,8802E-06	-20,00	-48,26	1,4935E-05
125	40,4	40,46	36,0	24,0	-16,46	-26,00	-66,46	2,2605E-07	-20,00	-60,46	8,9992E-07
160	37,9	37,96	39,0	27,0	-10,96	-23,00	-60,96	8,0205E-07	-18,00	-55,96	2,5363E-06
200	35,7	35,76	42,0	30,0	-5,76	-21,00	-56,76	2,1096E-06	-16,00	-51,76	6,6712E-06
250	36,2	36,26	45,0	33,0	-3,26	-19,00	-55,26	2,9799E-06	-15,00	-51,26	7,4852E-06
315	35,7	35,76	48,0	36,0	0,24	-17,00	-52,76	5,2991E-06	-14,00	-49,76	1,0573E-05
400	34,6	34,66	51,0	39,0	4,34	-15,00	-49,66	1,0819E-05	-13,00	-47,66	1,7147E-05
500	35,4	35,46	52,0	40,0	4,54	-13,00	-48,46	1,4262E-05	-12,00	-47,46	1,7955E-05
630	36,6	36,66	53,0	41,0	4,34	-12,00	-48,66	1,3620E-05	-11,00	-47,66	1,7147E-05
800	38,9	38,96	54,0	42,0	3,04	-11,00	-49,96	1,0097E-05	-9,00	-47,96	1,6003E-05
1000	40,5	40,56	55,0	43,0	2,44	-10,00	-50,56	8,7943E-06	-8,00	-48,56	1,3938E-05
1250	42,9	42,96	56,0	44,0	1,04	-9,00	-51,96	6,3709E-06	-9,00	-51,96	6,3709E-06
1600	44,3	44,36	56,0	44,0	-0,36	-9,00	-53,36	4,6153E-06	-10,00	-54,36	3,6661E-06
2000	43,7	43,76	56,0	44,0	0,24	-9,00	-52,76	5,2991E-06	-11,00	-54,76	3,3435E-06
2500	41,4	41,46	56,0	44,0	2,54	-9,00	-50,46	8,9992E-06	-13,00	-54,46	3,5826E-06
3150	39,0	39,06	56,0	44,0	4,94	-9,00	-48,06	1,5638E-05	-15,00	-54,06	3,9283E-06
							Soma	0,000111815		Soma	0,000146185
							-10Lg(soma)	39,51499573		-10Lg(soma)	38,35098599
							C	0,0		Ctr	-2
								40			38

Fonte: Adaptado de NBR ISO 717-1 (2021)

 $D_{nT} *$ : valores compilados $D_{nT} **$ : valores ajustados baseados na equação de Dunbavin e Gerretsen (2014)

Diferenças (+): 27,00 dB &lt; 32,00 dB

Incremento: -12

Apêndice B - Partição VII-B - Cálculo de  $D_{nT,w}$ ,  $D_{nT,A100} = (D_{nT,w} + C)$  e  $D_{nT,Atr100} = (D_{nT,w} + C_{tr})$ 

Frequência de um terço de oitava (Hz)	$D_{nT} *$	$D_{nT} **$	Valores de Referência (Hz)	Curva ajustada $D_{nT,w}$	Diferenças (+)	Espectro n°1	$L_{i1} - D_{nT}$	$10^{(L_{i1}-D_{nT})/10}$	Espectro n°2	$L_{i1} - D_{nT}$	$10^{(L_{i1}-D_{nT})/10}$
100	20,2	20,26	33,0	26,0	5,74	-29,00	-49,26	1,18633E-05	-20,00	-40,26	9,42332E-05
125	21,9	21,96	36,0	29,0	7,04	-26,00	-47,96	1,60031E-05	-20,00	-41,96	6,37095E-05
160	25,9	25,96	39,0	32,0	6,04	-23,00	-48,96	1,27117E-05	-18,00	-43,96	4,0198E-05
200	32,1	32,16	42,0	35,0	2,84	-21,00	-53,16	4,83286E-06	-16,00	-48,16	1,52828E-05
250	33,3	33,36	45,0	38,0	4,64	-19,00	-52,36	5,81037E-06	-15,00	-48,36	1,4595E-05
315	40,7	40,76	48,0	41,0	0,24	-17,00	-57,76	1,67573E-06	-14,00	-54,76	3,34352E-06
400	43,3	43,36	51,0	44,0	0,64	-15,00	-58,36	1,4595E-06	-13,00	-56,36	2,31315E-06
500	44,5	44,56	52,0	45,0	0,44	-13,00	-57,56	1,75471E-06	-12,00	-56,56	2,20904E-06
630	45,9	45,96	53,0	46,0	0,04	-12,00	-57,96	1,60031E-06	-11,00	-56,96	2,01467E-06
800	49,8	49,86	54,0	47,0	-2,86	-11,00	-60,86	8,20737E-07	-9,00	-58,86	1,30078E-06
1000	50,9	50,96	55,0	48,0	-2,96	-10,00	-60,96	8,02055E-07	-8,00	-58,96	1,27117E-06
1250	51,6	51,66	56,0	49,0	-2,66	-9,00	-60,66	8,59417E-07	-9,00	-60,66	8,59417E-07
1600	52,8	52,86	56,0	49,0	-3,86	-9,00	-61,86	6,51935E-07	-10,00	-62,86	5,1785E-07
2000	51,7	51,76	56,0	49,0	-2,76	-9,00	-60,76	8,39855E-07	-11,00	-62,76	5,29912E-07
2500	48,3	48,36	56,0	49,0	0,64	-9,00	-57,36	1,8374E-06	-13,00	-61,36	7,31483E-07
3150	48,7	48,76	56,0	49,0	0,24	-9,00	-57,76	1,67573E-06	-15,00	-63,76	4,20924E-07
							Soma	6,51987E-05		Soma	0,00024353
							-10Lg(soma)	41,85761158		-10Lg(soma)	36,13446699
							C	-3,0		Ctr	-9
								42			36

Fonte: Adaptado de NBR ISO 717-1 (2021)

 $D_{nT} *$ : valores compilados $D_{nT} **$ : valores ajustados baseados na equação de Dunbavin e Gerretsen (2014)

Diferenças (+): 28,56 dB &lt; 32,00 dB

Incremento: -7

Apêndice B - Partição VVI2 - Cálculo de  $D_{nT,w}$ ,  $D_{nT,A100} = (D_{nT,w} + C)$  e  $D_{nT,Atr100} = (D_{nT,w} + C_{tr})$ 

Frequência de um terço de oitava (Hz)	$D_{nT} *$	$D_{nT} **$	Valores de Referência (Hz)	Curva ajustada $D_{nT,w}$	Diferenças (+)	Espectro nº1	$L_{i1} - D_{nT}$	$10^{(L_{i1}-D_{nT})/10}$	Espectro nº2	$L_{i1} - D_{nT}$	$10^{(L_{i1}-D_{nT})/10}$
100	28,8	28,86	33,0	24,0	-4,86	-29,00	-57,86	1,63759E-06	-20,00	-48,86	1,30078E-05
125	37,5	37,56	36,0	27,0	-10,56	-26,00	-63,56	4,40762E-07	-20,00	-57,56	1,75471E-06
160	38,0	38,06	39,0	30,0	-8,06	-23,00	-61,06	7,83798E-07	-18,00	-56,06	2,47859E-06
200	38,0	38,06	42,0	33,0	-5,06	-21,00	-59,06	1,24224E-06	-16,00	-54,06	3,9283E-06
250	39,4	39,46	45,0	36,0	-3,46	-19,00	-58,46	1,42628E-06	-15,00	-54,46	3,58265E-06
315	40,1	40,16	48,0	39,0	-1,16	-17,00	-57,16	1,924E-06	-14,00	-54,16	3,83888E-06
400	38,6	38,66	51,0	42,0	3,34	-15,00	-53,66	4,30729E-06	-13,00	-51,66	6,82659E-06
500	40,6	40,66	52,0	43,0	2,34	-13,00	-53,66	4,30729E-06	-12,00	-52,66	5,42256E-06
630	42,8	42,86	53,0	44,0	1,14	-12,00	-54,86	3,26741E-06	-11,00	-53,86	4,11343E-06
800	44,3	44,36	54,0	45,0	0,64	-11,00	-55,36	2,91209E-06	-9,00	-53,36	4,61534E-06
1000	43,8	43,86	55,0	46,0	2,14	-10,00	-53,86	4,11343E-06	-8,00	-51,86	6,51935E-06
1250	45,5	45,56	56,0	47,0	1,44	-9,00	-54,56	3,5011E-06	-9,00	-54,56	3,5011E-06
1600	46,7	46,76	56,0	47,0	0,24	-9,00	-55,76	2,65585E-06	-10,00	-56,76	2,10962E-06
2000	45,6	45,66	56,0	47,0	1,34	-9,00	-54,66	3,4214E-06	-11,00	-56,66	2,15876E-06
2500	43,3	43,36	56,0	47,0	3,64	-9,00	-52,36	5,81037E-06	-13,00	-56,36	2,31315E-06
3150	39,5	39,56	56,0	47,0	7,44	-9,00	-48,56	1,39381E-05	-15,00	-54,56	3,5011E-06
							Soma	5,5689E-05		Soma	6,96719E-05
							-10Lg(soma)	42,54230509		-10Lg(soma)	41,56942244
							C	0,0		Ctr	-1
								43			42

