

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO  
NÍVEL MESTRADO PROFISSIONAL**

**RAFAEL FERREIRA HEISSLER**

**ANÁLISE COMPARATIVA DO ISOLAMENTO ACÚSTICO EM DIFERENTES  
GEOMETRIAS:**

**Ensaio em campo e simulações computacionais**

**São Leopoldo**

**2018**

RAFAEL FERREIRA HEISSLER

**ANÁLISE COMPARATIVA DO ISOLAMENTO ACÚSTICO EM DIFERENTES  
GEOMETRIAS:  
Ensaio em campo e simulações computacionais**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS

Orientadora: Profa Dra. Maria Fernanda de Oliveira

São Leopoldo  
2018

H473a

Heissler, Rafael Ferreira.

Análise comparativa do isolamento acústico em diferentes geometrias : ensaios em campo e simulações computacionais / por Rafael Ferreira Heissler. – 2018.

89 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, São Leopoldo, RS, 2018.

“Orientadora: Dra. Maria Fernanda de Oliveira”.

1. Acústica de edifícios. 2. Desempenho. 3. Incerteza de medição.  
I. Título.

CDU: 72:534.84

RAFAEL FERREIRA HEISSLER

**COMPARATIVO DO ISOLAMENTO ACÚSTICO EM DIFERENTES GEOMETRIAS:  
Verificação em ensaios em campo e simulação computacional**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS

Aprovado em (dia) (mês) (ano)

BANCA EXAMINADORA

---

Jorge Viçoso Patrício – LNEC/PORTUGAL

---

Daniel Reis Medeiros – Unisinos

---

Maria Fernanda de Oliveira - Unisinos

Dedico este trabalho a  
minha família que muito  
me apoiou nesta trajetória.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Fernando e Elaine, por serem o maior exemplo de determinação e amor que tive em minha vida. Também ao meu irmão, Fernando, pelo parceiro que tem sido; e a toda minha família por sempre estar ao meu lado.

A minha orientadora, professora Maria Fernanda, pelo suporte e orientação no meu trabalho, e por ter sido minha mentora intelectual nesta caminhada através da acústica. Aos professores Daniel Medeiros e Jorge Patrício, os quais comporam a mesa avaliadora deste trabalho. Também a linguista Ieda de Andrade, pelas diversas vezes que corrigiu este trabalho.

Ao professor Bernardo Tutikian, que em 2013, com o itt Performance em obras, me ofereceu estágio no instituto, fato este primordial para obter o conhecimento aprofundado em construção civil que tenho hoje, e ao professor Roberto Christ e professora Fernanda Pacheco, que com muita paciência e disposição me ensinam e são exemplo de engenheiros éticos e profissionais.

Ao pessoal do laboratório Lavit do itt Performance, que direta e indiretamente contribuíram por este trabalho.

À toda Família do itt Performance, onde nestes últimos anos tenho feito grandes amizades e ótimos momentos para recordar.

E por fim, mas não menos importante, à minha noiva, Bianca de Andrade Krai, pela pessoa maravilhosa que és, dando suporte nos momentos mais críticos deste trabalho, com paciência e muito amor.

“...I can learn to persist  
With anything but aiming low...”  
(VESTRHEIM; LEE; PEART, 1996)

## RESUMO

Atualmente no Brasil as construtoras necessitam projetar e construir edificações residenciais com condições mínimas de isolamento acústico, e para tal, as características acústicas do sistema construtivo devem ser bem conhecidas. Para as condições de projeto, utilizam-se dados de isolamento acústico dos sistemas ensaiados em laboratório como valores de input em simulações computacionais, e assim, estimar os resultados que poderão ser obtidos em ensaios em campo. Entretanto, os requisitos que o sistema deve atender, na atual norma brasileira, são fundamentados somente em ensaios experimentais em laboratório ou em campo, particularmente, não contemplando o uso de métodos de predição acústica para se estimar o desempenho em etapas de projeto. Isso acarreta em uma necessidade de amostragem total da edificação, uma vez que requisitos são estipulados de acordo com a situação de uso das unidades. Deste modo, este trabalho busca apresentar resultados da diferença padronizada de nível ponderado e nível de pressão sonora de impacto-padrão ponderado de diferentes sistemas construtivos ensaiados em uma mesma edificação, com foco na análise comparativa das diferentes áreas e geometrias e na estimativa obtida de softwares de predição acústica. Os ensaios foram realizados em edifícios residenciais situados na região de Porto Alegre, de acordo com as normas técnicas ISO 16283-1 e ISO 16283-2, e estimados com o uso de software SONarchitect. Uma análise da incerteza de medição a partir de uma série histórica de dados foi realizada para se verificar se há influência da geometria na incerteza expandida. Para a condição de ruído aéreo, verificou-se que parte dos ensaios apresentaram resultados simulados com valor menor que os encontrados através de ensaio, e a incerteza de medição tende a um valor maior conforme o aumento do volume do cômodo ensaiado. Já para os ensaios de transmissão ao ruído de impacto, os valores estimados ficaram muito próximos dos resultados de ensaio, entretanto, não foi possível relacionar a incerteza de medição com o volume do cômodo ensaiado.

**Palavras-chave:** Acústica de edifícios; Desempenho de edificações; Incerteza de medição.



## ABSTRACT

Currently in Brazil, building companies need to design and construct residential buildings with a minimum of acoustic insulation conditions, and to this end, the acoustic characteristics of the constructive system must be well known. For the design situation, sound insulation data of the systems tested in the laboratory are used as input values in computational simulations, and thus, to estimate the results that can be obtained in field tests. However, the requirements only contemplate the minimum results that the system must have when performed in the laboratory and verified in the field situation, not allowing the use of acoustic prediction methods to estimate the performance in design stages. This entails a need for total sampling of the building since requirements are established according to the kind of the units. Thus, this study aims to present results of the weighted standardized sound level difference and weighted standardized impact sound pressure level of different building systems tested in the same building, with a focus on comparative analysis of different areas and geometry and obtained from estimation of acoustic prediction software. The tests were carried out in residential buildings located in the region of Porto Alegre, according to the technical standards ISO 16283-1 and ISO 16283-2, and estimated with the use of software SONarchitect. An analysis of the uncertainty of measurement from a historical data series was carried out to verify if there is influence of the geometry in the expanded uncertainty. For the airborne condition, it was found that part of the tests presented shown results with a lower value than those found by means of the test, and the measurement uncertainty tends to be higher as the volume of the room tested increases. However, for the impact noise transmission tests, the estimated values were very close to the test results, however, it was not possible to relate the measurement uncertainty to the volume of the room tested.

**Key-words:** Building acoustics; Dwelling Performance; Measurement uncertainty

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Propagação de ondas planas: compressão e rarefação .....	20
Figura 2 – Espectro de frequências audíveis em bandas de oitava e terço de oitava, em Hz.....	21
Figura 3 – Caminhos de transmissão sonora.....	22
Figura 4 – Diferentes regiões da redução ao ruído aéreo .....	23
Figura 5 – Transmissão de vibração através de elementos construtivos .....	26
Figura 6 – Sala de estar da Edificação 1.....	37
Figura 7 – Suíte da Edificação 1 .....	38
Figura 8 – Dormitório da Edificação 1 .....	38
Figura 9 – Sala de estar da Edificação 2.....	40
Figura 10 – Dormitórios da Edificação 2 .....	40
Figura 11 – Esquema de montagem dos equipamentos .....	44
Figura 12 - Valores por banda de terço de oitava estimados para sistema homogêneo .....	45
Figura 13 – Fluxograma de etapas para a expressão da incerteza de medição .....	47
Figura 14 – Comparativo dos resultados para o som aéreo (a) ensaiados e (b) simulados .....	52
Figura 15 – Resultados ponderados para o ruído aéreo .....	53
Figura 16 - Amostra NL1 .....	55
Figura 17 - Amostra NL2 .....	55
Figura 18 - Amostra LP1 .....	55
Figura 19 - Amostra LP2 .....	55
Figura 20 - Amostra LP3 .....	55
Figura 21 - Amostra LP5 .....	55
Figura 22 - Amostra NL3 .....	56
Figura 23 - Amostra NL4 .....	56
Figura 24 - Amostra LP4 .....	56
Figura 25 - Amostra LP6 .....	56
Figura 26 – Comparativo dos resultados para o som de impacto (a) ensaiados e (b) simulados .....	58
Figura 27 – Resultados ponderados para o ruído de impacto.....	59
Figura 28 – Isolamento ao ruído de impacto da amostra NL1.....	60

Figura 29 - Isolamento ao ruído de impacto da amostra NL2 .....	60
Figura 30 - Isolamento ao ruído de impacto da amostra LP1 .....	60
Figura 31 - Isolamento ao ruído de impacto da amostra LP2 .....	60
Figura 32 - Isolamento ao ruído de impacto da amostra LP3 .....	61
Figura 33 - Isolamento ao ruído de impacto da amostra LP5 .....	61
Figura 34 - Isolamento ao ruído de impacto da amostra NL3 .....	61
Figura 35 - Isolamento ao ruído de impacto da amostra NL4 .....	61
Figura 36 - Resultados em $L'_{nT}$ e volumes das amostras (a) ensaiados e (b) simulados .....	62
Figura 37 - Diagrama de causa e efeito para ensaio de ruído aéreo .....	64
Figura 38 - Diagrama de causa e efeito para ensaio de ruído de impacto .....	64
Figura 39 – Box-plot dos valores de incerteza de medição obtidos nos ensaios de ruído aéreo .....	70
Figura 40 – Anova dos valores de incerteza de medição obtidos nos ensaios de ruído aéreo .....	71
Figura 41 – Linha de tendência de função polinomial de segunda ordem .....	72
Figura 42 – Análises da Incerteza média em função do volume do cômodo (a) Box-plot dos valores de incerteza de medição média em função do volume do cômodo e (b) Anova dos valores de incerteza de medição média em função do volume do cômodo .....	74
Figura 43 – Linha de tendência de primeira ordem dos valores de incerteza de medição média em função do volume do cômodo .....	75
Figura 44 – Box-plot dos valores de incerteza de medição obtidos nos ensaios de ruído de impacto.....	77
Figura 45 – Valores amostrados (a) Anova dos valores de incerteza de medição obtidos nos ensaios de ruído de impacto e (b) Linha de tendência de função polinomial de segunda ordem para valores de impacto padrão .....	78
Figura 46 – Análise dos dados amostrados (a) Box-plot dos valores de incerteza de medição média em função do volume do cômodo para ruído de impacto e (b) Linha de tendência de primeira ordem dos valores de incerteza de medição média em função do volume do cômodo para ruído de impacto.....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Incerteza padrão para isolamento de ruído aéreo em bandas de um terço de oitavas .....	33
Tabela 2 – Incerteza padrão para isolamento de ruído de impacto em bandas de um terço de oitavas .....	33
Tabela 3 – Síntese dos ensaios a serem realizados e da geometria dos cômodos ..	41
Tabela 4 – Distâncias entre posições dos equipamentos e das superfícies da sala .	42
Tabela 5 – Equipamentos utilizados no ensaio .....	44
Tabela 6 - Valores por banda de terço de oitava estimados para sistema não homogêneo .....	46
Tabela 7 – Distribuição de probabilidade e seus divisores.....	49
Tabela 8 – Comparativo de resultados para ruído aéreo, valores em dB .....	51
Tabela 9 - Comparativo de resultados para ruído de impacto padrão, valores em dB .....	58
Tabela 10 – Coeficientes de sensibilidade .....	66
Tabela 11 – Valores exemplificados por bandas de frequência (dB) .....	66
Tabela 12 - Incerteza de ensaios de ruído aéreo em campo, valores em dB .....	67
Tabela 13 – Valores calculados para níveis de quartil para gráfico de Box-plot, valores em dB .....	69
Tabela 14 – Tendência da incerteza de medição na série histórica amostrada para ruído aéreo .....	73
Tabela 15 – Incerteza média em função do volume do cômodo .....	73
Tabela 16 - Incerteza de medição de ensaios de ruído de impacto desempenhados em campo, valores em dB.....	76
Tabela 17 – Valores de U para impacto calculados para níveis de quartil para gráfico de Box-plot, valores em dB .....	77
Tabela 18 - Tendência da incerteza de medição na série histórica amostrada para ruído de impacto.....	79
Tabela 19 – Incerteza média para ruído de impacto em função do volume do cômodo .....	79

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de variância
BIM	Building Information Model
EN	European Standard
GUM	Guide to the expression of uncertainty in measurement
ISO	International Organization for Standardization
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
PVC	Policloreto de vinila

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1 Tema .....	16
1.2 Delimitação do Tema .....	16
1.3 Problema .....	17
1.4 Objetivos .....	17
1.4.1 Objetivo Geral .....	17
1.4.2 Objetivos Específicos .....	17
1.5 Justificativa .....	18
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>19</b>
2.1 O Ruído .....	19
2.2 Isolamento acústico .....	22
2.2.1 Isolamento ao ruído aéreo .....	23
2.2.2 Isolamento ao ruído de impacto .....	25
2.3 Métodos de estimativa de desempenho acústico de edificações .....	28
2.4 Incerteza de medição .....	30
2.4.1 Método GUM .....	30
2.4.2 Incerteza aplicada a acústica de edifícios .....	31
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>35</b>
3.1 Edificações amostradas .....	35
3.1.1 Edifício 1 .....	35
3.1.2 Edifício 2 .....	38
3.1.3 Síntese de ensaios .....	40
3.2 Ensaios em campo .....	41
3.3 Estimativa de desempenho acústico .....	44
3.4 Incerteza de medição e levantamento histórico .....	46
<b>4 ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>51</b>
4.1 Ruído aéreo .....	51
4.2 Ruído de impacto .....	57
4.3 Estimativa da incerteza de medição .....	63
4.3.1 Diagrama de causa e efeito .....	63
4.3.2 Definição do Modelo Matemático e Componentes de Incerteza .....	65
4.3.3 Estimativa da incerteza padrão .....	65

4.3.4 Coeficientes de sensibilidade .....	65
4.3.5 Determinação da incerteza combinada e incerteza expandida .....	66
<b>4.4 Análise histórica de incerteza de medição .....</b>	<b>67</b>
4.4.1 Série histórica para ensaio de ruído aéreo.....	67
4.4.2 Série histórica para ensaio de transmissão ao ruído de impacto .....	75
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>81</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>84</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A estimativa de resultados de acústica de edifícios é um tema que requer constante atualização. O conjunto de normas europeias EN 12354 (EN 12354/2000) serviram de base para a elaboração das normas internacionais ISO 12354 (ISO 2017) que tratam exatamente deste assunto, substituindo as anteriores ISO 15712.

A utilização de normas técnicas, como as ISO 12354, é necessária para a avaliação de desempenho de sistemas construtivos na etapa de projeto (BURATTI; BELLONI; MORETTI, 2014; BUTKUS; JANUSEVICIUS; MAZUOLIS, 2011; MISKINIS *et al.*, 2018) e os softwares se mostram ferramentas importantes para auxiliar nos cálculos, tanto pelos métodos de predição (HENRIQUE; ZANNIN, 2007; PEÑA; COLINA; MORENO, 2002) quanto por métodos de análise por elementos finitos (POBLET-PUIG; GUIGOU-CARTER, 2015).

A estimativa do desempenho acústico e a utilização de requisitos está largamente difundida em países da Europa. Em 2014 foi lançado um documento que serviria de base para a iniciativa de harmonização e criação de padrões de descritores em países europeus, servindo de esboço à ISO 19488, que no momento encontra-se em desenvolvimento pelo grupo de trabalho WG 29 da ISO (RASMUSSEN; MACHIMBARRENA, 2014). Atualmente essa ISO se encontra na segunda redação (KANG, 2017).

Os descritores para acústica de edifícios condizem com uma necessidade de verificação, sendo ela através de métodos de predição (ISO 12354) ou por métodos de ensaio (ISO 16283 ou ISO 18233), conforme orientação metodológica. Entretanto, todo o ensaio realizado somente é representativo quando junto ao resultado a incerteza de medição é expressa.

Procedimentos internacionais já são conhecidos e muito estudados para determinação da incerteza de medição, como o GUM (*Guide to the expression of uncertainty in measurement*). Para a acústica de edifícios, a ISO 12999-1:2014 é a referência no assunto, apresentando valores padrão para resultados de ensaios, mas não há um regulamento de limite à incerteza, na forma de limitar a variação de resultados de laboratórios diferentes.

Já o setor da construção civil brasileira encontra-se aquecido nacionalmente com os avanços de regulamentações técnicas que tratam de requisitos de



desempenho. A NBR 15575 (ABNT, 2013) traz requisitos e descritores acústicos a serem regulamentados para edificações residenciais.

Estes requisitos são parametrizados de acordo com o uso do cômodo, no caso, situações em que haja pelo menos um ambiente de dormitório; situações em que não tenha um ambiente dormitório; situações em que haja área comum de trânsito eventual; e ambientes de área comum de permanência de pessoas (CBIC, 2013).

A relevância da NBR 15575 é observada não somente para o uso habitacional. Seguindo os passos da Norma de Desempenho, o Ministério da Educação lançou as Diretrizes Técnicas para Apresentação de Projetos e Construção de Estabelecimentos de Ensino Público, que traz requisitos de desempenho a serem observados em projetos e na construção de estabelecimentos de ensino público. Neste caderno são apresentados requisitos para paredes de geminação de creches e pré-escolas com blocos de serviço, sanitários ou salas contíguas; e paredes de creches, pré-escolas, multiuso, berçários, diretoria, sala de professores com áreas comuns de trânsito eventual (BRASIL, 2014).

## **1.1 Tema**

Dentro da área de acústica, este trabalho focará na subárea de acústica de edifícios. Motivado pelo aprofundamento teórico sobre a perda de transmissão acústica de sistemas construtivos e a incerteza dos ensaios para a determinação de tal, este trabalho tem como tema o isolamento acústico de edifícios, com foco em partições ensaiadas em campo e estimadas com software, e apontamentos referentes a incerteza de medição destes métodos.

## **1.2 Delimitação do Tema**

Este trabalho trata da influência da variação da geometria dos cômodos em resultados de ensaios de acústica de edifícios, com foco nas diferenças entre as áreas das partições que fazem divisa entre unidades habitacionais e no volume dos cômodos. As análises deste trabalho referentes aos sistemas de vedações verticais, limitam-se a alvenarias com blocos vazados, e o elemento estrutural dos sistemas de piso, a lajes de concreto maciço.

### 1.3 Problema

O problema de pesquisa definido para este trabalho parte de questões atuais na área de atuação de acústica de edifícios. Considera-se que, atualmente no Brasil, não há um parâmetro indicativo ou critério para a escolha do sistema construtivo de partição e quais cômodos se deve utilizar como amostra para a determinação do desempenho acústico. Além disso, sabe-se que em algumas situações existem diferentes geometrias a serem consideradas como amostras, o que traz a questão deste trabalho: A estimativa de isolamento acústico por simulação computacional apresenta valores próximos aos encontrados em campo, considerando ainda a incerteza de medição destes?

### 1.4 Objetivos

Os objetivos desse trabalho foram definidos com base na delimitação do tema e da estruturação do problema de pesquisa. Dividem-se em: geral e específicos.

#### 1.4.1 Objetivo Geral

Este trabalho busca analisar comparativamente as diferenças em resultados de perda de transmissão sonora, de redução ao nível de pressão sonora de impacto-padrão e a incerteza de medição com as diferenças geométricas de edificações. Foram considerados resultados de ensaios em campo, estimativas computacionais, com as verificações de incerteza na obtenção desses resultados.

#### 1.4.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Analisar resultados de ensaios em campo em duas unidades habitacionais nos diferentes cômodos;
- b) Estimar o isolamento acústico destas duas unidades habitacionais através de simulações computacionais;
- c) Determinar a incerteza de medição dos ensaios em campo; e
- d) Estimar a incerteza de medição de uma série histórica;

## 1.5 Justificativa

A construção civil está em constante mudança e, a principal transformação é a incorporação de tecnologia de informação no construir e projetar. Impulsionado pelo Decreto 9377, que trata da Estratégia Nacional para Disseminação do BIM, a utilização da modelagem informatizada eleva a confiabilidade na elaboração de projetos e na execução de obra (BRASIL, 2018).

Algo que será muito beneficiado com a informatização da construção civil é a aplicação da Norma de Desempenho, que trouxe parâmetros ao setor e já completou 5 anos de sua publicação. Com isso, grupos começam a se formar para a revisão desta norma, e diversos requisitos já são apontados como mudança certa, e as partes que remetem a acústica não poderiam ser diferentes (CBIC, 2018).

Esta atualização normativa é de extrema necessidade, visto que requisitos como o de nível de pressão sonora de impacto padrão ponderado (requisito mínimo de 80 dB para dormitórios no Brasil) está longe dos requisitos de países como Portugal e Espanha, com 60 dB e 65 dB, respectivamente (RASMUSSEN; MACHIMBARRENA, 2014), e de países vizinhos como a Argentina, onde o requisito mínimo é de 53 dB, com uma diferença ainda maior (MACHIMBARRENA; RASMUSSEN, 2016).

A norma brasileira de desempenho traz requisitos acústicos para sistemas ensaiados em câmara reverberante e em campo, entretanto, não direciona o método de uso dos ensaios em câmara, apenas menciona que poderá haver diferença entre os valores encontrados devido as condições de contorno (ABNT, 2013). Deste modo, é fundamental que seja incorporado nesta norma alguns procedimentos informativos para avaliação computacional. (KLIPPEL FILHO, 2016; SILVA, 2014).

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 O Ruído

O ruído é qualquer tipo de som que não é desejado ou traz um certo incômodo às pessoas. Hassan (2009) comenta que alguns tipos de som podem ser considerados ruído para certas pessoas, entretanto para outras não, como por exemplo: alguns ritmos musicais, sinos de igrejas, crianças brincando, pássaros, o mar, etc. Do ponto de vista da caracterização quantitativa, não há diferença entre som e ruído, a resposta para isto tende a ser mais subjetiva (SALIBA, 2016).

O ruído pode ser classificado como de impacto ou impulsivo, ou contínuo ou intermitente.

O ruído de impacto ou impulsivo é aquele que apresenta picos de energia com uma duração inferior a um segundo, e intervalos maiores que um segundo (BRASIL, 1978; FUNDACENTRO, 2001). Astete (1978; *apud* Saliba, 2016) ainda define ruído de impacto como aquele com duração de 0,2 segundos ou menos com intervalo entre ocorrências maior que um segundo.

O ruído contínuo ou intermitente é aquele que não é considerado de impacto, ou podendo ainda possuir picos de energia com uma duração inferior a um segundo, mas com intervalos também inferiores a um segundo (FUNDACENTRO, 2001). Algumas terminologias ainda diferenciam o ruído contínuo do intermitente, sendo que o primeiro não apresenta variação no nível de pressão sonora maior que 6 dB ao longo de todo o tempo de percepção; enquanto o intermitente deve apresentar esta variação (ABNT, 1990). Já Saliba (2016) indica que para se considerar como ruído intermitente, esta variação, ao longo do tempo de percepção, deve ser maior que 3 dB.

Ainda segundo Saliba (2016), o controle do ruído pode ser realizado em três meios distintos, sendo eles: controle na fonte; controle no meio; e, controle no homem.

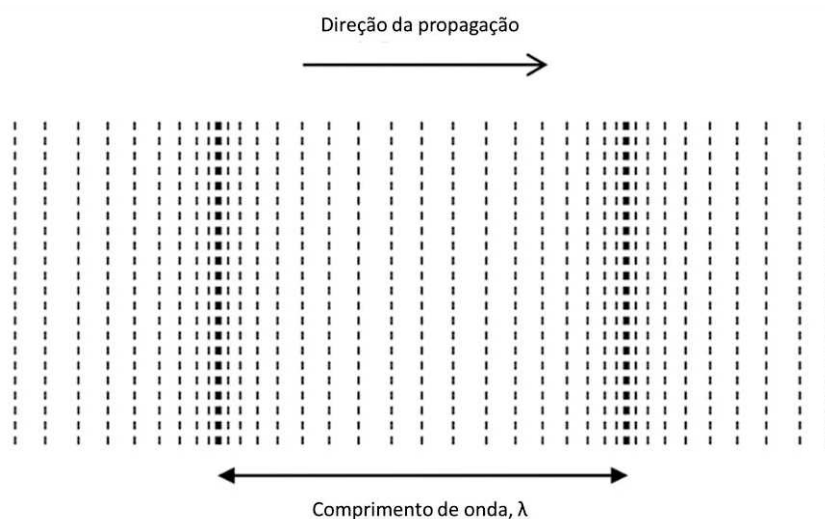
Nas edificações, é necessário identificar a procedência do ruído, que pode ser externo à edificação, oriundo de ruídos de tráfego, obras, auditórios, centro de eventos; como também pode ser proveniente da operação de equipamentos de serviço do próprio prédio, como, por exemplo, bombas de recalque, sistemas hidrossanitários, eletrodomésticos, entre outros. Além desses, podem ser citados os

sons originados das atividades cotidianas dos usuários dos edifícios como, movimentação de móveis, caminhar de pessoas, conversas. (ABNT, 2013; BISTAFA, 2011; CBIC, 2013).

Quando se trata de ruídos externos, alguns autores sugerem que um ponto importante que deve ser verificado no ruído de tráfego são as acelerações e frenagens (GUEDES, BERTOLI; 2014; CUETO, HERNANDEZ; 2013; SÁNCHEZ, MAURIZ, MARGARITIS; 2016; WG AEN; 2006). Ao trafegar de forma contínua, os veículos produzem um nível de ruído relativamente constante. Entretanto, quando há intersecções viárias, que possibilitam acelerações, desacelerações e frenagens, o ruído altera consideravelmente. Esses aspectos devem ser considerados quando são utilizados métodos de estimativa de ruído de tráfego veicular urbano para que os resultados sejam representativos de determinada realidade (WG AEN; 2006).

O ruído, assim como o som, é um fenômeno físico de propagação de ondas em um meio de transmissão (MEISSER, 1973). As transmissões destas ondas ocorrem em fases de compressão e rarefação do meio em que se deslocam, como pode ser observado na representação da Figura 1, com a movimentação das partículas de ar na direção da propagação (HOPKINS, 2012; PATRÍCIO, 2008).

Figura 1 – Propagação de ondas planas: compressão e rarefação



Fonte: Hopkins (2012, p. 2)

As fases de compressão e rarefação formam um ciclo ondulatório e quando verificadas suas repetições em um período de tempo de 1 segundo, são denominadas de frequência e expressado em Hertz (LAZZARINI, 1998). Ou seja,

uma vibração com 500 ciclos de compressão e de rarefação em um período de 1 segundo, está na frequência de 500 Hz.

A NBR 16313 (ABNT, 2014) caracteriza o som como toda a variação de pressão nas frequências compreendidas entre 20 Hz e 20 KHz, com diferentes sensações auditivas para o ser humano.

As medições acústicas podem ser realizadas com filtros de bandas. Um filtro de banda muito utilizado é o filtro de bandas de oitavas, que se determina com a taxa de 2:1 em frequências centrais de oitava (BALLOU, 2008). O exemplo na Figura 2 apresenta as frequências nas bandas de oitava e terço de oitava, bem como o intervalo de frequências que cada banda abrange.

