

**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**

**RAFAEL DE TONI**

**DESEMPENHO ACÚSTICO DE EDIFÍCIOS COM LAJE NERVURADA  
BIDIRECIONAL: COMPARATIVO ENTRE ESTIMATIVA COM SOFTWARE E  
ENSAIOS EM CAMPO**

**SÃO LEOPOLDO  
2020**

RAFAEL DE TONI

**DESEMPENHO ACÚSTICO DE EDIFÍCIOS COM LAJE NERVURADA  
BIDIRECIONAL: COMPARATIVO ENTRE ESTIMATIVA COM SOFTWARE E  
ENSAIOS EM CAMPO**

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: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Fernanda de Oliveira

Co-orientador: Prof<sup>o</sup> Msc. Rafael Ferreira Heissler

São Leopoldo

2020

T665d Toni, Rafael De.  
Desempenho acústico de edifícios com laje nervurada bidirecional : comparativo entre estimativa com software e ensaios em campo / por Rafael De Toni. – 2019.  
68 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, São Leopoldo, RS, 2019.  
Orientadora: Dr<sup>a</sup>. Maria Fernanda de Oliveira.  
Co-orientador: Msc. Rafael Ferreira Heissler.

1. Acústica de edifícios. 2. Construção civil.  
3. Desempenho de edificações. 4. Ensaio acústico em campo. 5. Simulação acústica. I. Título.

CDU: 72:534.84

## RESUMO

Os conflitos gerados por incômodos condominiais têm crescido continuamente, e grande parte deles derivam-se de ruídos lindeiros a pessoas que unicamente buscam o sossego. Isso pode estar ligado, não necessariamente, à fonte de ruídos e, sim, a uma precariedade das antigas edificações brasileiras, que não cumprem satisfatoriamente com o objetivo de isolar ruídos. Com a implementação da Norma de Desempenho (NBR 15575:2013), foram estabelecidas regras para a avaliação do desempenho acústico das habitações, aumentando, assim, o requisito das edificações quanto à qualidade acústica. Nesse caminho, este trabalho teve como objetivo analisar o uso de ferramenta computacional de simulação de transmissão sonora numa edificação multifamiliar na cidade de Bento Gonçalves e, simultaneamente, realizar as medições de ensaios em campo, conforme a Norma de Desempenho requisita, comparando os resultados obtidos. Para a simulação utilizou-se o software SONarchitect, o qual utiliza para estimativa os cálculos propostos pela ISO 12354:2017. Já os ensaios em campo foram realizados conforme as normas ISO 16283, norma que substituiu a ISO 140, a qual o uso é recomendado Brasil. Evidenciou-se que diversos resultados ponderados apresentaram valores similares, diferenciando-se, no máximo, em 2 dB tanto para o ruído aéreo quanto para o de impacto.

**Palavras-chave:** Acústica de edifícios. Construção civil. Desempenho de edificações. Ensaios acústicos em campo. Simulação acústica.

## ABSTRACT

Conflicts generated by condominium troublesome have been growing steadily, and much of it derive from bordering noise to people who only seek peace. This may not necessarily be linked to the source of noise, but to a precariousness of the old Brazilian buildings, which do not satisfactorily fulfill the ability to isolate noise. With the implementation of the Performance Standard (NBR 15575:2013), rules were established for the assessment of the acoustic performance, thus increasing the requirement of buildings regarding acoustic quality. In this way, this work aimed to analyze the use of a computational tool for simulating sound transmission in a multifamily building in the Bento Gonçalves city, and simultaneously carry out the measurements of field tests, according to the Performance Standard, comparing the results obtained. SONarchitect software was used for the simulation, which uses the calculations proposed by ISO 12354: 2017 to estimate. The field tests have already been carried out in accordance with ISO 16283, a standard that replaced ISO 140, which is recommended for use in Brazil. It showed that several weighted results presented similar values, differentiating it to the maximum in 2 dB for both airborne noise as the impact.

**Keywords:** Acoustic field tests. Acoustic simulation. Building acoustics. Building performance. Construction.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diversos tipos de ruído nas edificações .....	12
Figura 2 – Transmissão da energia sonora de um meio para outro. ....	13
Figura 3 – Comportamento típico de placas homogêneas .....	17
Figura 4 – Estimativa de perda na transmissão de painéis sólidos e homogêneos, na região controlada pela coincidência .....	19
Figura 5 – Transmissão ao ruído de impacto. ....	20
Figura 6 – Transmissão por flancos. ....	21
Figura 7 – Exemplo de aplicação de piso flutuante .....	22
Figura 8 – Redução ponderada do impacto padrão .....	23
Figura 9 – Formas de Transmissão Sonora .....	25
Figura 10 – Exemplo de estudo de quantificação da transmissão por flancos .....	32
Figura 11 – Imagem externa do empreendimento.....	37
Figura 12 – Planta do pavimento tipo do empreendimento .....	38
Figura 13 – Detalhamento estrutural da laje.....	39
Figura 14 – Detalhamento do sistema de piso no ensaio “A” .....	40
Figura 15 – Detalhamento do sistema de piso no ensaio “B e D” .....	41
Figura 16 – Detalhamento do sistema de piso no ensaio “C” .....	42
Figura 17 – Localização dos ensaios .....	43
Figura 18 – Detalhamentos dos perfis linha Aura 55C TB e linha Aura 40C .....	44
Figura 19 – Tijolo maciço 15 furos utilizados nas paredes .....	44
Figura 20 – Esquema de montagem dos equipamentos .....	48
Figura 21 – Modelagem de uma edificação pelo software SONarchitect .....	51
Figura 22 – $D_{n,T}$ medidos nos sistemas de pisos.....	54
Figura 23 – $L'_{n,T,w}$ medidos nos sistemas de pisos. ....	55
Figura 24 – $D_{n,T}$ simulados nos sistemas de pisos .....	57
Figura 25 – $L'_{nT,w}$ simulados nos sistemas de pisos .....	58
Figura 26 – Comparativo de $D_{nT,w}$ medidos e simulados.....	59
Figura 27 – Comparativos de $D_{nT}$ medidos e simulados .....	60
Figura 28 – Comparativo de $L'_{nT,w}$ medidos e simulados .....	61
Figura 29 – Comparativos de $L'_{nT}$ medidos e simulados .....	62

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Requisitos de isolamento acústico para habitações multifamiliares em oito países. ....	33
Quadro 2 – Desempenhos acústicos dos sistemas de uma edificação. ....	34
Quadro 3 – Parâmetros do desempenho acústico. ....	35
Quadro 4 – medições do ruído de impacto. ....	36
Quadro 5: Valores medidos de $D_{n,T,w}$ nos sistemas de pisos ensaiados. ....	54
Quadro 6: Valores medidos de $L'_{n,T,w}$ nos sistemas de pisos ensaiados. ....	55
Quadro 7: Valores simulados de $D_{n,T,w}$ para os sistemas de pisos. ....	56
Quadro 8: Valores medidos de $L'_{n,T,w}$ simulados para os sistemas de pisos. ....	57

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>7</b>
1.1 Tema .....	9
1.2 Delimitação Do Tema .....	9
1.3 Objetivos .....	9
1.3.1 Objetivos Geral .....	9
1.3.2 Objetivos Específicos .....	9
1.4 Justificativa.....	10
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>12</b>
2.1 Acústica de edifícios .....	12
2.2 Transmissão do som aéreo .....	13
2.3 Transmissão do som de impacto.....	20
2.3 Transmissão por flancos .....	24
2.4 Descritores acústicos .....	32
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>37</b>
3.1 Empreendimento e detalhamento dos materiais utilizados .....	37
3.2 Ensaio em campo .....	44
3.2.1 Determinação do isolamento ao som aéreo .....	45
3.2.2 Determinação do som de impacto .....	48
3.3 Simulação computacional .....	50
<b>4. RESULTADOS</b> .....	<b>53</b>
4.1 Resultados dos ensaios em campo.....	53
4.1.1 Resultados dos ensaios de ruído aéreo .....	53
4.1.2 Resultados dos ensaios de ruído de impacto .....	54
4.2 Resultados das simulações .....	56
4.2.1 Resultados da simulação de ruído aéreo .....	56
4.2.2 Resultados das simulações ao ruído de impacto .....	57
4.3 Comparativos entre resultados.....	58
4.3.1 Comparativo dos resultados para o som aéreo .....	58
4.3.2 Comparativo dos resultados para o som de impacto .....	60
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>64</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>65</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente em áreas metropolitanas o ruído tem se tornado corriqueiro. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), quando em excesso, o ruído pode prejudicar o aparelho auditivo e causar perturbações diversas, podendo atingir vários órgãos por ação reflexa, provocando alterações no organismo como mudanças na pressão arterial, náuseas, cefaleia, vômitos, perdas de equilíbrio e tremores (WHO, 2011). As primeiras reações do indivíduo são a inquietação, irritabilidade, stress, perda do sono e perda do apetite e, na verdade, pode haver diversos outros problemas com o passar do tempo (SILVA, 2005).

Estima-se que mais de dez milhões de pessoas nos Estados Unidos sofrerão com a perda de audição causada pelo ruído excessivo. Já na Dinamarca, em locais em que há o aumento do ruído de tráfego, a valorização dos imóveis tende a diminuir; e aviões e jatos antigos que geram muito ruído são proibidos em alguns aeroportos na Europa (BISTAFA, 2011).

Na Europa, todos os anos, em decorrência do ruído, ocorrem 10.000 mortes prematuras, 900.000 casos de hipertensão, 43.000 internações hospitalares. A OMS classificou que o ruído é a segunda pior poluição ambiental, perdendo apenas pela poluição do ar que carrega partículas ultrafinas (EEA, 2014).

A poluição sonora já é um problema não apenas na Europa e na América e, sim, em todos os continentes, por isso a importância da padronização dos descritores acústicos.

A preocupação com a acústica nas edificações teve início na Europa, quando surgiu a primeira metodologia mais estruturada dos sistemas e componentes construtivos, foi a partir da publicação da norma “*ISO 6241- Performance standards in building – Principles for their preparation and factors to be considered*”, em 1980 (HOLTZ; SCHMITT, 2015).

A maioria dos países Europeus, segundo Rasmussen et al. (2014), já possui requisitos que regulamentam o isolamento sonoro das habitações e os esquemas dessas classificações são diferentes em cada país, o que dificulta a padronização para a indústria da construção civil. A COST ACTION TU0901 (RASMUSSEN *et al*, 2014), sendo criada em 1971 por 19 países, atualmente inclui 35 países membros e Israel como cooperante, sua finalidade é integrar e harmonizar os aspectos de

isolamento sonoro em construções habitacionais urbanas sustentáveis, proporcionando uma padronização nos países europeus.

No Chile, como base para um projeto acústico informações registradas no site do *Ministerio de Vivienda y Urbanismo*, o qual apresenta uma lista com 107 soluções para sistemas de vedações verticais e 78 para sistemas de vedações horizontais ensaiados em laboratório que definem os materiais utilizados e o desempenho obtido. Um grupo considerado muito importante, que não está regulamentado por norma, são os elementos de fachadas como, janelas, portas, grades de ventilação, por possuir uma grande variedade de produtos. Segundo a EMB Construcción (2016) a melhoria no requisito de isolamento acústico de fachada pode impulsionar o mercado imobiliário de forma positiva.

Atualmente, no Brasil, com a norma de desempenho, algumas empresas vêm se aprofundando na especificação de seus métodos construtivos e suas características acústicas. Entretanto, o que baliza o mercado imobiliário é o preço por área construída e a localização do imóvel, não sendo atribuída, muitas vezes, a diferença entre os materiais empregados para que a edificação atenda a critérios de desempenho (PARGA, 2004).

O ruído urbano no Brasil vem aumentando e o isolamento sonoro perdendo sua eficiência (DUARTE, 2005). Segundo Queiroz (2007), não há um projeto de instrução e de conscientização que proporcione o esclarecimento à indústria da construção civil referenciando a importância do isolamento acústico à frente de seus usuários, tão pouco sobre o quanto as pessoas se sentem incomodadas pelo ruído em suas moradias.

Em relação ao cenário internacional, os critérios de desempenho acústico da norma brasileira estão com seus requisitos muito aquém dos demais países. Todavia, é de fundamental importância que as construtoras adotem decisões emergenciais para reverter o quadro atual, adotando novas tipologias e tecnologias a fim de contribuir para o melhoramento do isolamento acústico a nível nacional (SANTANA, 2016).

O setor da construção civil, no Brasil, ainda carece de informações técnicas das características acústicas dos sistemas construtivos convencionalmente utilizados e, muitas vezes, são utilizados dados e valores de produtos similares adotados no exterior para a tomada de decisão da concepção construtiva.

## **1.1 Tema**

O tema deste trabalho se insere no atual contexto de necessidade de qualificação da cadeia produtiva da construção civil através da abordagem do isolamento acústico de sistemas construtivos de lajes de concreto nervuradas bidirecionais.

## **1.2 Delimitação Do Tema**

A delimitação deste trabalho está na abordagem de sistemas construtivos de vedações verticais vinculados à lajes nervuradas bidirecionais. Este trabalho visa a uma análise do comportamento acústico-vibracional de lajes nervuradas bidirecionais apoiadas em paredes de blocos cerâmicos maciços e bloco de vedação com ligação rígida à estrutura de pilares.

## **1.3 Objetivos**

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

### **1.3.1 Objetivo Geral**

Analisar, comparativamente, o desempenho acústico obtido por ensaios em campo e por simulação computacional em sistemas de pisos com laje bidirecional em um empreendimento habitacional.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar os sistemas de pisos quanto à isolação acústica para ruídos de impacto e ruídos aéreos.
- Analisar, comparativamente, os sistemas quanto ao isolamento dos ruídos de impacto e ruídos aéreos entre a simulação computacional, utilizando o software SONarchitect e ensaios em campo.

## 1.4 Justificativa

Com o crescimento da construção civil no mercado brasileiro, a qualidade das edificações diminuiu significativamente pela falta de mão de obra qualificada. Isso atingiu não apenas as construtoras, mas, principalmente, os fornecedores de matéria prima (PARGA, 2004).

Atualmente, o problema enfrentado é o aumento do custo das edificações para se atingir os níveis de desempenhos mais elevados, sendo que o mais grave disso é a conscientização do consumidor para sentir os efeitos do maior conforto ocasionados pela aplicação de estudos e de materiais diferenciados.

A construção das edificações no Brasil foi privilegiada com a NBR 15575, 2013 que entrou em vigor em julho 2013 e que estabelece regras para a avaliação do desempenho das habitações, auxiliando tanto na parte executiva, quanto nos usos e nas manutenções. Em países europeus, a preocupação com os ruídos e com seus efeitos já têm uma história de mais de 25 anos (PATRÍCIO, 2010).

Na referida norma, em que são avaliados critérios de desempenhos térmicos, acústicos, lumínicos e de segurança ao fogo, o conceito de aplicabilidade para cada um desses desempenhos deve ser analisado individual e isoladamente. A norma define critérios de avaliação em mínimo, intermediário e superior, não especificando tipos de materiais e de técnicas construtivas para se atingir esses resultados, ficando, assim, a critério de cada profissional ou de cada empresa definir os materiais e as técnicas construtivas para atingir o resultado desejado, levando em consideração que, independente de área, do tipo e do padrão de edificação, deve-se atingir o desempenho mínimo.

Hoje em dia, a estimativa do desempenho acústico de edificações ficou mais fácil e rápida de se calcular de acordo com os materiais aplicados e isso se deve à ajuda de softwares computacionais que auxiliam nas especificações durante a etapa de projeto.

Nos países europeus, já está difundida a utilização do software que auxilia os projetistas nos projetos que buscam uma eficiência acústica ampliada, seguindo a norma EN 12354 nas partes 1, 2, 3, 4 e 6.