Fonte: Adaptado de NBR ISO 717-1 (2021)

 $D_{nT} *$ : valores compilados $D_{nT} **$ : valores ajustados baseados na equação de Dunbavin e Gerretsen (2014)

Diferenças (+): 23,72 dB &lt; 32,00 dB

Incremento: -9

Apêndice B - Partição LP4 - Cálculo de  $D_{nT,w}$ ,  $D_{nT,A100} = (D_{nT,w} + C)$  e  $D_{nT,Atr100} = (D_{nT,w} + C_{tr})$ 

Frequência de um terço de oitava (Hz)	$D_{nT} *$	$D_{nT} **$	Valores de Referência (Hz)	Curva ajustada $D_{nT,w}$	Diferenças (+)	Espectro nº1	$L_{i1} - D_{nT}$	$10^{(L_{i1}-D_{nT})/10}$	Espectro nº2	$L_{i1} - D_{nT}$	$10^{(L_{i1}-D_{nT})/10}$
100	37,8	37,86	33,0	31,0	-6,86	-29,00	-66,86	2,0616E-07	-20,00	-57,86	1,63759E-06
125	50,9	50,96	36,0	34,0	-16,96	-26,00	-76,96	2,01467E-08	-20,00	-70,96	8,02055E-08
160	43,6	43,66	39,0	37,0	-6,66	-23,00	-66,66	2,15876E-07	-18,00	-61,66	6,82659E-07
200	45,3	45,36	42,0	40,0	-5,36	-21,00	-66,36	2,31315E-07	-16,00	-61,36	7,31483E-07
250	42,1	42,16	45,0	43,0	0,84	-19,00	-61,16	7,65957E-07	-15,00	-57,16	1,924E-06
315	41,7	41,76	48,0	46,0	4,24	-17,00	-58,76	1,33108E-06	-14,00	-55,76	2,65585E-06
400	44,0	44,06	51,0	49,0	4,94	-15,00	-59,06	1,24224E-06	-13,00	-57,06	1,96881E-06
500	47,2	47,26	52,0	50,0	2,74	-13,00	-60,26	9,42332E-07	-12,00	-59,26	1,18633E-06
630	48,5	48,56	53,0	51,0	2,44	-12,00	-60,56	8,79436E-07	-11,00	-59,56	1,10714E-06
800	50,1	50,16	54,0	52,0	1,84	-11,00	-61,16	7,65957E-07	-9,00	-59,16	1,21396E-06
1000	50,6	50,66	55,0	53,0	2,34	-10,00	-60,66	8,59417E-07	-8,00	-58,66	1,36208E-06
1250	51,4	51,46	56,0	54,0	2,54	-9,00	-60,46	8,9992E-07	-9,00	-60,46	8,9992E-07
1600	52,5	52,56	56,0	54,0	1,44	-9,00	-61,56	6,98561E-07	-10,00	-62,56	5,54886E-07
2000	52,4	52,46	56,0	54,0	1,54	-9,00	-61,46	7,14832E-07	-11,00	-63,46	4,51029E-07
2500	53,9	53,96	56,0	54,0	0,04	-9,00	-62,96	5,06062E-07	-13,00	-66,96	2,01467E-07
3150	54,0	54,06	56,0	54,0	-0,06	-9,00	-63,06	4,94543E-07	-15,00	-69,06	1,24224E-07
							Soma	1,07738E-05		Soma	1,67816E-05
							-10Lg(soma)	49,67629844		-10Lg(soma)	47,7516573
							C	0,0		Ctr	-2
								50			48

Fonte: Adaptado de NBR ISO 717-1 (2021)

 $D_{nT} *$ : valores compilados $D_{nT} **$ : valores ajustados baseados na equação de Dunbavin e Gerretsen (2014)

Diferenças (+): 24,96 dB &lt; 32,00 dB

Incremento: -2

Apêndice B - Partição LP6 - Cálculo de  $D_{nT,w}$ ,  $D_{nT,A100} = (D_{nT,w} + C)$  e  $D_{nT,Atr100} = (D_{nT,w} + C_{tr})$

Frequência de um terço de oitava (Hz)	$D_{nT} *$	$D_{nT} **$	Valores de Referência (Hz)	Curva ajustada $D_{nT,w}$	Diferenças (+)	Espectro n°1	$L_{i1} - D_{nT}$	$10^{(L_{i1}-D_{nT})/10}$	Espectro n°2	$L_{i1} - D_{nT}$	$10^{(L_{i1}-D_{nT})/10}$
100	35,2	35,26	33,0	27,0	-8,26	-29,00	-64,26	3,75149E-07	-20,00	-55,26	2,97992E-06
125	41,0	41,06	36,0	30,0	-11,06	-26,00	-67,06	1,96881E-07	-20,00	-61,06	7,83798E-07
160	33,6	33,66	39,0	33,0	-0,66	-23,00	-56,66	2,15876E-06	-18,00	-51,66	6,82659E-06
200	37,7	37,76	42,0	36,0	-1,76	-21,00	-58,76	1,33108E-06	-16,00	-53,76	4,20924E-06
250	39,4	39,46	45,0	39,0	-0,46	-19,00	-58,46	1,42628E-06	-15,00	-54,46	3,58265E-06
315	37,2	37,26	48,0	42,0	4,74	-17,00	-54,26	3,75149E-06	-14,00	-51,26	7,48521E-06
400	37,0	37,06	51,0	45,0	7,94	-15,00	-52,06	6,22593E-06	-13,00	-50,06	9,86743E-06
500	40,2	40,26	52,0	46,0	5,74	-13,00	-53,26	4,72285E-06	-12,00	-52,26	5,94572E-06
630	43,3	43,36	53,0	47,0	3,64	-12,00	-55,36	2,91209E-06	-11,00	-54,36	3,6661E-06
800	45,0	45,06	54,0	48,0	2,94	-11,00	-56,06	2,47859E-06	-9,00	-54,06	3,9283E-06
1000	47,2	47,26	55,0	49,0	1,74	-10,00	-57,26	1,8802E-06	-8,00	-55,26	2,97992E-06
1250	49,7	49,76	56,0	50,0	0,24	-9,00	-58,76	1,33108E-06	-9,00	-58,76	1,33108E-06
1600	50,3	50,36	56,0	50,0	-0,36	-9,00	-59,36	1,15932E-06	-10,00	-60,36	9,20882E-07
2000	49,5	49,56	56,0	50,0	0,44	-9,00	-58,56	1,39381E-06	-11,00	-60,56	8,79436E-07
2500	50,2	50,26	56,0	50,0	-0,26	-9,00	-59,26	1,18633E-06	-13,00	-63,26	4,72285E-07
3150	50,3	50,36	56,0	50,0	-0,36	-9,00	-59,36	1,15932E-06	-15,00	-65,36	2,91209E-07
							Soma	3,36892E-05		Soma	5,61498E-05
							-10Lg(soma)	44,72509917		-10Lg(soma)	42,50652078
							C	-1,0		Ctr	-3
								45			43

Fonte: Adaptado de NBR ISO 717-1 (2021)

$D_{nT} *$ : valores compilados

$D_{nT} **$ : valores ajustados baseados na equação de Dunbavin e Gerretsen (2014)

Diferenças (+): 27,43 dB < 32,00 dB

Incremento: -6

Apêndice B - Partição PAE178B - Cálculo de  $D_{nT,w}$ ,  $D_{nT,A100} = (D_{nT,w} + C)$  e  $D_{nT,Atr100} = (D_{nT,w} + C_{tr})$ 