Figura 2 – Espectro de frequências audíveis em bandas de oitava e terço de oitava, em Hz

Frequência central das bandas de oitava	Limites de banda	Frequência central das bandas de 1/3 de oitava	Limites de banda
31.5	22	25	22
		31.5	28
63	44	40	35
		50	44
		63	57
125	88	80	71
		100	88
		125	113
		160	141
250	176	200	176
		250	225
		315	283
		400	353
		500	440
500	353	500	565
		630	707
		800	880
1 K	707	1000	1130
		1250	1414
		1600	1760
		2000	2250
2 K	1414	2500	2828
		3150	3530
		4000	4400
4 K	2828	5000	5650
		6300	7070
		8000	8800
8 K	5650	10000	11300
		12500	14140
		16000	17600
16 K	11300	20000	22500
	22,500		

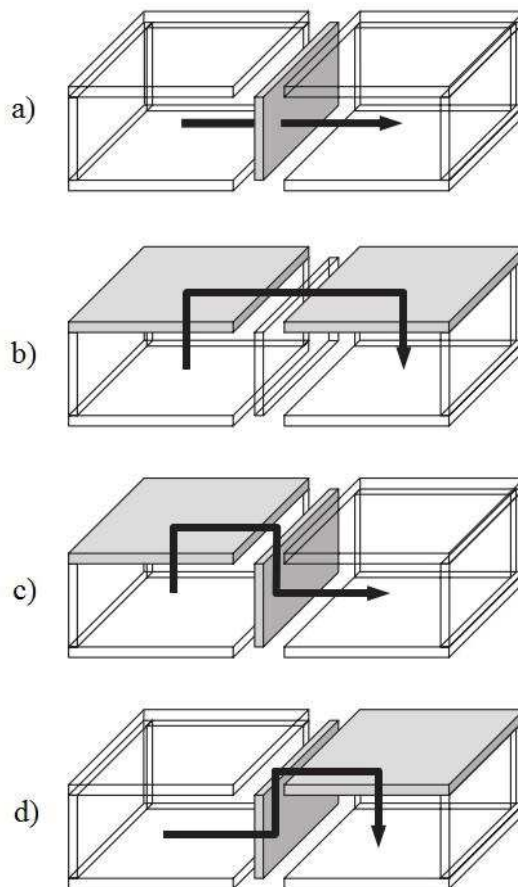
Fonte: Ballou (2008, p. 28)

## 2.2 Isolamento acústico

O isolamento acústico de sistemas construtivos isoladamente é determinado em ensaios em laboratório. As câmaras reverberantes utilizadas para o ensaio devem estar totalmente desvinculadas de outros elementos construtivos, inclusive da amostra a ser ensaiada (ISO, 2010; HOPKINS, 2012).

Quando realizados ensaios em campo, todos os elementos estão vinculados entre si e criam meios de transmissão da vibração pelos flancos, ou seja, pela via estrutural, no contato entre diferentes elementos e sistemas construtivos. A Figura 3 ilustra que a transmissão da vibração entre ambientes internos pode ser direta pela partição divisória (a); através da estrutura do cômodo emissor para o cômodo receptor (b); através da estrutura para a partição divisória (c); e pela divisória de partição para a estrutura do cômodo receptor (d).

Figura 3 – Caminhos de transmissão sonora



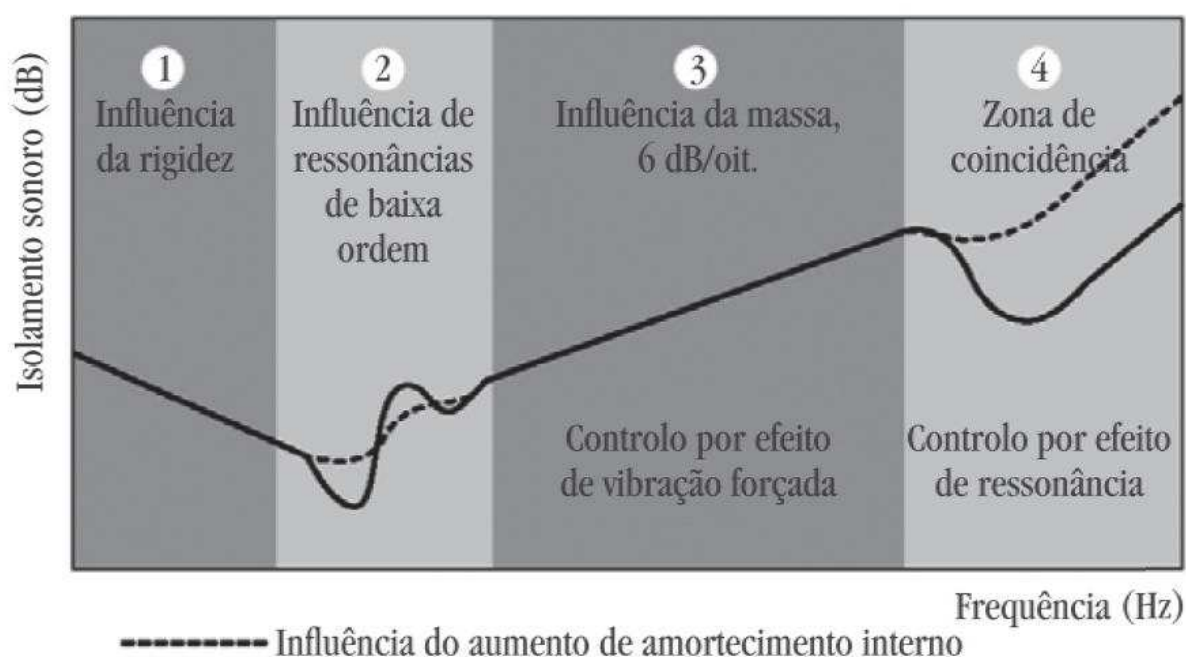
Fonte: Hopkins (2012, p. 248)

### 2.2.1 Isolamento ao ruído aéreo

Ao se escolher um material para fins de isolamento acústico, este deve ser analisado quanto às características que influenciarão no controle da transmissão do som. Paixão (2002) comenta que são 4 mecanismos principais que terão influência no controle de ruído: a rigidez; a ressonância; a massa; e a coincidência. Mecanismos estes que corroboram com a necessidade de se entender o espectro do som que se queira atenuar.

Patrício (2018) considera que o isolamento acústico ao ruído aéreo depende da inércia, da massa e das características elásticas dos elementos utilizados na compartimentação de ambientes. Além disso, o isolamento acústico de sistemas planos homogêneos, varia em função da frequência, e o comportamento pode ser dividido em 4 regiões distintas, conforme apresentado na Figura 4 (PATRÍCIO, 2018; LUNDH, 2017).

Figura 4 – Diferentes regiões da redução ao ruído aéreo



Fonte: Patrício (2018, p. 61)

Na Região 1, para baixas frequências, a perda de transmissão é controlada pela rigidez do material (LUNDH, 2017). Para Hopkins (2012) é muito difícil se prever o comportamento do isolamento nas baixas frequências, mas esse é considerado um importante dado a ser verificado em sistemas de fachadas por causa da



componente espectral do ruído de tráfego veicular nas faixas das baixas frequências, sendo esta a fonte sonora usualmente predominante nos estudos de isolamento sonoro de fachadas.

A Região 2 expressa a influência do controle das ressonâncias mecânicas do painel no movimento de flexão, e são o resultado da combinação construtiva de ondas de flexão que se propagam ao longo do painel e são irradiadas pelas suas bordas (BISTAFA, 2011).

A Região 3 é a parte controlada pela “Lei da massa”. Nesta faixa o isolamento tende a crescer 6 dB por acréscimo de banda de oitava (ANJOS, 2013; HOPKINS, 2012). O isolamento obedece ao modelo matemático apresentado na Equação 1 para sistemas ensaiados em laboratório, a qual pode ser utilizada até a frequência de coincidência (Região C) (ISO, 2017).

$$R = -10 \lg \left[ \left( \frac{2\rho_0 c_0}{2\pi f m'} \right)^2 \frac{\pi f_c \sigma^2}{2f \eta_{tot}} \right] \quad (1)$$

Sendo,  $R$  o índice de redução sonora, em dB;  $\rho_0$  a densidade do ar, em kg/m<sup>3</sup>;  $c_0$  a velocidade do som no ar, em m/s;  $f$  a frequência, em Hz;  $m'$  a massa por unidade de área do elemento de partição, em kg/m<sup>2</sup>;  $f_c$  a frequência de coincidência do elemento de partição, em Hz;  $\sigma$  o fator de irradiação para ondas livres; e  $\eta_{tot}$  o fator de perda total.

A frequência de coincidência (ou frequência crítica), representada na Figura 4 como Região 4, é o período caracterizado pela similaridade entre o comprimento da onda no ar com o comprimento de ondas formado pelo grupo de elementos da amostra (HOPKINS, 2012; ISO, 2017; VIGRAN, 2008).

A frequência crítica pode ser determinada pela Equação 2.

$$f_c = \frac{c_0^2}{1,8 \times C_L \times t} \quad (2)$$

Sendo  $f_c$  a frequência de coincidência do elemento de partição, em Hz;  $c_0$  a velocidade do som no ar, em m/s;  $C_L$  a velocidade da onda quasi-longitudinal, em m/s; e  $t$  a espessura do elemento de partição.

Alguns autores consideram ainda uma região posterior para a perda de transmissão sonora nas altas frequências, a qual pode ter um acréscimo na perda de transmissão sonora por bandas de oitavas de 7 a 9 dB (LUNDH, 2017). As

Equações 3 e 4 apresentam o cálculo do índice de redução sonora para as bandas de frequência superiores a frequência de coincidência.

$$R = -10 \lg \tau \quad (3)$$

$$\tau = \left( \frac{2\rho_0 c_0}{2\pi f m'} \right)^2 \left( 2\sigma_f \left[ \frac{1-f^2}{f_c^2} \right]^{-2} + 2 \frac{\pi f_c}{4f} \frac{\sigma^2}{\eta_{\text{tot}}} \right) \quad (4)$$

Ljunggren *et al* (2016, *apud* LUNDH, 2017) mencionam que a área posterior a Região 4, caracterizada pelo isolamento em altíssimas frequências, tem comportamento ao isolamento regido pela Equação 5.

$$R = 20 \times \log \left( \frac{\rho_w \times c_w}{\rho \times c} \right) + 10 \times \log \left( \frac{\eta}{\eta_0} \right) \quad (5)$$

Sendo  $\rho_w$  a densidade da unidade de partição, em kg/m<sup>3</sup>;  $c_w$  a velocidade de propagação de uma onda longitudinal direita através da parede, em m/s;  $\eta$  o fator de perda da parede; e  $\eta_0$  o valor referência para o fator de perda.

A ISO 12354-1:2017 (ISO 2017) apresenta etapas de cálculo para a estimativa do isolamento ao ruído aéreo. Nesta parte da norma são apresentados dois métodos de cálculo, o método simplificado e o método detalhado (ISO, 2017), conforme comentado a seguir.

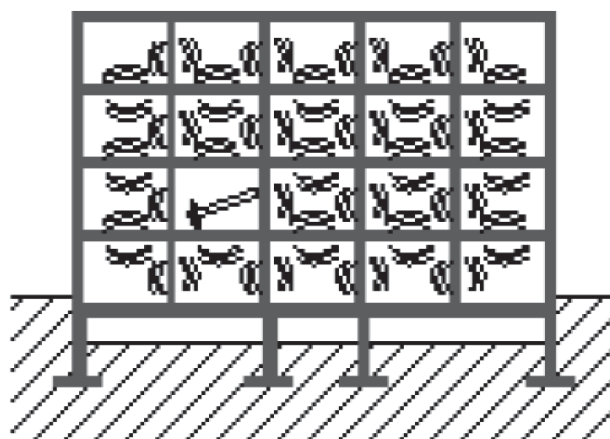
### 2.2.2 Isolamento ao ruído de impacto

Dentre os requisitos de desempenho acústico de edifícios a serem verificados, o ruído de impacto deve ter uma atenção especial, principalmente no momento de se determinar os materiais construtivos a serem empregados. Esse tipo de transmissão é decorrente do impacto mecânico entre sólidos nos sistemas de piso, que por sua característica intrínseca, sempre terá um ou mais elementos estruturais em sua composição. A estrutura de uma edificação, quando apresenta ligações rígidas e solidarizadas, é um meio suscetível a permitir a transmissão da vibração quando geradas por uma fonte de impacto, com pouca perda de energia (HASSAN, 2009; PATRÍCIO, 2012).

Elementos construtivos com massa elevada apresentam maior eficiência na redução da irradiação das vibrações. No caso do isolamento aos sons aéreos, um pequeno aumento na massa já representa algum aumento no isolamento sonoro de partições, pois a energia sonora é considerada pequena nessa forma de

transmissão. Entretanto, no ruído de impacto essa energia é maior, com aumento considerável da velocidade de transmissão do som, com uma força aplicada diretamente no sistema construtivo (Figura 5). Por isso, a lei da massa não possui a mesma eficiência no controle vibracional quando se tratar do som de impacto em relação ao ruído aéreo (HASSAN, 2009).

Figura 5 – Transmissão de vibração através de elementos construtivos



Fonte: Patrício (2018, p. 99)

A utilização de materiais com função de amortecimento a impactos mecânicos em sistemas de pisos pode ser uma solução para a redução do som de impacto. A diferença no ruído de impacto entre sistemas de pisos com revestimentos rígidos e elásticos é verificada a partir da banda de 500 Hz, sendo nesse ponto observado um decaimento mais acentuado da força de excitação, quando na situação de utilização de revestimentos elásticos. (HESSLER *et al.*, 2017; NUNES; PATRÍCIO, 2016).

A forma mais eficiente de se atenuar os sons de impacto é com a utilização de pisos flutuantes, sendo um conceito relativamente novo no Brasil e ainda pouco empregado na cadeia da construção civil nacional. A proposta deste sistema é que a camada de contrapiso, colocada acima da laje, não tenha vínculo rígido com outros elementos estruturais, como paredes e a própria laje. Este sistema construtivo só é possível com a utilização de elementos com características elásticas, que tenham a capacidade de amortecimento de vibrações (GERRETSEN, 1999; HOLTZ; SCHMITT, 2015; ISO, 1989; PIERRARD; AKKERMAN, 2013).

Gerretsen (1999) comenta que a redução sonora de sistemas construtivos compostos ao ruído aéreo pode ser largamente estimada, entretanto, ao se tratar de sistemas heterogêneos de pisos, a predição pode não ser tão simples assim. Em

alguns sistemas de piso são utilizados diferentes materiais de forma combinada, sendo muitos deles leves e sem finalidade estrutural. De acordo com Hopkins (2012), lajes compostas por elementos leves não têm o mesmo comportamento acústico que uma laje maciça, que apresenta características de material heterogêneo e ortotrópico. Segundo Patrício (2001) nesse tipo de sistema construtivo, são verificadas diferenças significativas nos mecanismos de transmissão pelos flancos, comparado a laje de concreto maciço homogênea, para uma densidade superficial similar. Sendo assim, ainda segundo o autor, a transmissão por flancos é um dos principais fatores que limitam o isolamento acústico nos sistemas de piso heterogêneos, mas com a utilização de acabamentos nos flancos entre a parede de alvenaria, acima ou abaixo da laje, é possível melhorar consideravelmente o seu desempenho. Essas características tornam as estimativas teóricas complexas devido aos diferentes tipos de ondas geradas nos diferentes materiais.

A Equação 6 apresenta o modelo matemático proposto pela ISO 12354-2:2017 para se estimar o nível de pressão sonora de impacto padrão de sistemas de pisos.

$$L_{n,d,w} = L_{n,eq,0,w} - \Delta L_w - \Delta L_{d,w} \quad (6)$$

Sendo  $L_{n,d,w}$  o nível de pressão sonora de impacto normalizado ponderado para o caminho direto;  $L_{n,Eq,0,w}$  o nível de pressão sonora de impacto normalizado ponderado equivalente do piso descoberto;  $\Delta L_w$  é a redução ponderada do nível de pressão sonora de impacto do revestimento de um sistema de piso;  $\Delta L_{d,w}$  é a redução ponderada do nível de pressão sonora de impacto de uma camada adicional no lado de recepção do elemento de separação; sendo todas as unidades em dB.

Os dados de  $\Delta L_w$  podem ser estimados caso a rigidez dinâmica do material resiliente seja conhecida. Já os valores de  $\Delta L_{d,w}$  são obtidos de ensaios de rebaixo em tetos. Para a ISO 12354-2 estes componentes são denominados camadas adicionais e os resultados obtidos em campo podem ser utilizados como uma aproximação dos valores de laboratório. (ISO, 2017).

De acordo com a ISO 12354-2 (ISO, 2017), a estimativa para os sistemas estruturais de piso, identificados como  $L_{n,Eq,0,w}$ , são obtidos através da Equação 7,

quando sistema de piso for homogêneo, e pela Equação 8, quando sistema de piso for heterogêneo de lajota cerâmica.

$$L_{n,eq,0,w} = 164 - \left( 35 \log \frac{m'}{1 \frac{kg}{m^2}} \right) dB \quad (7)$$

$$L_{n,eq,0,w} = 160 - \left( 35 \log \frac{m'}{1 \frac{kg}{m^2}} \right) dB \quad (8)$$

### 2.3 Métodos de estimativa de desempenho acústico de edificações

Para a representação do desempenho acústico de um tipo de sistema construtivo, tanto os modelos de previsão como os métodos de medição têm suas limitações, mas com o conhecimento das limitações de cada um deles, as decisões a serem tomadas na etapa de projeto tornam-se menos complexas. Hopkins (2012) pondera que um modelo fornece mais do que apenas um procedimento para calcular um resultado numérico, pois as suposições inerentes ao processo de modelagem podem esclarecer questões e hipóteses de um estudo. O autor ainda explica que os modelos simples geralmente identificam as variáveis mais importantes com menor esforço do ponto de vista do equipamento de *hardware*. Além disso, imprecisões na descrição das características construtivas mais detalhadas de um edifício, no caso de modelagens mais complexas, podem produzir grandes diferenças entre os resultados de uma modelagem e os resultados obtidos em ensaios em campo.

A caracterização teórica do isolamento acústico de sistemas construtivos, conforme Patrício (2018), pode ser realizada por diferentes métodos como, por exemplo o elasto-dinâmico, de análise modal, de análise por elementos finitos e de análise estatística de energia. Ainda segundo o autor, o método elasto-dinâmico apresenta o fundamento básico dos demais e parte da formulação conceitual de um modelo inercial, que integra os efeitos de rigidez e de amortecimento interno. Dessa forma, a transmissão sonora é estimada com base no processo de deformação correspondente às diferentes características elásticas dos materiais e as consequentes interações do sistema construtivo a ser analisado. A consideração

básica é fundamentada em uma placa plana, com espessura constante e desvinculada do seu contorno.

Método da matriz de transferência utiliza várias equações numéricas combinadas a parâmetros geométricos, resultando em gráficos que descrevem o comportamento acústico frente à uma excitação sonora. Este modelo tem como vantagem poder variar as características e configurações de um elemento multicamadas a ser modelado, assumindo que as camadas são infinitas e representa uma propagação plana nas camadas (Dijckmansa; Vermeir, 2013)

Atualmente, a ISO 12354:2017 (ISO, 2017) é a referência normativa para as estimativas de desempenho acústico de edifícios e está dividida em 4 partes. A primeira parte trata de estimativas quanto ao isolamento ao ruído aéreo entre cômodos; a segunda parte trata de estimativas quanto ao isolamento ao ruído de impacto; a terceira parte sobre estimativas quanto ao isolamento de ruídos externos (fachada); e a quarta e última parte trata sobre a transmissão de ruído interno para áreas externas.

Para a elaboração das 4 partes da ISO 12354:2017, a EN 12354:2000 foi utilizada como base, que ainda conta com mais duas partes não transcritas para a ISO 12354:2017, as quais tratam de estimativa de ruído de equipamentos de serviço (EN, 2003) e absorção acústica em recintos fechados (EN, 2009). De acordo com Rosão e Silva (2018) a maior alteração entre as normas ISO e EN está no fato de haver uma distinção entre sistemas construtivos pesados e leves, que deve ser levada em conta nos procedimentos de cálculo. Os autores ainda comentam que esta nova ISO possui, na parte 1 um anexo com estimativa de incerteza, e que na parte 2 a tabela de correção  $k$ , para a determinação da transmissão por flancos pelo método simplificado, não está presente. A transmissão por flancos é determinada através de fórmulas que consideram a relação entre massas diferentes do sistema de piso e das paredes (ROSÃO; SILVA, 2018).

Conforme mencionado anteriormente, as normas de estimativa de isolamento acústico apresentam dois métodos de cálculo, sendo o método simplificado para a obtenção de resultado ponderado e o método detalhado para resultados por bandas de terço de oitava (ISO, 2018); sendo que, as comparações entre resultados de estimativas teóricas e de por métodos experimentais podem ser realizadas, com a finalidade de ser validar, ou não, dados de sistemas construtivos compostos por materiais de difícil caracterização. Caniato *et al* (2017) realizaram ensaios quanto ao

ruído de impacto em pisos de madeira para a comparação com estimativas teóricas e concluíram que o método de estimativa pode apresentar resultados menores em bandas de baixas frequências, quando ensaiado em campo. Os autores verificaram diferenças de até 20 dB entre os valores medidos e estimados (CANIATO *et al.*, 2017).

## 2.4 Incerteza de medição

A incerteza de medição está ligada a dúvida quanto ao resultado de um mensurando, geralmente relacionado diretamente à precisão do ensaio (JCGM 100:2008, 2008). A incerteza de medição, conforme o Vocabulário Internacional de Metrologia, é um “Parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas” (INMETRO, 2005).

Há uma diferença entre precisão da medição e exatidão que não deve ser confundida quando avaliados fatores de dispersão. A precisão está ligada ao grau de concordância entre valores medidos em uma série repetida e pode ser identificada como erro aleatório, como, por exemplo, as condições de repetibilidade. Por sua vez, a exatidão está ligada à concordância entre o valor medido, de um determinado mensurando, com o valor verdadeiro, podendo ser identificado como erro sistemático (INMETRO, 2005).

### 2.4.1 Método GUM

Na tradução brasileira do GUM – *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements* –, flexões do termo incerteza são apresentados e tratados especificamente, como (JCGM 100, p. 3, 2008):

**Incerteza-padrão:** incerteza do resultado de uma medição expressa como um desvio-padrão;

**Avaliação do Tipo A** (de incerteza): método de avaliação de incerteza pela análise estatística de séries de observações;

**Avaliação do Tipo B** (de incerteza): método de avaliação de incerteza por outros meios que não a análise estatística de séries de observações;

**Incerteza-padrão combinada:** incerteza-padrão do resultado de uma medição, quando este resultado é obtido por meio dos valores de várias outras grandezas, sendo igual à raiz quadrada positiva de uma soma de termos, que constituem as variâncias ou covariâncias destas outras grandezas, ponderadas de acordo com o quanto o resultado da medição varia com mudanças nestas grandezas;

**Incerteza expandida:** quantidade que define um intervalo em torno do resultado de uma medição com o qual se espera abranger uma grande fração da distribuição dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando. NOTA 1: A fração pode ser vista como a probabilidade de abrangência ou nível da confiança do intervalo. NOTA 2: Para associar um nível da confiança específico ao intervalo definido pela incerteza expandida são necessárias suposições explícitas ou implícitas com respeito à distribuição de probabilidade caracterizada pelo resultado da medição e sua incerteza-padrão combinada. O nível da confiança que pode ser atribuído a este intervalo somente será conhecido na medida em que tais suposições possam ser justificadas. NOTA 3: Incerteza expandida é denominada incerteza global no parágrafo 5 da Recomendação INC-1 (1980);

**Fator de abrangência:** fator numérico utilizado como um multiplicador da incerteza-padrão combinada de modo a obter uma incerteza expandida. NOTA um fator de abrangência,  $k$ , está tipicamente na faixa de 2 a 3;

Pode se afirmar que existem diversas fontes que contribuem para a incerteza de medição, tais como: a avaliação incompleta ou imperfeita de um mensurando; a amostragem não-representativa; desprezo aos efeitos das condições ambientais sobre a medição ou medição imperfeita das condições ambientais; erro de tendência pessoal na leitura de instrumentos analógicos; resolução do instrumento; valores inexatos dos materiais de referência e de padrões; as suposições incorporadas ao método de medição; as variações nas observações repetidas do mensurando sob condições idênticas (GALLAS, 2010).

#### 2.4.2 Incerteza aplicada a acústica de edifícios

Os ensaios de acústica de edifícios podem apresentar uma variação entre medições repetidas. Wittstock (2005) realizou estudos sobre os limites de repetitividade e os requisitos indicados na ISO 140-2:1991. Estes estudos foram realizados na divisão de mecânica e acústica do instituto PTB – *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* – na Alemanha.

O grande problema de uma baixa repetitividade em ensaios acústicos advém de campos sonoros não difusos e do tempo de reverberação não uniforme em câmaras laboratoriais. Estes desvios são apresentados em ensaios em câmara reverberante e em ensaios em campo (WSZOLEK, 2007). Entretanto, em ensaios



em campo, a forma de se diminuir o desvio padrão de ensaios é aumentar a quantidade de pontos medidos; já em câmara reverberante, esse efeito deve ser contornado de outras formas, uma vez que normas de incerteza já estipulam um desvio máximo a ser considerado.

Michalski et al (2008) abordou o assunto incerteza de medição em acústica de edifícios com ênfase em medições de campo de isolamento sonoro aéreo. Posteriormente, Michalski (2011), aprofundou sua pesquisa, e em sua tese de doutorado abordou o isolamento sonoro aéreo entre salas em campo e fachadas, utilizando o método clássico e o método da função de transferência (ISO, 2014).

A atual referência normativa para a incerteza de medição para acústica de edificações é a ISO 12999-1 que substituiu e aprimorou requisitos indicados anteriormente na ISO 140-2. Esta norma também fornece valores referência para a incerteza padrão, que deverão ser utilizados quando o laboratório não possuir dados de ensaios de proficiência para validar seu método (Tabela 1). Para desenvolver esta norma, uma série histórica de valores de ensaios interlaboratoriais foram coletados e tratados estatisticamente, e representam uma média dos valores obtidos de diferentes tipos de mensurandos, incluindo paredes de sistemas leves, divisórias, paredes de sistemas pesados, esquadrias. (ISO, 2014).

Esses valores referência são apresentados em quatro categorias, que são:

- Situação A: Caracterizado por medições em laboratório. Para este caso, a amostra é de acordo com o indicado pela respectiva parte da ISO 10140, bem como os equipamentos de ensaio e as instalações.
- Situação A ( $\sigma_{R95}$ ): Situação igual a apresentada na Situação A, mas representa uma média dos limites superiores do intervalo para os desvios padrões de reprodutibilidade com uma probabilidade de abrangência de 95%.
- Situação B: Diferentes laboratórios realizam ensaio em um mesmo local, mantendo assim a mesma amostra. A principal diferença para a Situação A é que diversos aspectos de transmissão aérea e periférica são mantidos, pois manteve-se a instalação e amostra de ensaio.
- Situação C: Caracteriza-se quando o ensaio é repedido diversas vezes na mesma amostra, pelo mesmo operador, utilizando o mesmo equipamento.