Uma possibilidade muito difundida em países europeus é a utilização de software de simulação acústica, que faz estimativas do isolamento de ruídos de condução aérea, de ruídos de impacto e dos tempos de reverberação. A partir da

modelagem dos ambientes e da atribuição das características dos materiais que forem empregados na construção, é possível realizar essas estimativas teóricas, mas, para isso, eles têm que possuir resultados de ensaios em laboratórios. Os softwares disponíveis para esses estudos já possuem, no seu banco de dados, informações de materiais ensaiados e utilizados nos países europeus, em que existe uma maior quantidade de estudos sobre isolamentos de portas, janelas, pisos, telhados, fachadas, paredes, materiais, que, na maioria das vezes, não são aplicados no Brasil.

## 2. Fundamentação Teórica

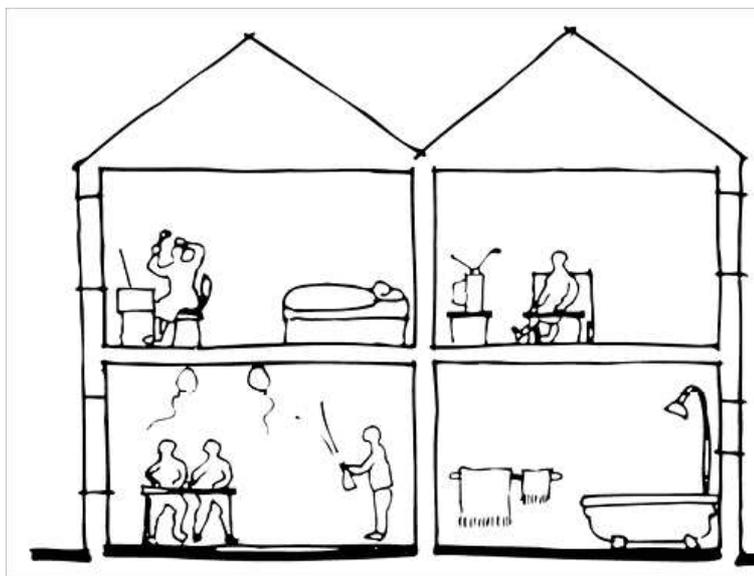
### 2.1 Acústica de edifícios

A transmissão sonora para o interior de uma edificação é gerada pelo efeito da irradiação de vibrações nos elementos dos sistemas construtivos (BISTAFA, 2011) e, para fins de caracterizações na acústica de edifícios, é dividida em som aéreo e som de impacto (PATRÍCIO, 2018).

Os ruídos aéreos são gerados por uma fonte sonora que deriva da excitação direta no ar, meio gasoso, como, por exemplo, os ruídos dos automóveis, trens e aviões.

Os ruídos de impacto são gerados através do choque de corpos sólidos, que exercem a propagação de campos sonoros intensos em distâncias diferentes da origem de propagação, como por exemplo a queda de objetos, caminhar de pessoas ou arrastar de móveis, conforme mostra a Figura 1 que ilustra vários efeitos de ruídos de impactos e aéreos sofridos numa edificação.

Figura 1 – Diversos tipos de ruído nas edificações

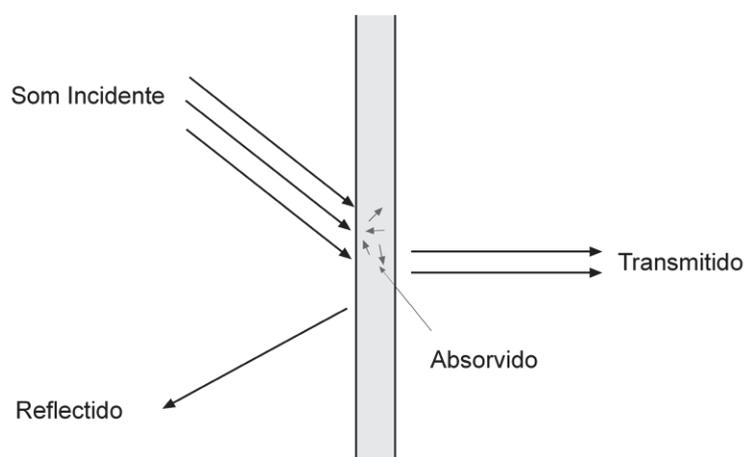


Fonte: Your home (2018).

## 2.2 Transmissão do som aéreo

Por meio de uma fonte geradora de ruído, cria-se uma excitação das moléculas existentes no ar, gerando, assim, ondas longitudinais que se movem para frente e para trás com movimentos ao longo da direção de propagação. Essas ondas, ao trocar de meio, geram uma transferência de energia, sendo que a energia incidente  $E_i$ , indo em direção a uma parede, gera uma energia refletida  $E_r$ , uma energia absorvida  $E_a$ , além de uma energia transmitida  $E_t$  (MARTINS, 2008), conforme a Figura 2.

Figura 2 – Transmissão da energia sonora de um meio para outro.



Fonte: Martins, 2008.

Dessa maneira, a energia que chega ao ambiente receptor é inferior a que originalmente foi emitida. A variação da diferenciação da energia reduzida depende exclusivamente das propriedades dos materiais que compõem o sistema.

Segundo Silva (2005), a energia que se dissipa pelo obstáculo se transforma em energia calorífica ou mecânica, já a energia de reflexão é ocasionada pela onda devolvida ao ambiente mudando de direção.

As ondas sonoras, quando encontram um obstáculo, podem ser refletidas, absorvidas ou transmitidas. A elevada capacidade de isolar o som está relacionada à baixa capacidade de transmissão sonora.

O isolamento e a capacidade de absorção da energia sonora, variam de acordo com sua propriedade, sendo que nem todo o material isolante pode ser considerado um bom absorvedor, pois depende muito de algumas de suas características (SOUZA *et al*, 2007).

Sabe-se que a diferença entre a energia incidente e a energia transmitida revela a qualidade do isolamento acústico do sistema, podendo assim calcular a capacidade que a superfície tem em absorver o som, dado pelo coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ), definido pela Equação 1

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorvida}}}{E_{\text{incidente}}} = \frac{E_{\text{incidente}} - E_{\text{refletida}}}{E_{\text{incidente}}} = 1 - \frac{E_{\text{refletida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (1)$$

Para o cálculo do coeficiente de reflexão sonora ( $\rho$ ), o mesmo é definido pela Equação 2.

$$\rho = \frac{E_{\text{refletida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (2)$$

Considerando as Equações 1 e 2 pode-se avaliar para  $\alpha = 1 - \rho$ , que o resultado  $\alpha = 1$  e  $\rho = 0$ , temos para uma parede totalmente absorvente não ocorrendo reflexão sonora ( $E_{\text{refletida}} = 0$ ), já um resultado para  $\alpha = 0$  e  $\rho = 1$  temos uma parede totalmente reflexiva, sendo assim ( $E_{\text{refletida}} = E_{\text{incidente}}$ ).

Através da diferença entre a energia incidente ( $E_i$ ) e a energia transmitida ( $E_t$ ) define-se o isolamento acústico de uma parede. Sendo assim, ao se relacionar essas duas formas de energia, obtém-se o coeficiente de transmissão sonora ( $\sigma$ ), expresso pela Equação 3.

$$\tau = \frac{E_t}{E_i} \quad (3)$$

O coeficiente de transmissão sonora varia de 0 a 1, se a energia transmitida for igual a incidente, pode-se concluir que  $\sigma = 1$ , dessa forma, toda a energia será transmitida de um ambiente para outro. Por outro lado, se  $\sigma = 0$  demonstra que nada foi transmitido para o outro ambiente.

A Perda de Transmissão Sonora (PT) é expressa em dB, sendo caracterizada como a eficiência do isolamento acústico a mesma que varia de acordo com a propriedade do material utilizado no elemento construtivo. Assim, através da relação logarítmica entre as energias incidente e transmitida, a PT é definida pela Equação 4.

$$PT = 10 \log \frac{E_i}{E_T} = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (4)$$

Assim, pode-se concluir que a PT será diretamente influenciada pelo coeficiente de transmissão sonora, sendo que, quanto menor for o valor, maior será o isolamento de sons aéreos de um determinado fechamento.

Os estudos para determinação da transmissão por via aérea são realizados para fechamentos entre dois compartimentos adjacentes. No entanto, sabe-se que usualmente a transmissão da energia sonora não somente ocorre pelo elemento que separa a fonte sonora do receptor, pois a propagação da onda sonora ocorre pelos elementos que envolvem os espaços como paredes, lajes, forros e tetos. A transmissão que ocorre pela parede que separa os espaços é chamada de transmissão direta, já a transmissão que ocorrer pelos os elementos que envolvem os espaços é chamada por transmissão marginal (QUEIRÓS, 2010).

Sabe-se que é possível definir os vários percursos da transmissão que percorre através da combinação dos elementos existentes que dividem dois compartimentos e os modelos teóricos dessas estimativas estão descritos na norma ISO 12354-1:2017.

O desempenho do isolamento dos sons aéreos em diversos países é dado a partir de um índice de redução sonora (R) ou através de um índice de redução sonora aparente, (R'). Essa redução sonora pode variar de acordo com os elementos utilizados, como uma parede, um pavimento, uma janela e uma porta.

Sabe-se que o índice de redução sonora (R) é obtido através de ensaios em laboratórios, onde há isolamento do material sob condições padronizadas, já no índice de redução sonora aparente (R') é medido através de ensaios em campo "*in situ*" em uma construção qualquer (QUEIRÓS, 2010).

A diferença entre os dois ensaios estabelece que o índice de redução sonora aparente (R') tende a possuir um menor isolamento sonoro, já que se considera dois tipos de transmissões, a direta e a pelos flancos, isto é, a transmissão direta através dos elementos ensaiados e a marginal, que é percorrida através dos elementos conectados entre si. No índice de redução sonora (R), a transmissão é apenas a direta, que ocorre através dos elementos ensaiados (PATRÍCIO, 2010; QUEIRÓS, 2010).

Se uma fonte sonora for colocada em um ambiente fechado e for, repentinamente, desligada, a energia sonora irá decrescer em função do tempo, sendo absorvida pelos elementos que compõem o ambiente. O mesmo ocorre se fecharmos uma torneira de entrada de água, pois, quanto maior o diâmetro dela,

menor será o tempo do esvaziamento, logo, quanto maior a absorção sonora no ambiente, menor será o tempo de reverberação (BISTAFA, 2011).

Define-se como tempo de reverberação o tempo necessário em que a pressão sonora decresça 60 dB após a fonte sonora ter sido desligada. A relação entre o tempo de reverberação e a absorção sonora foi definida, em 1896, por Wallace Sabine e é dada pela Equação 5.

$$T_r = \frac{0,16V}{A_{eq}} \quad (5)$$

em que  $V$  ( $m^3$ ) é o volume do interior do ambiente e  $A_{eq}$  ( $m^2$ ) é a área de absorção sonora equivalente.

O tempo de reverberação varia de acordo com a banda de frequência analisada, assim como a absorção sonora.

Para se obter a expressão do índice de pressão sonora aparente ( $R'$ ), utiliza-se a Equação 6.

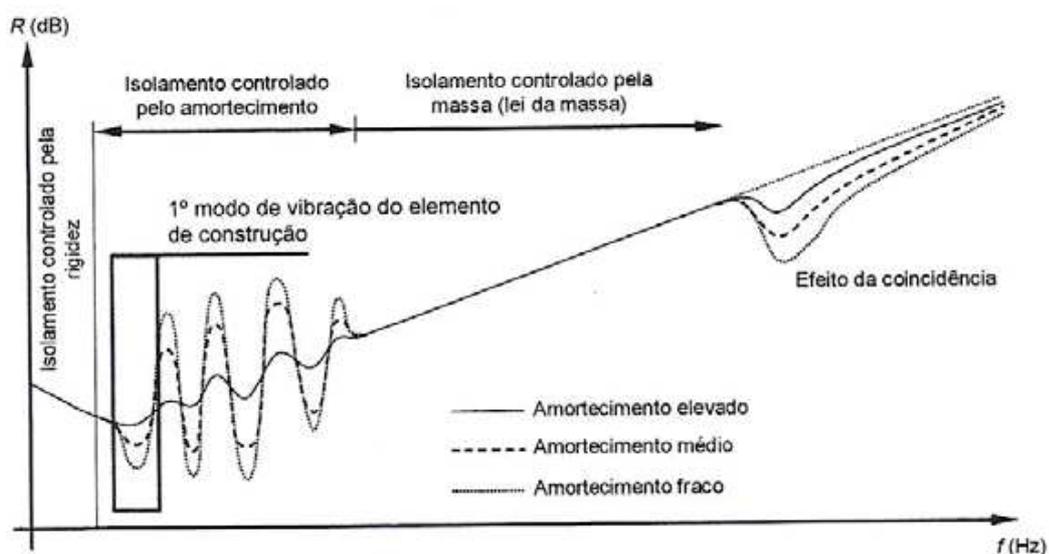
$$R' = L_{p1} - L_{p2} + 10 \log \frac{S_s}{A_2} (dB) \quad (6)$$

sendo  $L_{p1}$  (dB) o nível de pressão sonora no compartimento emissor e  $L_{p2}$  (dB) referente ao nível de pressão sonora no compartimento receptor, permitindo, assim, ser possível determinar o ( $R'$ ) através da medição do nível de pressão sonora nos dois ambientes adjacentes.

Para efeito de projeto, utiliza-se o valor de ( $R$ ) que é obtido apenas em ensaios de laboratório. Esse índice não contempla a parcela das transmissões marginais, apenas a transmissão direta, para a qual as transmissões marginais reais são verificadas nos ensaios em *in situ*.

Para a estimativa teórica de ( $R$ ), considera-se sistemas planos e homogêneos dependendo da sua inércia, da massa e das características elásticas, como o amortecimento interno e a rigidez dos elementos considerados (PATRÍCIO, 2018). Representado a variação do índice de redução sonora ( $R$ ) em relação às variações das frequências em uma placa fina e homogênea de espessura uniforme, servindo como base de estudos dos elementos utilizados nas construções, a Figura 3 demonstra o comportamento típico em função do espectro.

Figura 3 – Comportamento típico de placas homogêneas



Fonte: Smith *et al* (2011).

Nas baixas frequências, a transmissão sonora depende exclusivamente da rigidez do material e, segundo Bistafa (2011), quanto menor a frequência, menor será a isolação sonora.

Na região em que o isolamento é controlado pelo amortecimento, encontra-se a região controlada pela ressonância mecânica, relacionada aos movimentos de flexão existentes. As diversas frequências de ressonâncias na flexão de um painel são dadas pela Equação 7.

$$f_{r_{ij}} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{B}{M} \left( \frac{i}{a^2} + \frac{j}{b^2} \right)} \text{ Hz} \rightarrow [i, j, = 1, 2, 3, \dots] \quad (7)$$

sendo “B” rigidez à flexão do painel e “M” densidade superficial do painel.

Variando-se os índices  $i$  e  $j$ , obtém-se as variações de frequências da ressonância que são transmitidas através de ondas de flexão ao painel e transmitidas às suas bordas, dependendo das condições de contorno. Nos casos de painéis simplesmente apoiados, que contemplam bordas engastadas, as frequências de ressonância, dadas pela Equação 7, terão o dobro de seu valor calculado.

Com o som incidente ao painel, o movimento é amplificado gerando perda na transmissão sonora, sendo que o movimento do painel é controlado pelo amortecimento dele. A energia sonora também é absorvida pelo movimento vibratório do painel, pois geralmente as frequências de superfícies grandes ficam abaixo do limite audível de 20 Hz (QUEIRÓS, 2010; BISTAFA, 2011).

Acima das baixas frequências, pode-se afirmar que o isolamento tem a mesma tendência da lei da massa, sofrendo aumentos e quebras bruscas. Essa situação ocorre quando o elemento sofre a incidência das ondas sonoras e as mesmas igualam a sua frequência natural, para a qual o número de frequências de ressonâncias será igual ao número de graus de liberdade do elemento. Dependendo de como estão fixadas suas extremidades e de suas dimensões, o efeito da ressonância diminui à medida que as frequências vão aumentando (BISTAFA, 2011).