Frequência de um terço de oitava (Hz)	$D_{nT} *$	$D_{nT} **$	Valores de Referência (Hz)	Curva ajustada $D_{nT,w}$	Diferenças (+)	Espectro nº1	$L_{i1} - D_{nT}$	$10^{(L_{i1}-D_{nT})/10}$	Espectro nº2	$L_{i1} - D_{nT}$	$10^{(L_{i1}-D_{nT})/10}$
100	18,30	18,36	33,0	22,0	3,64	-29,00	-47,36	1,8374E-05	-20,00	-38,36	0,00014595
125	30,70	30,76	36,0	25,0	-5,76	-26,00	-56,76	2,10962E-06	-20,00	-50,76	8,39855E-06
160	33,80	33,86	39,0	28,0	-5,86	-23,00	-56,86	2,0616E-06	-18,00	-51,86	6,51935E-06
200	34,80	34,86	42,0	31,0	-3,86	-21,00	-55,86	2,5954E-06	-16,00	-50,86	8,20737E-06
250	31,90	31,96	45,0	34,0	2,04	-19,00	-50,96	8,02055E-06	-15,00	-46,96	2,01467E-05
315	34,00	34,06	48,0	37,0	2,94	-17,00	-51,06	7,83798E-06	-14,00	-48,06	1,56388E-05
400	34,90	34,96	51,0	40,0	5,04	-15,00	-49,96	1,00973E-05	-13,00	-47,96	1,60031E-05
500	38,20	38,26	52,0	41,0	2,74	-13,00	-51,26	7,48521E-06	-12,00	-50,26	9,42332E-06
630	39,10	39,16	53,0	42,0	2,84	-12,00	-51,16	7,65957E-06	-11,00	-50,16	9,64282E-06
800	40,00	40,06	54,0	43,0	2,94	-11,00	-51,06	7,83798E-06	-9,00	-49,06	1,24224E-05
1000	41,70	41,76	55,0	44,0	2,24	-10,00	-51,76	6,6712E-06	-8,00	-49,76	1,05731E-05
1250	43,40	43,46	56,0	45,0	1,54	-9,00	-52,46	5,67811E-06	-9,00	-52,46	5,67811E-06
1600	45,50	45,56	56,0	45,0	-0,56	-9,00	-54,56	3,5011E-06	-10,00	-55,56	2,78102E-06
2000	45,10	45,16	56,0	45,0	-0,16	-9,00	-54,16	3,83888E-06	-11,00	-56,16	2,42217E-06
2500	44,00	44,06	56,0	45,0	0,94	-9,00	-53,06	4,94543E-06	-13,00	-57,06	1,96881E-06
3150	42,10	42,16	56,0	45,0	2,84	-9,00	-51,16	7,65957E-06	-15,00	-57,16	1,924E-06
							Soma	0,000106373		Soma	0,0002777
							-10Lg(soma)	39,73166636		-10Lg(soma)	35,56424645
							C	-1,0		Ctr	-6
								40			35

Fonte: Adaptado de NBR ISO 717-1 (2021)

 $D_{nT} *$ : valores compilados $D_{nT} **$ : valores ajustados baseados na equação de Dunbavin e Gerretsen (2014)

Diferenças (+): 29,76 dB &lt; 32,00 dB

Incremento: -11

Apêndice B - Partição PAE1710B - Cálculo de  $D_{nT,w}$ ,  $D_{nT,A100} = (D_{nT,w} + C)$  e  $D_{nT,Atr100} = (D_{nT,w} + C_{tr})$

Frequência de um terço de oitava (Hz)	$D_{nT} *$	$D_{nT} **$	Valores de Referência (Hz)	Curva ajustada $D_{nT,w}$	Diferenças (+)	Espectro nº1	$L_{i1} - D_{nT}$	$10^{(L_{i1}-D_{nT})/10}$	Espectro nº2	$L_{i1} - D_{nT}$	$10^{(L_{i1}-D_{nT})/10}$
100	23,70	23,76	33,0	24,0	0,24	-29,00	-52,76	5,29912E-06	-20,00	-43,76	4,20924E-05
125	28,80	28,86	36,0	27,0	-1,86	-26,00	-54,86	3,26741E-06	-20,00	-48,86	1,30078E-05
160	34,50	34,56	39,0	30,0	-4,56	-23,00	-57,56	1,75471E-06	-18,00	-52,56	5,54886E-06
200	37,80	37,86	42,0	33,0	-4,86	-21,00	-58,86	1,30078E-06	-16,00	-53,86	4,11343E-06
250	36,80	36,86	45,0	36,0	-0,86	-19,00	-55,86	2,5954E-06	-15,00	-51,86	6,51935E-06
315	35,40	35,46	48,0	39,0	3,54	-17,00	-52,46	5,67811E-06	-14,00	-49,46	1,13293E-05
400	38,00	38,06	51,0	42,0	3,94	-15,00	-53,06	4,94543E-06	-13,00	-51,06	7,83798E-06
500	38,90	38,96	52,0	43,0	4,04	-13,00	-51,96	6,37095E-06	-12,00	-50,96	8,02055E-06
630	40,50	40,56	53,0	44,0	3,44	-12,00	-52,56	5,54886E-06	-11,00	-51,56	6,98561E-06
800	42,30	42,36	54,0	45,0	2,64	-11,00	-53,36	4,61534E-06	-9,00	-51,36	7,31483E-06
1000	44,10	44,16	55,0	46,0	1,84	-10,00	-54,16	3,83888E-06	-8,00	-52,16	6,08421E-06
1250	46,10	46,16	56,0	47,0	0,84	-9,00	-55,16	3,04933E-06	-9,00	-55,16	3,04933E-06
1600	47,40	47,46	56,0	47,0	-0,46	-9,00	-56,46	2,2605E-06	-10,00	-57,46	1,79558E-06
2000	47,50	47,56	56,0	47,0	-0,56	-9,00	-56,56	2,20904E-06	-11,00	-58,56	1,39381E-06
2500	46,40	46,46	56,0	47,0	0,54	-9,00	-55,46	2,8458E-06	-13,00	-59,46	1,13293E-06
3150	45,20	45,26	56,0	47,0	1,74	-9,00	-54,26	3,75149E-06	-15,00	-60,26	9,42332E-07
							Soma	5,93312E-05		Soma	0,000127168
							-10Lg(soma)	42,26717149		-10Lg(soma)	38,95620884
							C	-1,0		Ctr	-4
								42			39

Fonte: Adaptado de NBR ISO 717-1 (2021)

$D_{nT} *$ : valores compilados

$D_{nT} **$ : valores ajustados baseados na equação de Dunbavin e Gerretsen (2014)

Diferenças (+): 22,57 dB < 32,00 dB

Incremento: -9

Apêndice B - Partição PAE1710C1 - Cálculo de  $D_{nT,w}$ ,  $D_{nT,A100} = (D_{nT,w} + C)$  e  $D_{nT,Atr100} = (D_{nT,w} + C_{tr})$ 