Tabela 1 – Incerteza padrão para isolamento de ruído aéreo em bandas de um terço de oitavas

Frequência (Hz)	Situação A $\sigma_{R95}$ (dB)	Situação A $\sigma_R$ (dB)	Situação B $\sigma_{situ}$ (dB)	Situação C $\sigma_r$ (dB)
50	11,7	6,8	4	2
63	6,7	4,6	3,6	1,8
80	5,9	3,8	3,2	1,6
100	5,0	3	2,8	1,4
125	5,0	2,7	2,4	1,2
160	3,8	2,4	2	1
200	3,3	2,1	1,8	0,9
250	3,3	1,8	1,6	0,8
315	3,3	1,8	1,4	0,7
400	3,3	1,8	1,2	0,6
500	3,3	1,8	1,1	0,6
630	3,3	1,8	1	0,6
800	3,3	1,8	1	0,6
1000	3,3	1,8	1	0,6
1250	3,4	1,8	1	0,6
1600	3,4	1,8	1	0,6
2000	3,4	1,8	1	0,6
2500	3,5	1,9	1,3	0,6
3150	3,6	2	1,6	0,6
4000	4,0	2,4	1,9	0,6
5000	4,7	2,8	2,2	0,6

Fonte: ISO 12999-1:2014, pág 7, tab 2

Já para as situações de isolamento ao ruído de impacto padrão, não há resultados válidos para as condições de reprodutividade (situação A). Para as demais situações, a Tabela 2 apresenta os valores em bandas de terço de oitava.

Tabela 2 – Incerteza padrão para isolamento de ruído de impacto em bandas de um terço de oitavas

Frequência (Hz)	Situação B $\sigma_{situ}$ (dB)	Situação C $\sigma_r$ (dB)
50	3,2	1,5
63	2,8	1,4
80	2,4	1,3
100	2	1,2
125	1,6	1,1
160	1,4	1
200	1,3	0,9
250	1,2	0,8

315	1,2	0,8
400	1,2	0,8
500	1,2	0,8
630	1,2	0,8
800	1,2	0,8
1000	1,2	0,8
1250	1,3	0,8
1600	1,4	0,8
2000	1,5	0,8
2500	1,7	1
3150	1,9	1,2
4000	2,1	1,4
5000	2,3	1,6

Heissler (2016) estudou os efeitos da incerteza de medição em ensaios de perda de transmissão sonora em câmara reverberante, com a comparação de resultados obtidos em dois tipos diferentes de amostras. Foram utilizados os métodos GUM e da ISO 12999-1 para determinar a incerteza de medição, concluindo que para as situações ensaiadas, a incerteza proposta pela ISO possuía um valor maior que o estimado pelo GUM (HEISSLER, 2016; HEISSLER *et al.*, 2016).

Quando se utiliza o método GUM para a estimativa da incerteza de medição, é importante que sejam mapeadas todas as possibilidades de fatores que possam contribuir com um desvio. Deste modo, Heissler, Pires e Oliveira (2017) analisaram a precisão intermediária do ensaio de ruído aéreo em câmara reverberante, com a alteração das variáveis de operador, sendo seis operadores diferentes, e dia de ensaio, com ensaios realizados ao longo de uma semana. Neste estudo, as variáveis amostrais e o equipamento utilizado foram mantidos fixos e o valor de precisão intermediária obtido foi de 0,18 dB.

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo é dividido entre a caracterização das edificações amostradas, as etapas de ensaio em campo, a estimativa de isolamento acústico com a utilização de software e a determinação da incerteza de medição.

#### 3.1 Edificações amostradas

Nesta parte são apresentadas as duas edificações analisadas denominadas de Edifício 1 e Edifício 2, bem como os cômodos utilizados neste trabalho. Optou-se por utilizar os cômodos indicados a seguir por serem os menores e maiores cômodos dentro das unidades habitacionais dos edifícios analisados.

##### 3.1.1 Edifício 1

O Edifício 1 apresenta sistema de vedação vertical, localizado entre unidades habitacionais distintas, composto por alvenaria de blocos cerâmicos de vedação de dimensões de 19x19x29 cm, com revestimento argamassa de múltiplo uso com 1 cm de espessura em projeto e espessura total da parede de 21 cm. Nas salas/cozinhas, a parede ainda é revestida com azulejo cerâmico assentado com argamassa colante.

O sistema de vedação vertical quando divisa de unidade habitacional com área comum de trânsito eventual, como o corredor, é composto por alvenaria de bloco cerâmico de vedação de dimensões de 14x19x29 cm, com revestimento em argamassa de múltiplo uso com 1 cm de espessura em projeto.

Os ambientes analisados possuem ainda paredes externas de alvenaria de blocos cerâmicos de vedação de 19x19x29 cm, com revestimento argamassado de múltiplo uso com espessura média de 3,0 cm na face externa e 1,0 cm na face interna, totalizando 23 cm de espessura da parede. As esquadrias são compostas por perfil de alumínio *Doc Alcoa* e vidro incolor de 4 mm nos dormitórios e cozinha; na sala a bandeira da esquadria tem vidro laminado 3+3 mm de espessura e folhas de correr com vidros 5 mm de espessura. As persianas são em PVC *Doc Isoperfil* – Linha 2055, já as portas internas das unidades habitacionais são de madeira semi-

oca com 33 mm de espessura, e as portas externas são de madeira maciça com espessura de 42 mm.

As paredes internas das unidades habitacionais são de sistema tipo drywall, compostos por guias e montantes de 75 mm de espessura, preenchido com lã de vidro de 50 mm de espessura e densidade de  $12 \text{ kg/m}^3$ , com espessura total de 100 mm com montantes a cada 60 cm e fechamento de placa de gesso acartonado *standard* de 12,5 mm em ambas as faces.

A laje dos ambientes é de concreto maciço moldado in loco com 12 cm de espessura e sem contrapiso. Na cozinha há, ainda, piso cerâmico Alfenas Natural Fit 44,5x44,5 cm.

A Figura 6 apresenta os locais em que foram realizados os ensaios de ruído aéreo, sendo em cômodos com a mesma característica de uso (sala de estar). As áreas das paredes que formam os sistemas de partição das salas de estar variam entre  $14,33 \text{ m}^2$  (Figura 6a), identificado como LP6, e  $9,8 \text{ m}^2$  (Figura 6b), identificado como LP4.

Nesses mesmos cômodos foram realizados ensaios do ruído aéreo e de impacto no sistema de pisos: a Figura 6a apresenta o cômodo identificado como LP5 e  $20 \text{ m}^2$  e a Figura 6b o cômodo identificado como LP3 com  $17 \text{ m}^2$  para a situação de ensaio do sistema de piso.

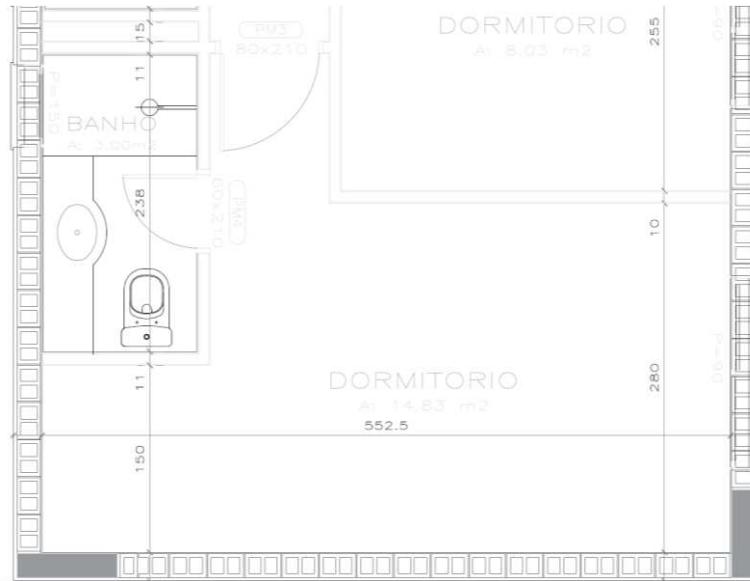
Figura 6 – Sala de estar da Edificação 1



Fonte: o autor

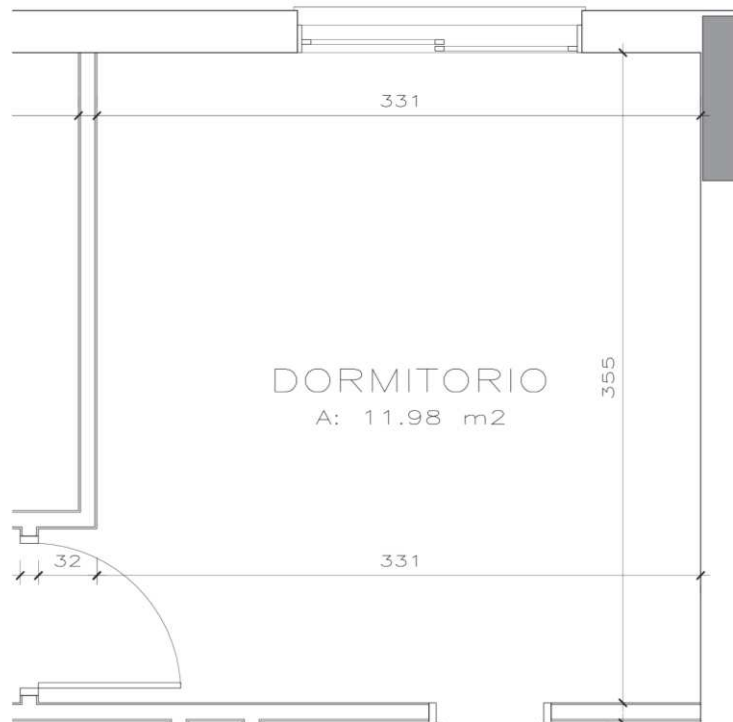
A Figura 7 e a Figura 8 apresentam os locais em que foram realizados ensaios de ruído aéreo e impacto, sendo em cômodos com a mesma característica de uso (dormitórios), com variações nas áreas dos sistemas de partição entre 14,83 m<sup>2</sup> (Figura 7) e 11,98 m<sup>2</sup> (Figura 8).

Figura 7 – Suíte da Edificação 1



Fonte: o autor

Figura 8 – Dormitório da Edificação 1



Fonte: o autor

### 3.1.2 Edifício 2

O Edifício 2 apresenta sistema de vedação vertical, localizado entre unidades habitacionais distintas, composto por alvenaria de blocos cerâmicos de vedação de

dimensões de 14x19x29 cm. Nos dormitórios o sistema vertical de vedação é revestido com argamassa múltiplo uso com 1,3 cm de espessura em uma face e 2,2 cm de espessura na outra face, com espessura total da parede de 17,5 cm. Nas salas/cozinhas, a parede é revestida com azulejo cerâmico Nórdico Snow Acetinado 29,6cm x 40 cm assentado com argamassa colante, com espessura de 2,2 cm em uma face e 2,0 cm de espessura na outra face. Assim, as paredes das salas/cozinhas parede possui 18,2 cm de espessura total.

Os ambientes analisados têm ainda paredes externas de alvenaria de blocos cerâmicos de vedação de 19x19x29 cm, com revestimento argamassado de múltiplo uso com espessura média de 2,0 cm em ambas as faces, totalizando 23 cm de espessura. As esquadrias são de alumínio com vidro incolor de 4 mm de espessura e as portas internas são de madeira. Há janelas de ventilação permanente na sala das unidades habitacionais com persianas de PVC.

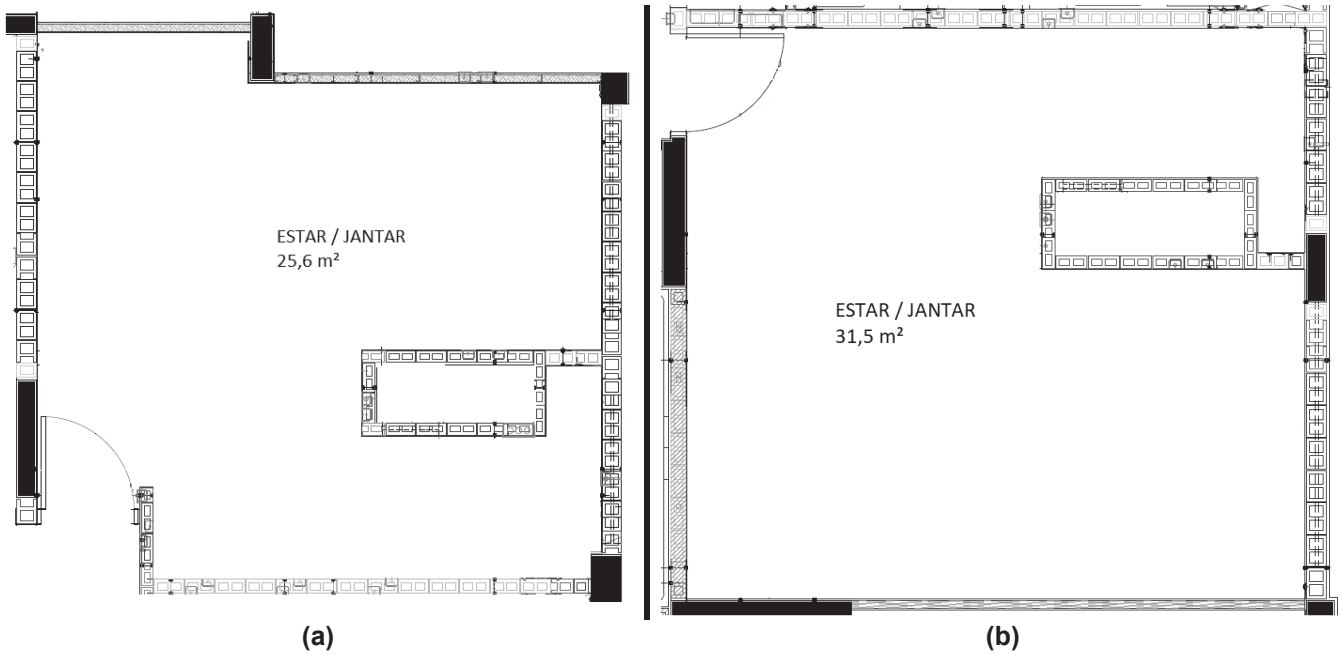
As paredes internas das unidades habitacionais são de drywall, compostos por guias e montantes de 75 mm de espessura, preenchido com lã de vidro com 50 mm de espessura e densidade de 12 kg/m<sup>3</sup>, com espessura total de 100 mm. Entre dormitórios e banheiros a distância entre montantes é de 40 cm, com fechamento de placas de gesso acartonado de 12,5 mm de espessura, do tipo standard em uma face e resistente à umidade, na outra face. Nos demais ambientes, a distância entre montantes é de 60 cm, com fechamento de placa de gesso acartonado standard de 12,5 mm em ambas as faces.

A Figura 9 apresenta os locais em que foram realizados os ensaios de ruído aéreo e impacto nos cômodos das salas de estar. Também houve variações nas áreas desses sistemas, com valores de 25,6 m<sup>2</sup> (Figura 9a) e 31,5 m<sup>2</sup> (Figura 9b).

A Figura 10 apresenta os locais em que foram realizados os ensaios de ruído aéreo e impacto nos dormitórios, nos quais as áreas dos sistemas de partição são de 9 m<sup>2</sup> (Figura 10a) e 11,3 m<sup>2</sup> (Figura 10b).

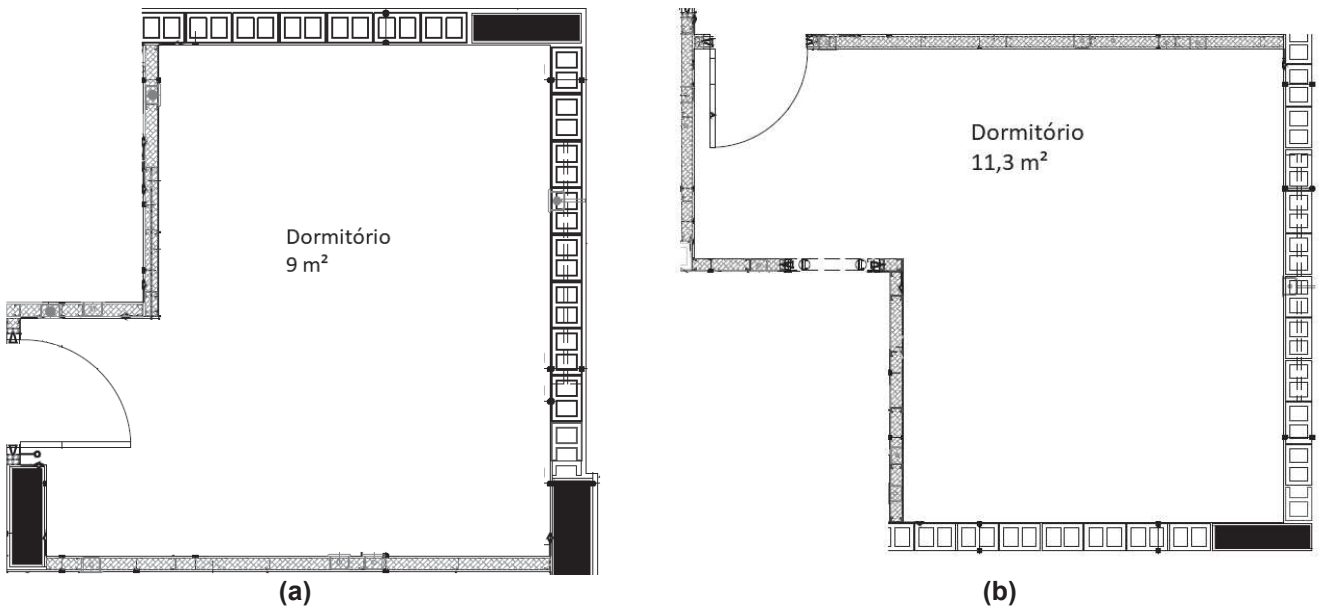


Figura 9 – Sala de estar da Edificação 2



Fonte: o autor

Figura 10 – Dormitórios da Edificação 2



Fonte: o autor

### 3.1.3 Síntese de ensaios

O Tabela 3 apresenta uma síntese dos ensaios realizados, bem como as dimensões das unidades e o tipo de ensaio realizado.

Tabela 3 – Síntese dos ensaios a serem realizados e da geometria dos cômodos

Cômodo	Ident.	Edifício	Área partição (m <sup>2</sup> )	Tipo de partição	Volume (m <sup>3</sup> )	Ruído aéreo	Ruído de impacto
Dormitório	LP1	1	12,0	Piso	31,8	x	x
Dormitório	LP2	1	14,8	Piso	39,2	x	x
Sala de estar	LP3	1	17,3	Piso	45,4	x	x
Sala de estar	LP4	1	9,8	Parede	45,7	x	
Sala de estar	LP5	1	20,1	Piso	52,9	x	x
Sala de estar	LP6	1	14,3	Parede	53,2	x	
Dormitório	NL1	2	9,0	Piso	23,8	x	x
Dormitório	NL2	2	11,3	Piso	29,9	x	x
Sala de estar	NL3	2	25,6	Piso	67,8	x	x
Sala de estar	NL4	2	31,5	Piso	83,5	x	x

Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.2 Ensaios em campo

De acordo com a atual Norma de Desempenho (ABNT, 2013), o ensaio de isolamento ao ruído aéreo em campo pode ser realizado de duas maneiras: através do método de engenharia, conforme ISO 140-4:1998; e pelo método simplificado, conforme ISO 10052:2004. Já para o ensaio de determinação do nível de pressão sonora de impacto padrão em campo é indicado o método proposto pela norma ISO 16283-2:1998.

Para este trabalho foi utilizado o método de engenharia para o ensaio de isolamento ao ruído aéreo, seguindo procedimentos das normas ISO 16283-1:2014 e ISO 16283-2:2015 para os ensaios de isolamento ao ruído aéreo e transmissão ao ruído de impacto, respectivamente.

Para ambos os métodos os valores são expressos em bandas de terço de oitavas, nas faixas de frequências de 100 a 3150 Hz. Para a expressão do valor único, foi utilizada a ISO 717-1 para os ensaios de isolamento ao ruído aéreo e ISO 717-2 para ensaio de transmissão ao ruído de impacto.

Para o ensaio de isolamento ao som aéreo, a fonte emissora de ruído deve estar posicionada no cômodo menor ao que o microfone estará. Denomina-se cômodo emissor aquele em que a fonte emissora de ruído é instalada, e cômodo receptor aquele em que o microfone é posicionado. Nesta medição, foram adotadas duas posições de fonte emissora de ruído e cinco posições de microfone para cada posição de fonte emissora de ruído.

Para o ensaio de transmissão ao ruído de impacto, a fonte emissora de ruído de impacto (máquina de impactos) foi posicionada no cômodo superior ao que o microfone é posicionado. Denomina-se cômodo emissor aquele em que a máquina de impactos é instalada, e cômodo receptor aquele em que o microfone é posicionado. Nesta medição, foram adotadas cinco posições de fonte emissora de ruído de impacto e quatro posições de microfone para cada posição de fonte emissora de ruído de impacto.

Em ambos os ensaios as posições de microfone e de fonte foram escolhidas aleatoriamente, com a distância mínima de acordo com a Tabela 4. O microfone foi posicionado para o centro do cômodo.

Tabela 4 – Distâncias entre posições dos equipamentos e das superfícies da sala

<b>Equipamentos e superfícies</b>	<b>Distância (m)</b>
Microfone e superfícies internas da sala	0,7
Fonte sonora e superfícies internas da sala	0,7
Microfone	1,0
Fonte	1,0
Microfone e amostra	1,0
Fonte e amostra	1,0

Fonte: Elaborado pelo autor

Para se determinar o ruído no cômodo emissor, nos ensaios de isolamento ao ruído aéreo, foi realizada a média logarítmica de todas as medições realizadas nesta etapa, utilizando a Equação 9.

$$L_1 = 10 * \log \sum_{i=1}^n 10^{\left(\frac{L_{1i}}{10}\right)} \quad (9)$$

Sendo  $L_1$  a média do nível de pressão sonora no cômodo emissor, em dB;  $L_{1i}$  a medição pontual no cômodo emissor, em dB.

Para se determinar o ruído no cômodo receptor em ambos os ensaios, foi realizada a média logarítmica de todas as medições realizadas nesta etapa, utilizando a Equação 10.

$$L_2 = 10 * \log \sum_{i=1}^n 10^{\left(\frac{L_{2i}}{10}\right)} \quad (10)$$

Sendo  $L_2$  a média do nível de pressão sonora no cômodo receptor, em dB;  $L_{2i}$  a medição pontual no cômodo receptor, em dB.

Ainda para cada ensaio foi medido o tempo de reverberação do ambiente, de acordo com a ISO 3382-2:2008. Neste caso, foi utilizado o método de engenharia de ruído interrompido, que possui uma precisão de 10% para verificações por bandas de terço de oitava. (ISO, 2008).

Como a norma referência para acústica de edifícios no Brasil já indica descritor acústico para ensaio em campo, neste trabalho foi utilizado este mesmo descritor, apresentado na Equação 11, para o ensaio de ruído aéreo e na Equação 12, para o ensaio de nível de pressão sonora de impacto padrão.

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \lg \left( \frac{T}{T_0} \right) \quad (11)$$

Sendo  $D_{nT}$  a diferença padronizada de nível, em dB;  $T$  o tempo de reverberação do cômodo receptor, em s; e  $T_0$  o valor referência para o tempo de reverberação.

$$L'_{nT} = L_2 - 10 \lg \left( \frac{T}{T_0} \right) \quad (12)$$

Sendo  $L'_{nT}$  o nível de pressão sonora de impacto padrão.

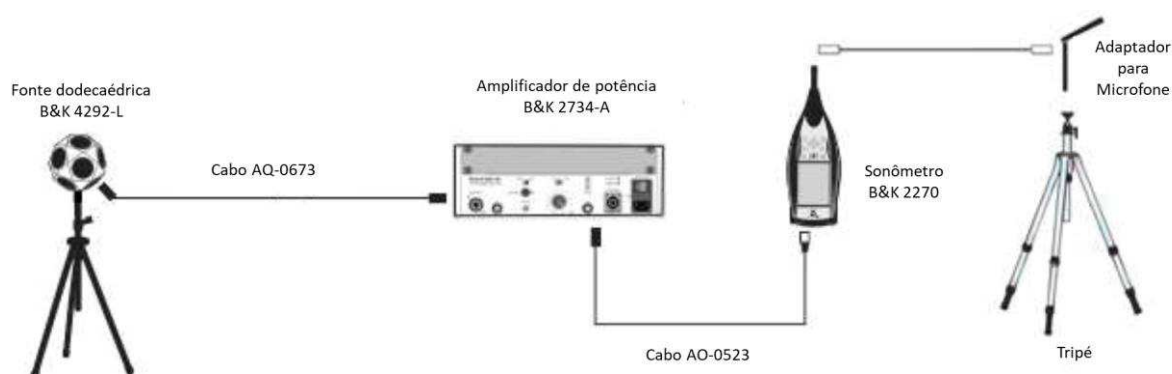
Para realizar os ensaios, o sistema completo incluindo cabos e microfones é indicado na ISO 10140-5:2010, conforme as exigências de Classe 1 de acordo com IEC 61672-1 e os filtros da Classe 0 ou 1 de acordo com a IEC 61260. O calibrador deve cumprir as exigências de Classe 1 de acordo com a IEC 60942. Os equipamentos utilizados estão indicados na Tabela 5 e na Figura 11, um esquema da montagem é apresentado.