Para a lei da massa, em condições de pressão e temperaturas normais, pode-se simplificar as relações entre variáveis, considerando-se as ondas com incidência normal ao fechamento, através da Equação 8.

$$R = 30 \log(m' f) - 43 \rightarrow (dB) \quad (8)$$

Na região controlada pela lei da massa, considerando-se uma placa homogênea, não são previstas reduções bruscas no índice de redução sonora (R). Essa situação ocorre apenas nas zonas de ressonância e de coincidência (HOPKINS, 2012).

Nas zonas regidas pelo efeito de coincidência, o isolamento acústico é determinado pelas ondas de flexão de um elemento em regime livre ao coincidirem com a vibração causada pela incidência de uma dada onda sonora. O efeito de coincidência para uma determinada frequência acima da frequência crítica aumenta, significativamente, quando a interação do ângulo de incidência de uma onda de flexão coincide com o comprimento da onda sonora incidente no elemento, promovendo assim, a redução do isolamento acústico.

Pode-se determinar a frequência crítica de um dado elemento a partir da Equação 9.

$$f_c = \frac{c_0}{1,8c_L h} \quad (9)$$

sendo h correspondente à espessura do elemento (m) e  $c_L$  refere-se à velocidade de propagação das ondas longitudinais podendo ser obtida pela Equação 10.

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (10)$$

sendo  $E$  se refere ao módulo de elasticidade ( $N/m^2$ ),  $\rho$  é a massa específica do elemento e  $\nu$  é o coeficiente de Poisson que mede a deformação transversal de um material homogêneo.

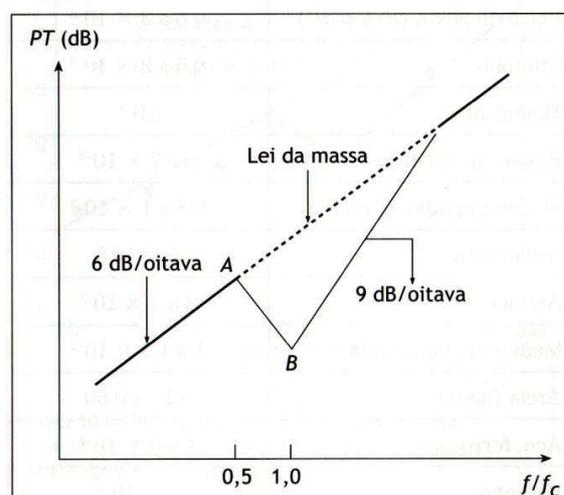
No caso da frequência crítica ( $f_c$ ), BISTAFA (2011) indica a utilização da equação dada pela Equação 11.

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{M}{B}} \quad (11)$$

sendo  $M$  a massa do painel e  $B$  é a rigidez à flexão do painel, sendo que, quanto menor o seu valor, maior a elevação da frequência crítica. Um exemplo é o painel de chumbo, que possui um baixo valor de  $B$  que compromete a isolamento nas baixas frequências, área de maior interesse.

Segundo Bistafa (2011), depois de passar pela frequência crítica a perda na transmissão em painéis sólidos e homogêneos pode ser de 9 dB por oitava, conforme mostra a Figura 4.

Figura 4 – Estimativa de perda na transmissão de painéis sólidos e homogêneos na região controlada pela coincidência



Fonte Bistafa (2011).

Após passada a zona de coincidência, o isolamento sonoro aumenta na faixa de 6 dB por oitava, retornando assim a “Lei da Massa”.

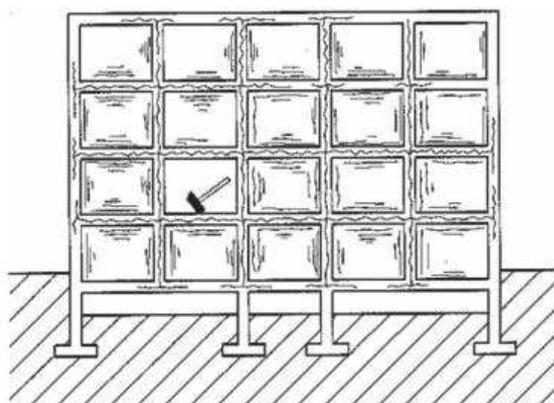
### 2.3 Transmissão do som de impacto

A transmissão sonora ocasionada através do impacto ou da colisão entre materiais sólidos na estrutura de uma edificação como, o andar de pessoas, a queda de objetos, o arrastar de uma cadeira, entre outros, pode gerar ondas quase-longitudinais, de cisalhamento, torsional e de flexão (HOPKINS, 2012). Já, segundo Patrício (2018), o choque exercido sobre os elementos de uma edificação, devido à rigidez das ligações, propaga-se com facilidade através dos elementos que compõem a estrutura, percorrendo por locais distantes do início de sua excitação. Segundo Magalhães (2013), os pilares, as vigas e as lajes servem como propagadores de ondas vibratórias.

Essa excitação mecânica é transmitida pela estrutura e gera uma energia sonora nos ambientes compartimentados que é influenciada pelas características elásticas dos elementos que compõem a edificação.

A Figura 5 ilustra como o ruído de impacto é transmitido pelos elementos que compõem a edificação. Essas vibrações irão depender de acordo com o sistema construtivo, podendo ser de maior ou de menor intensidade.

Figura 5 – Transmissão ao ruído de impacto.



Fonte: Patrício (2018).

A transmissão sonora depende da força do impacto e das características do sistema como um todo. Analisando-se tipos de pisos, paredes, forros, contrapisos etc., pode-se afirmar que a energia transmitida na estrutura irá depender da natureza e da força aplicada, da variação temporal da força, da impedância

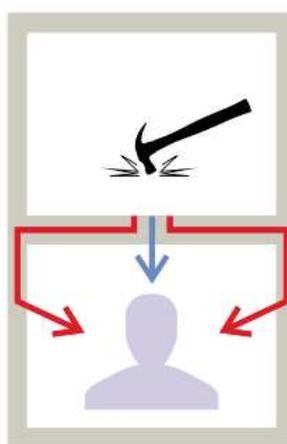
mecânica da estrutura, da velocidade de propagação e da frequência da vibração (LINARES *et al.*, 1996).

Em sistemas construtivos que contemplam maior quantidade de massa, com maior espessura e/ou densidade de massa aparente, será maior a eficiência do isolamento acústico ao ruído aéreo, ocorrendo uma pequena transmissão de energia ao sistema. Já para o ruído de impacto, a lei da massa não é tão eficiente devido à energia aplicada à estrutura gerar vibrações que irradiam nos sistemas que compõem a estrutura (HASSAN, 2009).

Segundo Bistafa (2011), o impacto ocasionado por quedas de objetos e pelo caminhar de pessoas ocasiona grande desconforto ao vizinho do pavimento inferior, visto que a laje se torna um propagador de energia sonora em amplas faixas de frequências.

As transmissões do ruído de impacto ocorrem através de duas formas em ambientes sobrepostos, como demonstra a Figura 6, sendo uma delas a transmissão direta, que ocorre pelo piso e pela laje, e a outra é a transmissão indireta, ocorrendo pelas paredes e pelas vedações verticais.

Figura 6 – Transmissão por flancos.



Fonte: Patricio (2018).

O importante nas transmissões são as vibrações irradiadas por elementos do tipo “barras” e “placas”, pois a radiação sonora será transmitida para ambientes delimitados por placas na forma de sistemas de pisos e de paredes a partir do vínculo com barras na forma de vigas e de pilares (HOPKINS, 2007).

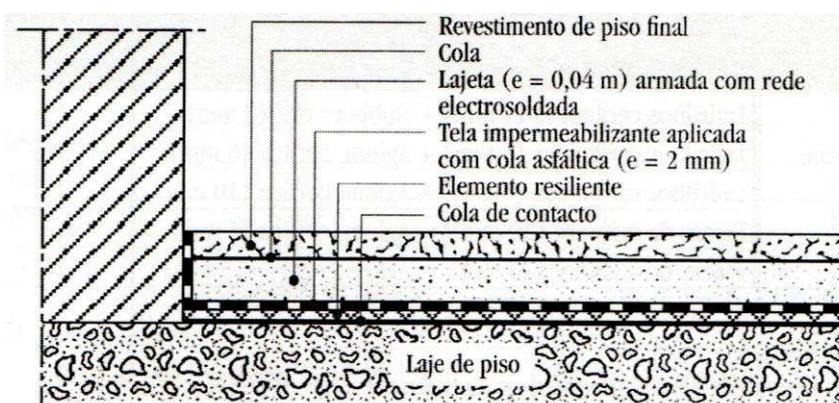
A transmissão do som gerado pelo impacto em laboratório é dada conforme procedimentos da ISO 10140-3, que, através do ensaio, origina o nível sonoro normalizado de impacto ( $L_n$ ). Para o procedimento em laboratório são utilizadas duas câmaras reverberantes, uma delas para o posicionamento da fonte emissora e outra para a recepção dos níveis sonoros. O ensaio consiste na excitação da laje na câmara superior, no caso o ambiente emissor. O equipamento normalizado, que gera a vibração, contém cinco marteleiros de quinhentos gramas cada, liberados em uma queda de quatro centímetros a dez impactos por segundo. Na sala de recepção simultaneamente é medido o nível sonoro médio ( $L_p$ ) (BISTAFA, 2009).

Esse método possibilita a quantificação do som de impacto através dos elementos horizontais da edificação a partir de um valor único  $L_{n,w}$ , especificada pela norma ISO 717-2 (PATRÍCIO, 2010) e definida pela Equação 12.

$$L_{n,eq,0,w} = 160 - \left( 35 \log \left( \frac{m'}{1 \text{ kg/m}^2} \right) \right) \text{ dB} \quad (12)$$

O uso de elementos elásticos, que possuem uma determinada característica de rigidez dinâmica, auxilia na tomada de decisão para escolha dos produtos a serem utilizados na composição de pisos flutuantes (Figura 7). Para a determinação da rigidez dinâmica de materiais elásticos em pisos flutuantes, a norma ISO 9052-1 (1989) apresenta os métodos de ensaio. A norma não se aplica para materiais cujo uso seja destinado a carregamentos inferiores a 0,4 kPa ou superiores a 4 kPa, como, por exemplo, em fundações de edificações.

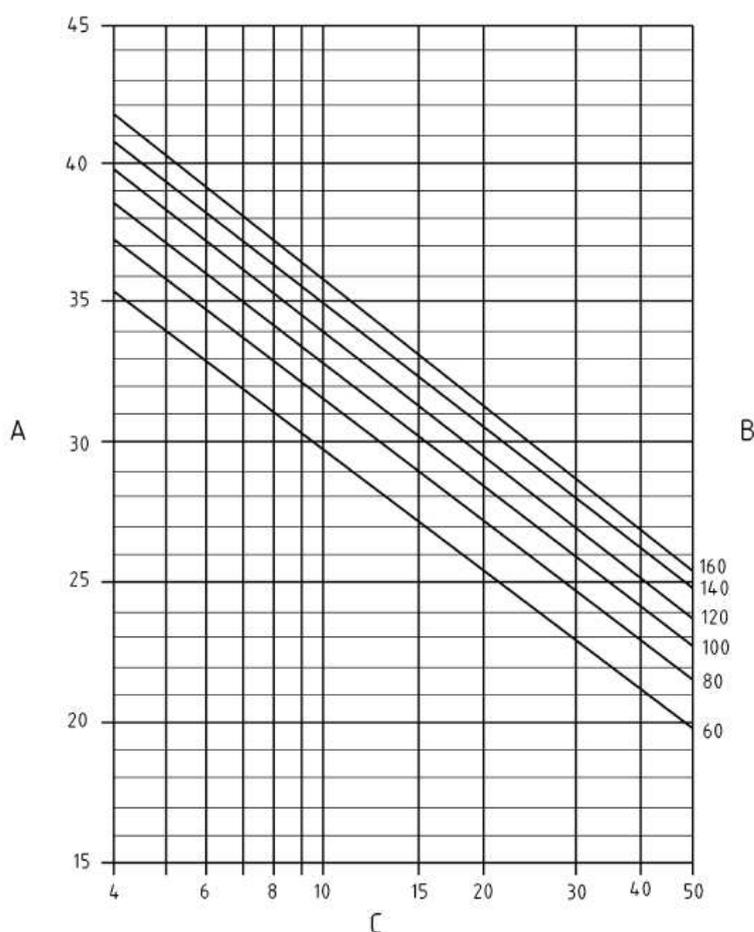
Figura 7 – Exemplo de aplicação de piso flutuante



Fonte: Patrício (2018).

A rigidez dinâmica de uma camada elástica de pisos flutuantes deve ser baixa, sendo que em alguns países europeus, esses materiais devem apresentar um valor de rigidez dinâmica no máximo de  $10 \text{ MN/m}^3$  (ZUCHETTO et al., 2016). Além dessa característica, o material sobre o material elástico, deve ser rígido e o mais denso possível. A redução da transmissão do nível de pressão de ruído de impacto padrão ponderado pode ser estimada conforme a ISO 12354:2 (2017), que apresenta um ábaco para a determinação da redução do nível sonoro a um som de impacto em um piso flutuante, a partir da rigidez dinâmica e da densidade superficial do contrapiso, conforme Figura 8 (BARON et al, 2004; ISO, 2017b).

Figura 8 – Redução ponderada do impacto padrão



Fonte: ISO (2017b, p. 24).

A letra “A” da Figura 8 representa a redução ponderada do nível de pressão sonora de impacto por um pavimento  $\Delta L_w$ , em dB; a Letra “B” representa a massa por unidade de área do piso flutuante, em  $\text{kg/m}^2$ ; e a Letra “C” representa a rigidez dinâmica  $s'$  por unidade de área da camada resiliente, em  $\text{MN/m}^3$ .

O valor do nível de pressão sonora de impacto normalizado ponderado, considerando-se somente a transmissão direta, sem a influência da transmissão por flancos, pode ser obtido com o  $\Delta L_w$ , adicionado na Equação 13.

$$L_{n,d,w} = L_{n,eq,0,w} - \Delta L_w - \Delta L_{d,w} \quad (13)$$

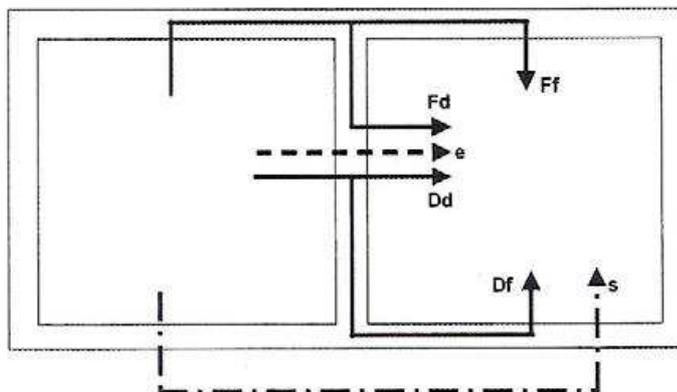
sendo  $L_{n,d,w}$  o nível de pressão sonora de impacto normalizado ponderado para a transmissão direta (dB),  $L_{n,eq,0,w}$  o nível de pressão sonora de impacto normalizado equivalente do piso sem revestimento (dB),  $\Delta L_{d,w}$  a redução ponderada do nível de pressão sonora da camada adicional no lado da recepção de um elemento de separação (dB).

### 2.3 Transmissão por flancos

O índice de isolamento acústico determinado em laboratório para sistemas construtivos é definido pela a transmissão direta em câmaras reverberantes. Nesse caso, a transmissão sonora ocorre diretamente para o ambiente receptor, sem a influência das transmissões por flancos. Em campo, as junções são rígidas, o que permite a transmissão indireta do som, isto é, no ambiente receptor o som também é transmitido por elementos adjacentes, chamados de transmissões por flancos (ALMEIDA, 2009). A transmissão por flancos ocorre tipicamente em ensaios de desempenho acústico para sons aéreos e para sons de impactos realizados em campo (PATRICIO, 2018), mas também pode ser caracterizada isoladamente em laboratório conforme método especificado no conjunto de normas ISO 10848.