Frequência de um terço de oitava (Hz)	$D_{nT} *$	$D_{nT} **$	Valores de Referência (Hz)	Curva ajustada $D_{nT,w}$	Diferenças (+)	Espectro nº1	$L_{i1} - D_{nT}$	$10^{(L_{i1}-D_{nT})/10}$	Espectro nº2	$L_{i1} - D_{nT}$	$10^{(L_{i1}-D_{nT})/10}$
100	31,50	31,56	33,0	18,0	-13,56	-29,00	-60,56	8,79436E-07	-20,00	-51,56	6,98561E-06
125	26,40	26,46	36,0	21,0	-5,46	-26,00	-52,46	5,67811E-06	-20,00	-46,46	2,2605E-05
160	33,10	33,16	39,0	24,0	-9,16	-23,00	-56,16	2,42217E-06	-18,00	-51,16	7,65957E-06
200	33,10	33,16	42,0	27,0	-6,16	-21,00	-54,16	3,83888E-06	-16,00	-49,16	1,21396E-05
250	33,80	33,86	45,0	30,0	-3,86	-19,00	-52,86	5,1785E-06	-15,00	-48,86	1,30078E-05
315	29,60	29,66	48,0	33,0	3,34	-17,00	-46,66	2,15876E-05	-14,00	-43,66	4,30729E-05
400	30,60	30,66	51,0	36,0	5,34	-15,00	-45,66	2,71772E-05	-13,00	-43,66	4,30729E-05
500	33,90	33,96	52,0	37,0	3,04	-13,00	-46,96	2,01467E-05	-12,00	-45,96	2,53632E-05
630	34,50	34,56	53,0	38,0	3,44	-12,00	-46,56	2,20904E-05	-11,00	-45,56	2,78102E-05
800	34,00	34,06	54,0	39,0	4,94	-11,00	-45,06	3,12036E-05	-9,00	-43,06	4,94543E-05
1000	36,20	36,26	55,0	40,0	3,74	-10,00	-46,26	2,36703E-05	-8,00	-44,26	3,75149E-05
1250	39,40	39,46	56,0	41,0	1,54	-9,00	-48,46	1,42628E-05	-9,00	-48,46	1,42628E-05
1600	42,50	42,56	56,0	41,0	-1,56	-9,00	-51,56	6,98561E-06	-10,00	-52,56	5,54886E-06
2000	41,40	41,46	56,0	41,0	-0,46	-9,00	-50,46	8,9992E-06	-11,00	-52,46	5,67811E-06
2500	41,80	41,86	56,0	41,0	-0,86	-9,00	-50,86	8,20737E-06	-13,00	-54,86	3,26741E-06
3150	42,10	42,16	56,0	41,0	-1,16	-9,00	-51,16	7,65957E-06	-15,00	-57,16	1,924E-06
							Soma	0,000209987		Soma	0,000319367
							-10Lg(soma)	36,77806791		-10Lg(soma)	34,95709744
							C	0,0		Ctr	-1
								36			35

Fonte: Adaptado de NBR ISO 717-1 (2021)

 $D_{nT} *$ : valores compilados $D_{nT} **$ : valores ajustados baseados na equação de Dunbavin e Gerretsen (2014)

Diferenças (+): 25,39 dB &lt; 32,00 dB

Incremento: -15

Apêndice B - Partição PAE1710C2 - Cálculo de  $D_{nT,w}$ ,  $D_{nT,A100} = (D_{nT,w} + C)$  e  $D_{nT,Atr100} = (D_{nT,w} + C_{tr})$ 

Frequência de um terço de oitava (Hz)	$D_{nT} *$	$D_{nT} **$	Valores de Referência (Hz)	Curva ajustada $D_{nT,w}$	Diferenças (+)	Espectro nº1	$L_{i1} - D_{nT}$	$10^{(L_{i1}-D_{nT})/10}$	Espectro nº2	$L_{i1} - D_{nT}$	$10^{(L_{i1}-D_{nT})/10}$
100	32,20	32,26	33,0	22,0	-10,26	-29,00	-61,26	7,48521E-07	-20,00	-52,26	5,94572E-06
125	29,90	29,96	36,0	25,0	-4,96	-26,00	-55,96	2,53632E-06	-20,00	-49,96	1,00973E-05
160	30,80	30,86	39,0	28,0	-2,86	-23,00	-53,86	4,11343E-06	-18,00	-48,86	1,30078E-05
200	32,40	32,46	42,0	31,0	-1,46	-21,00	-53,46	4,51029E-06	-16,00	-48,46	1,42628E-05
250	36,10	36,16	45,0	34,0	-2,16	-19,00	-55,16	3,04933E-06	-15,00	-51,16	7,65957E-06
315	32,90	32,96	48,0	37,0	4,04	-17,00	-49,96	1,00973E-05	-14,00	-46,96	2,01467E-05
400	34,10	34,16	51,0	40,0	5,84	-15,00	-49,16	1,21396E-05	-13,00	-47,16	1,924E-05
500	35,70	35,76	52,0	41,0	5,24	-13,00	-48,76	1,33108E-05	-12,00	-47,76	1,67573E-05
630	38,30	38,36	53,0	42,0	3,64	-12,00	-50,36	9,20882E-06	-11,00	-49,36	1,15932E-05
800	40,40	40,46	54,0	43,0	2,54	-11,00	-51,46	7,14832E-06	-9,00	-49,46	1,13293E-05
1000	42,50	42,56	55,0	44,0	1,44	-10,00	-52,56	5,54886E-06	-8,00	-50,56	8,79436E-06
1250	44,70	44,76	56,0	45,0	0,24	-9,00	-53,76	4,20924E-06	-9,00	-53,76	4,20924E-06
1600	46,20	46,26	56,0	45,0	-1,26	-9,00	-55,26	2,97992E-06	-10,00	-56,26	2,36703E-06
2000	46,70	46,76	56,0	45,0	-1,76	-9,00	-55,76	2,65585E-06	-11,00	-57,76	1,67573E-06
2500	44,80	44,86	56,0	45,0	0,14	-9,00	-53,86	4,11343E-06	-13,00	-57,86	1,63759E-06
3150	43,50	43,56	56,0	45,0	1,44	-9,00	-52,56	5,54886E-06	-15,00	-58,56	1,39381E-06
							Soma	9,19189E-05		Soma	0,000150117
							-10Lg(soma)	40,36595325		-10Lg(soma)	38,23568907
							C	-1,0		Ctr	-3
								40			38

Fonte: Adaptado de NBR ISO 717-1 (2021)

 $D_{nT} *$ : valores compilados $D_{nT} **$ : valores ajustados baseados na equação de Dunbavin e Gerretsen (2014)

Diferenças (+): 25,39 dB &lt; 32,00 dB

Incremento: -15

Apêndice B - Partição PAE1710C3 - Cálculo de  $D_{nT,w}$ ,  $D_{nT,A100} = (D_{nT,w} + C)$  e  $D_{nT,Atr100} = (D_{nT,w} + C_{tr})$ 

Frequência de um terço de oitava (Hz)	$D_{nT} *$	$D_{nT} **$	Valores de Referência (Hz)	Curva ajustada $D_{nT,w}$	Diferenças (+)	Espectro n°1	$L_{i1} - D_{nT}$	$10^{(L_{i1}-D_{nT})/10}$	Espectro n°2	$L_{i1} - D_{nT}$	$10^{(L_{i1}-D_{nT})/10}$
100	31,60	31,66	33,0	25,0	-6,66	-29,00	-60,66	8,59417E-07	-20,00	-51,66	6,82659E-06
125	36,90	36,96	36,0	28,0	-8,96	-26,00	-62,96	5,06062E-07	-20,00	-56,96	2,01467E-06
160	37,90	37,96	39,0	31,0	-6,96	-23,00	-60,96	8,02055E-07	-18,00	-55,96	2,53632E-06
200	36,20	36,26	42,0	34,0	-2,26	-21,00	-57,26	1,8802E-06	-16,00	-52,26	5,94572E-06
250	36,90	36,96	45,0	37,0	0,04	-19,00	-55,96	2,53632E-06	-15,00	-51,96	6,37095E-06
315	37,60	37,66	48,0	40,0	2,34	-17,00	-54,66	3,4214E-06	-14,00	-51,66	6,82659E-06
400	38,30	38,36	51,0	43,0	4,64	-15,00	-53,36	4,61534E-06	-13,00	-51,36	7,31483E-06
500	40,30	40,36	52,0	44,0	3,64	-13,00	-53,36	4,61534E-06	-12,00	-52,36	5,81037E-06
630	41,20	41,26	53,0	45,0	3,74	-12,00	-53,26	4,72285E-06	-11,00	-52,26	5,94572E-06
800	43,00	43,06	54,0	46,0	2,94	-11,00	-54,06	3,9283E-06	-9,00	-52,06	6,22593E-06
1000	44,50	44,56	55,0	47,0	2,44	-10,00	-54,56	3,5011E-06	-8,00	-52,56	5,54886E-06
1250	46,50	46,56	56,0	48,0	1,44	-9,00	-55,56	2,78102E-06	-9,00	-55,56	2,78102E-06
1600	48,90	48,96	56,0	48,0	-0,96	-9,00	-57,96	1,60031E-06	-10,00	-58,96	1,27117E-06
2000	49,10	49,16	56,0	48,0	-1,16	-9,00	-58,16	1,52828E-06	-11,00	-60,16	9,64282E-07
2500	47,60	47,66	56,0	48,0	0,34	-9,00	-56,66	2,15876E-06	-13,00	-60,66	8,59417E-07
3150	45,70	45,76	56,0	48,0	2,24	-9,00	-54,76	3,34352E-06	-15,00	-60,76	8,39855E-07
							Soma	4,28003E-05		Soma	6,80823E-05
							-10Lg(soma)	43,68553362		-10Lg(soma)	41,66965772
							C	-1,0		Ctr	-2
								43			42