Tabela 5 – Equipamentos utilizados no ensaio

Equipamento	Marca	Modelo
Analizador sonoro	Brüel & Kjær	2270
Microfone	Brüel & Kjær	4189
Calibrador	Brüel & Kjær	4231
Amplificador de potência	Brüel & Kjær	2734-A
Fonte omnidirecional	Brüel & Kjær	4292-L
Cabo	Brüel & Kjær	AQ-0673 e AO-0523
Trena Metálica	Vonder	8 metros
Termohigrômetro	Instrutemp	ITMP-600

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 11 – Esquema de montagem dos equipamentos



Fonte: Manual Brüel & Kjær (2000)

### 3.3 Estimativa de desempenho acústico

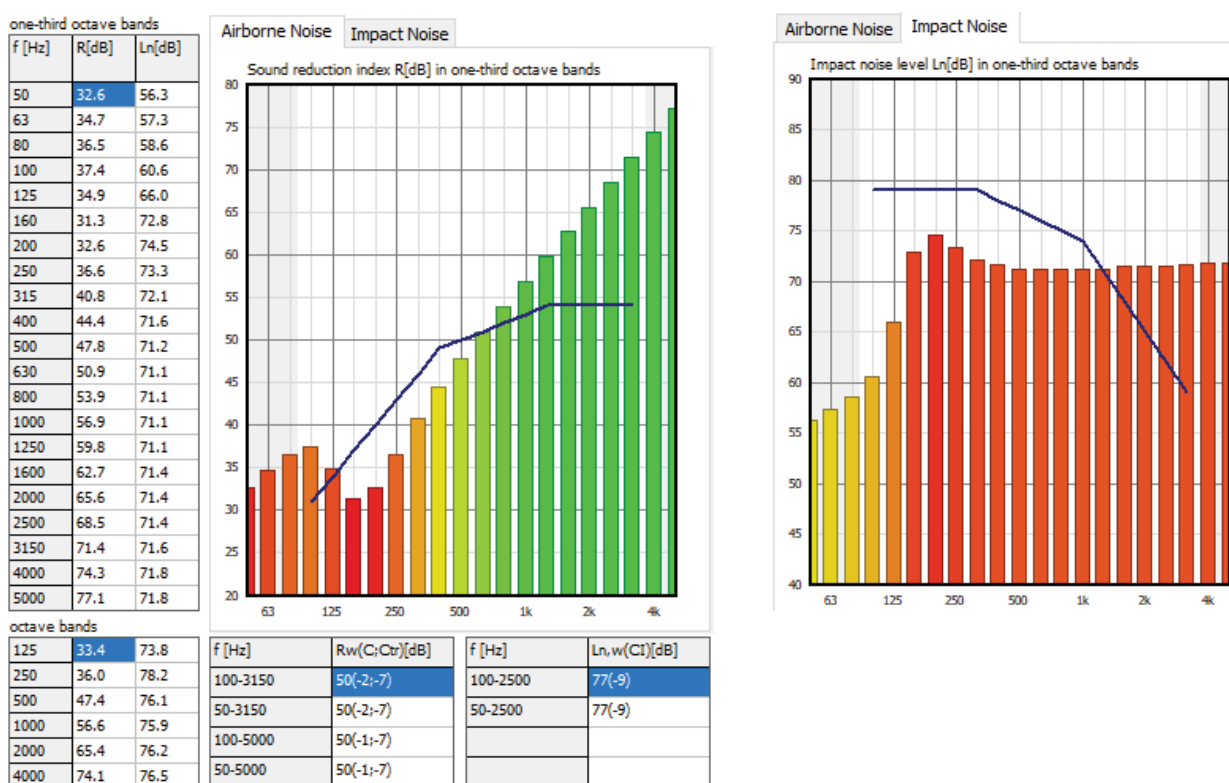
Como já comentado anteriormente, as normas europeias EN 12354:2000 serviram como base para a elaboração das normas internacionais ISO 12354:2017. Como não foi identificado software que utilize as normas ISO para a simulação, optou-se por utilizar o software SONarchitect®, o qual utiliza o grupo de normas EN 12354:2000 para a predição do isolamento acústico de sistemas construtivos em edifícios.

Utilizou-se como dados de entrada do software, valores estimados de acordo com a ISO 12354:2000, quando elementos construtivos homogêneos, e valores estimados pelo método da matriz de transferência, quando materiais não

homogêneos ou multicamadas. Os modelos utilizados no método da matriz de transferência foram processados diretamente pelo software.

O sistema de pisos foi considerado um sistema homogêneo, por ser constituído somente de concreto armado na espessura de 120 mm. Tal sistema conta com uma densidade superficial de 300 kg/m<sup>2</sup> e um fator de perda de 0,005. A Figura 12 apresenta os valores por banda de terço de oitava.

Figura 12 - Valores por banda de terço de oitava estimados para sistema homogêneo



Os sistemas de paredes são compostos por blocos cerâmicos com diferentes espessuras e argamassa cimentícia como revestimento. A Tabela 6 apresenta os valores estimados no software pelo método da matriz de transferência, que tem como retorno o índice de redução sonora ( $R_w$ ). Para obtenção dos valores de  $R_w$ , são utilizados os seguintes dados de entrada no software: a Amostra 1 composta por bloco cerâmico de dimensão de 14x19x29 cm e com reboco argamassado em ambas as faces com espessura de 1 cm; a Amostra 2 composta por bloco cerâmico de dimensão de 19x19x29 cm e com reboco argamassado em ambas as faces com espessura de 1 cm; a Amostra 3 composta por bloco cerâmico de dimensão de 19x19x29 cm e com reboco argamassado em ambas as faces com espessura de 1,5

cm em uma das faces e 2 cm na outra; a Amostra 4 composta por bloco cerâmico de dimensão de 19x19x29 cm e com reboco argamassado em ambas as faces com espessura de 3 cm; e a amostra 5 composta por parede de gesso acartonado com 1 placa em cada face e manta de lã de vidro, e foi utilizado banda acústica.

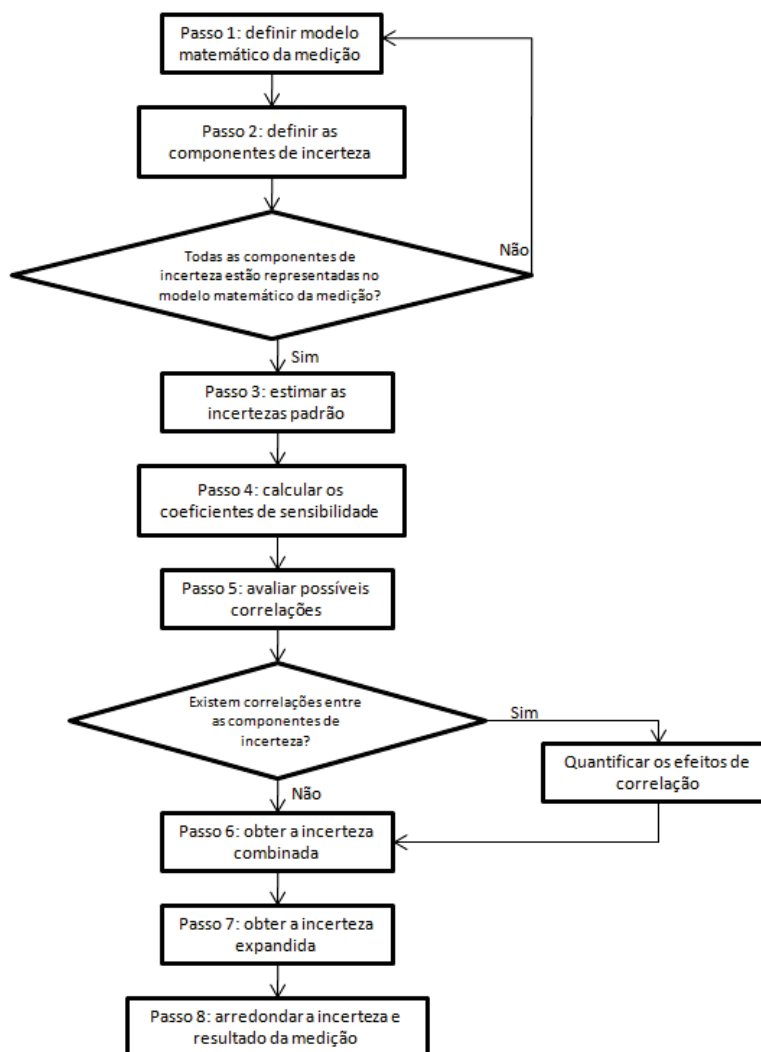
Tabela 6 - Valores por banda de terço de oitava estimados para sistema não homogêneo

Amostra	Densidade superficial (kg/m <sup>2</sup> )	Frequência (Hz)																R <sub>w</sub>
		100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	
1	160	35,1	36,2	36,3	33,6	29,3	27,9	30,2	36	40	45,8	49,5	52,4	57	61,4	60,2	62,7	41
2	190	36,2	35,8	31,4	29,9	28,8	33,7	36,6	41,2	41,2	48,6	54,3	58,2	62,6	62,3	70,8	72,4	44
3	230	36,8	36,7	33	30,1	27,4	32,2	36,1	41,9	47,2	50,3	54,5	58,5	61,8	61,3	66	73,8	44
4	260	38,6	38,8	36,6	29,9	29,7	30,2	35,9	42,2	44,8	48,7	55,1	59,2	62,5	68	72,2	74,4	44
5	23	17	20,4	25,5	26,9	29,1	31,3	33,7	36,1	38,7	41,3	43,8	46,2	48,1	48,6	45,8	37,4	39

### 3.4 Incerteza de medição e levantamento histórico

Para a estimativa da incerteza de medição, este trabalho adotou o método de trabalho apresentado na ISO/IEC Guide 98-3 - Guide to the expression of uncertainty in measurement (REDE METROLOGICA RS, 2013). As etapas para a determinação da incerteza de medição são apresentadas na Figura 13.

Figura 13 – Fluxograma de etapas para a expressão da incerteza de medição



Fonte: REDE METROLOGICA RS (2013, p. 6)

O GUM apresenta os passos para se avaliar a incerteza de medição. O ponto principal deste método é se trabalhar com a lei da propagação de incertezas para se ter a incerteza combinada, ao serem combinados todos os componentes de incerteza –  $u^2(x_i)$  – e multiplicados por seu coeficiente de sensibilidade (que neste trabalho foi a derivada parcial do modelo matemático em relação a variável), conforme apresenta a Equação 13 (GIESBRECHT, 2007; JCGM 100:2008, 2008; MICHALSKI, 2011).

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial y}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)} \quad (13)$$

Posterior a determinação da incerteza combinada, a incerteza expandida,  $U$ , pode ser obtida pelo produto da incerteza padrão combinada –  $u_c$  - e o fator de



abrangência – k - (Equação 14). O fator de abrangência é caracterizado pelo valor de graus de liberdade que foi indicado para a incerteza seguindo a distribuição de t-student. (JCGM 100:2008, 2008).

$$U = ku_c \quad (14)$$

Quando se trata da análise estatística de séries de observações (avaliação da incerteza utilizando fontes e componentes do Tipo A) são utilizados os métodos estatísticos usuais como tendência (Equação 15), variância (Equação 16), desvio padrão (Equação 17). Quando utilizados métodos de repetitividade, a incerteza padrão associada é dada pelo desvio padrão experimental da média (Equação 18).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (15)$$

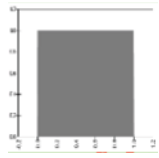
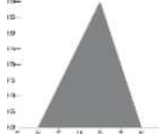
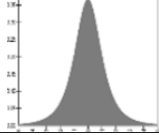
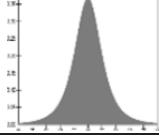
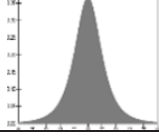
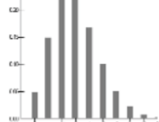
$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (16)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (17)$$

$$u(x_i) = \frac{s(\bar{x})}{\sqrt{n}} \quad (18)$$

A Equação 18 apresenta a incerteza padrão a ser calculada pela razão do desvio padrão com os graus de liberdade. Entretanto, a Tabela 7 apresenta esta incerteza que pode ser calculada pela razão dos dados de estimativa com o divisor, de acordo com a distribuição da probabilidade.

Tabela 7 – Distribuição de probabilidade e seus divisores

Tipo de Componente de Incerteza	Distribuição de Probabilidade	Divisor
Quando se conhecem apenas os valores máximos e mínimos de variação ( $\pm a$ ): por exemplo, o erro máximo admissível para um determinado equipamento ou o efeito causado pela resolução finita do equipamento utilizado	Retangular 	$\sqrt{3}$
Quando se conhecem os valores máximos e mínimos de variação ( $\pm a$ ) e o valor mais provável: por exemplo, o erro de posicionamento de um instrumento em uma marca de escala	Triangular 	$\sqrt{6}$
Desvio-padrão da média de um conjunto de N medições repetidas	T-Student 	$\sqrt{N}$
Desvio-padrão de dados históricos de repetitividade e/ou reprodutibilidade, na situação em que o resultado do ensaio/calibração é obtido por meio de uma única medição e não por uma média	T-Student 	1
Incerteza herdada da calibração de equipamentos e padrões	Normal ou t-Student 	Valor de K do certificado
Desvio-padrão de um processo de contagem de elementos discretos, com média m e desvio-padrão (POISSON)	Poisson 	1

Adaptado de: Rede Metrologica RS (2013)

Dessa forma, neste trabalho a análise histórica de incerteza de medição foi realizada para se ter conhecimento do comportamento de incertezas e os fatores que as influenciam, para que a população amostral tenha um valor significativo e linhas de tendências e regressões estimem para valores mais robustos.

Visando contribuir com uma base histórica de dados, ensaios de isolamento acústico em campo realizados a partir de 2016 pelo itt Performance da Unisinos foram considerados para este trabalho, sendo 34 ensaios de isolamento ao ruído aéreo e 20 ensaios de transmissão ao ruído de impacto padrão. Cabe ressaltar que estes ensaios foram realizados conforme método de ensaio da ISO 16283-1:2014

para ensaio de ruído aéreo e a ISO 16283-2:2015 para ensaios de transmissão ao ruído de impacto.

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo se divide em quatro partes, sendo que nas duas primeiras são apresentados os resultados obtidos em ensaios de campo e com a simulação computacional, para ruído aéreo e de impacto. Posteriormente, investiga-se na terceira parte a incerteza de medição destes ensaios em campo e é feito um comparativo com um histórico de incerteza de medição de ensaios realizados nos últimos dois anos na última parte deste capítulo.

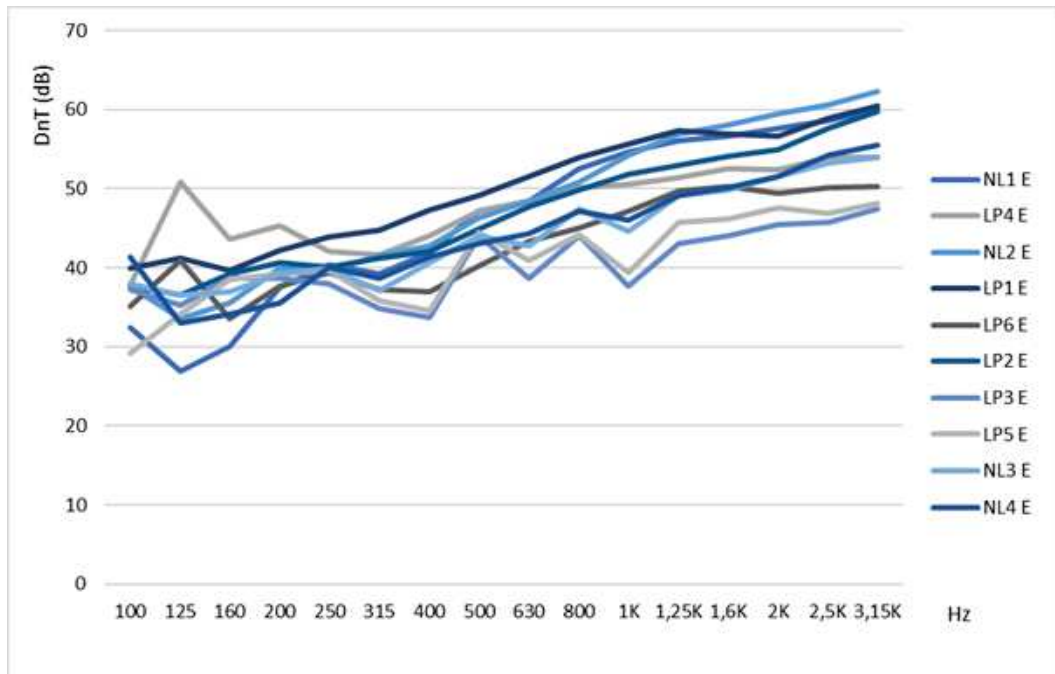
### 4.1 Ruído aéreo

Como já apresentado anteriormente, foram ensaiados os cômodos de duas edificações distintas, com sistemas construtivos semelhantes, e posteriormente, foi modelada a edificação no software *SONarchitect*®, estimando-se conforme a ISO 12354:2017 e o método da matriz de transferência. A Tabela 8 e Figura 14 apresenta os valores de ensaios em campo estimados por software.

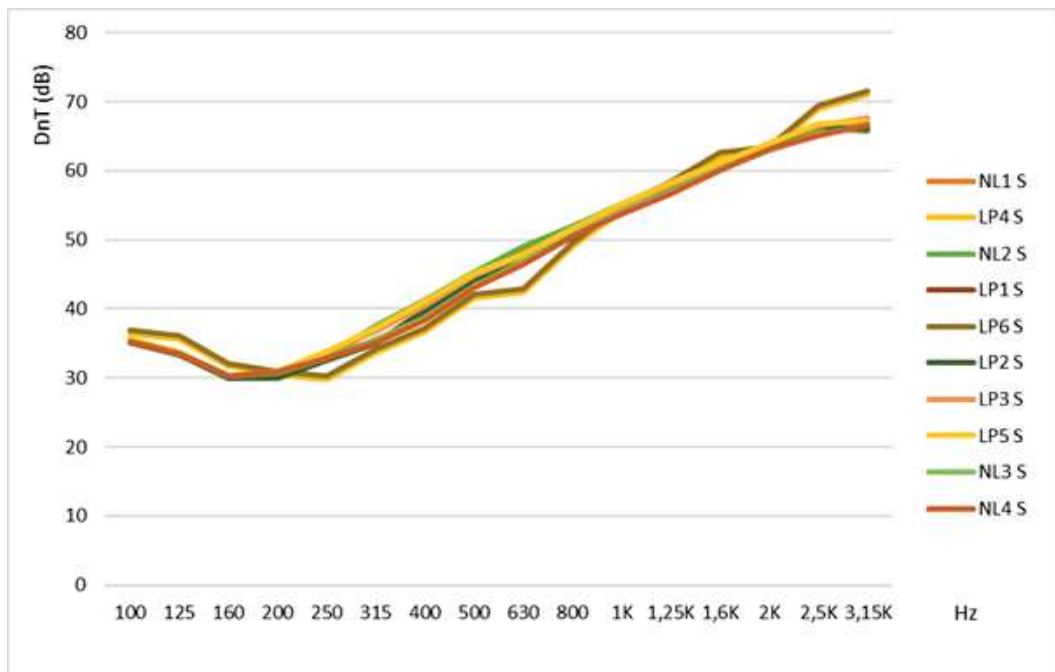
Tabela 8 – Comparativo de resultados para ruído aéreo, valores em dB

Ident.	Método	Frequência (Hz)																D <sub>ntw</sub> (dB)
		100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	
NL1	Ensaio	32,4	26,9	30,1	37,5	40,4	39,2	41,9	47,1	48,4	52,5	54,7	56,1	56,7	57,6	58,7	60,0	49
	Simulado	35,3	33,5	30,1	30,8	32,9	37,3	41,0	45,2	48,8	51,8	55,0	58,1	61,1	63,3	66,1	65,8	47
LP4	Ensaio	37,8	50,9	43,6	45,3	42,1	41,7	44,0	47,2	48,5	50,1	50,6	51,4	52,5	52,4	53,9	54,0	51
	Simulado	36,4	35,7	31,7	30,4	29,8	33,6	36,7	41,6	42,4	49,1	54,3	57,9	62,0	63,0	68,9	71,0	44
NL2	Ensaio	37,7	33,6	35,5	40,0	39,6	41,5	42,8	46,3	48,5	50,8	54,2	56,9	58,1	59,5	60,6	62,3	51
	Simulado	35,4	33,6	30,2	31,0	33,2	37,6	41,3	45,4	49,0	52,0	55,2	58,3	61,2	63,4	66,3	65,7	47
LP1	Ensaio	40,0	41,2	39,7	42,2	43,9	44,7	47,3	49,2	51,6	53,9	55,6	57,3	57,0	56,6	58,9	60,5	54
	Simulado	35,2	33,3	30,1	30,1	32,7	35,1	39,8	44,4	47,3	50,6	54,5	57,7	60,7	63,9	66,6	66,1	46
LP6	Ensaio	35,2	41,0	33,6	37,7	39,4	37,2	37,0	40,2	43,3	45,0	47,2	49,7	50,3	49,5	50,2	50,3	46
	Simulado	36,9	36,1	32,1	30,9	30,3	34,2	37,3	42,1	42,9	49,6	54,8	58,5	62,6	63,4	69,5	71,6	45
LP2	Ensaio	37,8	36,6	39,2	40,6	40,1	41,2	42,1	44,9	47,7	49,8	51,9	53,0	54,1	55,0	57,6	59,8	51
	Simulado	35,1	33,3	30,0	29,9	32,5	34,9	39,6	44,2	47,1	50,4	54,4	57,6	60,5	63,8	66,6	66,3	46
LP3	Ensaio	37,3	35,3	38,7	38,6	38,0	34,8	33,7	44,0	38,6	44,0	37,7	43,0	44,1	45,5	45,8	47,5	42
	Simulado	35,7	33,7	30,3	30,9	33,8	36,7	40,5	44,8	47,7	51,4	54,9	57,9	61,0	64,0	66,6	67,7	47
LP5	Ensaio	29,2	34,2	38,5	39,3	39,6	35,8	34,5	44,5	41,0	44,2	39,4	45,7	46,2	47,6	46,9	48,2	44
	Simulado	35,7	33,7	30,2	31,0	33,9	37,3	41,2	45,2	47,9	51,6	55,2	58,2	61,2	64,0	66,9	67,1	47
NL3	Ensaio	37,9	36,5	37,0	39,2	40,0	37,1	40,6	44,0	42,8	47,5	44,6	49,1	49,8	51,6	53,3	53,9	47
	Simulado	35,3	33,5	30,2	30,8	32,8	35,6	38,7	43,3	46,9	50,7	54,0	56,9	60,2	63,0	65,2	66,7	46
NL4	Ensaio	41,4	33,0	34,2	35,6	40,1	38,7	41,4	43,1	44,4	47,2	46,0	49,1	50,2	51,5	54,2	55,5	48
	Simulado	35,3	33,5	30,3	30,9	32,9	35,2	38,3	43,0	46,5	50,5	53,8	56,7	60,1	63,1	65,0	66,7	46

Figura 14 – Comparativo dos resultados para o som aéreo (a) ensaiados e (b) simulados



(a)

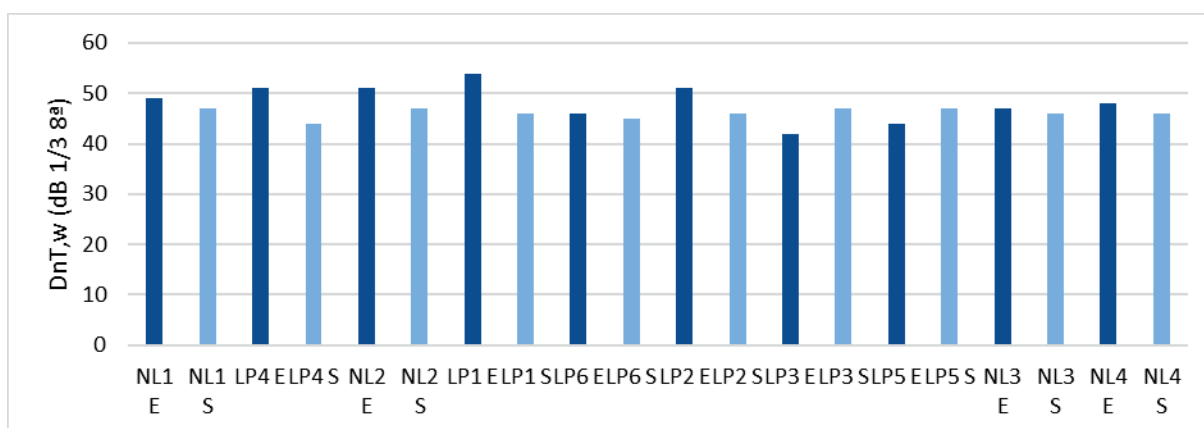


(b)

Quando analisados somente os resultados ponderados (Figura 15), percebe-se que os valores obtidos através de métodos de estimativa apresentaram valores

mais conservadores, em sua grande maioria (como pode ser percebido nas amostras NL1, NL2, NL3, NL4, LP1, LP2, LP4 e LP6). Ou seja, a estimativa neste caso apresentou resultado com valor mais elevado do que quando ensaiado em campo.

Figura 15 – Resultados ponderados para o ruído aéreo



Entretanto, quando analisadas as amostras LP3 e LP5 de pisos de cômodos de salas de estar, verifica-se que a inversa da lógica observada anteriormente é válida, na qual os resultados obtidos em ensaios em campo apresentaram resultado com valor mais elevado do que quando estimados pelo software.

Considerando a diferença entre os valores ponderados obtidos pelo ensaio em campo e pela estimativa, o conjunto de amostras NL3 de piso e LP6 de alvenaria e o conjunto de amostras NL1 e NL4, ambas de pisos, apresentaram 1 dB e 2 dB, respectivamente, indicando que os valores ficaram muito próximos entre si.

As amostras LP5 e NL2 apresentaram uma diferença no valor ponderado de 3 dB e 4 dB respectivamente, já apontando para um desvio maior que a incerteza padrão apresentada pela ISO 12999-1:2014, que é de 2 dB.

A Norma de Desempenho, ABNT NBR 15575:2013, indica requisitos a serem cumpridos quanto ao isolamento ao ruído aéreo, com os requisitos mínimos como obrigatórios, e os requisitos intermediário e superior como indicativos de um padrão melhor de edificação.

As amostras LP2, LP3, LP4 e LP1 apresentaram uma diferença no valor ponderado entre os valores obtidos pelo ensaio em campo e pela estimativa, maiores que 5 dB. Isto indica que, considerando o que a ABNT NBR 15575-4:2013 traz como requisito mínimo, intermediário e superior, esta diferença obtida nos diferentes métodos estudados alteraria a classificação do sistema construtivo.

A utilização de valores ponderados facilita a classificação de um sistema construtivo ou a comparação de sistemas distintos. Contudo, para uma análise mais refinada, utilizam-se os valores obtidos por bandas de frequência, assim, podendo ser evidenciado o comportamento do sistema quanto a sua rigidez ou a frequência de coincidência e possíveis frestas e fragilidades em ensaios em campo.

A Figura 16 à Figura 25 apresentam um comparativo, por bandas de terço de oitava, do resultado ensaiado e estimado.