A Figura 9 apresenta as diferentes formas de transmissões de energia sonora entre os ambientes emissor e receptor.

Figura 9 – Formas de Transmissão Sonora



Fonte: ISO 12354-1:2017.

A transmissão sonora se dá de forma direta (Dd), através do elemento de separação indireta de portas exteriores ou interiores (s), janelas, aberturas para ventilação (s) e por flancos (Ff) através de várias junções existentes (Fd e Df).

Segundo Patrício (2018), na transmissão por flancos para sons aéreos, até recentemente, não era levada em consideração a definição das características de isolamento sonoro dos elementos de separação principal e dos elementos adjacentes. Para tanto, são utilizados o índice de isolamento de sistemas construtivos em laboratório  $R_w$  e o índice de isolamento sonoro em campo  $R'_w$ , que podem ser adaptados de acordo com a contribuição da transmissão por flancos (ALMEIDA, 2009).

Para o ruído aéreo, as relações entre  $R_w$  e  $R'_w$  pode ser assim resumida, conforme indicado por Patrício (2018):

- para  $R_w \leq 35$  dB, a contribuição para transmissão por flancos é igual a 0 dB, isto é,  $R_w = R'_w$ , ocorre em que a massa do elemento de separação é muito menor do que a massa do elemento adjacente, sendo a transmissão por flancos praticamente desprezível.

- para  $35 \text{ dB} < R_w \leq 45$  dB na contribuição da transmissão por flancos, dá-se uma redução do índice de isolamento sonoro de 3 dB, isto é,  $R_w = R'_w - 3$ , quando a massa do elemento de separação for igual a massa do elemento adjacente, a transmissão direta é igual a que ocorre na indireta.

- para  $45 < R_w \leq 55$  dB na contribuição da transmissão por flancos, dá-se uma redução do índice de redução sonora de 4 dB, isto é,  $R_w = R'_w - 4$ .

- para valores acima de  $R_w > 55$  dB é importante a determinação da transmissão por flancos através da norma ISO 12354-2:2017.

Ainda segundo Patricio (2018), a contribuição por transmissão por flancos tem uma influência muito significativa na redução do índice de redução sonora, e pode ser bastante complexa. Alguns autores, como medida de segurança propõem, uma redução de 5 dB, isto é,  $R_w = R'_w - 5$ , tanto para  $R_w > 55$  dB, quanto para  $45 < R_w \leq 55$  dB, pois a massa adjacente é muito menor que a massa do elemento de separação, sendo que a energia sonora é propagada por quase sua totalidade pelos flancos, diminuindo a eficácia do sistema de compartimentação principal (PATRICIO, 2010; ALMEIDA, 2009).

A ISO 12354-1 quantifica o fator de transmissão de energia sonora total radiada para o compartimento receptor, proveniente da excitação aérea no espaço do emissor, em que é dado, pela Equação 14, para cada banda de frequência de interesse.

$$\tau' = \tau_d + \sum_{f=1}^n \tau_f + \sum_{e=1}^m \tau_e + \sum_{s=1}^k \tau_s \quad (14)$$

Onde:

- $\tau'$  - fator de transmissão da energia sonora total radiada para o compartimento receptor;
- $\tau_d$  – fator de transmissão da energia sonora radiada para o compartimento receptor por via direta;
- $\tau_f$  – fator de transmissão da energia sonora radiada para o compartimento receptor pelos flancos;
- $\tau_e$  – fator de transmissão da energia sonora radiada para o compartimento receptor por pequenos elementos onde ocorrer transmissão direta, por exemplo, aberturas, ou sistemas de ventilação;
- $\tau_s$  – fator de transmissão da energia sonora radiada para o compartimento receptor por outras vias de transmissão indireta, por exemplo, propagação pelo exterior do edifício, através de janelas dos respectivos compartimentos, ou no caso de verificação do isolamento entre espaços de zonas comuns como corredores interiores;
- $n$  – número total de flancos, por norma  $n = 4$ ;
- $m$  – número de pequenos elementos;

- k – número de vias de transmissão indireta.

A Equação 15 resulta no valor da redução sonora global que corresponde aos diferentes caminhos das transmissões, conforme ilustra a Figura 9.

$$R' = -10 \log \tau' \quad (15)$$

O fator de transmissão de energia sonora radiada para o compartimento receptor é dado pela Equação 16.

$$\tau = 10^{-R/10} \quad (16)$$

A Equação 17 traduz a redução sonora global dada pela transmissão direta e por flancos;

$$R'_w = -10 \log \left[ 10^{\frac{-R_{Dd,w}}{10}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{\frac{-R_{Ff,w}}{10}} + \sum_{f=1}^n 10^{\frac{-R_{Df,w}}{10}} + \sum_{F=1}^n 10^{\frac{-R_{Fd,w}}{10}} \right] \quad (17)$$

onde o índice de isolamento sonoro relativo à transmissão direta constante na Equação 17, que determina a transmissão do caminho percorrido pelo Dd, é dado pela Equação 18.

$$R_{Dd,w} = R_{s,w} + \Delta R_{Dd,w} \quad (18)$$

onde  $R_{s,w}$  é o isolamento sonoro do elemento de separação determinado em laboratório, ou estimado através de métodos provisionais, expresso em dB.

Já os demais índices de reduções sonoras das transmissões, de acordo com a Figura 9, são aplicados a elementos que não estejam rigidamente ligados aos elementos envolventes, conforme a Equação 19, Equação 20 e Equação 21.

$$R_{Ff,w} = \frac{R_{F,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Ff,w} + K_{Ff} + 10 \log \frac{S_s}{1_0 L_f} \quad (19)$$

$$R_{Fd,w} = \frac{R_{F,w} + R_{s,w}}{2} + \Delta R_{Fd,w} + K_{Fd} + 10 \log \frac{S_s}{1_0 L_f} \quad (20)$$

$$R_{Df,w} = \frac{R_{s,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Df,w} + K_{Df} + 10 \log \frac{S_s}{1_0 L_f} \quad (21)$$

Onde:

$R_{F,w}$  é o índice de redução sonora por flancos do elemento F, no compartimento emissor, em dB;

$R_{f,w}$  é o índice de redução sonora por flancos do elemento f, no compartimento receptor, em dB;

$\Delta R_{Ff,w}$  é o acréscimo de isolamento sonoro, por introdução de um revestimento adicional, colocado nos flancos do elemento do espaço emissor ou receptor, em dB;

$\Delta R_{Fd,w}$  é o acréscimo de isolamento sonoro, por introdução de um revestimento adicional, colocado nos flancos do elemento do espaço emissor ou no elemento de separação no lado do espaço receptor, em dB;

$\Delta R_{Df,w}$  é o acréscimo de isolamento sonoro, por introdução de um revestimento adicional, colocado no elemento de separação no lado do emissor ou no flancos do espaço receptor, em dB;

$k_{Ff}$ : é o índice de redução de transmissão de vibrações pelo encaminhamento Ff, em dB;

$k_{Fd}$ : é o índice de redução de transmissões de vibrações pelo encaminhamento Fd, em dB;

$k_{Df}$ : é o índice de redução de transmissões de vibrações, pelo encaminhamento Df, em dB;

$S_s$ : é a superfície do elemento de separação, em m<sup>2</sup>;

$L_f$ : é o comprimento da linha de junção entre o elemento de separação e os elementos de flancos F e f, em metros;

$l_0$  é o comprimento da linha de junção de referência, igual a um metro.

É importante salientar que se faz necessário conhecer os valores de isolamento sonoro dos elementos de compartimentação e dos materiais acrescidos como revestimentos adicionais, sendo esses valores determinados em laboratório para as várias tipologias de compartimentação, como paredes de alvenaria de várias espessuras, divisórias de gesso e etc.

O  $k_{ij}$ , é correlacionado com cada tipo de junção e são definidas entre a relação da massa superficial e dos elementos de compartimentação presente na ISO 12354-1:2017, em que essa relação é designada de máxima definida pela Equação 22.

$$M = \text{Log} \left( \frac{m_i}{m_j} \right) \quad (22)$$

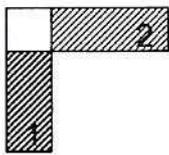
Onde:

- $m_i$  é a massa superficial do elemento  $i$  no caminho de transmissão  $ij$  [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ];
- $m_j$  é a massa superficial do elemento perpendicular a  $i$  no caminho de transmissão  $ij$  [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ].

Podendo, também, serem calculados os seguintes índices de redução da transmissão de vibração com diferentes tipos de junções, de acordo com Patrício (2010), conforme os exemplos:

- Ligações rígidas:

Ângulos



$$K_{12} = 15|M| - 3 = k_{21}$$

em que:

$$M = \log \left( \frac{m_2}{m_1} \right)$$

- Mudanças de espessura:

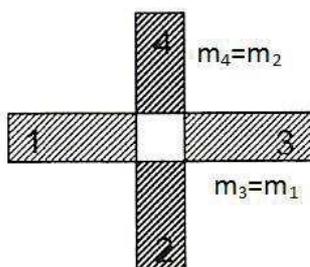


$$K_{12} = 5M^2 - 5 = k_{21}$$

em que:

$$M = \log \left( \frac{m_2}{m_1} \right)$$

- Ligações em cruz:



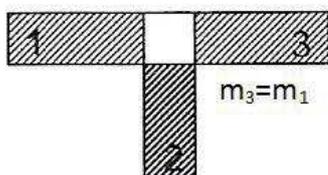
$$K_{13} = 8,7 + 17,1xM + 5,7xM^2$$

$$K_{12} = 8,7 + 5,7xM^2 = K_{23}$$

em que:

$$M = \log\left(\frac{m_2}{m_1}\right)$$

- Ligações em T:



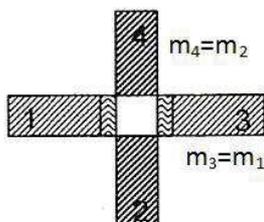
$$K_{13} = 5,7 + 14,1xM + 5,7xM^2$$

$$K_{12} = 5,7 + 5,7xM^2$$

em que:

$$M = \log\left(\frac{m_2}{m_1}\right)$$

- Ligações com camadas resilientes:



$$K_{13} = 5,7 + 14,1xM + 5,7xM^2 + 2\Delta_1$$

$$K_{12} = 5,7 + 5,7xM^2 + \Delta_1 = K_{23}$$

$$-4 \leq (K_{24} = 3,7 + 14,1xM + 5,7xM^2) \leq 0dB$$

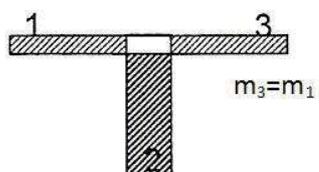
em que:

$$M = \log\left(\frac{m_2}{m_1}\right)$$

$$\Delta_1 = 10 \log\left(\frac{f}{f_1}\right) \text{ com } \rightarrow f \triangleright f_1$$

$$f_1 = 125 \text{ Hz} \rightarrow se \frac{E_1}{t_1} \approx 100 \text{ MN} / m^3$$

- Ligações de fachadas com sistemas leves:



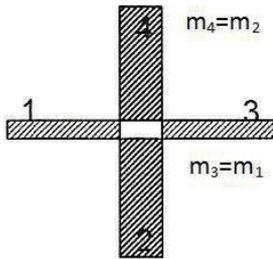
$$K_{13} = 5 + 10xM$$

$$K_{12} = 10 + 10x|M| = K_{23}$$

em que:

$$M = \log\left(\frac{m_2}{m_1}\right)$$

- Ligação de paredes duplas leves e elementos homogêneos:



$$K_{13} = 10 + 20xM - 3,3x \log\left(\frac{f}{f_k}\right)$$

$$K_{24} = 3 + 14,1xM + 5,7xM^2 \rightarrow \frac{m_2}{m_1} > 3$$

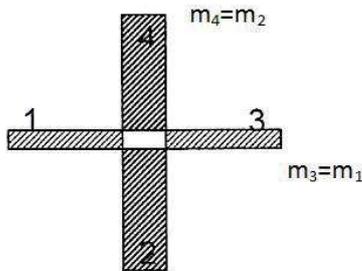
$$K_{12} = 10 + 10x|M| + 3,3x \log\left(\frac{f}{f_k}\right) = K_{23}$$

em que:

$$M = \log\left(\frac{m_2}{m_1}\right)$$

$$f_k = 500 \text{ Hz}$$

- Ligação de paredes duplas e leves acopladas:



$$K_{13} = 10 + 20xM - 3,3x \log\left(\frac{f}{f_k}\right)$$

$$K_{12} = 10 + 10x|M| + 3,3x \log\left(\frac{f}{f_k}\right) = K_{23}$$

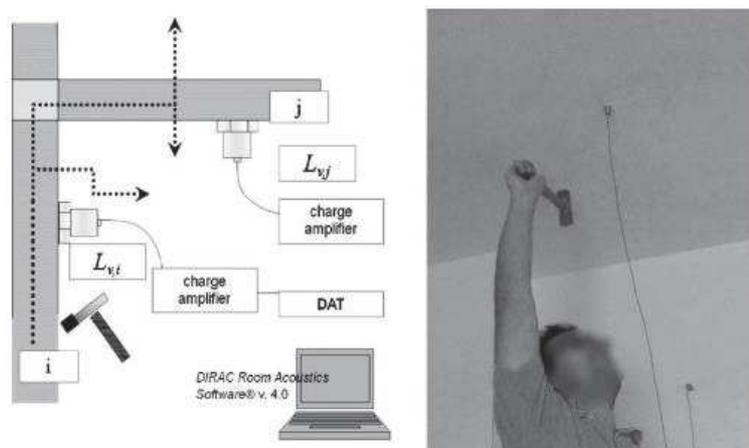
em que:

$$M = \log\left(\frac{m_2}{m_1}\right)$$

$$f_k = 500 \text{ Hz}$$

Para aplicação das equações anteriormente referidas, faz-se necessário a quantificação dos valores de redução das transmissões por vibrações, o  $K_{ij}$ , gerados através da transmissão de energia sonora entre os compartimentos, sendo analisado através de vários tipos de junções que a malha de compartimentação de um edifício (PATRICIO, 2018). Essas análises são realizadas em laboratório, a partir da excitação mecânica dos sistemas construtivos e as consequentes respostas vibracionais dos elementos adjacentes, conforme pode ser visualizado na Figura 10, em estudo conduzido por Schiavi e Astolfi (2010).

Figura 10 – Exemplo de estudo de quantificação da transmissão por flancos



Fonte: Schiavi; Astolfi, 2010.

## 2.4 Descritores acústicos

Os descritores acústicos atualmente são usados em vários países de forma diferente, dificultando uma normativa internacional sobre os aprofundamentos acústicos, o que acaba ocasionando uma confusão para a indústria da construção.

Importante seria providenciar uma classificação única nas faixas de frequências e nos métodos parametrizados nas avaliações, harmonizando os descritores para o isolamento aéreo e para o de impacto (RASMUSSEN *et al.*, 2014).

As regulamentações que estabelecem critérios e limites de acústica servem como proteção à saúde dos cidadãos, sejam nas suas habitações, no meio urbano, nas áreas de lazer, no trabalho, nas escolas e nos demais ambientes que contemplem a permanência das pessoas, pois segundo OMS (Organização Mundial da Saúde) já foi por muitos pesquisadores que o ruído em excesso prejudica a saúde (MACHIMBARRENA; RASMUSSEN; MONTEIRO, 2019).

Segundo Machimbarrena (2016) os descritores acústicos utilizados são diferentes nos países da América do Sul e na Europa. Nos países da América do Sul que já possuem alguma normativa em isolamentos acústicos como Argentina, Brasil e Chile, que juntos correspondem a 68% da superfície e 64% da população, já existem regulamentos baseados na norma internacional ISO para reduções sonoras; já em países como Peru, Colômbia e Bolívia, que juntos possuem 21,5% da população, não possuem legislações que contemplem isolamentos acústicos.