Fonte: Adaptado de NBR ISO 717-1 (2021)

 $D_{nT} *$ : valores compilados $D_{nT} **$ : valores ajustados baseados na equação de Dunbavin e Gerretsen (2014)

Diferenças (+): 25,39 dB &lt; 32,00 dB

Incremento: -15

Apêndice B - Partição Kuhn1 - Cálculo de  $D_{nT,w}$ ,  $D_{nT,A100} = (D_{nT,w} + C)$  e  $D_{nT,Atr100} = (D_{nT,w} + C_{tr})$ 

Frequência de um terço de oitava (Hz)	$D_{nT} *$	$D_{nT} **$	Valores de Referência (Hz)	Curva ajustada $D_{nT,w}$	Diferenças (+)	Espectro n°1	$L_{i1} - D_{nT}$	$10^{(L_{i1}-D_{nT})/10}$	Espectro n°2	$L_{i1} - D_{nT}$	$10^{(L_{i1}-D_{nT})/10}$
100	36,55	36,61	33,0	25,0	-11,61	-29,00	-65,61	2,74919E-07	-20,00	-56,61	2,18376E-06
125	43,68	43,74	36,0	28,0	-15,74	-26,00	-69,74	1,06219E-07	-20,00	-63,74	4,22867E-07
160	41,11	41,17	39,0	31,0	-10,17	-23,00	-64,17	3,83005E-07	-18,00	-59,17	1,21117E-06
200	41,55	41,61	42,0	34,0	-7,61	-21,00	-62,61	5,48535E-07	-16,00	-57,61	1,73462E-06
250	37,12	37,18	45,0	37,0	-0,18	-19,00	-56,18	2,41104E-06	-15,00	-52,18	6,05625E-06
315	36,63	36,69	48,0	40,0	3,31	-17,00	-53,69	4,27764E-06	-14,00	-50,69	8,53501E-06
400	36,64	36,70	51,0	43,0	6,30	-15,00	-51,70	6,76401E-06	-13,00	-49,70	1,07202E-05
500	38,13	38,19	52,0	44,0	5,81	-13,00	-51,19	7,60684E-06	-12,00	-50,19	9,57644E-06
630	40,21	40,27	53,0	45,0	4,73	-12,00	-52,27	5,93204E-06	-11,00	-51,27	7,468E-06
800	42,50	42,56	54,0	46,0	3,44	-11,00	-53,56	4,40762E-06	-9,00	-51,56	6,98561E-06
1000	44,97	45,03	55,0	47,0	1,97	-10,00	-55,03	3,14199E-06	-8,00	-53,03	4,97971E-06
1250	46,72	46,78	56,0	48,0	1,22	-9,00	-55,78	2,64365E-06	-9,00	-55,78	2,64365E-06
1600	47,63	47,69	56,0	48,0	0,31	-9,00	-56,69	2,1439E-06	-10,00	-57,69	1,70296E-06
2000	47,51	47,57	56,0	48,0	0,43	-9,00	-56,57	2,20396E-06	-11,00	-58,57	1,39061E-06
2500	47,11	47,17	56,0	48,0	0,83	-9,00	-56,17	2,4166E-06	-13,00	-60,17	9,62064E-07
3150	45,46	45,52	56,0	48,0	2,48	-9,00	-54,52	3,53349E-06	-15,00	-60,52	8,87573E-07
							Soma	4,87954E-05		Soma	6,74605E-05
							-10Lg(soma)	43,11620717		-10Lg(soma)	41,70950353
							C	-1,0		Ctr	-2
								43			42

Fonte: Adaptado de NBR ISO 717-1 (2021)

 $D_{nT} *$ : valores compilados $D_{nT} **$ : valores ajustados baseados na equação de Dunbavin e Gerretsen (2014)

Diferenças (+): 30,85 dB &lt; 32,00 dB

Incremento: -8

Apêndice B - Partição Kuhn2 - Cálculo de  $D_{nT,w}$ ,  $D_{nT,A100} = (D_{nT,w} + C)$  e  $D_{nT,Atr100} = (D_{nT,w} + C_{tr})$ 

Frequência de um terço de oitava (Hz)	$D_{nT} *$	$D_{nT} **$	Valores de Referência (Hz)	Curva ajustada $D_{nT,w}$	Diferenças (+)	Espectro nº1	$L_{i1} - D_{nT}$	$10^{(L_{i1}-D_{nT})/10}$	Espectro nº2	$L_{i1} - D_{nT}$	$10^{(L_{i1}-D_{nT})/10}$
100	36,20	36,26	33,0	21,0	-15,26	-29,00	-65,26	2,97992E-07	-20,00	-56,26	2,36703E-06
125	35,94	36,00	36,0	24,0	-12,00	-26,00	-62,00	6,31254E-07	-20,00	-56,00	2,51307E-06
160	27,69	27,75	39,0	27,0	-0,75	-23,00	-50,75	8,41791E-06	-18,00	-45,75	2,66198E-05
200	39,22	39,28	42,0	30,0	-9,28	-21,00	-60,28	9,38003E-07	-16,00	-55,28	2,96623E-06
250	33,01	33,07	45,0	33,0	-0,07	-19,00	-52,07	6,21161E-06	-15,00	-48,07	1,56029E-05
315	35,38	35,44	48,0	36,0	0,56	-17,00	-52,44	5,70432E-06	-14,00	-49,44	1,13816E-05
400	35,84	35,90	51,0	39,0	3,10	-15,00	-50,90	8,13213E-06	-13,00	-48,90	1,28886E-05
500	37,47	37,53	52,0	40,0	2,47	-13,00	-50,53	8,85532E-06	-12,00	-49,53	1,11482E-05
630	37,92	37,98	53,0	41,0	3,02	-12,00	-49,98	1,00509E-05	-11,00	-48,98	1,26533E-05
800	38,58	38,64	54,0	42,0	3,36	-11,00	-49,64	1,08694E-05	-9,00	-47,64	1,72268E-05
1000	41,16	41,22	55,0	43,0	1,78	-10,00	-51,22	7,55447E-06	-8,00	-49,22	1,1973E-05
1250	43,80	43,86	56,0	44,0	0,14	-9,00	-52,86	5,1785E-06	-9,00	-52,86	5,1785E-06
1600	44,24	44,30	56,0	44,0	-0,30	-9,00	-53,30	4,67955E-06	-10,00	-54,30	3,7171E-06
2000	43,77	43,83	56,0	44,0	0,17	-9,00	-52,83	5,2144E-06	-11,00	-54,83	3,29006E-06
2500	41,46	41,52	56,0	44,0	2,48	-9,00	-50,52	8,87573E-06	-13,00	-54,52	3,53349E-06
3150	37,52	37,58	56,0	44,0	6,42	-9,00	-46,58	2,19889E-05	-15,00	-52,58	5,52337E-06
							Soma	0,0001136		Soma	0,000148583
							-10Lg(soma)	39,44620297		-10Lg(soma)	38,28031046
							C	-1,0		Ctr	-2
								39			38

Fonte: Adaptado de NBR ISO 717-1 (2021)

 $D_{nT} *$ : valores compilados $D_{nT} **$ : valores ajustados baseados na equação de Dunbavin e Gerretsen (2014)

Diferenças (+): 22,92 dB &lt; 32,00 dB

Incremento: -12

Apêndice C - Partição III-C - Cálculo de  $L'_{nT,w}$ ,  $L'_{nT,A100} = (L'_{nT,w} + C_I)$ 