Figura 16 - Amostra NL1

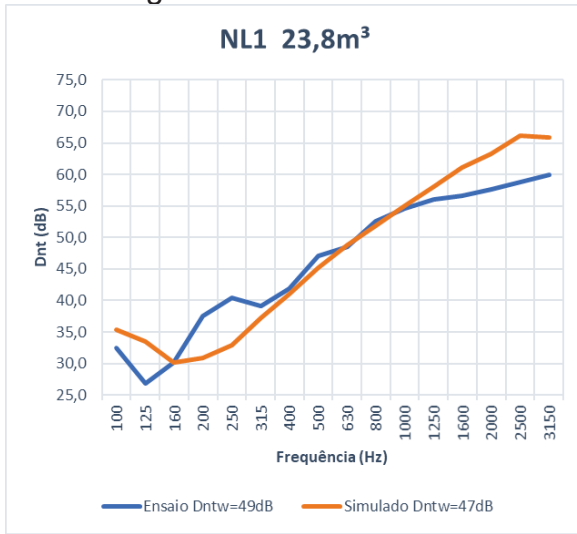


Figura 17 - Amostra NL2

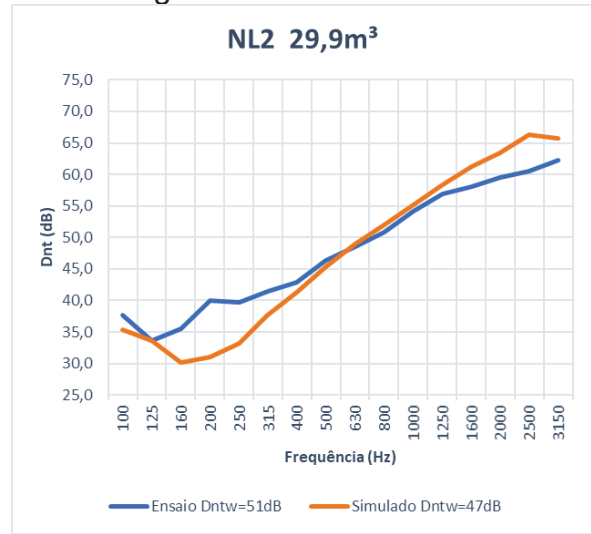


Figura 18 - Amostra LP1

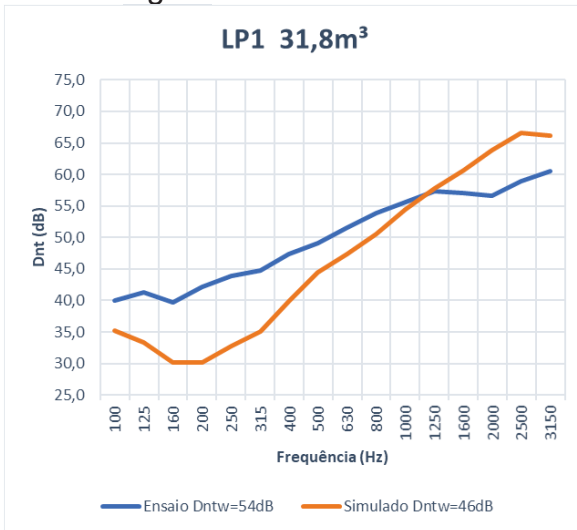


Figura 19 - Amostra LP2

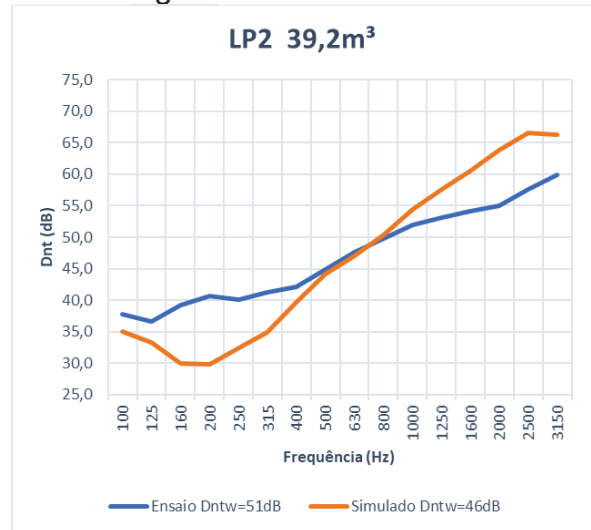


Figura 20 - Amostra LP3

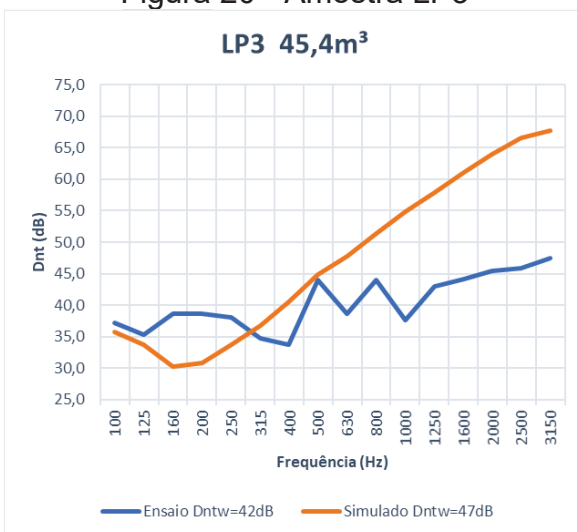


Figura 21 - Amostra LP5

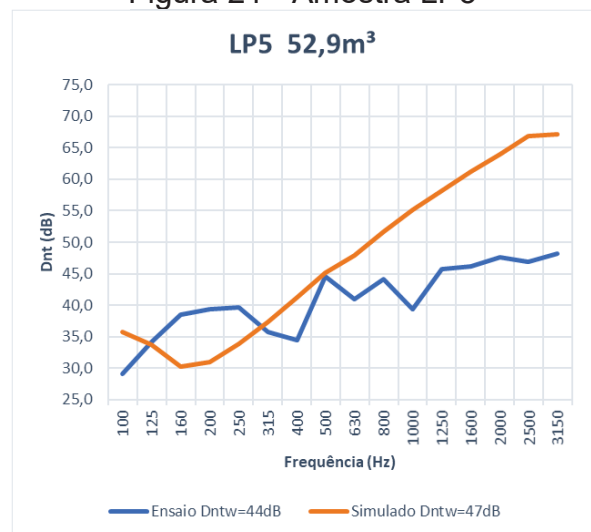




Figura 22 - Amostra NL3

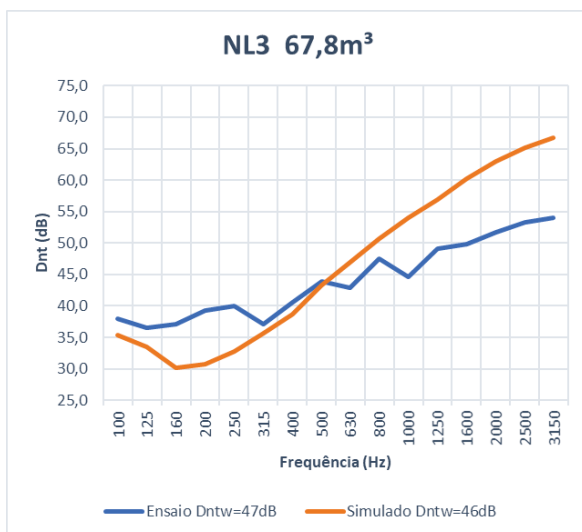


Figura 23 - Amostra NL4

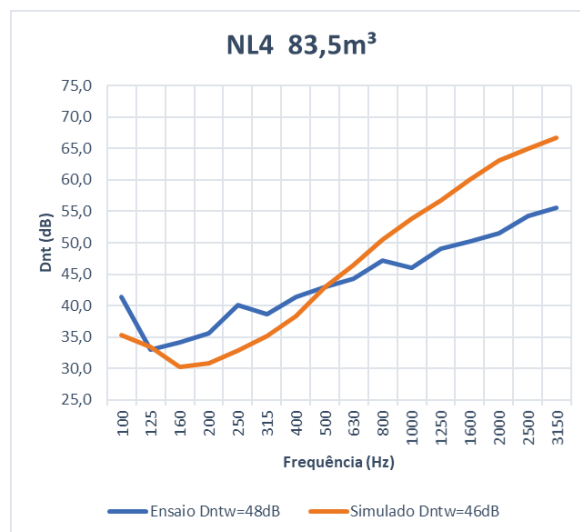


Figura 24 - Amostra LP4

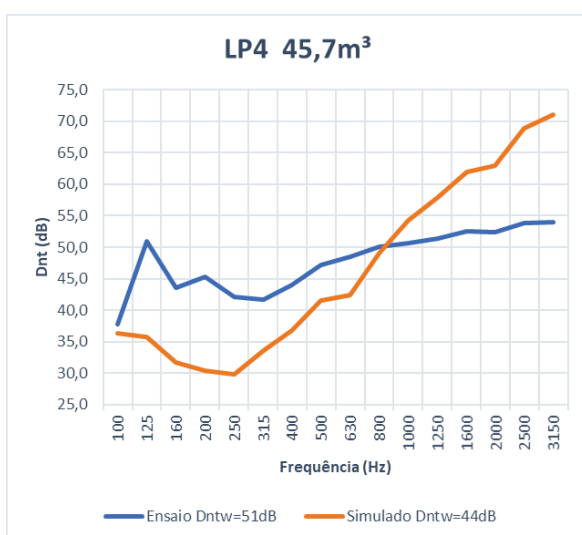
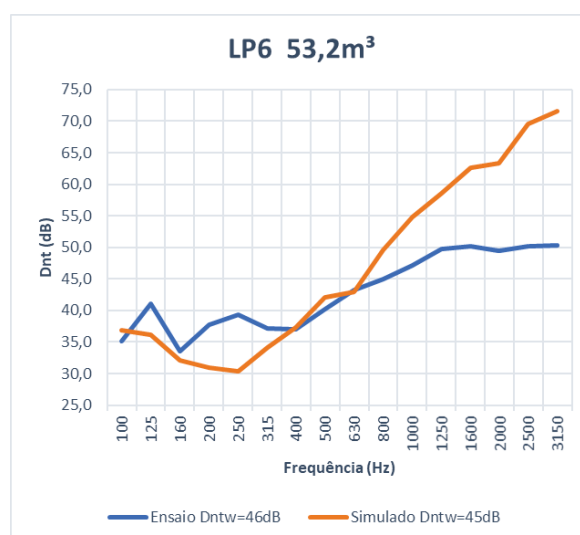


Figura 25 - Amostra LP6



As amostras LP4 e LP6 possuem como elemento de partição um sistema de vedação vertical não homogêneo e estimado pelo método da matriz de transferência. É verificado que em ambos os casos é apresentada uma diferença nas bandas de altas frequências.

Percebe-se que em grande parte, os maiores desvios entre os dados avaliados foram em bandas de baixas frequências, e vai ao encontro de trabalhos que já apontaram que a incerteza de medição tende a ter um valor mais elevado nas bandas de baixas frequências (ANTÓNIO; MATEUS, 2015; MACHIMBARRENA *et al.*, 2015; NAVACERRADA; PEDRERO; DÍAZ, 2016; ÖQVIST; LJUNGGREN; GREN, 2012; SCROSATI *et al.*, 2016).

Entretanto, diversas amostras também apresentaram variações nas bandas de altas frequências. As amostras NL1 e NL2, representadas nas Figura 16 e Figura 17, não apresentaram variações maiores que 7 dB na faixa das altas frequências. As demais amostras apresentaram uma variação expressiva.

Ao analisar as amostras NL1, NL2, LP1, LP2, LP3, LP5, NL3 e NL4, representadas pela Figura 16 a Figura 23, sabe-se que o sistema construtivo da partição é concreto armado, ou seja, elemento homogêneo composto somente por uma camada. Este elemento ainda conta com a presença da caixa de luz, diminuindo a seção de concreto não somente no local em que está posicionada, mas também nos locais de passagem dos eletrodutos.

Labres et al (2018) constataram em seu trabalho que pontos de fragilidade como estes, quando alocados em paredes, apresentaram uma diminuição no índice de redução sonora de até 3 dB em ensaios em laboratório. Já outros autores verificaram que pequenas rachaduras já apresentavam diferenças significativas nos resultados esperados e ensaiados. (JOHANNESON; LJUNGGREN; FINNEY, 1998). Ou seja, esses pequenos elementos embutidos em sistemas construtivos influenciam de forma relevante, e acabam influenciando o isolamento sonoro do sistema construtivo ao ponto de que métodos de predição acústica não sejam capazes de ser efetivos em seu uso, uma vez que esses, quando estimados de acordo com a ISO 12354, não consideram pontos de fragilidade como os apontados.

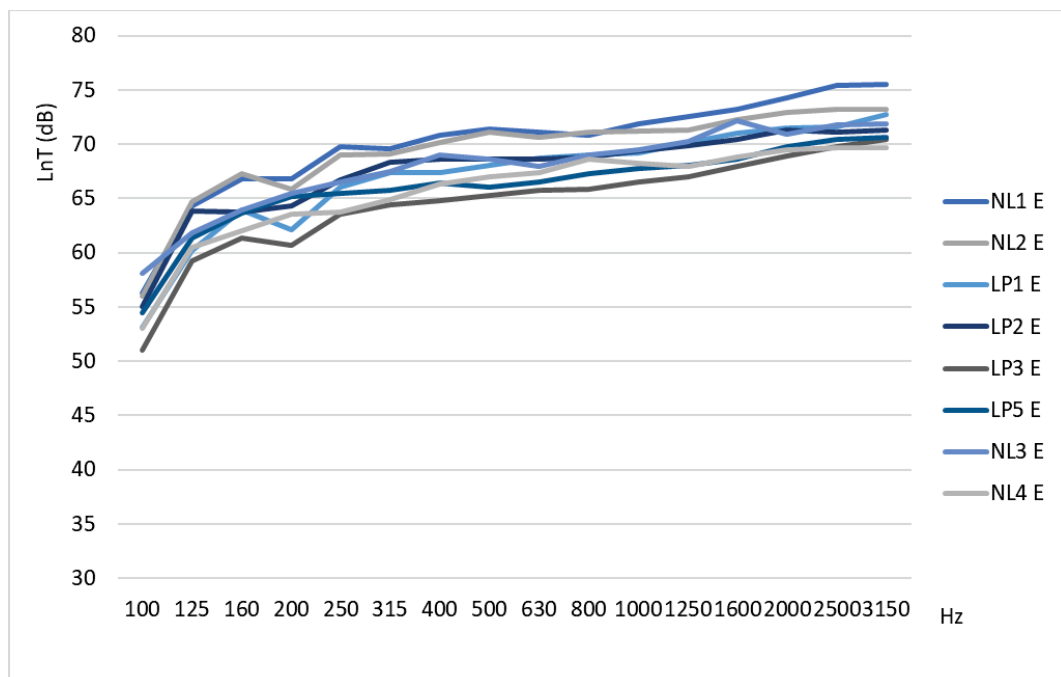
## **4.2 Ruído de impacto**

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos no ensaio de nível de pressão sonora de impacto padrão realizados em campo e a estimativa realizada com software para as mesmas unidades. A Tabela 9 e a Figura 26 apresenta a síntese dos resultados, por bandas de terço de oitava, de acordo com as amostras apresentadas no Capítulo do Método, bem como o valor ponderado.

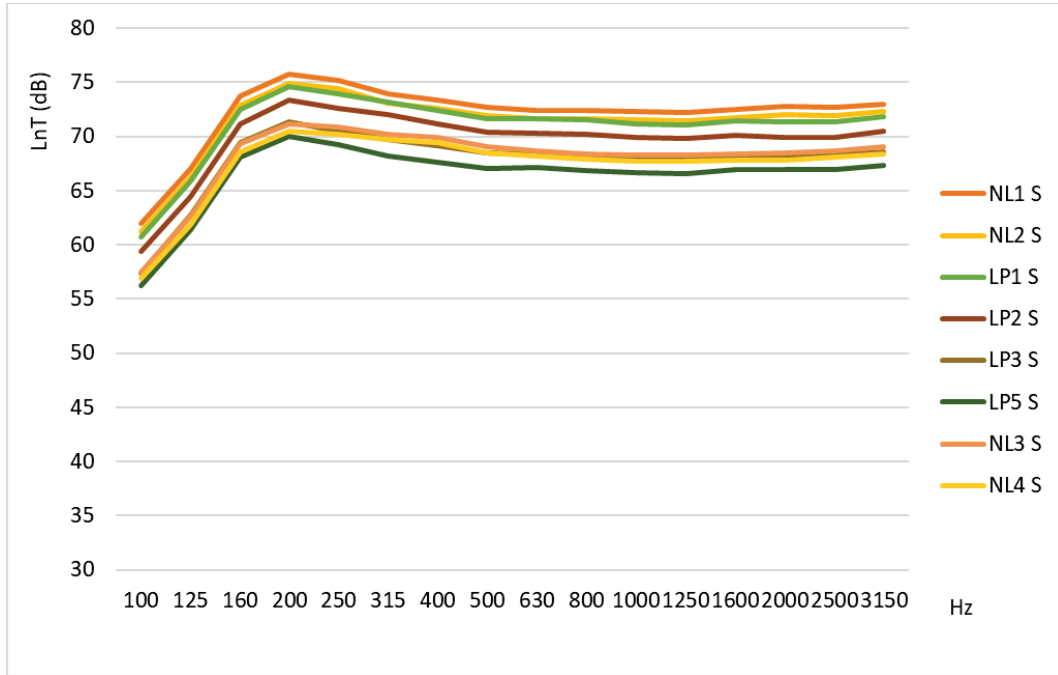
Tabela 9 - Comparativo de resultados para ruído de impacto padrão, valores em dB

Ident.	Método	Frequência (Hz)															L <sub>ntw</sub> (dB)	
		100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500		3150
NL1	Ensaio	56,3	64,3	66,8	66,8	69,8	69,6	70,8	71,4	71,1	70,8	71,9	72,5	73,2	74,3	75,4	75,5	80
	Simulado	62,0	67,0	73,7	75,7	75,2	73,9	73,4	72,7	72,4	72,4	72,3	72,2	72,5	72,8	72,7	73,0	79
NL2	Ensaio	56,0	64,7	67,3	65,8	69,0	69,1	70,1	71,1	70,6	71,1	71,2	71,3	72,3	72,9	73,2	73,2	78
	Simulado	61,2	66,3	72,9	74,9	74,4	73,1	72,6	71,9	71,6	71,6	71,5	71,4	71,7	72,0	71,9	72,3	78
LP1	Ensaio	53,1	60,2	63,9	62,1	66,0	67,4	67,4	68,0	68,7	69,0	69,2	70,1	71,0	71,5	71,6	72,7	77
	Simulado	60,7	65,9	72,5	74,6	73,9	73,2	72,4	71,6	71,6	71,5	71,2	71,1	71,4	71,3	71,3	71,8	77
LP2	Ensaio	55,0	63,8	63,7	64,3	66,7	68,3	68,6	68,6	68,6	68,8	69,4	69,9	70,4	71,3	71,1	71,3	77
	Simulado	59,4	64,5	71,2	73,4	72,6	72,0	71,2	70,4	70,3	70,2	69,9	69,8	70,1	69,9	69,9	70,5	76
LP3	Ensaio	51,0	59,2	61,3	60,7	63,5	64,4	64,8	65,3	65,7	65,8	66,5	67,0	67,9	68,9	69,8	70,4	75
	Simulado	57,4	62,7	69,4	71,3	70,5	69,7	69,1	68,5	68,4	68,2	68,0	68,0	68,2	68,2	68,3	68,6	74
LP5	Ensaio	54,5	61,3	63,6	65,2	65,5	65,7	66,4	66,0	66,5	67,3	67,8	68,0	68,6	69,8	70,4	70,6	75
	Simulado	56,2	61,4	68,1	70,0	69,2	68,2	67,6	67,0	67,1	66,8	66,7	66,6	66,9	66,9	66,9	67,3	73
NL3	Ensaio	58,1	61,8	63,9	65,5	66,5	67,5	69,0	68,6	67,9	69,0	69,5	70,2	72,2	70,9	71,8	71,9	77
	Simulado	57,5	62,6	69,3	71,2	70,9	70,2	69,9	69,0	68,7	68,4	68,3	68,3	68,4	68,5	68,7	69,0	75
NL4	Ensaio	53,0	60,5	62,0	63,5	63,7	64,9	66,3	67,0	67,4	68,6	68,2	67,9	68,8	69,5	69,7	69,7	75
	Simulado	56,9	61,9	68,6	70,5	70,2	69,7	69,4	68,5	68,2	67,9	67,7	67,7	67,8	67,8	68,1	68,4	74

Figura 26 – Comparativo dos resultados para o som de impacto (a) ensaiados e (b) simulados



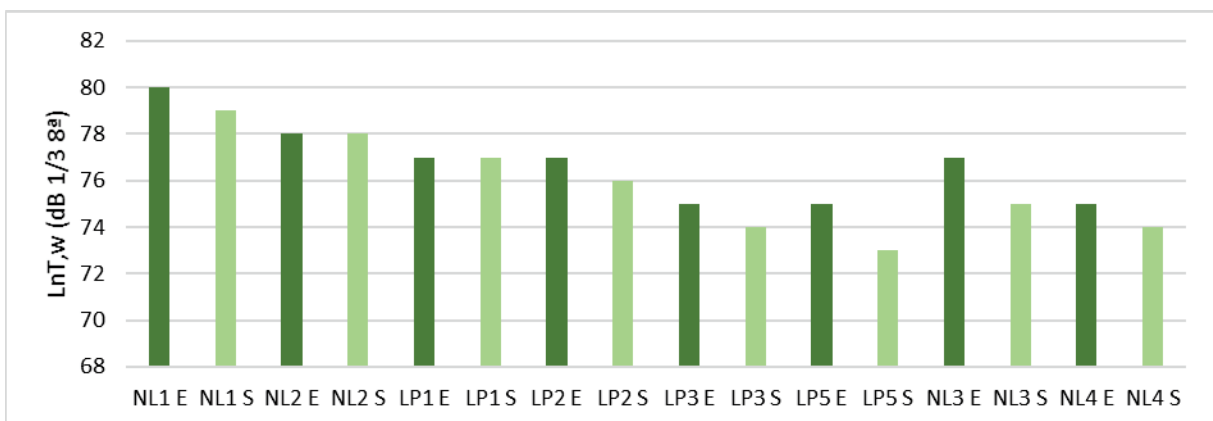
(a)



(b)

Ao analisar somente os resultados ponderados, percebe-se que os valores obtidos através do método de estimativa novamente apresentaram valores menores, podendo isso ser evidenciado na maior parte das amostras. Algumas ainda apresentando o mesmo valor ponderado em ambas as situações, visto isso nas amostras NL2 e LP1 (Figura 27).

Figura 27 – Resultados ponderados para o ruído de impacto



Já nas amostras NL1, LP2, LP3 e NL4, as diferenças entre os valores ponderados ensaiados em campo e simulados ficaram em 1 dB. Nas demais amostras (LP5 e NL3) a diferença ficou em 2 dB. Verificando os resultados por

bandas de terço de oitava, a Figura 28 à Figura 35 apresentam as NL1, NL2, LP1, LP2, LP3, LP5, NL3 e NL4.

Figura 28 – Isolamento ao ruído de impacto da amostra NL1

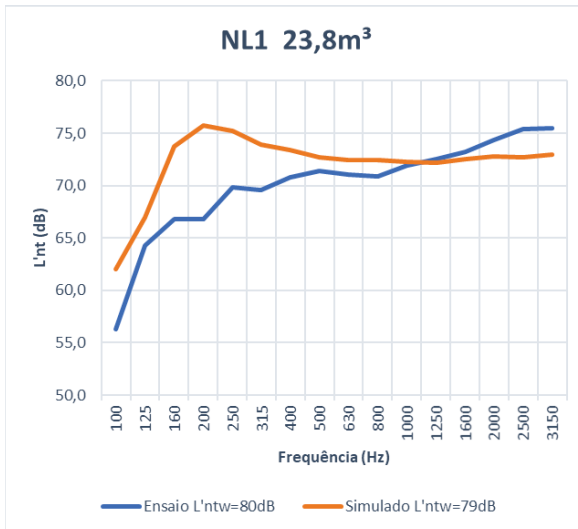


Figura 29 - Isolamento ao ruído de impacto da amostra NL2

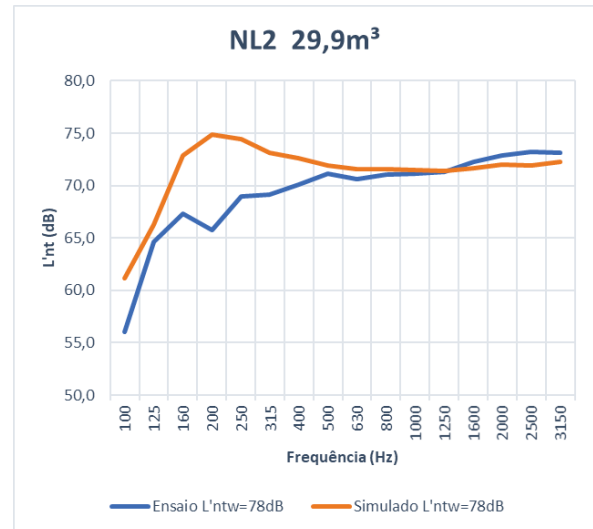


Figura 30 - Isolamento ao ruído de impacto da amostra LP1

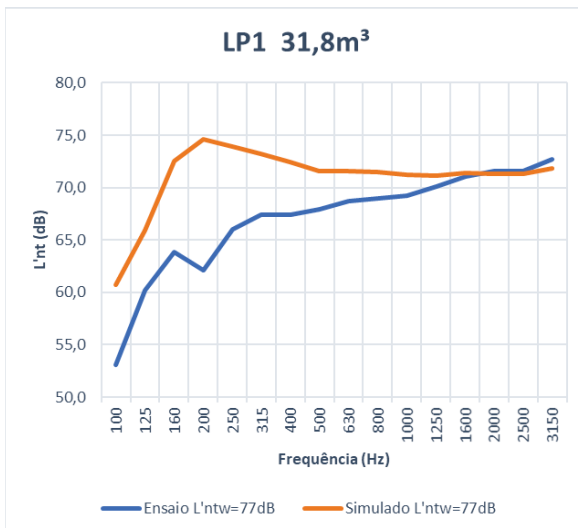


Figura 31 - Isolamento ao ruído de impacto da amostra LP2

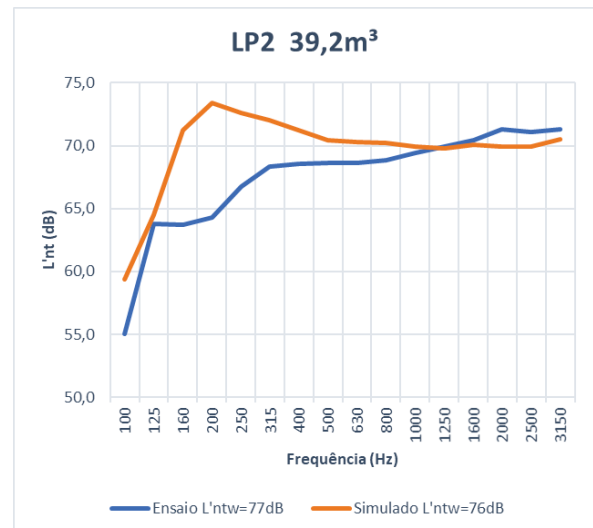


Figura 32 - Isolamento ao ruído de impacto da amostra LP3

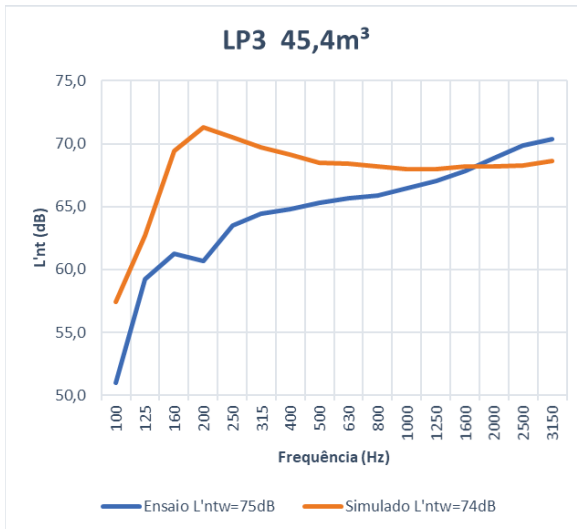


Figura 33 - Isolamento ao ruído de impacto da amostra LP5

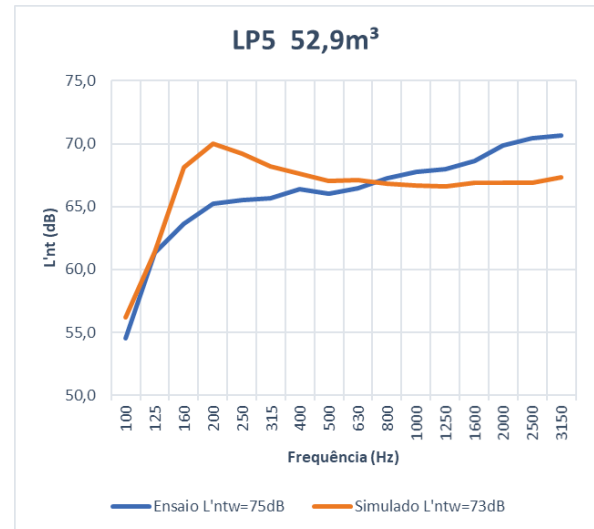


Figura 34 - Isolamento ao ruído de impacto da amostra NL3

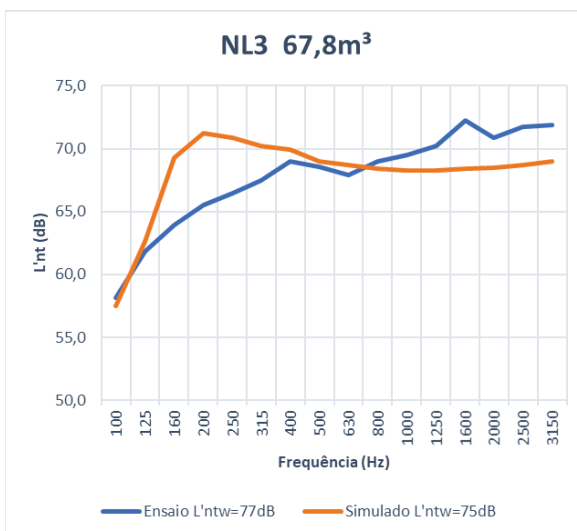
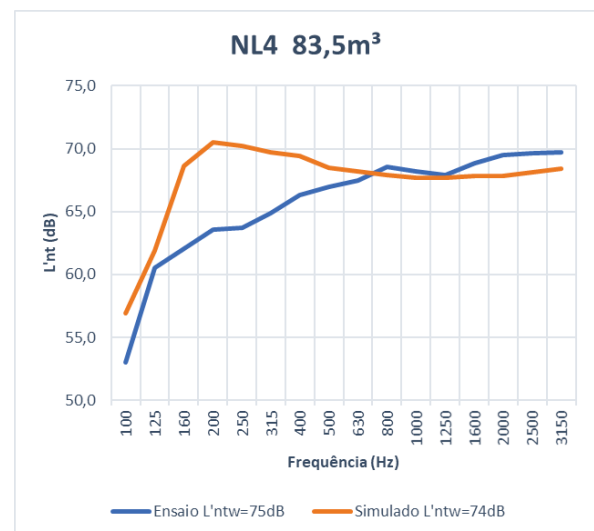


Figura 35 - Isolamento ao ruído de impacto da amostra NL4



Percebe-se uma proximidade maior entre os valores, quando analisado o isolamento ao ruído de impacto, do que quando analisado em situação de ruído aéreo.