No caso dos países europeus, a comparação entre os descritores na Áustria, na Bélgica, na República Tcheca, na Dinamarca e na Espanha, pode ser vista no Quadro 1, com o resumo dos requisitos acústico dos oito países.

Quadro 1 – Requisitos de isolamento acústico para habitações multifamiliares em oito países.

<b>Isolamento acústico entre divisórias de unidades multifamiliares– Requisitos</b>			
<b>País</b>	<b>Requisitos ao ruído aéreo [dB]</b>	<b>Requisitos ao ruído de impacto [dB]</b>	<b>Comentários</b>
<b>Argentina</b>	$R'_w \geq 50$	$L'_{n,w} \leq 53$	Não obrigatório.
<b>Brasil</b>	$D_{nT,w} \geq 45$	$L'_{nT,w} \leq 80$	Obrigatório
<b>Chile</b>	$R_A / R'_A \geq 45$	$L_{n,w} \leq 75$	Obrigatório
<b>Austria</b>	$D_{nT,w} \geq 55$	$L'_{nT,w} \leq 48$	Requisitos para casas geminadas
<b>Bélgica</b>	$D_{nT,w} \geq 54$	$L'_{nT,w} \leq 58$	
<b>Rep. Tcheca</b>	$R'_w \geq 53$	$L'_{n,w} \leq 55$	
<b>Dinamarca</b>	$R'_w \geq 55$	$L'_{n,w} \leq 53$	
<b>Espanha</b>	$D_{nT,A}^* \approx D_{nT,w} + C \geq 50$	$L'_{nT,w} \leq 65$	* $D_{nT,A}$ de 100 Hz to 5000 Hz

Adaptado de: Machinbarrena, Rasmussen (2016).

No que diz respeito ao isolamento aéreo, temos quatro descritores ( $R'_w$ ,  $R_A/R'_A$ ,  $D_{nT,w}$ ,  $D_{nT,A}$ ) diferentes nos oito países, com requisitos que variam dos 55 dB a 45 dB e faixas de frequências não homogêneas, para o isolamento do ruído de impacto, sendo que apenas dois descritores se diferenciam ( $L'_{n,w}$ ,  $L'_{nT,w}$ ), nos quais os requisitos variam de 48 a 80 dB.

A harmonização dos descritores acústicos nos países teria como objetivo principal melhorar o desempenho acústico das edificações através de requisitos e dos regulamentos básicos desenvolvendo, assim, a consciência entre as autoridades e as indústrias da construção civil para o desenvolvimento de uma classificação acústica comum para as edificações, o que seria de grande importância, já que muitos países estão em processo de desenvolvimento dos requisitos acústicos (MACHIMBARRENA; RASMUSSEN; MONTEIRO, 2019).

No Brasil, os descritores acústicos passaram a ser adotados para fins de atendimento de critérios normativos com a norma brasileira NBR 15575:2013, que determina níveis não apenas para desempenho acústico, mas contempla diferentes tipos de classificações de desempenho para ambientes e para sistemas construtivos em edificações habitacionais.

A norma é dividida em seis partes, que evidenciam os respectivos desempenhos acústicos dos sistemas de uma edificação, mostrados no Quadro 2.

Quadro 2 – Desempenhos acústicos dos sistemas de uma edificação.

PARTE	EXIGÊNCIA
<b>1. Geral</b>	1 Isolamento acústico de paredes externas 2 Isolamento acústico entre salas adjacentes 3 Ruído de impacto e ruído gerado pelos equipamentos
<b>2. Sistemas Estruturais</b>	1 Desempenho acústico dos sistemas estruturais
<b>3. Pisos Internos</b>	1 Ruído de impacto em pisos 2 Isolamento ao ruído aéreo de pisos entre unidades residenciais
<b>4. Paredes Internas e Externas</b>	1 Nível máximo de pressão sonora na residência
<b>5. Terraços e Pisos</b>	1 Isolamento ao ruído aéreo de pisos terraço. Isolamento de som de ruído de impacto de terraço acessíveis ao público.
<b>6. Sistemas Hidrosanitários</b>	1 Limitação de ruído hidrosanitário

Fonte: Adaptado norma 15575:2013.

A norma 15575 contempla níveis de desempenho divididos em (M) mínimo, (I) intermediário e (S) superior. Esses requisitos devem ser estritamente atendidos pelas construtoras e pelas incorporadoras.

Nessa norma, não fica obrigatório o isolamento acústico aos ruídos ocasionados por equipamentos prediais, apenas um anexo como informativo para o tratamento do ruído gerado. Nos demais requisitos, o empreendedor fica com o critério de definição do nível que quer atender e fica apenas obrigatório atingir o mínimo (M) (HOLTZ; SCHMITT, 2015).

Para as medições acústicas em campo, são indicadas diretrizes de normas internacionais ISO 140:1998 partes 4 e 7, *Acoustic – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements*, ou ISO 10052:2004 – *Acoustics – Field measurements of airborne and impact sound insulation and of service equipment sound – Survey method*. Já para as medições realizadas em laboratório, utiliza-se o conjunto de normas ISO 10140:2010 – *Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements*.

A ISO 717:1996 – *Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements*, serve para a ponderação dos valores medidos em laboratório e em campo.

Os descritores estabelecidos, segundo a NBR 15575:2013, em medições de ruído aéreo e de impacto estão listados a seguir:

- $D_{n,T,w}$  – Diferença padronizada de nível de pressão sonora ponderada, em dB para elementos verticais internos de vedação medidos em campo e paredes;
- $D_{2m,n,T,w}$  – Diferença padronizada de nível de pressão sonora ponderada com fonte a 2 m de distância da fachada, em dB, fachadas medidas em campo;
- $R_w$  – Índice de redução sonora ponderado, em dB, elementos construtivos ensaiados em laboratório;
- $L_{n,T,w}$  – Nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado, em dB, para sistemas de pisos.

Em que os parâmetros para o desempenho acústico ao ruído aéreo em campo estão descritos no Quadro 3 de acordo com os valores, mínimo (M), intermediário (I) e superior (S).

Quadro 3 – Parâmetros do desempenho acústico.

<b>Elemento</b>	<b><math>D_{nT,w}</math> [dB]</b>	<b>Nível de desempenho</b>
Parede entre unidades habitacionais autônomas (parede de germinação), nas situações onde não haja ambiente dormitório	40 a 44	M
	45 a 49	I
	≥50	S
Parede entre unidades habitacionais autônomas (parede de germinação), no caso em que pelo menos um ambiente é dormitório	45 a 49	M
	50 a 55	I
	≥55	S
Parede cega de dormitório entre uma unidade habitacional e áreas comuns de trânsito eventual como corredores e escadaria dos pavimentos	40 a 44	M
	45 a 49	I
	≥50	S
Parede cega de salas e cozinhas entre uma unidade habitacional e área comuns de trânsito eventual coo corredores e escadaria dos pavimentos	30 a 34	M
	35 a 39	I
	≥40	S
Parede cega entre uma unidade habitacional e áreas comuns de permanência de pessoas, atividades de lazer e atividades esportivas, como home theater, salas de ginástica, salão de festas, salão de jogos, banheiros e vestiários coletivos, cozinhas e lavanderias coletivas	45 a 49	M
	50 a 54	I
	≥55	S
Conjunto de paredes e portas de unidades distintas separadas pelo hall ( $D_{nT,w}$ obtida entre as unidades)	40 a 44	M
	45 a 49	I
	≥50	S

Adaptado de: ABNT NBR 15575-4:2013.

Nas medições de ruído de impacto os valores de  $L'_{n,T,w}$  que atendem a parte três da norma 15.575, os parâmetros seguem descritos no Quadro 4.

Quadro 4 – medições do ruído de impacto.

<b>Elemento</b>	<b><math>L'_{n,T,w}</math> dB</b>
Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas posicionadas em pavimentos distintos	≤80
Sistema de piso de áreas de uso coletivo (atividades de lazer e esportivas, como home theater, salas de ginástica, salão de festas, salão de jogos, banheiros e vestiários coletivos, cozinhas e lavanderias coletivas) sobre unidades habitacionais autônomas	≤55

Adaptado de: ABNT NBR 15575-4:2013.

Cabe ressaltar que a NBR 15575:2013, para sua implementação, foi baseada em normas internacionais ISO para procedimentos de ensaios e de isolamentos sonoros dos ruídos de impactos e dos aéreos. As normas utilizadas para medições em campo foram as ISO 140:1998 parte 4 e a ISO 140:1998 parte 7 e, para valores de tempos de reverberação dos ambientes receptores, a ISO 3382:2008 parte 2.

As medições sonoras em laboratórios dos ruídos de impactos e aéreos seguem as especificações da ISO 10140:2010-2 e da ISO 10140:2010-3, sendo sugerida, para valores da obtenção do Tempo de Reverberação TR das câmaras receptoras, a ISO 354:2003.

As medições geram valores de perda de transmissão PT, para ensaios em laboratório e em campo em função das frequências, sendo que, para a obtenção de um valor único, deve-se utilizar a ISO 717:1996-1, para ruídos aéreos, utilizando a curva da ponderação e, para os ruídos de impacto, a ISO 717:1996-2.

Vale salientar que as normas internacionais ISO 140 foram atualizadas em 2010 pelas normas internacionais ISO 10140.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a simulação do empreendimento, foi utilizada a ferramenta computacional SONarchitect, sendo que os resultados foram comparados com os resultados de ensaios obtidos em campo.

Para esta pesquisa, foi necessário buscar parâmetros de elementos construtivos já ensaiados, para o atendimento dos dados de input do software.

Para a realização deste trabalho foram realizadas as seguintes etapas:

1. Escolha do empreendimento, com as especificações e o detalhamento dos materiais utilizados;
2. Medições em campo dos níveis de ruídos de impactos e aéreos;
3. Utilização do software *SONarchitect* para simulações das transmissões sonoras aos ruídos de impacto e aos ruídos aéreos;
4. Comparativos dos resultados obtidos pela simulação e em campo.

#### 3.1 Empreendimento e detalhamento dos materiais utilizados

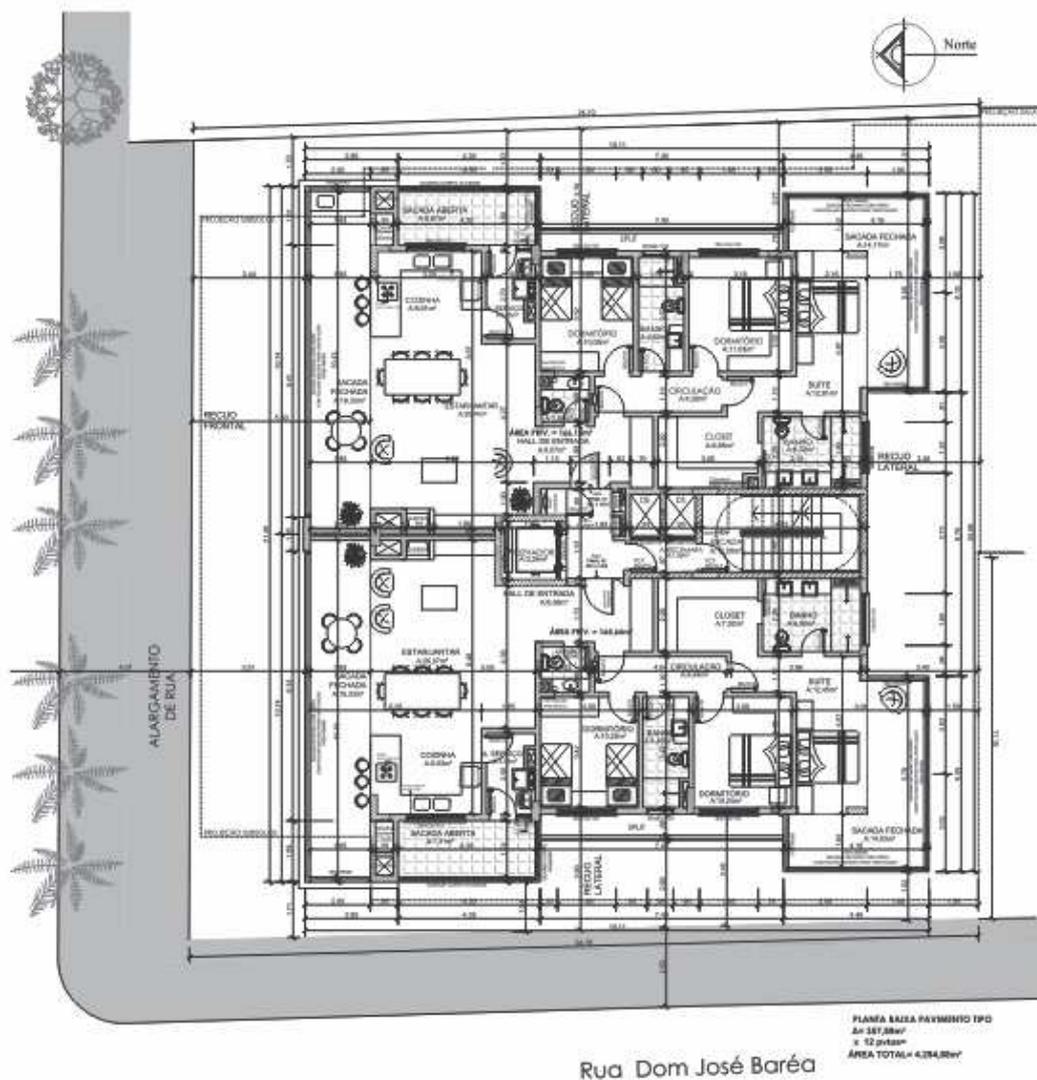
O empreendimento utilizado neste trabalho está localizado na cidade de Bento Gonçalves – RS, no bairro São Bento (Figura 11).

Na Figura 12, a planta do pavimento tipo pode ser visualizada. O empreendimento é constituído por dois apartamentos por andar, sendo cada um de três dormitórios, com áreas relativas de 166 m<sup>2</sup> privativos.

Figura 11 – Imagem externa do empreendimento



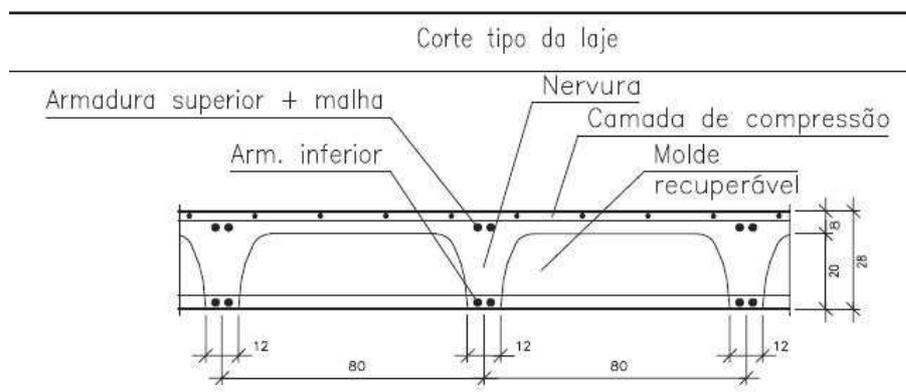
Figura 12 – Planta do pavimento tipo do empreendimento



O sistema construtivo da supra estrutura foi com laje bidirecional em todos os pavimentos, como descrito abaixo e seu detalhamento encontra-se na Figura 13.