Frequência de um terço de oitava (Hz)	$L'_{nT}$ *	$L'_{nT}$ **	Valores de Referência (Hz)	Curva ajustada $L'_{nT,w}$	Diferenças (+)	Espectro nº1	$L_{i1}$	$10^{(L_{i1})/10}$
100	56,10	56,12	62,00	64,0	7,88	-29,00	56,12	409246,3596
125	52,30	52,32	62,00	64,0	11,68	-26,00	52,32	170602,2776
160	61,30	61,32	62,00	64,0	2,68	-23,00	61,32	1355142,06
200	61,00	61,02	62,00	64,0	2,98	-21,00	61,02	1264692,156
250	61,30	61,32	62,00	64,0	2,68	-19,00	61,32	1355142,06
315	63,70	63,72	62,00	64,0	0,28	-17,00	63,72	2354966,995
400	63,80	63,82	61,00	63,0	-0,82	-15,00	63,82	2409821,223
500	64,90	64,92	60,00	62,0	-2,92	-13,00	64,92	3104451,111
630	65,00	65,02	59,00	61,0	-4,02	-12,00	65,02	3176763,066
800	65,80	65,82	58,00	60,0	-5,82	-11,00	65,82	3819309,252
1000	66,80	66,82	57,00	59,0	-7,82	-10,00	66,82	4808225,473
1250	67,50	67,52	54,00	56,0	-11,52	-9,00	67,52	5649172,352
1600	67,40	67,42	51,00	53,0	-14,42	-9,00	67,42	5520581,489
2000	68,60	68,62	48,00	50,0	-18,62	-9,00	68,62	7277543,749
2500	70,90	70,92	45,00	47,0	-23,92	-9,00	70,92	12359042,48
3150	71,90	71,92	42,00	44,0	-27,92	-9,00	71,92	15559112,64
							Soma	70593814,74
							-10Lg(soma)	78,48766651
							CI	2,0
								64

Fonte: Adaptado de NBR ISO 717-2 (2022)

 $L'_{nT}$  \*: valores compilados $L'_{nT}$  \*\*: valores ajustados baseados na equação de Dunbavin e Gerretsen (2014)

Diferenças (+): 28,18 dB &lt; 32,00 dB

Incremento: 2

Apêndice C - Partição IV-C - Cálculo de  $L'_{nT,w}$ ,  $L'_{nT,A100} = (L'_{nT,w} + C_I)$ 

Frequência de um terço de oitava (Hz)	$L'_{nT}$ *	$L'_{nT}$ **	Valores de Referência (Hz)	Curva ajustada $L'_{nT,w}$	Diferenças (+)	Espectro nº1	$L_{i1}$	$10^{(L_{i1})/10}$
100	53,90	53,92	62,00	63,0	9,08	-29,00	53,92	246595,317
125	54,70	54,72	62,00	63,0	8,28	-26,00	54,72	296472,7794
160	57,90	57,92	62,00	63,0	5,08	-23,00	57,92	619419,431
200	60,10	60,12	62,00	63,0	2,88	-21,00	60,12	1027980,378
250	60,60	60,62	62,00	63,0	2,38	-19,00	60,62	1153412,955
315	62,70	62,72	62,00	63,0	0,28	-17,00	62,72	1870616,776
400	64,80	64,82	61,00	62,0	-2,82	-15,00	64,82	3033785,176
500	65,10	65,12	60,00	61,0	-4,12	-13,00	65,12	3250759,384
630	64,20	64,22	59,00	60,0	-4,22	-12,00	64,22	2642316,428
800	64,10	64,12	58,00	59,0	-5,12	-11,00	64,12	2582169,963
1000	64,90	64,92	57,00	58,0	-6,92	-10,00	64,92	3104451,111
1250	66,00	66,02	54,00	55,0	-11,02	-9,00	66,02	3999307,752
1600	66,70	66,72	51,00	52,0	-14,72	-9,00	66,72	4698776,899
2000	68,40	68,42	48,00	49,0	-19,42	-9,00	68,42	6950000,325
2500	71,70	71,72	45,00	46,0	-25,72	-9,00	71,72	14858837,22
3150	72,50	72,52	42,00	43,0	-29,52	-9,00	72,52	17864251,53
							Soma	68199153,42
							-10Lg(soma)	78,33778984
							CI	2,0
								63

Fonte: Adaptado de NBR ISO 717-2 (2022)

 $L'_{nT}$  \*: valores compilados $L'_{nT}$  \*\*: valores ajustados baseados na equação de Dunbavin e Gerretsen (2014)

Diferenças (+): 27,98 dB &lt; 32,00 dB

Incremento: 1

Apêndice C - Partição VIII-C - Cálculo de  $L'_{nT,w}$ ,  $L'_{nT,A100} = (L'_{nT,w} + C_I)$ 

Frequência de um terço de oitava (Hz)	$L'_{nT}$ *	$L'_{nT}$ **	Valores de Referência (Hz)	Curva ajustada $L'_{nT,w}$	Diferenças (+)	Espectro nº1	$L_{i1}$	$10^{(L_{i1})/10}$
100	45,10	45,12	62,00	49,0	3,88	-29,00	45,12	32507,59384
125	45,90	45,92	62,00	49,0	3,08	-26,00	45,92	39082,72393
160	46,90	46,92	62,00	49,0	2,08	-23,00	46,92	49202,23432
200	41,90	41,92	62,00	49,0	7,08	-21,00	41,92	15559,11264
250	43,80	43,82	62,00	49,0	5,18	-19,00	43,82	24098,21223
315	45,90	45,92	62,00	49,0	3,08	-17,00	45,92	39082,72393
400	45,40	45,42	61,00	48,0	2,58	-15,00	45,42	34832,51437
500	46,70	46,72	60,00	47,0	0,28	-13,00	46,72	46987,76899
630	46,00	46,02	59,00	46,0	-0,02	-12,00	46,02	39993,07752
800	44,40	44,42	58,00	45,0	0,58	-11,00	44,42	27668,44965
1000	44,90	44,92	57,00	44,0	-0,92	-10,00	44,92	31044,51111
1250	45,80	45,82	54,00	41,0	-4,82	-9,00	45,82	38193,09252
1600	45,00	45,02	51,00	38,0	-7,02	-9,00	45,02	31767,63066
2000	46,60	46,62	48,00	35,0	-11,62	-9,00	46,62	45918,19678
2500	47,00	47,02	45,00	32,0	-15,02	-9,00	47,02	50348,30158
3150	48,30	48,32	42,00	29,0	-19,32	-9,00	48,32	67917,99003
							Soma	614204,1341
							-10Lg(soma)	57,88312735
							CI	-4,0
								43

Fonte: Adaptado de NBR ISO 717-2 (2022)

 $L'_{nT}$  \*: valores compilados $L'_{nT}$  \*\*: valores ajustados baseados na equação de Dunbavin e Gerretsen (2014)

Diferenças (+): 27,24 dB &lt; 32,00 dB

Incremento: -13

Apêndice C - Partição X-C - Cálculo de  $L'_{nT,w}$ ,  $L'_{nT,A100} = (L'_{nT,w} + C_I)$ 

Frequência de um terço de oitava (Hz)	$L'_{nT}$ *	$L'_{nT}$ **	Valores de Referência (Hz)	Curva ajustada $L'_{nT,w}$	Diferenças (+)	Espectro nº1	$L_{i1}$	$10^{(L_{i1})/10}$
100	44,30	44,32	62,00	58,0	13,68	-29,00	44,32	27038,63884
125	48,60	48,62	62,00	58,0	9,38	-26,00	48,62	72775,43749
160	54,90	54,92	62,00	58,0	3,08	-23,00	54,92	310445,1111
200	54,30	54,32	62,00	58,0	3,68	-21,00	54,32	270386,3884
250	57,50	57,52	62,00	58,0	0,48	-19,00	57,52	564917,2352
315	58,40	58,42	62,00	58,0	-0,42	-17,00	58,42	695000,0325
400	61,20	61,22	61,00	57,0	-4,22	-15,00	61,22	1324295,261
500	62,50	62,52	60,00	56,0	-6,52	-13,00	62,52	1786425,153
630	62,70	62,72	59,00	55,0	-7,72	-12,00	62,72	1870616,776
800	63,50	63,52	58,00	54,0	-9,52	-11,00	63,52	2248976,021
1000	63,90	63,92	57,00	53,0	-10,92	-10,00	63,92	2465953,17
1250	63,60	63,62	54,00	50,0	-13,62	-9,00	63,62	2301361,402
1600	64,20	64,22	51,00	47,0	-17,22	-9,00	64,22	2642316,428
2000	63,90	63,92	48,00	44,0	-19,92	-9,00	63,92	2465953,17
2500	66,60	66,62	45,00	41,0	-25,62	-9,00	66,62	4591819,678
3150	68,50	68,52	42,00	38,0	-30,52	-9,00	68,52	7111886,629
							Soma	30750166,53
							-10Lg(soma)	74,87847472
							CI	4,0
								60

Fonte: Adaptado de NBR ISO 717-2 (2022)