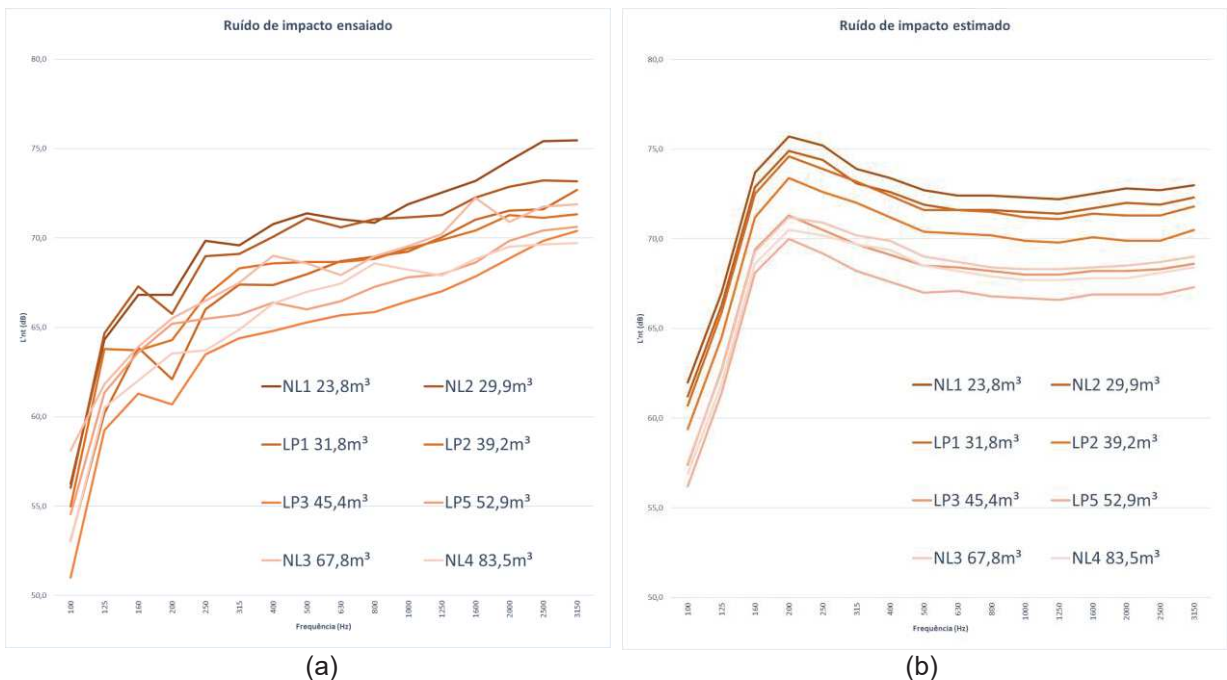
Verifica-se que em todas as situações, uma diferença maior que 5 dB ficou explícita na banda de 200 Hz. Entretanto, nas bandas de altas frequências os valores tendem a se aproximar.

Por se tratar de ruído de impacto, sistemas de concreto armado homogêneos e sem contrapiso flutuante tendem a apresentar um perfil gráfico em *flat* estimado em bandas de frequência acima de 315 Hz (PATRÍCIO, 2018; HOPKINS, 2012). Com isso, quando utilizados parâmetros da ISO 717-2:2013 para ponderar o valor obtido para impacto, os resultados que mais influenciam o processo de ponderação são os apresentados nas bandas de altas frequências.

Caso o sistema analisado fosse composto por um sistema de piso com contrapiso flutuante, ou outro tipo de amortecimento, o resultado ponderado poderia não estar tão próximo como verificado anteriormente, uma vez que é sabido que sistemas flutuantes tendem a dar um resultados menores de níveis sonoros de impacto a partir da banda de 500 Hz, conforme estudos de Nunes e Patrício (2016) e de Heissler *et al.* (2017).

Na Figura 36 pode ser verificado o conjunto de ensaios realizado em campo de ensaios estimados com software, com os volumes dos respectivos cômodos.

Figura 36 - Resultados em  $L'_{nT}$  e volumes das amostras (a) ensaiados e (b) simulados



Verifica-se que os resultados obtidos com ensaios em campo (Figura 36a) não apresentam o mesmo perfil gráfico que os resultados simulados. Muito disto pode ser indicado pelo mesmo fator já discorrido no capítulo anterior, em que o sistema analisado se constitui em um material homogêneo com a presença de

elementos complementares como instalação e tomadas, o que pode facilitar a transmissão sonora através destes.

Nos resultados obtidos na simulação computacional, a hierarquia dos valores é mais evidente e a relação com o volume dos cômodos pode ser interpretada de forma mais direta. Dessa forma, pode-se indicar que quanto maior o cômodo, menor será seu resultado estimado por bandas de frequência, sendo esta a expressão direta do modelo teórico.

Nas baixas frequências é possível verificar uma variação que se repete em todos os dados de ensaio, principalmente nas bandas de 160 e 200 Hz, caracterizada por pico de transmissão de ruído. Isto não é notado nos resultados de campo e pode indicar que os sistemas ensaiados possuíam uma rigidez maior que os sistemas modelados.

### **4.3 Estimativa da incerteza de medição**

Para se obter os valores de incerteza de medição, utilizou-se do método GUM para estimativa de incerteza de medição. Nesta etapa foram apresentados os passos até chegar no valor ponderado de incerteza de medição, utilizando como exemplo a amostra LP6.

Ressalta-se ainda que este procedimento para se determinar a incerteza de medição se repete para todos os ensaios, tendo somente diferença no desvio padrão amostral obtido do processo de ensaio conforme a ISO 16283 parte 1 (2014) e parte 2 (2015).

#### **4.3.1 Diagrama de causa e efeito**

Buscando evidenciar todos os fatores que possam influenciar no resultado do processo de medição de um mensurando, utiliza-se diagrama de causa e efeito, também conhecido como diagrama de Ishikawa.

A Figura 37 e Figura 38 apresentam a proposta de diagrama contendo as causas de incertezas para o ensaio de ruído aéreo e ruído de impacto.



Figura 37 - Diagrama de causa e efeito para ensaio de ruído aéreo

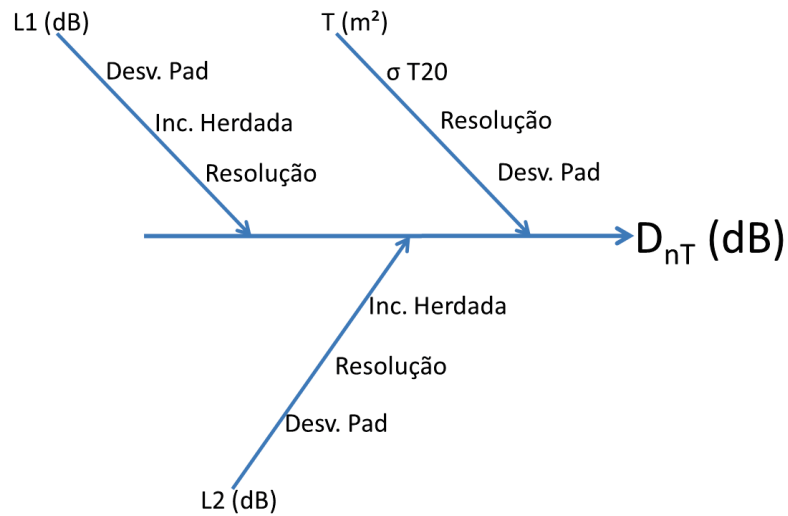
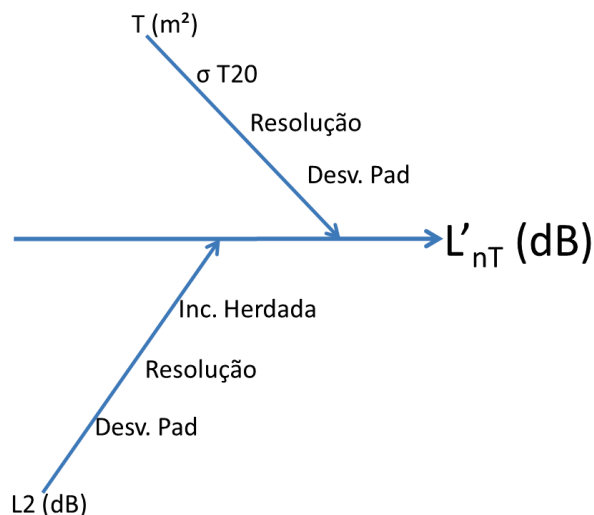


Figura 38 - Diagrama de causa e efeito para ensaio de ruído de impacto



Em ambos os casos (efeito para ensaios de ruído aéreo e ruído de impacto) foram utilizadas diversas causas similares na análise do diagrama, mas distintas para cada ensaio. No diagrama, há as setas que representam as causas, indicadas como as setas na diagonal, as quais apontam para uma linha central, que é o efeito somado das causas.

Foram identificadas como causas as medições nos diferentes cômodos emissores e receptores ( $L1$  e  $L2$  respectivamente), sendo estes: o desvio padrão amostral obtido das repetições realizadas em cada cômodo; a resolução utilizada; e a incerteza de medição obtida da calibração do analisador sonoro, pré-amplificador e microfone. Todas as causas com unidade em dB.

Como causa na medição do tempo de reverberação, apresentado como  $T_{20}$ , foram utilizadas as variáveis de medição, as quais são o desvio padrão do tempo de reverberação, além da resolução do equipamento e do desvio padrão indicado pela ISO 3382-2:2008, expresso com o símbolo de sigma. Todas as causas com unidade em segundo.

Verifica-se que na Figura 38 não está representada a causa “L1” por não ser realizada essa medição no procedimento de ensaio de som de impacto.

#### 4.3.2 Definição do Modelo Matemático e Componentes de Incerteza

Seguindo o roteiro indicado pelo fluxograma apresentado na Figura 13, inicia-se o estudo da incerteza de medição indicando o modelo matemático da medição. Este modelo foi apresentado na Equação 11 e 12.

Utilizando os dados do diagrama de causa e efeito, reescreve-se o modelo matemático contendo todos os componentes da incerteza, de modo que o resultado (efeito) seja adquirido com o desvio amostral de todos os componentes.

#### 4.3.3 Estimativa da incerteza padrão

A avaliação da incerteza padrão de um conjunto de medições, classificadas como do Tipo A, é definida pelo desvio padrão da média dos valores amostrados, dividido pela raiz quadrada do tamanho da amostra.

A Equação 19 apresenta a incerteza padrão calculada do conjunto de 10 medições realizadas no cômodo emissor (L1) na banda de frequência de 100Hz.

$$u(L_1(100 \text{ Hz})) = \frac{s(\overline{L_1})}{\sqrt{n}} = \frac{3,9}{\sqrt{10}} = 1,25 \text{ dB} \quad (19)$$

#### 4.3.4 Coeficientes de sensibilidade

Para se obter o coeficiente de sensibilidade, é necessário calcular a derivada parcial de cada causa em relação ao efeito, utilizando como base o modelo matemático apresentado na Equação 11 e na Equação 12. Os coeficientes de sensibilidade encontrados estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Coeficientes de sensibilidade

Estimativa de entrada	Modelo matemático	Coeficiente de sensibilidade
L <sub>1</sub>	Equação 9	$\frac{\partial Dnt}{\partial L_1} = 1$
L <sub>2</sub>	Equação 9	$\frac{\partial Dnt}{\partial L_2} = -1$
T <sub>20</sub>	Equação 9	$\frac{\partial Dnt}{\partial T_{20}} = \frac{4,34}{T_{20}}$
L <sub>2</sub>	Equação 10	$\frac{\partial L'nt}{\partial L_2} = 1$
T <sub>20</sub>	Equação 10	$\frac{\partial L'nt}{\partial T_{20}} = \frac{4,34}{T_{20}}$

#### 4.3.5 Determinação da incerteza combinada e incerteza expandida

Conforme o proposto pela lei da propagação de incertezas, a incerteza combinada é obtida pela Equação 13. A exemplo disto, esta apresentada na Equação 20 a incerteza combinada para o desvio padrão do tempo de reverberação para a banda de 100 Hz de frequência.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial y}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{4,34}{1,53}\right)^2 \times 0,176} = 0,5 \quad (20)$$

Já a incerteza expandida é obtida através da multiplicação da incerteza combinada pelo fator de abrangência. A Tabela 11 apresenta a síntese dos dados utilizados para se determinar a incerteza de medição.

Tabela 11 – Valores exemplificados por bandas de frequência (dB)

Freq (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1250	1600	2k	2500	3150
D'nT (dB)	35,2	41,0	33,6	37,7	39,4	37,2	37,0	40,2	43,3	45,0	47,2	49,7	50,3	49,5	50,2	50,3
V <sub>eff</sub>	20,9	21,9	16,2	21,2	18,0	16,5	20,7	23,0	23,9	17,0	30,9	38,3	63,8	42,7	53,4	44,2
u	1,7	1,1	1,2	0,9	0,9	1,0	0,7	0,4	0,5	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4	0,3
k	2,1	2,1	2,2	2,1	2,1	2,2	2,1	2,1	2,1	2,2	2,1	2,1	2,0	2,1	2,0	2,1
±U (dB)	3,7	2,4	2,7	1,8	1,9	2,1	1,4	0,9	1,0	0,9	0,6	0,8	0,7	0,8	0,7	0,7

Por fim, a incerteza de medição no valor único deverá ser calculada. Para tal utiliza-se o Anexo B da ISO 12999-1:2014 o qual expõe um procedimento, visto que o valor único é uma unidade ponderada.

#### 4.4 Análise histórica de incerteza de medição

Conforme mencionado anteriormente, foi utilizada uma base histórica de dados do itt Performance da Unisinos, de ensaios de isolamento acústico em campo realizados a partir de 2016.

Desta forma, 34 ensaios de isolamento ao ruído aéreo e 20 ensaios de transmissão ao ruído de impacto padrão foram estudados.

##### 4.4.1 Série histórica para ensaio de ruído aéreo

Os ensaios neste capítulo não possuem identificação, uma vez que, por se tratar de uma análise estatística, prevalecem os valores obtidos da incerteza e volume dos cômodos, e a Tabela 12 apresenta os dados.

Tabela 12 - Incerteza de ensaios de ruído aéreo em campo, valores em dB

	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Frequência (Hz)															
			100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
1	12	31	4,2	1,4	1,9	2,3	1,7	1,5	1,2	0,9	0,8	0,7	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,6
2	15	39	4,4	1,7	2,6	2,6	2,1	1,2	0,8	0,7	0,8	0,8	0,5	1,3	1,0	0,7	0,7	0,8
3	23	59	3,6	2,9	1,8	2,5	1,7	2,2	2,3	1,0	1,4	0,9	1,2	1,3	1,0	1,2	1,4	1,4
4	26	67	4,8	4,5	1,7	2,0	1,6	1,6	1,6	0,8	1,2	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,4	1,2
5	10	26	5,6	2,0	1,9	2,0	1,2	1,4	1,2	1,0	1,0	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6
6	11	45	3,8	3,2	3,3	2,8	1,3	1,5	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,5	1,4	1,5
7	14	67	3,7	2,4	2,7	1,8	1,9	2,1	1,4	0,9	1,0	0,9	0,6	0,8	0,7	0,8	0,7	0,7
8	28	75	5,6	4,0	2,5	1,8	1,8	1,5	1,1	0,7	1,0	0,7	0,6	0,6	0,6	0,8	1,1	1,3
9	15	40	3,8	2,0	2,6	2,8	2,2	1,6	1,0	1,1	0,8	0,7	0,6	0,7	0,6	0,8	0,7	0,8
10	28	75	3,2	3,7	2,2	2,7	1,6	1,4	0,9	0,9	0,8	0,8	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8
11	16	43	3,8	2,1	2,9	2,4	1,9	1,0	1,3	1,1	1,0	1,0	0,9	0,8	0,7	0,8	0,9	0,9
12	15	40	5,0	2,2	2,3	3,3	2,0	1,4	1,0	0,8	0,7	0,6	0,6	0,8	0,7	0,6	0,6	0,7
13	9	24	4,0	3,4	1,9	3,1	1,8	1,8	1,1	1,3	1,0	0,8	0,7	0,8	0,8	0,7	0,8	0,8
14	11	24	2,7	4,2	2,2	2,5	2,2	1,7	1,3	1,4	1,1	0,7	0,8	0,9	0,9	0,8	0,9	1,1
15	20	52	3,8	5,1	2,6	2,2	2,4	2,1	1,5	1,4	1,1	0,9	0,9	0,6	0,9	0,8	0,9	0,8
16	9	24	4,0	2,1	1,8	3,2	2,0	1,6	1,3	0,9	0,8	0,7	0,6	0,8	0,7	0,8	0,7	0,8
17	11	28	4,3	2,4	1,8	1,7	1,6	1,9	1,0	1,0	0,8	0,8	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7
18	23	61	5,4	4,1	1,9	1,6	2,1	1,9	1,2	0,9	1,1	0,9	0,8	1,1	0,7	0,6	0,7	0,7
19	9	25	2,2	1,2	1,8	2,6	1,6	1,9	1,3	1,0	1,1	0,6	0,5	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6
20	26	76	2,4	3,8	2,5	2,1	1,5	1,9	1,4	0,7	1,0	0,5	0,8	0,8	0,8	0,6	0,7	0,7
21	32	87	5,6	5,1	3,9	3,3	3,2	2,7	1,9	1,3	1,1	0,8	0,6	1,1	1,4	1,8	2,3	2,8
22	11	31	2,9	1,8	2,2	1,7	1,9	1,1	1,2	1,1	0,7	0,6	0,6	0,7	0,6	0,5	0,6	0,6
23	7	37	5,2	5,9	2,6	3,7	3,6	3,1	2,3	1,8	1,6	1,8	1,4	1,7	1,8	1,6	1,7	2,0
24	9	37	5,5	6,1	2,4	3,4	3,4	2,9	2,1	1,8	1,5	1,6	1,3	1,3	1,6	1,5	1,5	1,6

25	12	31	4,8	2,4	2,0	2,3	1,9	1,8	1,6	1,1	1,0	1,1	0,8	0,8	0,7	0,6	0,7	0,7
26	11	30	4,5	1,4	1,6	2,7	1,7	1,5	1,2	1,1	1,0	0,8	0,7	0,5	0,6	0,5	0,6	0,5
27	25	64	1,8	2,7	2,2	2,5	1,7	1,5	1,1	1,5	1,9	1,4	1,7	2,6	2,1	1,7	1,6	1,6
28	25	64	2,9	3,4	3,2	2,4	2,4	1,6	2,2	2,3	1,7	1,8	1,5	2,2	2,1	1,7	1,3	1,7
29	9	25	3,5	1,4	2,4	2,6	2,2	1,3	1,0	1,1	0,8	0,8	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7
30	8	74	3,5	5,3	2,7	1,9	2,5	1,4	1,4	0,9	1,2	1,5	0,9	1,1	1,0	1,0	1,1	1,0
31	9	27	3,6	1,9	1,6	1,5	1,1	0,8	1,1	0,8	1,0	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,6
32	22	110	2,1	2,8	1,7	1,5	1,4	1,1	1,1	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,0	0,9
33	13	36	2,4	2,3	2,2	2,2	1,4	1,3	1,0	1,4	1,3	0,8	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8	1,4
34	40	110	2,6	3,1	1,7	1,6	1,3	1,1	1,7	0,9	0,9	1,0	1,2	1,1	1,1	1,2	1,2	1,4
Média <sup>2</sup>			4,0	3,3	2,3	2,5	2,0	1,7	1,4	1,2	1,1	1,0	0,9	1,1	1,0	1,0	1,0	1,1

Conforme já discutido neste trabalho e indicado por diversos autores e pela ISO 12999-1:2014, a incerteza de medição em baixas frequências apresenta valor maior em relação a incerteza de medição obtida nas demais frequências.

Como a incerteza de medição é um valor obtido de dados do desvio padrão, soma linear e médias aritméticas não podem ser feitas. Desta forma, para se trabalhar com a média de valores, é necessário elevá-los ao quadrado, transformando o desvio padrão em variância.

Assim sendo, a média da incerteza em baixas frequências ficou em 4,0, 3,3, 2,3 e 2,5 dB para as bandas de frequência de 100, 125, 160 e 200 Hz, respectivamente. Estes valores ficam em um meio termo entre os valores apresentados pela ISO 12999-1:2014 no que se enquadra como incerteza padrão para a Situação A e a mesma situação com 95% de probabilidade de abrangência.

Em sequência, é apresentado um decaimento de 0,3 dB a cada acréscimo de frequência nas bandas de 250, 315 e 400 Hz, com resultados médios de 2,0, 1,7 e 1,4 dB de incerteza de medição. A partir de 500 Hz, uma flutuação de 0,1 a cada banda de frequência é apresentado.

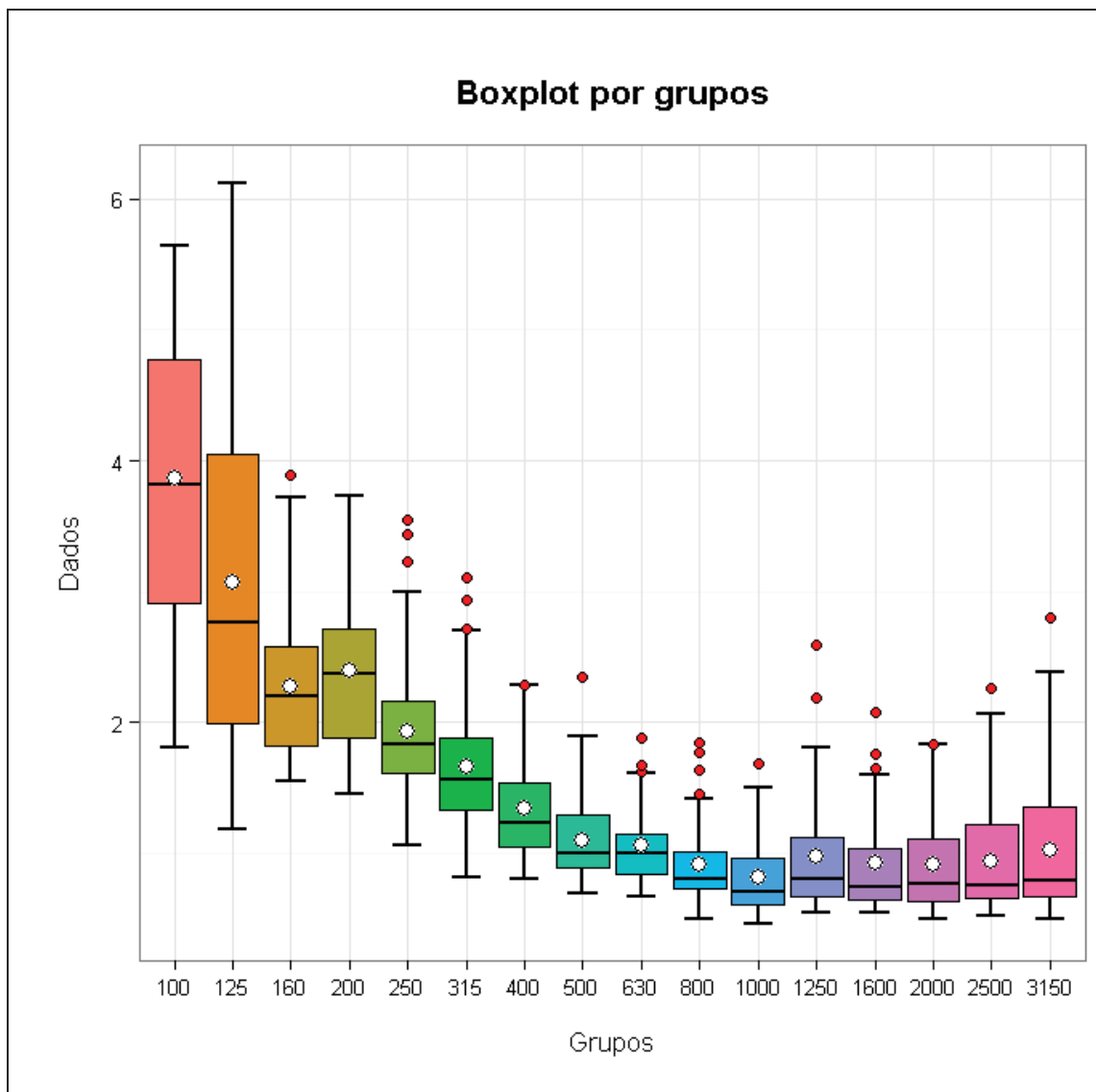
Para melhor se verificar a dispersão dos valores de incerteza de medição por bandas de frequência, utilizou-se do método estatístico denominado Box-plot, no qual os valores são fracionados em quartis, média e mediana. A Figura 39 apresenta o gráfico de Box-plot, no qual a média é apresentada com um ponto branco e a mediana como uma linha preta no interior da caixa. As caixas inferior e superior a linha da mediana condizem ao segundo e terceiro quadrante, e as linhas fora da caixa são o primeiro e quarto quadrante. Os pontos vermelhos são valores outliers, que para uma análise estatística com fator de abrangência maior, deverão ser

desconsiderados. A Tabela 13 apresenta os valores encontrados para se determinar os quartis no gráfico de Box-plot.