- Laje bidirecional com nervuras de 12 cm
- Capa de laje de 8 cm;
- Concreto de  $f_{ck}$  25 Mpa;

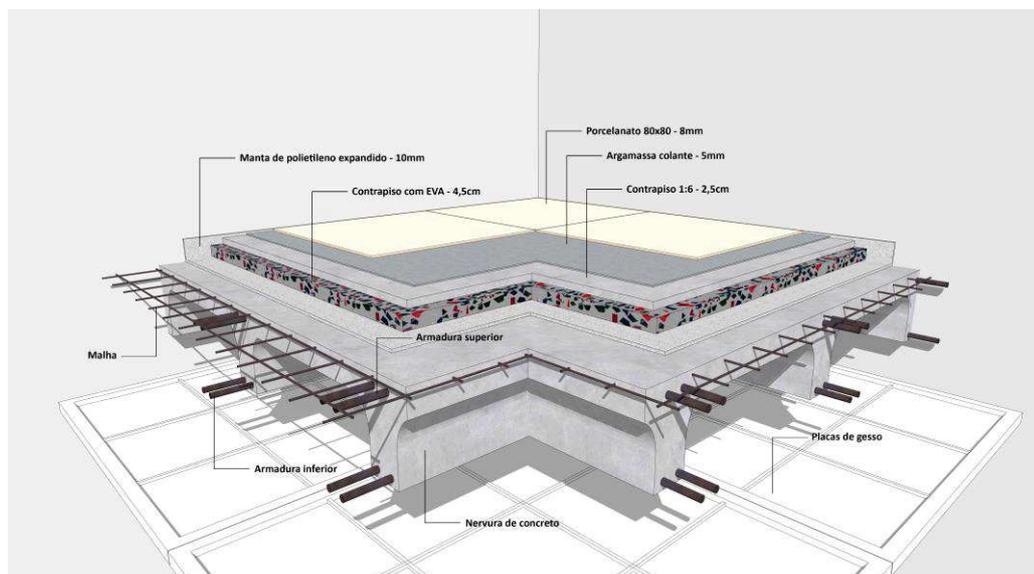
Figura 13 – Detalhamento estrutural da laje



O sistema construtivo no ensaio “A” está descrito da seguinte forma e detalhado na Figura 14

- Manta de Polietileno Expandido (EPE),  $e = 10$  mm, densidade  $20 \text{ kg/m}^3$  e rigidez dinâmica  $28 \text{ MN/m}^3$ ;
- Contrapiso com agregado sintético de borracha EVA traço (200 kg cimento, 125 kg de cinza volante, 460 kg de areia natural, 180 l de água, 2 l de polifuncional e 8,5 Sc de EVA),  $e = 4,5$  cm;
- Contrapiso de argamassa traço (1:6),  $e = 2,5$  cm;
- Porcelanato de espessura 1,0 cm aplicados com ACII de  $e = 1,5$  cm;
- Forro de Gesso convencional com placas de tamanho 65 x 65 cm de espessura  $e = 3$  cm nas bordas e 1,8 cm no meio com reforços, peso por placa 6 kg.

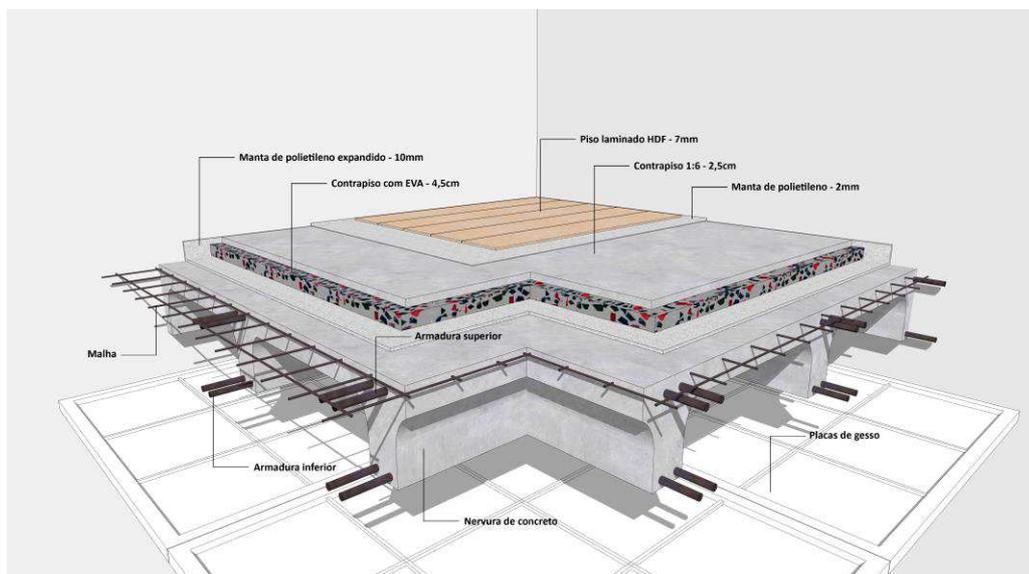
Figura 14 – Detalhamento do sistema de piso no ensaio “A”



Já o sistema construtivo nos ensaios “B” e “D”, está descrito da seguinte forma e detalhado na Figura 15.

- Manta de Polietileno Expandido (EPE),  $e = 10$  mm, densidade  $20 \text{ kg/m}^3$  e rigidez dinâmica  $28 \text{ MN/m}^3$ ;
- Contrapiso com agregado sintético de borracha EVA traço (200 kg cimento, 125 kg de cinza volante, 460 kg de areia natural, 180 l de água, 2 l de polifuncional e 8,5 Sc de EVA),  $e = 4,5$  cm;
- Contrapiso de argamassa traço (1:6),  $e = 2,5$  cm;
- Piso laminado Durafloor Linha Ritz,  $e = 7$  mm, feito em HDF, manta de polietileno,  $e = 2$  mm, espuma + capa plástica para proteção contra umidade;
- Forro de Gesso convencional com placas de tamanho  $65 \times 65$  cm de espessura  $e = 3$  cm nas bordas e  $1,8$  cm no meio com reforços, peso por placa 6 kg.

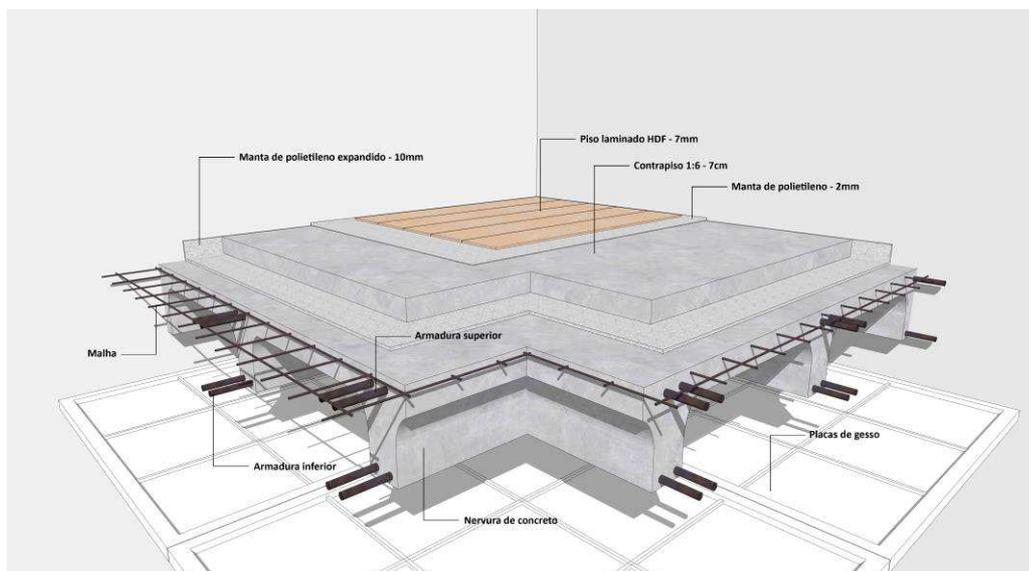
Figura 15 – Detalhamento do sistema de piso no ensaio “B e D”



O sistema construtivo no ensaio “C” está descrito da seguinte forma e detalhado na Figura 16.

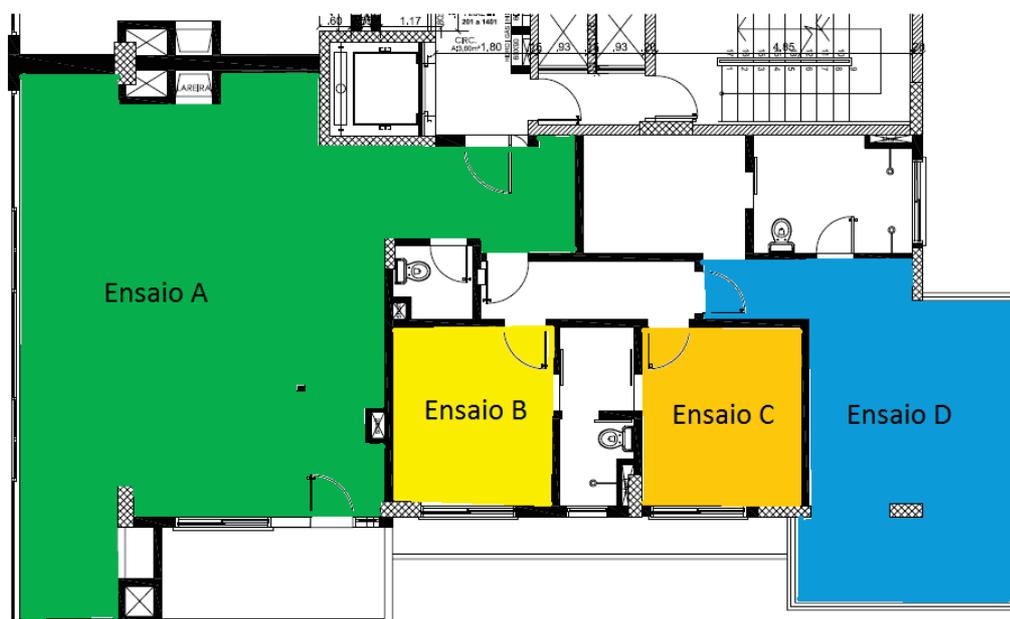
- Manta de Polietileno Expandido (EPE),  $e = 10 \text{ mm}$ , densidade  $20 \text{ kg/m}^3$  e rigidez dinâmica  $28 \text{ MN/m}^3$ ;
- Contrapiso de argamassa traço (1:6),  $e = 7,0 \text{ cm}$ ;
- Piso laminado Durafloor Linha Ritz,  $e = 7 \text{ mm}$ , feito em HDF, manta de polietileno,  $e = 2 \text{ mm}$ , espuma + capa plástica para proteção umidade;
- Forro de Gesso convencional com placas de tamanho  $65 \times 65 \text{ cm}$  de espessura  $e = 3 \text{ cm}$  nas bordas e  $1,8 \text{ cm}$  no meio com reforços, peso por placa  $6 \text{ kg}$ .

Figura 16 – Detalhamento do sistema de piso no ensaio “C”



A Figura 17 ilustra a localização dos sistemas de pisos nos ambientes adotados neste trabalho. Nos ambientes sala, cozinha e hall de entrada está localizado o ensaio “A”, sendo que o ambiente possui uma área total de 66,27 m<sup>2</sup> e volume de 165,27 m<sup>3</sup>. No dormitório ensaio “B”, a área do ambiente é de 10,25 m<sup>2</sup> e volume de 26,25 m<sup>3</sup>. No dormitório ensaio “C”, a área do ambiente é de 10,24 m<sup>2</sup> e volume de 25,48 m<sup>3</sup>. Já a suíte do casal, constitui de uma área de 26,56 m<sup>2</sup> e um volume de 66,40 m<sup>3</sup>, ensaio “D”.

Figura 17 – Localização dos ensaios



A escolha dos sistemas analisados foi baseada nas variações de cada ambiente, com diferenças entre as áreas e os formatos dos sistemas de vedação vertical interna (SVVI) e o sistema de vedação vertical externa (SVVE), constituído por materiais de sistemas diferentes.

No ambiente de ensaio “A”, que detém a maior área, há dois tipos de (SVVE), esquadrias de alumínio *thermal break* com poliamida, gerando um coeficiente de transmissão térmica (U) de 3,4 w/m<sup>2</sup>k, com espessura do perfil até 1,6 mm de liga 6063, sendo também utilizado na esquadria da suíte do ensaio “D”, demonstrado na Figura 17 e seu detalhamento na Figura 18. Na face norte da edificação tem-se o maior vão da esquadria com dimensão 10,21 m de comprimento por 2 m de altura com área equivalente a 20,42 m<sup>2</sup>. Na parede de divisa com o apartamento vizinho SVVI, utilizou-se parede dupla, com alvenaria de bloco cerâmico de vedação de dimensão 11,5 x 19 x 29 cm (Figura 19), com a utilização de lã de pet de espessura 50 mm entre as duas paredes. O revestimento das alvenarias é de reboco argamassado com espessura de 2 cm em cada lado, totalizando uma parede com espessura de 30 cm. Nas janelas, os vidros duplos são compostos por vidro laminado 3+3 mm, câmara de ar de 9 mm e vidro temperado 5 mm em todas as esquadrias. Todas as paredes externas SVVE, são com tijolo perfurado, 15 furos, de dimensão 11,5 x 11,5 x 19. Nos ambientes dos ensaios “B e C”, a esquadria tem

dimensão de 1,80 x 1,30 m com caixa de persiana embutida e o detalhamento do perfil, da linha Aura System 40C.

As portas internas são de MDF semi-ocas, com espessura 33 mm e borrachas para pressão de fechamento, na dimensão de 0,80 x 2,10 m.

Figura 18 – Detalhamentos dos perfis linha Aura 55C TB e linha Aura 40C

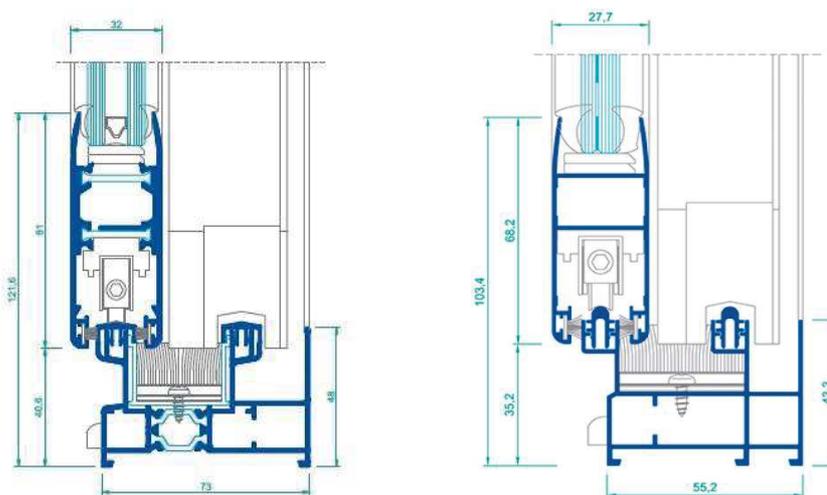
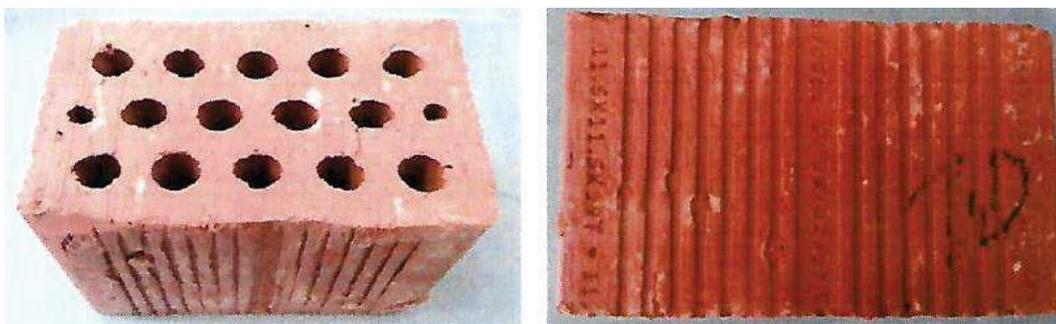


Figura 19 – Tijolo maciço 15 furos utilizados nas paredes



### 3.2 Ensaio em campo

As medições foram realizadas no empreendimento no dia seis de dezembro de 2018, e os ensaios determinados pelas normas ISO 16283-1 (2014), para as medições de níveis de pressão sonora. Já os ensaios de impacto, foram determinados pela ISO 16283-2 (2015).