 $L'_{nT}$  \*: valores compilados $L'_{nT}$  \*\*: valores ajustados baseados na equação de Dunbavin e Gerretsen (2014)

Diferenças (+): 30,30 dB &lt; 32,00 dB

Incremento: -13

Apêndice C - Partição VH1 - Cálculo de  $L'_{nT,w}$ ,  $L'_{nT,A100} = (L'_{nT,w} + C_I)$ 

Frequência de um terço de oitava (Hz)	$L'_{nT}$ *	$L'_{nT}$ **	Valores de Referência (Hz)	Curva ajustada $L'_{nT,w}$	Diferenças (+)	Espectro nº1	$L_{i1}$	$10^{(L_{i1})/10}$
100	56,60	56,62	62,00	68,0	11,38	-29,00	56,62	459181,9678
125	64,00	64,02	62,00	68,0	3,98	-26,00	64,02	2523392,599
160	60,60	60,62	62,00	68,0	7,38	-23,00	60,62	1153412,955
200	63,00	63,02	62,00	68,0	4,98	-21,00	63,02	2004401,988
250	64,00	64,02	62,00	68,0	3,98	-19,00	64,02	2523392,599
315	72,60	72,62	62,00	68,0	-4,62	-17,00	72,62	18280363,4
400	73,30	73,32	61,00	67,0	-6,32	-15,00	73,32	21477554,26
500	71,10	71,12	60,00	66,0	-5,12	-13,00	71,12	12941506,2
630	69,50	69,52	59,00	65,0	-4,52	-12,00	69,52	8953334,803
800	68,70	68,72	58,00	64,0	-4,72	-11,00	68,72	7447059,52
1000	69,90	69,92	57,00	63,0	-6,92	-10,00	69,92	9817136,394
1250	71,10	71,12	54,00	60,0	-11,12	-9,00	71,12	12941506,2
1600	71,80	71,82	51,00	57,0	-14,82	-9,00	71,82	15204944
2000	71,40	71,42	48,00	54,0	-17,42	-9,00	71,42	13867073,74
2500	71,30	71,32	45,00	51,0	-20,32	-9,00	71,32	13551420,6
3150	71,60	71,62	42,00	48,0	-23,62	-9,00	71,62	14520608,79
							Soma	157666290
							-10Lg(soma)	81,97738849
							CI	1,0
								67

Fonte: Adaptado de NBR ISO 717-2 (2022)

 $L'_{nT}$  \*: valores compilados $L'_{nT}$  \*\*: valores ajustados baseados na equação de Dunbavin e Gerretsen (2014)

Diferenças (+): 31,70 dB &lt; 32,00 dB

Incremento: 6

Apêndice C - Partição NV-1 - Cálculo de  $L'_{nT,w}$ ,  $L'_{nT,A100} = (L'_{nT,w} + C_I)$ 

Frequência de um terço de oitava (Hz)	$L'_{nT}$ *	$L'_{nT}$ **	Valores de Referência (Hz)	Curva ajustada $L'_{nT,w}$	Diferenças (+)	Espectro nº1	$L_{i1}$	$10^{(L_{i1})/10}$
100	44,90	44,92	62,00	63,0	18,08	-29,00	44,92	31044,51111
125	56,70	56,72	62,00	63,0	6,28	-26,00	56,72	469877,6899
160	60,80	60,82	62,00	63,0	2,18	-23,00	60,82	1207771,632
200	61,60	61,62	62,00	63,0	1,38	-21,00	61,62	1452060,879
250	62,20	62,22	62,00	63,0	0,78	-19,00	62,22	1667188,957
315	62,00	62,02	62,00	63,0	0,98	-17,00	62,02	1592153,093
400	63,40	63,42	61,00	62,0	-1,42	-15,00	63,42	2197783,077
500	64,20	64,22	60,00	61,0	-3,22	-13,00	64,22	2642316,428
630	65,00	65,02	59,00	60,0	-5,02	-12,00	65,02	3176763,066
800	65,70	65,72	58,00	59,0	-6,72	-11,00	65,72	3732371,159
1000	67,90	67,92	57,00	58,0	-9,92	-10,00	67,92	6194194,31
1250	69,80	69,82	54,00	55,0	-14,82	-9,00	69,82	9593671,088
1600	73,40	73,42	51,00	52,0	-21,42	-9,00	73,42	21977830,77
2000	75,60	75,62	48,00	49,0	-26,62	-9,00	75,62	36474120,19
2500	76,80	76,82	45,00	46,0	-30,82	-9,00	76,82	48082254,73
3150	76,10	76,12	42,00	43,0	-33,12	-9,00	76,12	40924635,96
							Soma	181416037,5
							-10Lg(soma)	82,58675677
							CI	7,0
								68

Fonte: Adaptado de NBR ISO 717-2 (2022)

 $L'_{nT}$  \*: valores compilados $L'_{nT}$  \*\*: valores ajustados baseados na equação de Dunbavin e Gerretsen (2014)

Diferenças (+): 29,68 dB &lt; 32,00 dB

Incremento: 1

Apêndice C - Partição NV-5 - Cálculo de  $L'_{nT,w}$ ,  $L'_{nT,A100} = (L'_{nT,w} + C_I)$ 

Frequência de um terço de oitava (Hz)	$L'_{nT}$ *	$L'_{nT}$ **	Valores de Referência (Hz)	Curva ajustada $L'_{nT,w}$	Diferenças (+)	Espectro nº1	$L_{i1}$	$10^{(L_{i1})/10}$
100	49,30	49,32	62,00	66,0	16,68	-29,00	49,32	85503,68357
125	59,60	59,62	62,00	66,0	6,38	-26,00	59,62	916188,4761
160	62,60	62,62	62,00	66,0	3,38	-23,00	62,62	1828036,34
200	62,90	62,92	62,00	66,0	3,08	-21,00	62,92	1958776,229
250	68,50	68,52	62,00	66,0	-2,52	-19,00	68,52	7111886,629
315	69,60	69,62	62,00	66,0	-3,62	-17,00	69,62	9161884,761
400	69,80	69,82	61,00	65,0	-4,82	-15,00	69,82	9593671,088
500	71,00	71,02	60,00	64,0	-7,02	-13,00	71,02	12646921,56
630	73,00	73,02	59,00	63,0	-10,02	-12,00	73,02	20044019,88
800	73,00	73,02	58,00	62,0	-11,02	-11,00	73,02	20044019,88
1000	71,80	71,82	57,00	61,0	-10,82	-10,00	71,82	15204944
1250	73,20	73,22	54,00	58,0	-15,22	-9,00	73,22	20988665,44
1600	74,40	74,42	51,00	55,0	-19,42	-9,00	74,42	27668449,65
2000	76,50	76,52	48,00	52,0	-24,52	-9,00	76,52	44872971,02
2500	75,50	75,52	45,00	49,0	-26,52	-9,00	75,52	35643867,85
3150	73,10	73,12	42,00	46,0	-27,12	-9,00	73,12	20510905,08
							Soma	248280711,6
							-10Lg(soma)	83,94942981
							CI	5,0
								69

Fonte: Adaptado de NBR ISO 717-2 (2022)

 $L'_{nT}$  \*: valores compilados $L'_{nT}$  \*\*: valores ajustados baseados na equação de Dunbavin e Gerretsen (2014)

Diferenças (+): 29,52 dB &lt; 32,00 dB

Incremento: 4

Apêndice C - Partição NV-8 - Cálculo de  $L'_{nT,w}$ ,  $L'_{nT,A100} = (L'_{nT,w} + C_I)$ 