Tabela 13 – Valores calculados para níveis de quartil para gráfico de Box-plot, valores em dB

<b>Grupos</b>	<b>100</b>	<b>125</b>	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>250</b>	<b>315</b>	<b>400</b>	<b>500</b>	<b>630</b>	<b>800</b>	<b>1000</b>	<b>1250</b>	<b>1600</b>	<b>2000</b>	<b>2500</b>	<b>3150</b>
Mínimo	1,8	1,2	1,6	1,5	1,1	0,8	0,8	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5
Limite inferior	1,8	1,2	1,6	1,5	1,1	0,8	0,8	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5
Primeiro quartil	2,9	2,0	1,8	1,9	1,6	1,3	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,7	0,7	0,6	0,7	0,7
Média	3,9	3,1	2,3	2,4	1,9	1,7	1,3	1,1	1,1	0,9	0,8	1,0	0,9	0,9	0,9	1,0
Mediana	3,8	2,8	2,2	2,4	1,8	1,6	1,2	1,0	1,0	0,8	0,7	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8
Terceiro quartil	4,8	4,0	2,6	2,7	2,2	1,9	1,5	1,3	1,2	1,0	1,0	1,1	1,0	1,1	1,2	1,4
Limite superior	5,6	6,1	3,7	3,7	3,0	2,7	2,3	1,9	1,6	1,4	1,5	1,8	1,6	1,8	2,1	2,4
Máximo	5,6	6,1	3,9	3,7	3,6	3,1	2,3	2,3	1,9	1,8	1,7	2,6	2,1	1,8	2,3	2,8

Figura 39 – Box-plot dos valores de incerteza de medição obtidos nos ensaios de ruído aéreo

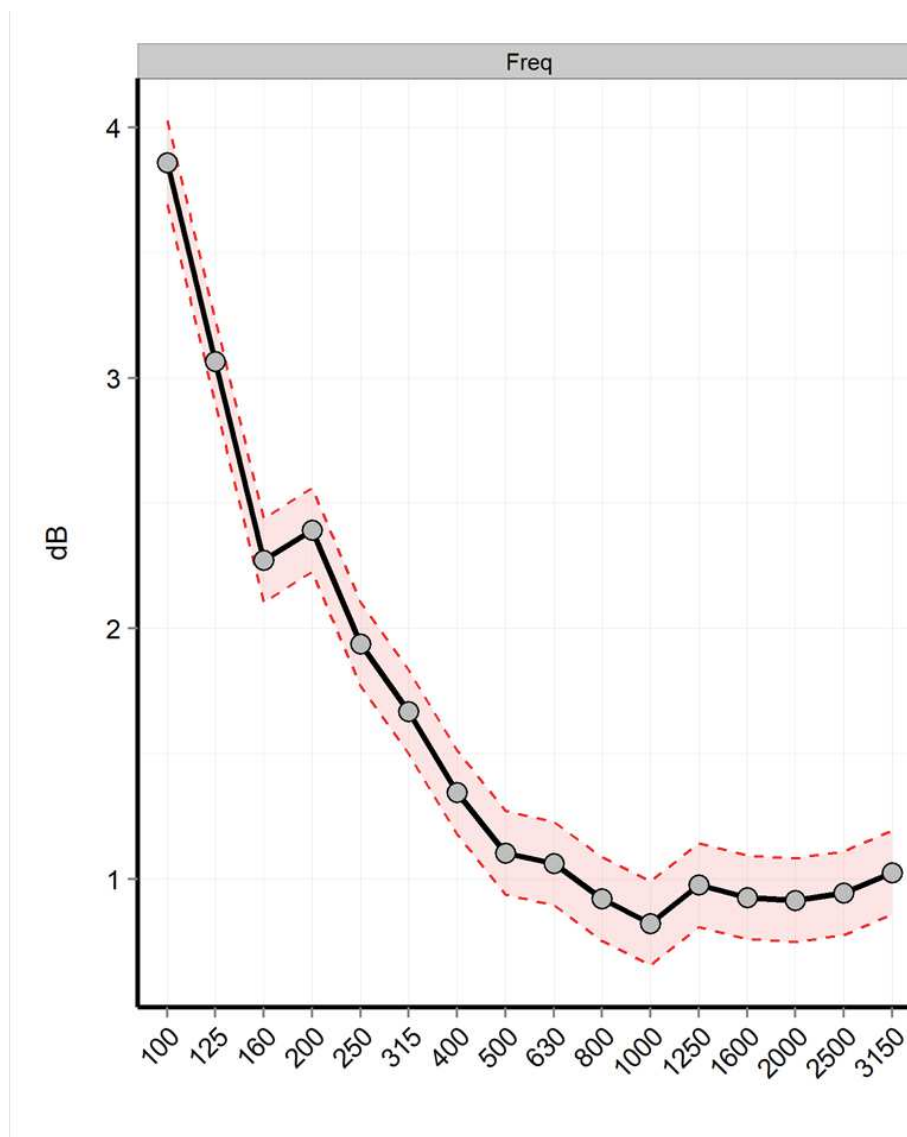


Como a população amostral deste trabalho é reduzida, boa parte dos valores outlier condizem com valores ensaiados em locais com volume maior, possivelmente pelo fato de não haver uma densidade amostral nestes valores.

As bandas de frequência de 250, 315, 630, e 1600 Hz apresentaram 3 valores outliers; as bandas de frequência de 160, 400, 500, 1000, 2000, 2500 e 3150 Hz apresentaram 1 valor outlier. Já na frequência de 800 Hz, 4 valores outliers foram encontrados; enquanto as bandas de 100, 125 e 200 Hz não apresentaram valores outliers, contudo, percebe-se que estas bandas de frequência possuem um desvio maior que as outras frequências e, conseqüentemente, os quartis com maior abrangência.

Realizando a análise da variância (ANOVA) os limites de desvio em cada banda são visualizados, conforme a Figura 40.

Figura 40 – Anova dos valores de incerteza de medição obtidos nos ensaios de ruído aéreo

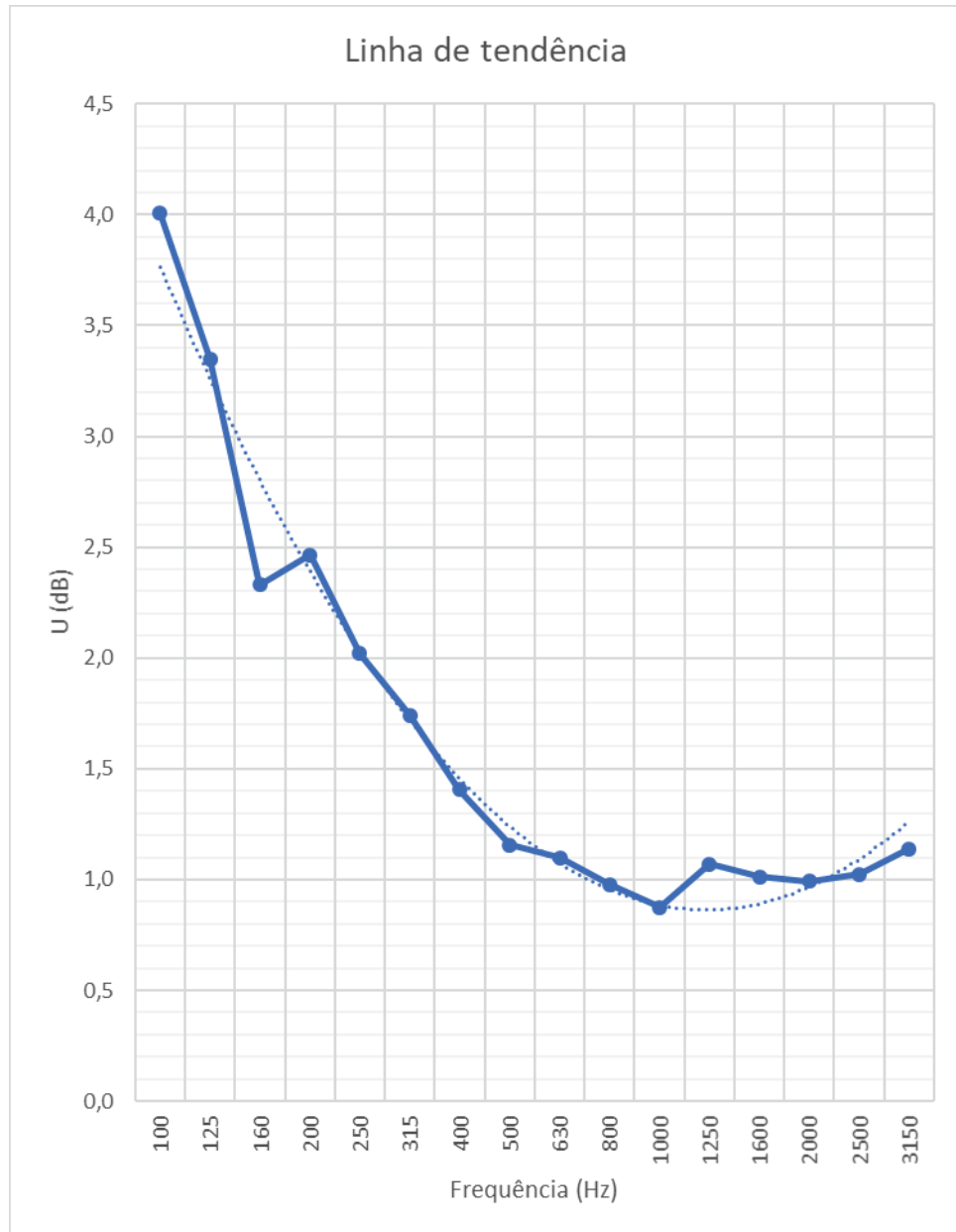


A regressão linear apresentada na Figura 40 retornou um desvio padrão global de 0,5 dB, e o teste de normalidade de Anderson-Darling um valor de 11,15 dB. Deste modo, a regressão linear não está apresentando uma boa normalidade em seus dados, e uma linha de tendência de regressão linear tenderá a apresentar um resíduo muito elevado.

Assim sendo, utilizou-se uma linha de tendência em função polinomial de segunda ordem, apresentada na Figura 41.



Figura 41 – Linha de tendência de função polinomial de segunda ordem



Esta linha de tendência apresentou um resíduo de 0,97, ficando assim muito próximo de 0. Conforme a linha de tendência proposta, a incerteza de medição na série histórica amostrada tende a dar os valores apresentados na Tabela 14

Tabela 14 – Tendência da incerteza de medição na série histórica amostrada para ruído aéreo

Freq (Hz)	U (dB)	Freq (Hz)	U (dB)
100	3,8	630	1,1
125	3,3	800	1,0
160	2,8	1000	0,9
200	2,4	1250	0,9
250	2,0	1600	0,9
315	1,7	2000	1,0
400	1,5	2500	1,1
500	1,2	3150	1,3

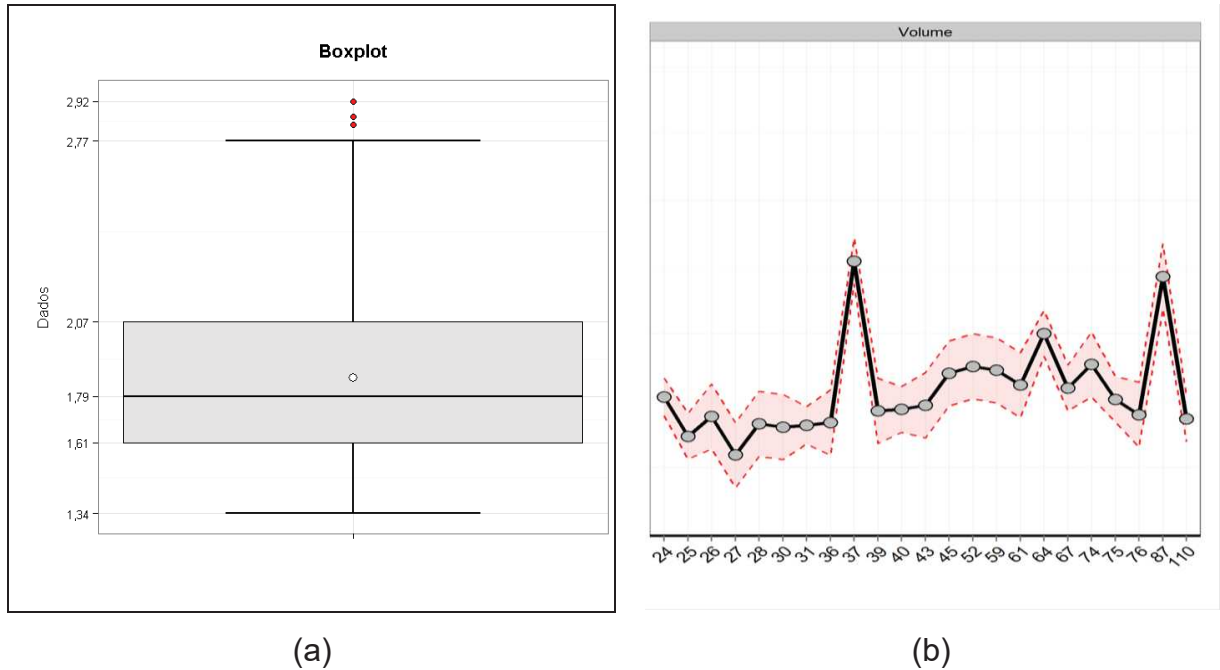
Utilizando do método indicado anteriormente de média de variâncias, buscou-se um valor único de incerteza de medição em função do volume dos cômodos analisados. A Tabela 15 apresenta a síntese dos resultados encontrados de incerteza de medição média conforme o volume do cômodo amostrado.

Com esses dados foi verificada a dispersão dos valores com gráfico de Box-plot, apresentado na Figura 42a, onde percebe-se que o limite inferior ficou em 1,3 dB, o primeiro quartil em 1,6 dB, o terceiro quartil em 2,1 dB e o limite superior ficou em 2,8 dB. Já a média e a mediana ficaram com valores de 1,9 e 1,8, respectivamente. Neste caso, 3 valores foram enquadrados como valores outliers.

Tabela 15 – Incerteza média em função do volume do cômodo

Volume (m³)	U (dB)	Volume (m³)	U (dB)	Volume (m³)	U (dB)
24,0	1,9	36,0	1,5	64,0	2,2
24,0	1,8	37,0	2,9	67,0	2,1
24,0	1,7	37,0	2,9	67,0	1,7
25,0	1,4	39,0	1,7	74,0	2,1
25,0	1,6	40,0	1,7	75,0	2,1
26,0	1,8	40,0	1,9	75,0	1,7
27,0	1,3	43,0	1,7	76,0	1,7
28,0	1,6	45,0	1,9	87,0	2,8
30,0	1,6	52,0	2,1	110,0	1,4
31,0	1,6	59,0	1,9	110,0	1,6
31,0	1,4	61,0	2,1		
31,0	1,8	64,0	1,9		

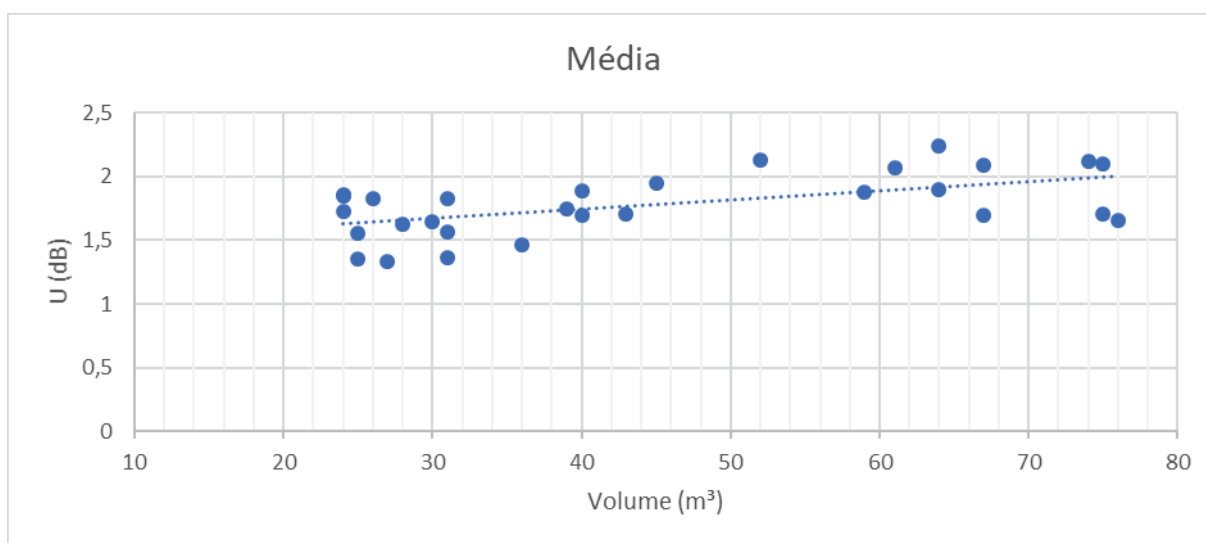
Figura 42 – Análises da Incerteza média em função do volume do cômodo (a) Boxplot dos valores de incerteza de medição média em função do volume do cômodo e (b) Anova dos valores de incerteza de medição média em função do volume do cômodo



Considerando toda a população amostral, realizou-se a análise da variância destes valores em função do volume, podendo ser verificado na Figura 42b. Esta análise apresenta de forma gráfica a influência dos valores outliers na regressão linear, com valores acentuados no volume de  $37 \text{ m}^3$  e  $87 \text{ m}^3$ .

Desprezando os valores considerados outliers, condizentes com os valores mostrados na Figura 42a e Figura 42b, a regressão linear de primeira ordem foi realizada, sendo apresentada na Figura 43. Esta linha de tendência apresenta um resíduo de 0,3 dB e conforme esta linha de tendência, a incerteza de medição na série histórica em função do volume é apresentada na Equação 21.

Figura 43 – Linha de tendência de primeira ordem dos valores de incerteza de medição média em função do volume do cômodo



$$U(V) = (0,0073 \times V) + 1,4523 \quad (21)$$

Na Figura 43 é possível verificar a dispersão dos resultados de incerteza ficando mais clara, com a linha de tendência e uma relação com o volume dos cômodos ensaiados. Esta relação aponta que a incerteza média tende a ser maior quanto maior for o volume do cômodo ensaiado.

#### 4.4.2 Série histórica para ensaio de transmissão ao ruído de impacto

Para este capítulo foram utilizados dados de ensaios de nível de transmissão sonora de impacto padrão, conforme método indicado anteriormente. A Tabela 16 apresenta os dados utilizados para tratamento estatístico e série histórica.

Tabela 16 - Incerteza de medição de ensaios de ruído de impacto desempenhados em campo, valores em dB

	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Frequência (Hz)															
			100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
1	12	31	2,2	1,9	1,2	1,1	0,9	0,7	0,8	0,8	0,6	0,4	0,4	0,5	0,4	0,5	0,5	0,7
2	15	38	2,1	1,5	1,1	1,5	1,2	0,8	0,8	0,8	0,6	0,5	0,5	0,7	0,6	0,7	0,7	0,8
3	23	59	2,0	1,5	1,4	1,2	1,0	1,1	0,7	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8
4	26	66	2,7	1,9	1,1	1,7	1,1	1,6	1,5	1,6	1,3	0,8	0,9	1,0	0,9	0,9	1,0	1,2
5	35	91	1,3	1,0	1,3	1,2	1,2	0,8	0,7	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4
6	15	39	2,2	2,5	1,4	1,3	1,1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,6
7	16	42	2,4	2,3	1,9	1,0	1,1	1,0	0,6	0,6	0,5	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,5	0,5
8	18	46	1,6	0,9	1,3	1,3	0,8	0,7	0,7	0,5	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,8
9	35	91	1,4	0,9	1,1	1,0	1,1	0,7	0,7	0,5	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5
10	9	23	3,4	3,5	2,0	1,4	1,0	0,9	0,8	0,7	0,7	0,9	0,8	0,6	0,6	0,7	0,9	0,8
11	20	52	2,3	2,7	1,4	1,3	1,1	0,9	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6	0,7	0,5	0,7	0,8	1,1
12	11	27	4,3	4,4	3,3	3,8	2,7	2,7	3,1	2,7	2,8	2,4	2,2	2,5	2,9	3,1	2,7	3,1
13	23	61	3,4	3,2	2,7	3,1	1,5	2,0	1,4	1,8	1,2	1,6	1,8	1,8	2,0	1,7	1,5	1,5
14	9	24	1,4	1,6	1,3	1,1	0,8	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	0,4	0,4
15	26	70	2,7	1,6	1,4	1,0	1,6	1,0	1,6	1,6	1,1	1,1	1,4	1,7	2,1	1,8	2,0	2,2
16	11	31	1,6	1,5	1,4	0,9	0,7	0,6	0,9	0,6	0,6	0,6	0,5	0,7	0,6	0,6	0,6	0,7
17	32	86	2,9	2,3	0,9	1,3	1,1	1,4	1,5	1,4	1,5	1,3	1,4	1,4	1,6	1,8	1,8	2,0
18	9	25	2,2	1,3	1,0	1,0	0,8	0,9	1,4	1,3	0,8	0,8	0,8	0,7	0,6	0,7	1,1	1,2
19	40	110	1,2	1,7	1,2	0,6	1,0	0,9	1,4	0,5	0,7	0,6	0,4	0,5	0,4	0,5	0,6	0,7
20	13	36	2,4	0,9	0,6	1,9	1,8	3,3	3,3	2,3	2,0	1,8	1,0	0,9	0,9	0,6	0,8	0,9
Média <sup>2</sup>			2,4	2,2	1,6	1,6	1,3	1,4	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,2

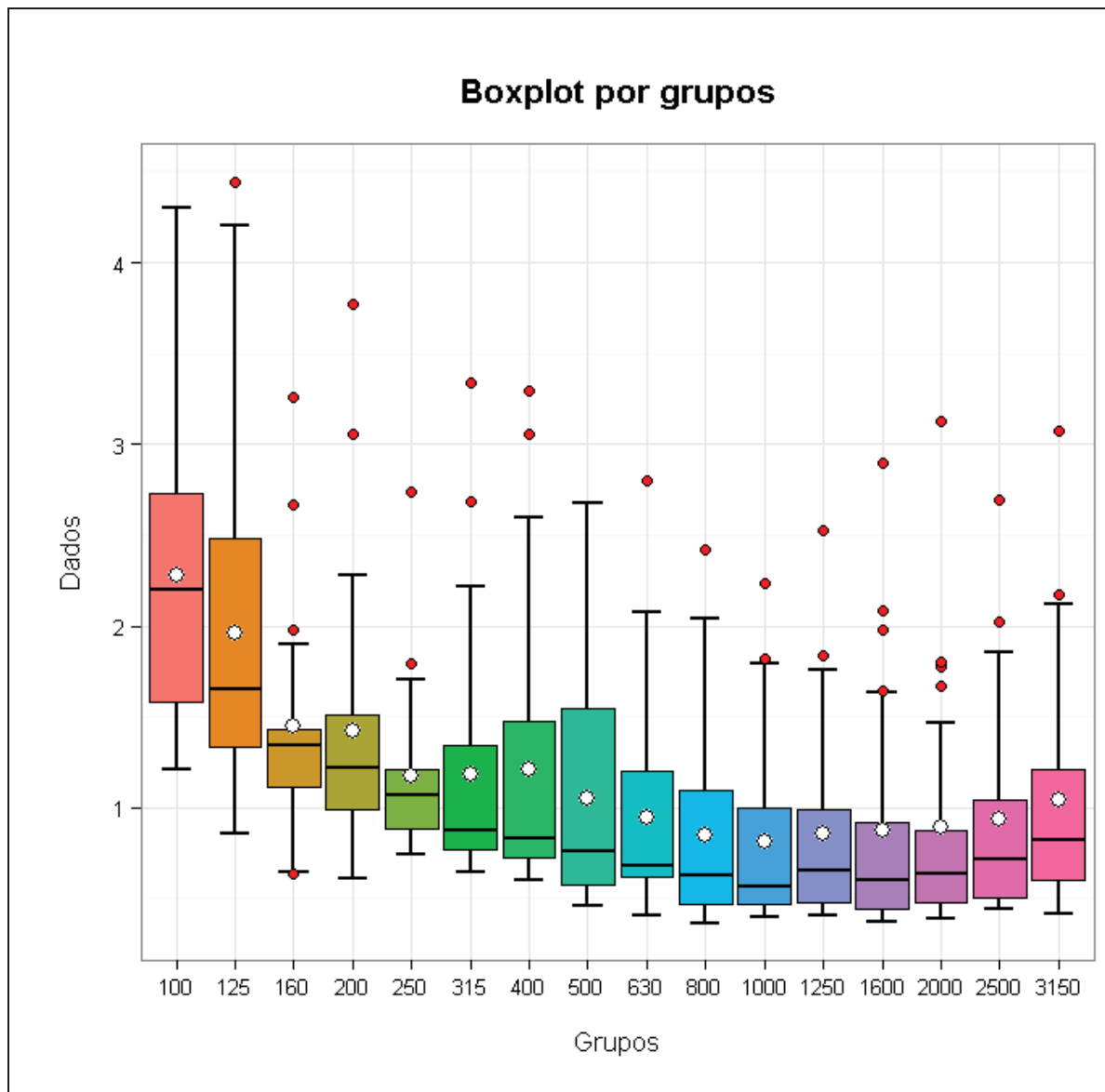
Os valores de incerteza média apresentados na Tabela 16 estão muito próximos dos apresentados pela ISO 12999-1:2014 na Situação B, e quando analisados nas bandas de frequência de 630 a 3150, os valores são menores que os normatizados. Entretanto, quando comparado com a Situação C, os valores ficaram maiores em todas as bandas de frequência.

Para melhor se verificar a dispersão dos valores de incerteza de medição por bandas de frequência, a Figura 44 apresenta o gráfico de Box-plot no qual os valores são fracionados em quartis, média e mediana. A Tabela 17 apresenta os valores encontrados para se determinar os quartis no gráfico de Box-plot.