De acordo com a norma brasileira de desempenho, a NBR 15575, que trata da avaliação de edificações habitacionais, nos procedimentos de medição é

permitida a utilização de dois métodos de medições, o de engenharia e o de laboratório, podendo o método de engenharia ser de precisão ou método simplificado em campo. Para avaliação do isolamento acústico de ruído aéreo, o método de engenharia utilizou-se das normas internacionais ISO 12354-1 e, para o método de controle, a ISO 10052:2004 e ambas utilizam a ISO 717-1 para a determinação da expressão de valor único.

Para o isolamento acústico ao ruído de impacto, o método de engenharia utiliza a norma internacional ISO 12354-2 e, para o método de controle, a ISO 10052:2004 e ambas utilizam a norma ISO 717-2 para a determinação da expressão de valor único.

Vale salientar que a precisão pelo método de controle é inferior, com maiores incertezas nos resultados, podendo gerar maiores dúvidas em relação ao atendimento à atual norma brasileira de desempenho. Neste trabalho, foi utilizado o método de engenharia, conforme procedimentos das normas ISO 16283-1:2014 para a transmissão ao ruído aéreo e da norma ISO 16283-2:2015 para o ensaio de transmissão ao ruído de impacto.

### 3.2.1 Determinação do isolamento ao som aéreo

A norma ISO 16283-1:2014 especifica os procedimentos para a determinação do isolamento acústico ao som aéreo entre dois ambientes de um prédio usando medições de nível de pressão sonora. Os procedimentos são destinados a volumes de salas de 10 m<sup>3</sup> a 250 m<sup>3</sup>, nas faixas de frequências de 50 Hz a 3.150 Hz. Os resultados servem para quantificar, para avaliar e para comparar o isolamento acústico aéreo em salas mobiliadas e não mobiliadas em que o campo sonoro pode, ou não, se aproximar de um campo difuso. O isolamento acústico aéreo medido deve ser convertido em um valor único através dos procedimentos de classificação da norma ISO 717-1, sendo dependente da banda de frequência.

O procedimento padrão para todas as bandas de frequências, através de uma distribuição das posições de um ou mais microfones fixos e das posições do alto-falante, é obter a média energética do nível de pressão sonora.

Para a realização dos ensaios, é importante que a distância do alto-falante esteja a 0,5 m a 1,0 m em relação as paredes que compõem o ambiente.

Nos procedimentos para a determinação de isolamento do som aéreo, é necessário calcular a média energética do NPS para cada posição do alto-falante, demonstrada na Equação 23 para salas emissoras e receptoras. Tal procedimento permite calcular a diferença do NPS entre as duas salas, através da aplicação da Equação 24, para cada posição do alto-falante, obtendo um valor único para cada faixa de frequência de bandas de um terço de oitava.

$$L_i = 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{\frac{L_j}{10}} \right) \quad (23)$$

Onde:

$n$  = número de posições do microfone na sala;

$L_j$  = nível de pressão sonora para cada posição do microfone na sala (dB);

$L_i$  = média energética do NPS para cada posição da fonte sonora na sala (dB).

$$D = L_1 - L_2 \quad (24)$$

Onde:

- $L_1$  = NPS médio na sala de emissão (dB);
- $L_2$  = NPS médio na sala de recepção (dB);
- $D$  = Diferença de NPS para cada posição da fonte sonora (dB).

Faz-se, então, a média logarítmica de todas as medições realizadas através da Equação 25.

$$L_1 = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{\left(\frac{L_{1i}}{10}\right)} \quad (25)$$

Onde.

- $L_1$  = média do nível de pressão sonora no cômodo emissor (dB);
- $L_{1i}$  = medição pontual no cômodo emissor (dB).

No cômodo receptor, para determinação do ruído, será realizada em todas as medições a média logarítmica, que é obtida pela Equação 26.

$$L_2 = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{\left(\frac{L_{2i}}{10}\right)} \quad (26)$$

Onde:

- $L_2$  = média do nível de pressão sonora no cômodo receptor (dB);
- $L_{2i}$  = medição pontual no cômodo receptor (dB).

Os ensaios para a verificação do tempo de reverberação dos ambientes receptores são obtidos conforme a norma ISO 3382-2:2008, que especifica os métodos para medições do tempo de reverberação em salas, descrevendo os procedimentos de medição, os equipamentos necessários e as posições de medições que, além do método de avaliação, apresenta o modelo de relatório do ensaio. O método utilizado foi o método de engenharia com ruído interrompido, que consiste na utilização de um alto-falante como fonte geradora de ruído estável, sendo interrompido para a medição do tempo necessário para o decaimento de 60 dB no nível de pressão sonora do ambiente, possuindo uma precisão de 10% para as verificações por banda de terço de oitava.

A NBR 15575:2013 indica os descritores acústicos para o Brasil para ensaios em campos. A Equação 27 apresenta o cálculo para o descritor para o ensaio de ruído aéreo.

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \log \left( \frac{T}{T_0} \right) \quad (27)$$

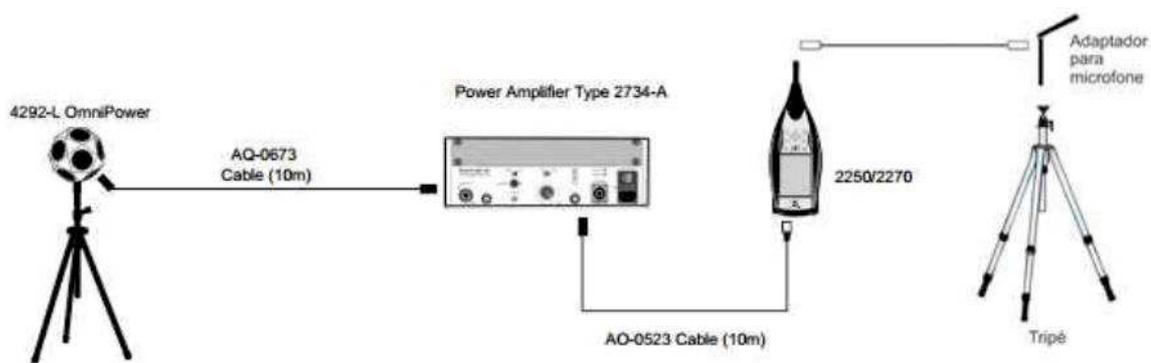
Onde:

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

A norma ISO 10140-5:2010 indica que, para a realização dos ensaios, o sistema de medição completo, incluindo cabos e microfones, deve cumprir as exigências de classe 1, de acordo com IEC 61672-1 e a IEC 61260 para os filtros de classe de 0 ou 1. A IEC 60942 determina que o calibrador atenda o critério das exigências de classe 1.

Na Figura 20, está indicado o esquema de montagem dos equipamentos.

Figura 20 – Esquema de montagem dos equipamentos



Fonte: Manual Brüel & Kjaer (2015).

### 3.2.2 Determinação do som de impacto

A norma ISO 16283-2:2015 especifica os procedimentos para a determinação do nível sonoro de impacto em campo usando medições de nível de pressão sonora produzidos durante a operação de uma fonte de impacto padrão, sendo operada entre os pisos de uma edificação. Destinam-se a volumes de salas de 10 m<sup>3</sup> a 250 m<sup>3</sup>, em bandas de frequências de 50 Hz a 3.150 Hz. Similar à parte da norma que trata da transmissão aérea, pode-se avaliar, quantificar e comparar os resultados do isolamento acústico de impacto em salas mobiliadas e não mobiliadas, onde o campo sonoro pode ou não se aproximar do campo difuso.

A fonte de impacto utilizada para os ensaios não reproduz todos os tipos possíveis de impactos reais em pisos de edifícios, o equipamento de excitação mecânica é usado para avaliar uma variedade de impactos leves e rígidos, como o caminhar de pessoas usando calçados de solados endurecidos ou a queda de objetos. A norma ISO 717- 2 determina os procedimentos para obtenção do valor único.

O ensaio é realizado através de uma máquina de impactos padrão, denominada de fonte emissora, que fica posicionada no cômodo superior. No pavimento inferior, cômodo receptor, fica localizado o microfone. As medições ocorrem por posições, de acordo com o descrito na ISO 16283-2:2015.

A distribuição dos pontos de medição do ensaio obedeceu às posições e distâncias dos equipamentos de acordo:

- 0,7 m posições do microfone e contornos do cômodo;

- 0,7 m entre as posições dos microfones fixos;
- 1,0 m entre qualquer posição do microfone e a divisória em que a fonte de impacto estiver atuando.

Para os ensaios acústicos de impacto, vale salientar que foram considerados: a presença dos ruídos de fundos, o ruído elétrico no sistema de recepção, o ruído dos operadores ou os ruídos advindos do externo que fazem a contribuição para os níveis de ruído de fundo. Dessa forma, é importante levar em consideração a medição do nível de ruído de fundo, garantindo que o nível de sinal no cômodo receptor não seja afetado pelo ruído residual e, em alguns casos, permitir que os valores sejam corrigidos.

Segundo a ISO 16283-1, para a correção ao ruído de fundo, ele deve estar em 6 dB e, preferencialmente, mais de 10 dB abaixo da soma do sinal de ruído de fundo combinado com o ruído gerado pela fonte sonora ligada.

Se o ruído de fundo estiver a 10 dB abaixo do sinal do ruído de fundo combinado com o ruído gerado pela fonte sonora, não será necessário fazer correção. Caso a diferença de nível seja menor ou igual a 6 dB, deve-se usar a correção de 1,3 dB e, se a diferença de nível for menor que 10 dB e maior que 6 dB, utiliza-se a Equação 28 para a correção da energia média do nível de pressão sonora de impacto.

$$L = 10 \log \left( 10^{\frac{L_{sb}}{10}} - 10^{\frac{L_b}{10}} \right) \quad (28)$$

Onde:

- $L$  = NPS ajustado (dB);
- $L_{sb}$  = nível do sinal e ruído de fundo combinados (dB);
- $L_b$  = ruído de fundo (dB).

Através da Equação 29, se obtém a média energética do nível de pressão sonora para as posições fixas dos microfones e a fonte sonora, no caso a máquina de impacto, obtendo assim, um valor para cada frequência central da banda de um terço de oitava.

$$L_i = 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{\frac{L_j}{10}} \right) \quad (29)$$

Onde:

$n$  = número de posições do microfone na sala;

$L_j$  = nível de pressão sonora para cada posição do microfone na sala (dB);  
 $L_i$  = média energética do NPS para cada posição da fonte sonora na sala (dB).

Usando o mesmo princípio da determinação do som aéreo e aplicando a Equação 25 e a Equação 26, pode-se, através da utilização dos descritores acústicos previstos na norma NBR 15575:2013, adotar a Equação 30 para a determinação do nível de pressão sonora de impacto padrão.

$$L_{nT} = L_2 - 10 \log \left( \frac{T}{T_0} \right) \quad (30)$$

Os equipamentos utilizados para o ensaio no empreendimento estão descritos abaixo:

- analisador sonoro, marca Brüel & Kjaer, modelo 2270;
- microfone, marca, marca Brüel & Kjaer, modelo 4189;
- calibrador, marca Brüel & Kjaer, modelo 4231;
- amplificador de potência, marca Brüel & Kjaer, modelo 2734-A;
- fonte omnidirecional, marca Brüel & Kjaer, 4292-L;
- cabo, marca Brüel & Kjaer, modelo AQ-0673 e AO-0523;
- trena metálica;
- termohigrômetro, marca Instrutemp, modelo ITMP-600.

### 3.3 Simulação computacional

Neste trabalho, a transmissão sonora dos ruídos aéreos e de impacto são simulados em software da empresa Sound of Numbers chamado SONarchitect ISO v2.2, que realiza os cálculos de acordo com as normas ISO 12354 partes 1,2,3,4 e 6.

O software permite a elaboração de modelos com a aplicação dos materiais utilizados em edificações, modelos de junções, tipos de utilizações de cada espaço, modelo em 3D, níveis de isolamento acústico e resolução de problemas nas vias de transmissão. Além disso, possui outros recursos como, um mapa de ruído emitido,

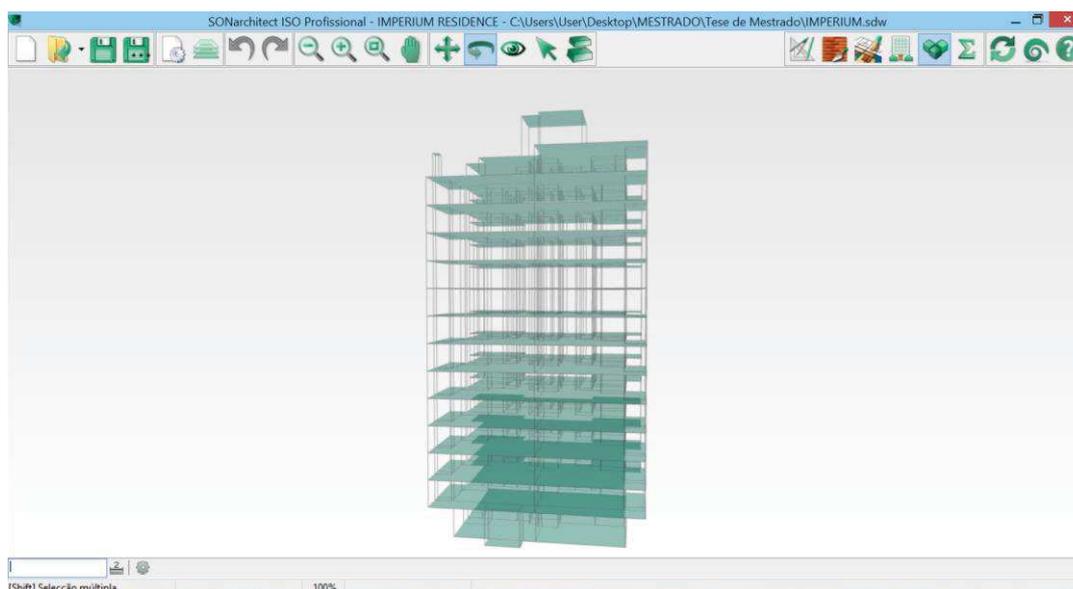
aurilização e a compreensão da qualidade acústica do projeto através da geração de relatórios personalizados.

Os parâmetros simulados para ruído de impacto são:  $T_{30}$ ,  $L'_{n,T}$  e  $L'_{n,T,w}$ ; já para ruído aéreo os parâmetros são:  $T_{30}$ ,  $D_{n,T}$  e  $D_{n,T,w}$ .

Todavia, é importante determinar os coeficientes de segurança para aplicação nos espectros simulados, para que se possa usar o *software* com confiabilidade em outros projetos.

Este trabalho servirá como base no desenvolvimento de uma nova metodologia de projetar no campo da atuação profissional do autor, pois é necessária a interpretação dos materiais utilizados e suas eficiências acústicas ainda na fase de projeto. A Figura 21 demonstra a imagem de uma edificação sendo modelada.

Figura 21 – Modelagem de uma edificação pelo software SONarchitect



Para a configuração das características da edificação, são colocados os dados do desempenho acústico dos sistemas construtivos, quando esses foram ensaiados em laboratórios, conforme normas específicas.

Os valores alusivos ao sistema construtivo estão apresentados na Tabela 1, sendo apresentado o índice de redução sonora para os sistemas de piso e de vedação vertical, além do nível de pressão sonora de impacto normalizado, para os sistemas de piso.

Tabela 1 – características acústicas dos sistemas construtivos utilizados como valores de input para o software SONarchitect.