Frequência de um terço de oitava (Hz)	$L'_{nT}$ *	$L'_{nT}$ **	Valores de Referência (Hz)	Curva ajustada $L'_{nT,w}$	Diferenças (+)	Espectro nº1	$L_{i1}$	$10^{(L_{i1})/10}$
100	59,00	59,02	62,00	64,0	4,98	-29,00	59,02	797966,8043
125	56,80	56,82	62,00	64,0	7,18	-26,00	56,82	480822,5473
160	59,60	59,62	62,00	64,0	4,38	-23,00	59,62	916188,4761
200	59,40	59,42	62,00	64,0	4,58	-21,00	59,42	874953,2021
250	59,40	59,42	62,00	64,0	4,58	-19,00	59,42	874953,2021
315	62,80	62,82	62,00	64,0	1,18	-17,00	62,82	1914189,038
400	66,10	66,12	61,00	63,0	-3,12	-15,00	66,12	4092463,596
500	66,10	66,12	60,00	62,0	-4,12	-13,00	66,12	4092463,596
630	66,70	66,72	59,00	61,0	-5,72	-12,00	66,72	4698776,899
800	68,20	68,22	58,00	60,0	-8,22	-11,00	68,22	6637198,783
1000	68,20	68,22	57,00	59,0	-9,22	-10,00	68,22	6637198,783
1250	68,20	68,22	54,00	56,0	-12,22	-9,00	68,22	6637198,783
1600	69,40	69,42	51,00	53,0	-16,42	-9,00	69,42	8749532,021
2000	73,30	73,32	48,00	50,0	-23,32	-9,00	73,32	21477554,26
2500	76,70	76,72	45,00	47,0	-29,72	-9,00	76,72	46987768,99
3150	76,60	76,62	42,00	44,0	-32,62	-9,00	76,62	45918196,78
							Soma	161787425,8
							-10Lg(soma)	82,08944765
							CI	5,0
								67

Fonte: Adaptado de NBR ISO 717-2 (2022)

 $L'_{nT}$  \*: valores compilados $L'_{nT}$  \*\*: valores ajustados baseados na equação de Dunbavin e Gerretsen (2014)

Diferenças (+): 26,88 dB &lt; 32,00 dB

Incremento: 2

Apêndice C - Partição NV-9 - Cálculo de  $L'_{nT,w}$ ,  $L'_{nT,A100} = (L'_{nT,w} + C_I)$ 

Frequência de um terço de oitava (Hz)	$L'_{nT}$ *	$L'_{nT}$ **	Valores de Referência (Hz)	Curva ajustada $L'_{nT,w}$	Diferenças (+)	Espectro nº1	$L_{i1}$	$10^{(L_{i1})/10}$
100	61,80	61,82	62,00	71,0	9,18	-29,00	61,82	1520494,4
125	67,70	67,72	62,00	71,0	3,28	-26,00	67,72	5915409,642
160	66,00	66,02	62,00	71,0	4,98	-23,00	66,02	3999307,752
200	64,70	64,72	62,00	71,0	6,28	-21,00	64,72	2964727,794
250	65,50	65,52	62,00	71,0	5,48	-19,00	65,52	3564386,785
315	68,40	68,42	62,00	71,0	2,58	-17,00	68,42	6950000,325
400	70,70	70,72	61,00	70,0	-0,72	-15,00	70,72	11802793,94
500	68,70	68,72	60,00	69,0	0,28	-13,00	68,72	7447059,52
630	71,30	71,32	59,00	68,0	-3,32	-12,00	71,32	13551420,6
800	71,20	71,22	58,00	67,0	-4,22	-11,00	71,22	13242952,61
1000	71,20	71,22	57,00	66,0	-5,22	-10,00	71,22	13242952,61
1250	72,90	72,92	54,00	63,0	-9,92	-9,00	72,92	19587762,29
1600	73,60	73,62	51,00	60,0	-13,62	-9,00	73,62	23013614,02
2000	74,30	74,32	48,00	57,0	-17,32	-9,00	74,32	27038638,84
2500	74,90	74,92	45,00	54,0	-20,92	-9,00	74,92	31044511,11
3150	75,40	75,42	42,00	51,0	-24,42	-9,00	75,42	34832514,37
							Soma	219718546,6
							-10Lg(soma)	83,41866718
							CI	-1,0
								68

Fonte: Adaptado de NBR ISO 717-2 (2022)

 $L'_{nT}$  \*: valores compilados $L'_{nT}$  \*\*: valores ajustados baseados na equação de Dunbavin e Gerretsen (2014)

Diferenças (+): 31,78 dB &lt; 32,00 dB

Incremento: 9

Apêndice C - Partição NV-11 - Cálculo de  $L'_{nT,w}$ ,  $L'_{nT,A100} = (L'_{nT,w} + C_I)$ 

Frequência de um terço de oitava (Hz)	$L'_{nT}$ *	$L'_{nT}$ **	Valores de Referência (Hz)	Curva ajustada $L'_{nT,w}$	Diferenças (+)	Espectro nº1	$L_{i1}$	$10^{(L_{i1})/10}$
100	53,30	53,32	62,00	66,0	12,68	-29,00	53,32	214775,5426
125	59,50	59,52	62,00	66,0	6,48	-26,00	59,52	895333,4803
160	61,70	61,72	62,00	66,0	4,28	-23,00	61,72	1485883,722
200	61,70	61,72	62,00	66,0	4,28	-21,00	61,72	1485883,722
250	64,60	64,62	62,00	66,0	1,38	-19,00	64,62	2897242,351
315	66,20	66,22	62,00	66,0	-0,22	-17,00	66,22	4187789,319
400	66,30	66,32	61,00	65,0	-1,32	-15,00	66,32	4285335,463
500	67,90	67,92	60,00	64,0	-3,92	-13,00	67,92	6194194,31
630	69,70	69,72	59,00	63,0	-6,72	-12,00	69,72	9375292,472
800	73,40	73,42	58,00	62,0	-11,42	-11,00	73,42	21977830,77
1000	71,80	71,82	57,00	61,0	-10,82	-10,00	71,82	15204944
1250	75,30	75,32	54,00	58,0	-17,32	-9,00	75,32	34039629,54
1600	78,30	78,32	51,00	55,0	-23,32	-9,00	78,32	67917990,03
2000	79,80	79,82	48,00	52,0	-27,82	-9,00	79,82	95936710,88
2500	78,40	78,42	45,00	49,0	-29,42	-9,00	78,42	69500003,25
3150	79,30	79,32	42,00	46,0	-33,32	-9,00	79,32	85503683,57
							Soma	421102522,4
							-10Lg(soma)	86,24387843
							CI	7,0
								71

Fonte: Adaptado de NBR ISO 717-2 (2022)

 $L'_{nT}$  \*: valores compilados $L'_{nT}$  \*\*: valores ajustados baseados na equação de Dunbavin e Gerretsen (2014)

Diferenças (+): 29,10 dB &lt; 32,00 dB

Incremento: 4

Apêndice C - Partição NV-14 - Cálculo de  $L'_{nT,w}$ ,  $L'_{nT,A100} = (L'_{nT,w} + C_I)$ 

Frequência de um terço de oitava (Hz)	$L'_{nT}$ *	$L'_{nT}$ **	Valores de Referência (Hz)	Curva ajustada $L'_{nT,w}$	Diferenças (+)	Espectro nº1	$L_{i1}$	$10^{(L_{i1})/10}$
100	46,00	46,02	62,00	62,0	15,98	-29,00	46,02	39993,07752
125	56,90	56,92	62,00	62,0	5,08	-26,00	56,92	492022,3432
160	58,00	58,02	62,00	62,0	3,98	-23,00	58,02	633847,563
200	58,10	58,12	62,00	62,0	3,88	-21,00	58,12	648611,7694
250	60,70	60,72	62,00	62,0	1,28	-19,00	60,72	1180279,394
315	63,70	63,72	62,00	62,0	-1,72	-17,00	63,72	2354966,995
400	66,70	66,72	61,00	61,0	-5,72	-15,00	66,72	4698776,899
500	69,50	69,52	60,00	60,0	-9,52	-13,00	69,52	8953334,803
630	68,00	68,02	59,00	59,0	-9,02	-12,00	68,02	6338475,63
800	69,40	69,42	58,00	58,0	-11,42	-11,00	69,42	8749532,021
1000	67,80	67,82	57,00	57,0	-10,82	-10,00	67,82	6053197,233
1250	66,80	66,82	54,00	54,0	-12,82	-9,00	66,82	4808225,473
1600	66,60	66,62	51,00	51,0	-15,62	-9,00	66,62	4591819,678
2000	67,20	67,22	48,00	48,0	-19,22	-9,00	67,22	5272114,393
2500	67,80	67,82	45,00	45,0	-22,82	-9,00	67,82	6053197,233
3150	67,70	67,72	42,00	42,0	-25,72	-9,00	67,72	5915409,642
							Soma	66783804,15
							-10Lg(soma)	78,24671154
							CI	3,0
								63

Fonte: Adaptado de NBR ISO 717-2 (2022)

 $L'_{nT}$  \*: valores compilados $L'_{nT}$  \*\*: valores ajustados baseados na equação de Dunbavin e Gerretsen (2014)

Diferenças (+): 30,20 dB &lt; 32,00 dB

Incremento: 0