Tabela 17 – Valores de U para impacto calculados para níveis de quartil para gráfico de Box-plot, valores em dB

Grupos	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
Mínimo	1,2	0,9	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Limite inferior	1,2	0,9	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Primeiro quartil	1,6	1,3	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5	0,6
Média	2,3	2,0	1,4	1,4	1,2	1,2	1,2	1,1	0,9	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0
Mediana	2,2	1,7	1,3	1,2	1,1	0,9	0,8	0,8	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,8
Terceiro quartil	2,7	2,5	1,4	1,5	1,2	1,3	1,5	1,5	1,2	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9	1,0	1,2
Limite superior	4,3	4,2	1,9	2,3	1,7	2,2	2,6	2,7	2,1	2,0	1,8	1,8	1,6	1,5	1,9	2,1
Máximo	4,3	4,4	3,3	3,8	2,7	3,3	3,3	2,7	2,8	2,4	2,2	2,5	2,9	3,1	2,7	3,1

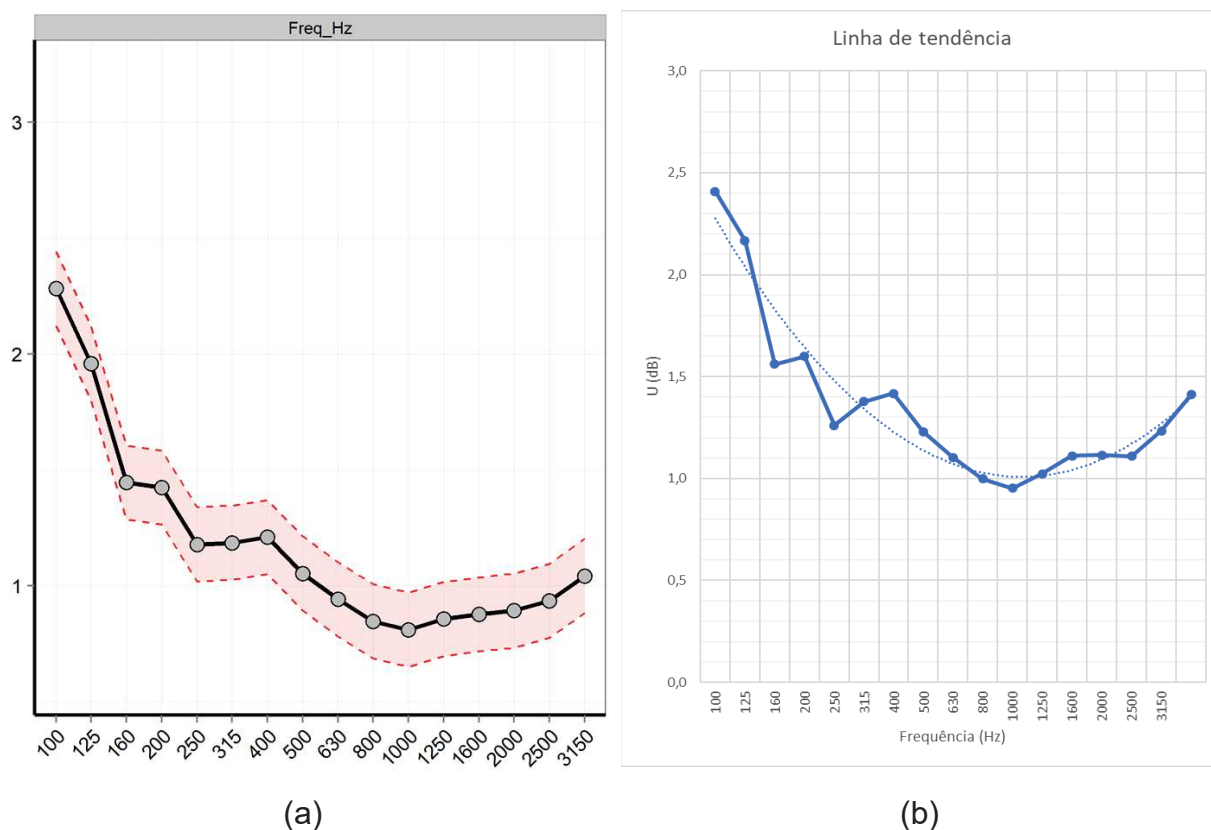
Figura 44 – Box-plot dos valores de incerteza de medição obtidos nos ensaios de ruído de impacto



As bandas de frequência de 160, 1600 e 2000 Hz apresentaram 4 valores outliers; as bandas de frequência de 200, 250, 315, 400, 1000, 1250, 2500 e 3150 Hz apresentaram 2 valores outliers. Já nas bandas de 125, 630 e 800 Hz foi encontrado 1 valor outlier, e as demais bandas de frequência não apresentaram valores outliers.

Quando realizado a ANOVA dos valores amostrados, os limites de desvio em cada banda são visualizados, conforme a Figura 45a, enquanto a Figura 45b apresenta a linha de tendência obtida da média quadrada dos valores de incerteza por bandas de frequência.

Figura 45 – Valores amostrados (a) Anova dos valores de incerteza de medição obtidos nos ensaios de ruído de impacto e (b) Linha de tendência de função polinomial de segunda ordem para valores de impacto padrão



Percebe-se um comportamento que indica a incerteza mais elevada para as baixas frequências, como já esperado. Em médias frequências é visto um leve decaimento, seguido de uma regularidade nos resultados, e em seguida um leve crescente nas altas frequências.

A linha de tendência de função polinomial de segunda ordem, apresentada na Figura 45b, apresentou um resíduo de 0,91. Conforme a linha de tendência

proposta, a Tabela 18 apresenta os valores que tendem a incerteza de medição na série histórica

Tabela 18 - Tendência da incerteza de medição na série histórica amostrada para ruído de impacto

Freq (Hz)	U (dB)	Freq (Hz)	U (dB)
100	2,3	630	1,1
125	2,0	800	1,0
160	1,8	1000	1,0
200	1,6	1250	1,0
250	1,5	1600	1,0
315	1,3	2000	1,1
400	1,2	2500	1,2
500	1,1	3150	1,3

Utilizando do método indicado no início deste capítulo a respeito da média de variâncias, buscou-se um valor único de incerteza de medição em função do volume dos cômodos analisados. A Tabela 19 apresenta a síntese dos resultados encontrados de incerteza de medição média conforme o volume do cômodo amostrado.

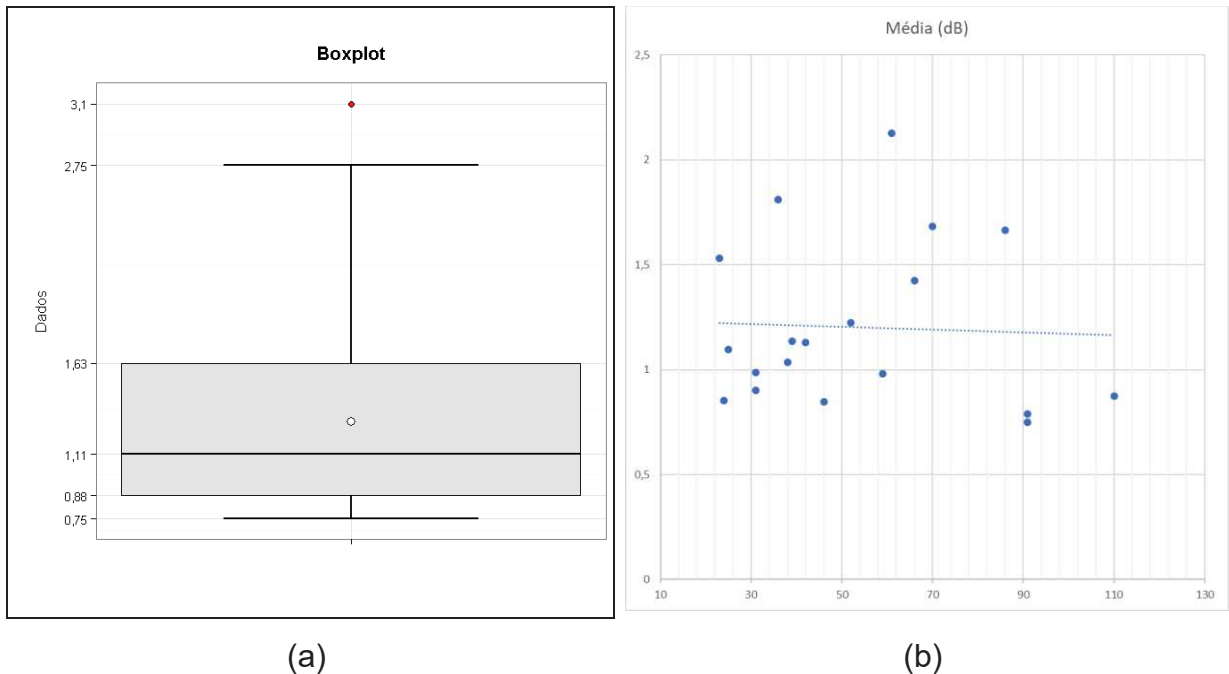
Com esses dados foi verificada a dispersão dos valores com gráfico de Box-plot, apresentado na Figura 46a, onde percebe-se que o limite inferior ficou em 0,7 dB, o primeiro quartil em 0,9 dB, o terceiro quartil em 1,6 dB e o limite superior ficou em 2,8 dB. Já a média e a mediana ficaram com valores de 1,3 e 1,1, respectivamente. Neste caso, 1 valor foi enquadrado como outlier.

Tabela 19 – Incerteza média para ruído de impacto em função do volume do cômodo

Volume (m <sup>3</sup> )	U (dB)	Volume (m <sup>3</sup> )	U (dB)
23	1,5	46	0,8
24	0,9	52	1,2
25	1,1	59	1,0
27	3,1	61	2,1
31	1,0	66	1,4
31	0,9	70	1,7
36	1,8	86	1,7
38	1,0	91	0,8
39	1,1	91	0,7
42	1,1	110	0,9



Figura 46 – Análise dos dados amostrados (a) Box-plot dos valores de incerteza de medição média em função do volume do cômodo para ruído de impacto e (b) Linha de tendência de primeira ordem dos valores de incerteza de medição média em função do volume do cômodo para ruído de impacto



Nota-se uma dispersão muito maior da média de incertezas na Figura 46b. Para se verificar se esses dados são paramétricos, o teste de Cox-Stuart foi utilizado indicando um p-Valor de 1, ou seja, não há significância para um intervalo de confiança de 95%. Logo, esta série temporal não é válida.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho buscou analisar as possíveis diferenças que resultados estimados de acústica de edificações possam obter em relação aos ensaios de campo, nos resultados de perda de transmissão sonora e redução ao nível de pressão sonora de impacto-padrão em sistemas construtivos com diferenças geométricas de uma mesma edificação.

No total, foram feitos 10 ensaios de ruído aéreo e 8 ensaios de ruído de impacto e a respectiva estimativa pelo software SONArchitect.

Quando analisados os valores ponderados dos ensaios de ruído aéreo, verificou-se que nenhum resultado retornou valores iguais, entretanto 2 amostras retornaram 1 dB de diferença e 2 amostras retornaram 2 dB de diferença.

Destaca-se que a amostra LP1, caracterizada por um sistema de piso, apresentou a diferença de 8 dB no isolamento ao ruído aéreo, e os resultados obtidos por estimativa apresentaram valores menores que os ensaiados nesta situação. Acrescenta-se que as amostras LP2, LP3 e LP4 também apresentaram valores acima de 5 dB. Estas situações alteram a classificação do requisito de acordo com a ABNT NBR 15575:2013.

Já nos sistemas de vedação vertical indicados para elemento de partição, um dos dois resultados apresentou diferença dentre o ensaiado e o estimado de 1 dB, enquanto que o outro sistema apresentou diferença de 7 dB. Em ambos os casos, o resultado do ensaio em campo apresentou isolamento maior.

Ao se comparar os resultados ponderados de ruído aéreo com o volume dos cômodos receptores, não fica evidente uma tendência de resultado sendo influenciada por esta variável. Foram ensaiados e simulados diferentes volumes de cômodo receptor, sendo o menor volume de 23,8 m<sup>3</sup> (Amostra NL1) e o maior 83,5 m<sup>3</sup> (Amostra NL 4), onde estes apresentaram resultados de 49 dB e 47 dB, considerando ensaiado e simulado, para a Amostra NL1 e de 48 dB e 46 dB, considerando ensaiado e simulado, para a Amostra NL4.

Referente aos valores ponderados dos ensaios de transmissão ao ruído de impacto, duas situações deram o mesmo resultado entre os valores estimados e ensaiados; 4 situações deram 1 dB de diferença; e 2 situações deram 2 dB de diferença. Entretanto, quando analisados os resultados por bandas de frequência, a

variação entre os valores ensaiados e simulados ficaram mais visíveis, como apresentado na Figura 30, tendo uma diferença de 12 dB nas bandas de 200 Hz.

Estas diferenças podem ser devidas a uma falta de conhecimento do comportamento vibracional e das transmissões marginais que sistemas construtivos brasileiros possam apresentar, o que implicaria em uma alimentação com dados de entrada no software de comportamento vibracional distinto da realidade.

Fazendo a relação entre o resultado ponderado obtido e o volume dos cômodos receptores, um padrão torna-se amostrado nos resultados até determinado volume. Considerando que os valores simulados para as Amostras NL1 (23,8 m<sup>3</sup>), NL2 (29,9 m<sup>3</sup>), LP1 (31,8 m<sup>3</sup>), LP2 (39,2 m<sup>3</sup>) e LP3 (45,4 m<sup>3</sup>) são de 79 dB, 78 dB, 77 dB, 76 dB e 74 dB, respectivamente e os valores ensaiados são de 80 dB, 78 dB, 77 dB, 77 dB e 75 dB para as respectivas amostra.

Isto mostra que para as situações ensaiadas, quando considerado ruído de impacto, houve uma relação de inversamente proporcional, sendo que quando se observado um aumento no volume do cômodo amostrado, o resultado tendia a ser menor. Entretanto, nas demais amostras, este comportamento não foi observado.

Além disto, foi realizado um levantamento do histórico de valores de incerteza de medição de 34 ensaios de isolamento ao ruído aéreo e 20 ensaios de transmissão ao ruído de impacto padrão.

Para os ensaios de ruído aéreo, foi realizada regressão linear e análise de variância com teste de normalidade Anderson-Darling, não apresentando uma boa normalidade em seus dados. Já utilizando a linha de tendência em função polinomial de segunda ordem foi apresentando um resíduo de 0,97.

Quando relacionada a incerteza de medição em função do volume dos cômodos, com a linha de tendência pôde ser evidenciado que há uma relação entre o volume dos cômodos ensaiados e a incerteza. Esta relação aponta que a incerteza média tende a ser maior quanto maior for o volume do cômodo ensaiado.

Entretanto, esta relação somente pode ser observada nos ensaios de ruído aéreo. Quando referente à incerteza média dos resultados de ruído de impacto padrão, tanto a análise de variância para regressão linear, quanto uma linha de tendência retornaram valores de série temporal não válidos.

A incerteza de medição é um parâmetro avaliativo da regularidade dos ensaios, e destaca-se que valores intrínsecos a geometria de unidades influencia no valor da incerteza expandida.

Por fim, a variação do volume dos cômodos é uma característica intrínseca da edificação a ser estudada, e a variação deste dado ocasiona diferentes resultados. Foi possível verificar um padrão entre o volume do cômodo receptor e os resultados obtidos para o ruído de impacto bem como o volume do cômodo receptor e a incerteza de medição em uma série amostrada. Entretanto, não foi possível verificar uma relação nos demais dados deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 11415**: Ruído aeronáutico. Rio de Janeiro, 1990

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 16313**: Acústica - Terminologia. Rio de Janeiro, 2014

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 15575-1** - Edificações habitacionais - Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 15575-2** - Edificações habitacionais - Desempenho Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 15575-3** - Edificações habitacionais - Desempenho Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 15575-4** - Edificações habitacionais - Desempenho Parte 4: Sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE. Rio de Janeiro, 2013.

ANJOS, Miguel António Remechido. **Caracterização do Conforto Acústico em Edifícios de Habitação**. 2013. 49 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova, Lisboa, 2013

ANTÓNIO, Julieta; MATEUS, Diogo. 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.

BALLOU, Glen M. **Handbook for Sound Engineers**. Burlington, 2008

BISTAFA, Sylvio R. Acústica aplicada ao controle do ruído. 2 ed. São Paulo: Blucher. São Paulo, 2011.

BRASIL. **Diretrizes Técnicas para Apresentação de Projetos e Construção de estabelecimentos de Ensino Público**. Volume I. Ministério da Educação - Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação. Disponível em: <<http://www.fnede.gov.br/portaldecompras/index.php/component/phocadownload/category/42-consultas-publicas?download=2148:cp-1-14-vol-i>>. Acesso em: 12 mai. 2018.

BRASIL. **Decreto no 9.377, de 17 de maio de 2018**. Institui a Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2018/Decreto/D9377.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/Decreto/D9377.htm)>. Acesso em: 12 mai. 2018.

BURATTI, Cinzia; BELLONI, Elisa; MORETTI, Elisa. Façade noise abatement prediction: New spectrum adaptation terms measured in field in different road and railway traffic conditions. **Applied Acoustics**. v. 76, p. 238–248, 2014.

BUTKUS, Donatas; JANUSEVICIUS, Tomas; MAZUOLIS, Jurgis. Building partitions acoustic properties. In: Environmental engineering. 2011, Vilnius. **Anais eletrônicos...** p. 43–79, Vilnius, 2011.

CANIATO, Marco et al. Impact sound of timber floors in sustainable buildings. **Building and Environment** v. 120, p. 110–122, 2017.

CBIC. **CBIC inicia estudo técnico para subsidiar a revisão da Norma de Desempenho**, 2018. Disponível em: <<https://cbic.org.br/cbic-inicia-estudo-tecnico-para-subsidiar-a-revisao-da-norma-de-desempenho/>>. Acesso em: 26 jan. 2018

CBIC. **Desempenho de edificações habitacionais: guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013**. Câmara Brasileira da Indústria da Construção. 2 ed. Editora Fortaleza. Fortaleza, 2013.

DIJCKMANSA, Arne; VERMEIR, Gerrit. Development of a hybrid wave based-transfer matrix model for sound transmission analysis. **Journal of the Acoustical Society of America**. V 133, n. 4, p. 2157-2168. 2013

FUNDACENTRO. **NHO01 – Avaliação da Exposição Ocupacional ao Ruído**. Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho p. 12–40, 2001.

GALLAS, Márcia Russman. **Incerteza de Medição**. Instituto de Física - UFRGS p. 10, 2010. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/~marcia/medidas.pdf>>. Acesso em: 26 jan. 2018

GERRETSEN, Eddy. Predicting the Sound Reduction of Building Elements from Material Data. **Building Acoustics** v. 6, n. 3, p. 225–234, 1999.

GIESBRECHT, Peter Klitzke. **Incerteza na medição das características acústicas dos materiais**. 2007. 115 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica). Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2007.

HASSAN, Osama A. B. **Building acoustics and vibration: theory and practice**. World Scientific, 2009.

HEISSLER, Rafael Ferreira et al. Análise crítica do desempenho acústico de sistemas de revestimentos de pisos. In: Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica – SOBRAC, 27., 2017, Brasília, **Anais eletrônicos...** Brasília, 2017.

HEISSLER, Rafael Ferreira. **Desempenho acústico: investigação da incerteza de medição em ensaios de isolamento aéreo em câmara**. 2016. 84 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 20

HEISSLER, Rafael Ferreira et al. Uncertainty in measurement determination in the sound reduction index in laboratory. In: International Congress on Acoustics – ICA, 22., 2016, Buenos Aires, **Anais eletrônicos...** Buenos Aires, 2016.

HEISSLER, Rafael Ferreira; PIRES, Josiane Reschke; OLIVEIRA, Maria Fernanda. A contribuição da precisão intermediária do ensaio de ruído aéreo para a incerteza de medição. In: Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica – SOBRAC, 27., 2017, Brasília, **Anais eletrônicos...** Brasília, 2017.

HENRIQUE, Paulo; ZANNIN, Trombetta. Determinação de coeficientes de isolamento acústico: medições in situ e simulação computacional. **Ambiente Construído** v. 7, n. 2, p. 15–29, 2007.

HOLTZ, Marcos; SCHMITT, Rafael. **Manual PróAcústica de recomendações básicas para Contrapisos flutuantes**. 2015 p. 52

HOPKINS, Carl. **Sound Insulation**. Taylor & Francis, 2012.

INMETRO. **Vocabulário Internacional de Termos de Metrologia Legal - VIM**. 2005.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 12354-1**: Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 1: Airborne sound insulation between rooms. 1st ed. Geneva, 2017. (Technical report).

\_\_\_\_\_. **ISO 12354-2**: Building acoustics -- Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements -- Part 2: Impact sound insulation between rooms. 1st ed. Geneva, 2017. (Technical report).

\_\_\_\_\_. **ISO 3382-2**. Acoustics -- Measurement of room acoustic parameters -- Part 2: Reverberation time in ordinary rooms. 1st ed. Geneva, 2008. (Technical report).

\_\_\_\_\_. **ISO 9052-1**. Acoustics -- Determination of dynamic stiffness -- Part 1: Materials used under floating floors in dwellings. 1st ed. Geneva, 1989. (Technical report).

JCGM 100. **Avaliação de dados de medição** — Guia para a expressão de incerteza de medição. INMETRO p. 126, 2008.

JOHANNESSON, C. M.; LJUNGGREN, S.; FINNEY, Peter. Acoustic methods for locating fire spread paths in old buildings. **NDT&E International** v. 31, n. 4, p. 299–305, 1998.

KANG, Jian. **Noise and Vibration Control in the Built Environment**. Editora MDPI. 2017. ISBN: 303842420X

KLIPPEL FILHO, S.; LABRES, H. S.; PIRES, J. H.; BOLINA, F. L.; OLIVERIA, M. F. Desempenho acústico em um edifício residencial: classificação superior pela NBR 15575. **Acústica e Vibrações**, n. 48, p. 93–103, 2016.

LABRES, H.; OLIVEIRA, M. F.; PACHECO, F.; PATRÍCIO, J.; TUTIKIAN, B. Acoustic performance of brick masonry walls: Construction defects and influence of installations. **Building Acoustics** v. 25, n. 4, p. 351–362, 2018.

LAZZARINI, Victor E P. **Elementos de Acústica**. 47 f., 1998. ISBN: 85-213-0093-X.

LUNDH, Henric. **Sustainable thermal and acoustic retrofitting of façade walls**. 2017. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Acústica) – Division of Engineering Acoustics, Lund University, Sweden, 2017.

MACHIMBARRENA, María et al. Uncertainty determination of in situ airborne sound insulation measurements. **Applied Acoustics**, v. 89, p. 199–210. 2015.

MACHIMBARRENA, María; RASMUSSEN, Birgit. Legislation and Regulations in Building Acoustics: Comparison of acoustic regulations for housing and schools in selected countries in Europe and South America. In: International Congress on Acoustics – ICA, 22., 2016, Buenos Aires, **Anais eletrônicos...** Buenos Aires, 2016.

MICHALSKI, R. L. X. N.; FERREIRA, D. P. F.; NABUCO, M. Incerteza em Medição em Campo de Isolamento Sonoro Aéreo. In: Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica – SOBRAC, 22., 2008, Belo Horizonte, **Anais eletrônicos...** 2008.

MICHALSKI, Ranny Loureiro Xavier Nascimento. **Metodologias para medição de isolamento sonoro em campo e para expressão da incerteza de medição na avaliação do desempenho acústico de edificações**. 2011. 235 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011

MISKINIS, Kestutis et al. Influence of EPS, mineral wool and plaster layers on sound and thermal insulation of a wall: a case study. **Applied Acoustics** v. 137, n. August, p. 62–68, 2018.

NAVACERRADA, M. A.; PEDRERO, A.; DÍAZ, C. Study of the uncertainty of façade sound insulation measurements: Analysis of the ISO 12999-1 uncertainty proposal. **Applied Acoustics** v. 114, p. 1–9, 2016.

NUNES, M. F. O.; PATRÍCIO, J. V. Different input parameters in modelling for predicting impact noise of non-homogenous floors. In: International Congress on Acoustics – ICA, 22., 2016, **Anais eletrônicos...** Buenos Aires, 2016.

ÖQVIST, Rikard; LJUNGGREN, Fredrik; GREN, Anders. On the uncertainty of building acoustic measurements - Case study of a cross-laminated timber construction. **Applied Acoustics** v. 73, n. 9, p. 904–912, 2012.

PAIXÃO, Dinara Xavier Da. **Caracterização do isolamento acústico de uma parede de alvenaria, utilizando análise estatística de energia (SEA)**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, como – UFSC, Florianópolis, 2002.



PATRÍCIO, Jorge Viçoso. **Acústica nos edifícios**. Engebook. 7 ed. Lisboa, 2018.

PATRÍCIO, Jorge Viçoso. **Isolamento sonoro a sons aéreos e de percussão**. 5 ed. Lisboa, 2008.

PEÑA, Miguel Angel; COLINA, Carlos de La; MORENO, Antonio. IAPAI, Software to Predict Acoustic Insulation in Buildings in Accordance with EN 12354/1/2. In: Forum Acusticum Sevilla 2002. **Anais eletrônicos...** Sevilla, 2002.

PIERRARD, Juan Frias; AKKERMAN, Davi. **Manual ProAcústica Sobre a Norma de Desempenho**. 31 f. São Paulo, 2013.

POBLET-PUIG, J.; GUIGOU-CARTER, C. Using spectral finite elements for parametric analysis of the vibration reduction index of heavy junctions oriented to flanking transmissions and EN-12354 prediction method. **Applied Acoustics**. v. 99, p. 8–23, dez. 2015.

RASMUSSEN, Birgit; MACHIMBARRENA, María. **Building acoustics throughout Europe** – Volume 1: Towards a common framework in building acoustics throughout Europe. DiScript Preimpresion, S. L., 2014. 257 p.

REDE METROLOGICA RS. **Rm 68** – Incerteza De Medição: Guia Prático Do Avaliador De Laboratórios. Rede Metrológica do Rio Grande do Sul p. 1–32, 2013.

ROSÃO, Vitor; SILVA, João. Comparison of EN 12354-1 to -4 of 2000 with EN 12354-1 to -4 of 2017. In: European Congress and Exposition on Noise Control Engineering – Euronoise, 11., 2018, Crete. **Anais Eletrônicos...** Creta, 2018. Disponível em: <[http://www.euronoise2018.eu/docs/papers/197\\_Euronoise2018.pdf](http://www.euronoise2018.eu/docs/papers/197_Euronoise2018.pdf)>. Acesso em: 14 jun. 2018.

SALIBA, Tuffi Messias. **Manual prático de avaliação e controle do ruído - PPRA**. 9a Ed. LTr. São Paulo, 2016.

SILVA, A. T.; KERN, A. P.; PICCOLI, R.; GONZÁLEZ, M. A. S. Novas exigências decorrentes de programas de certificação ambiental de prédios e de normas de desempenho na construção. **Arquitetura Revista**, v. 10, n. 2, p. 105–114, 2014.

SCROSATI, Chiara et al. Uncertainty of facade sound insulation by a Round Robin Test. Evaluations of low-frequency procedure and single numbers. **Building and Environment**, v. 105, p. 253–266, 2016.

VIGRAN, Tor Erik. **Building Acoustics**. Taylor & Francis - CRC Press. Nova Iorque, 2008.

VESTRHEIM, K, C; LEE, G; PEART, N. **Resist - Rush**, Test for Echo, Gravadora Atlantic. 1996

WITTSTOCK, Volker. Uncertainties in building acoustics. In: Forum Acusticum Budapeste, 2005. **Anais eletrônicos...** Budapeste, 2005 p. 2217–2222.

WSZOLEK, Tadeusz. Uncertainty of sound insulation measurement in laboratory.  
**Archives of Acoustics**, v. 4, p. 271–277, 2007.