Amostra	Descritor	Frequência (Hz)															Ponderado	
		100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500		3150
Nervurada Bidirecional c/ EPS	R	32	34	45	46	46	50	52	55	62	67	68	69	73	75	76	75	57
Nervurada Bidirecional c/ EPS	Ln	56	56	55	53	46	40	36	38	36	29	20	18	17	13	12	8	46
Cobertura em concreto	R	40	44	45	47	50	53	55	60	63	66	70	72	75	77	79	78	62
Cobertura em concreto	Ln	61	54	53	52	49	45	43	42	42	43	42	40	41	40	33	30	48
Sist. Vertical em bloco cerâmico	R	53	51	47	50	52	51	52	53	56	58	59	61	63	65	66	67	59
Rebaixo em gesso	DR	10	12	14	12	9	6	7	9	10	14	17	21	22	25	31	36	10
Rebaixo em gesso	Dln	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

O *software* SONarchitect é um programa computacional de cálculos que se baseia na ISO 12354, no qual é verificada a transmissão do som de forma direta através dos elementos de partição e a transmissão por flancos através dos elementos marginais. As fórmulas utilizadas para a adequação do ensaio de laboratório, para o resultado a ser obtido em campo, conforme a ISO, estão apresentadas nas Equações 31 e 32, para a diferença padronizada de nível de pressão sonora e para o nível de pressão sonora de impacto padronizado, respectivamente.

$$D_{nT} = R' + \left( 10 \log \frac{0,3V}{S_s} \right) \quad (31)$$

$$L'_{nT} = L'_n - \left( 10 \lg \left( \frac{C_{sab}V}{A_o T_o} \right) \right) \text{dB} \quad (32)$$

## 4. RESULTADOS

Este capítulo está dividido em três partes, sendo o primeiro referente aos ensaios realizados em campo, de acordo com a ISO 16283 e suas respectivas partes. Posteriormente, são abordados os resultados obtidos pelo método de simulação com o uso do *software* SONarchitect e, por último, é feito um comparativo entre os resultados obtidos, analisando sempre o sistema de piso como elemento de separação entre unidades.

### 4.1 Resultados dos ensaios em campo

Os ensaios de ruídos aéreos e de impacto, sobre o sistema de lajes nervuradas bidirecionais, manta de polietileno expandido e contrapiso, foram realizados no dia seis de dezembro de 2018 pelo itt Performance (Institutos Tecnológicos da Unisinos). Foram realizados quatro ensaios em ambientes distintos, tanto para o ruído aéreo, como para o de impacto caracterizados pelas letras “A”, “B”, “C” e “D” de acordo com a Figura 17.

Nas seções 4.1.1 e 4.1.2 estão apresentados os resultados das medições através dos valores médios em cada banda de frequência de acordo com  $D_{n,T}$  e  $L'_{n,T}$ .

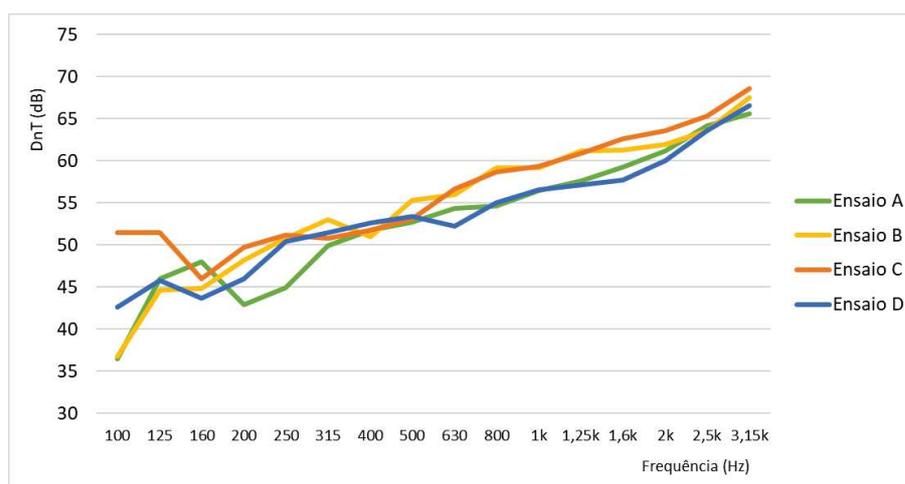
#### 4.1.1 Resultados dos ensaios de ruído aéreo

Os sistemas construtivos ensaiados estão detalhados conforme a Figura 14, Figura 15 e Figura 16. No Quadro 5, são apresentados os resultados dos ensaios de isolamento ao som aéreo, com os quatro sistemas ensaiados obtendo classificação de nível superior conforme a NBR 15575. Ressalta-se que o sistema de piso do ambiente A apresentou menor  $D_{nT,W}$ , já os ambientes B e C mostraram maiores valores de isolamento sonoro ao ruído aéreo. Esse comportamento pode estar relacionado às dimensões dos sistemas de pisos, pois conforme afirma Hopkins (2012), sistema com menores áreas apresentam, por consequência, mais restrições para a irradiação de vibrações.

Quadro 5: Valores medidos de  $D_{n,T,w}$  nos sistemas de pisos ensaiados.

Local	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	$D_{n,T,w}$ (dB)	Acabamento
Sistema A	66,27	165,27	56	Porcelanato
Sistema B	10,25	26,25	59	Laminado
Sistema C	10,24	25,48	59	Laminado
Sistema D	26,56	66,40	57	Laminado

Os resultados obtidos também podem ser analisados por bandas de terços de oitavas, conforme apresentado na Figura 22. Nesse sentido, pode-se indicar, em relação ao sistema A, um decaimento no isolamento nas bandas de 200 e 250 Hz, região controlada pela rigidez. Também são verificados, nos sistemas A e D, com maiores áreas, valores menores que os demais nas bandas entre 800 e 1600 Hz.

Figura 22 –  $D_{n,T}$  medidos nos sistemas de pisos.

#### 4.1.2 Resultados dos ensaios de ruído de impacto

As medições dos níveis de pressão sonora de impacto nas salas receptoras ocorreram conforme descrito no item 4.1 e seus respectivos detalhamentos dos elementos construtivos ensaiados estão especificados conforme a Figura 14, a Figura 15 e a Figura 16.

O Quadro 6 apresenta os valores ponderados para os quatro sistemas de pisos analisados. Assim como nos resultados para o isolamento a ruídos aéreos, as dimensões dos sistemas construtivos influenciaram na capacidade de isolamento acústico. No entanto, no caso do som de impacto a característica elástica da superfície que recebe a excitação mecânica da máquina de impactos é determinante

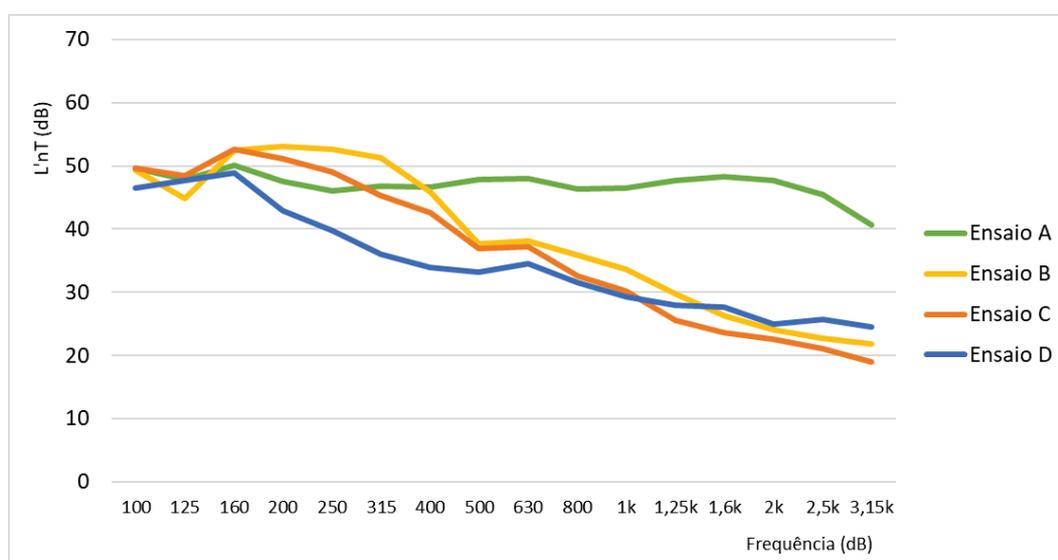
nos resultados, conforme verificados nos trabalhos de Oliveira e Patrício (2017) e Heissler et al. (2017). Todos os sistemas ensaiados obtiveram classificação superior de desempenho acústico ao som de impacto, com resultados  $L'_{n,T,w}$  menores que 55 dB.

Quadro 6: Valores medidos de  $L'_{n,T,w}$  nos sistemas de pisos ensaiados.

Local	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	$L'_{n,T,w}$ (dB)	Acabamento
Sistema A	66,27	165,27	52	Porcelanato
Sistema B	10,25	26,25	44	Laminado
Sistema C	10,24	25,48	42	Laminado
Sistema D	26,56	66,40	38	Laminado

A Figura 23 apresenta os valores das medições por bandas de terço de oitavas. Assim como nos resultados com os valores ponderados, a característica mais rígida do revestimento de porcelanato, comparada ao piso laminado, determina menor eficiência no isolamento ao som de impacto em sistemas de pisos. O efeito do amortecimento do piso flutuante pode ser visualizado nos perfis gráficos dos ensaios dos sistemas B, C e D, com decaimento dos valores a partir das médias frequências. O efeito proporcionado pelo duplo sistema de amortecimento não pôde ser verificado na comparação das curvas dos ensaios dos sistemas B e C, tendo ambas áreas semelhantes, com diferença na instalação de contrapiso com agregado com EVA no sistema B, além do contrapiso argamassado convencional.

Figura 23 –  $L'_{n,T,w}$  medidos nos sistemas de pisos.



A utilização de resíduos em contrapisos pode apresentar um aumento no desempenho acústico ao som de impacto, quando não é considerado o efeito do revestimento final, conforme já foi verificado nas pesquisas de Tutikian et al. (2012), Tutikian et al. (2017) e Borges et al. (2018). No entanto, conforme indicado anteriormente, o efeito do grau de amortecimento da excitação mecânica da máquina de impactos nos resultados é mais relevante, conforme também indicado no trabalho de Siqueira et al. (2018).

## 4.2 Resultados das simulações

### 4.2.1 Resultados da simulação de ruído aéreo

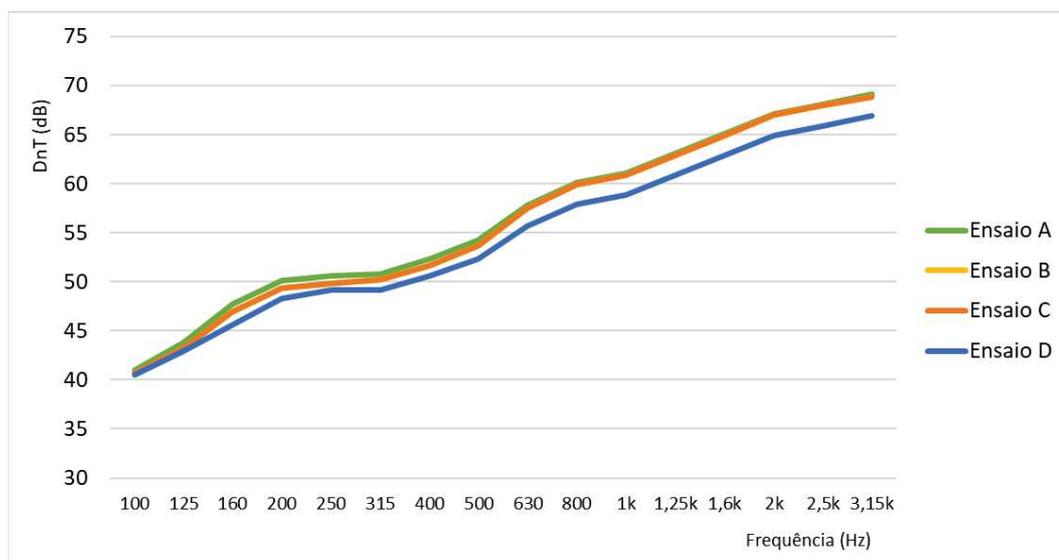
Os resultados das simulações computacionais para as estimativas de desempenho ao ruído aéreo nos mesmos sistemas de pisos testados em campo, são apresentados no Quadro 7, com os valores ponderados, e na Figura 24, com as curvas de cada sistema por bandas de terço de oitava.

De modo geral, os valores ponderados simulados ficaram muito próximos. Sendo o piso do sistema A com o maior isolamento ao som aéreo, com  $D_{nT,w}$  de 60 dB; os sistemas B e C com 59 dB; e o sistema D com  $D_{nT,w}$  de 58 dB.

Quadro 7: Valores simulados de  $D_{nT,w}$  para os sistemas de pisos.

Local	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	$D_{nT,w}$ (dB)	Acabamento
Sistema A	66,27	165,27	60	Porcelanato
Sistema B	10,25	26,25	59	Laminado
Sistema C	10,24	25,48	59	Laminado
Sistema D	26,56	66,40	58	Laminado

Os resultados simulados por bandas de terço de oitava para os sistemas A, B e C também ficaram semelhantes, sendo que para o sistema D, os valores de isolamento acústico foram menores, em especial nas bandas de frequências a partir de 630 Hz.

Figura 24 –  $D_{n,T}$  simulados nos sistemas de pisos

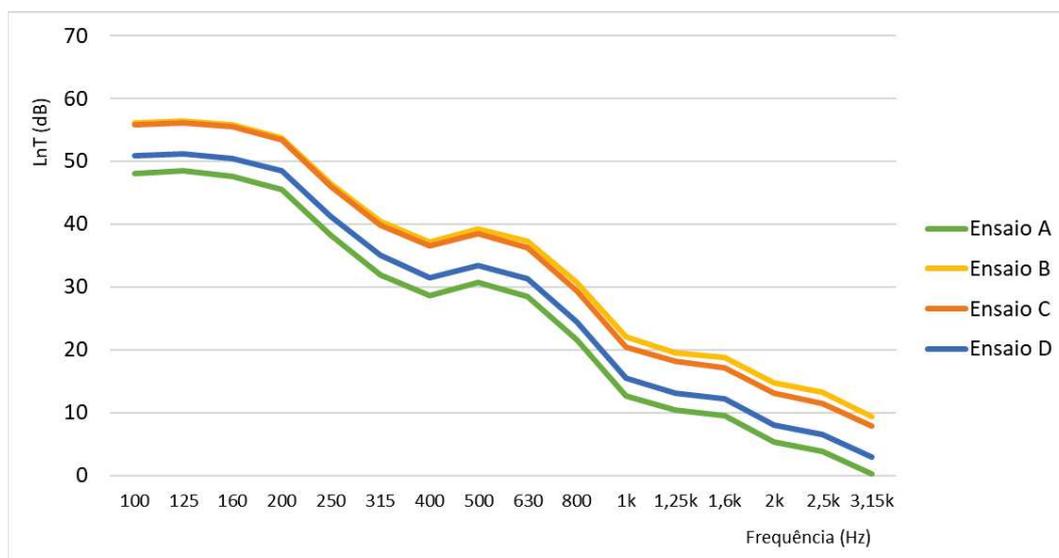
#### 4.2.2 Resultados das simulações ao ruído de impacto

As simulações computacionais dos níveis sonoros de impacto foram realizadas com os mesmos sistemas de pisos dos ensaios em campo. No Quadro 8, são apresentados os valores ponderados, em que as estimativas indicam que todos alcançam o nível de desempenho superior. Nesses resultados, foram encontradas diferenças de 8 dB entre o menor valor de  $L'_{nT,w}$  no (sistema A) e o maior valor de  $L'_{nT,w}$  nos (sistemas B e C).

Quadro 8: Valores medidos de  $L'_{nT,w}$  simulados para os sistemas de pisos.

Local	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	$L'_{nT,w}$ (dB)	Acabamento
Sistema A	66,27	165,27	38	Porcelanato
Sistema B	10,25	26,25	46	Laminado
Sistema C	10,24	25,48	46	Laminado
Sistema D	26,56	66,40	41	Laminado

A Figura 25 apresenta os resultados por bandas de terço de oitava dos sistemas de pisos. Para o sistema A, apesar da maior rigidez do revestimento de piso, o resultado da simulação computacional foi o menor para todas as bandas de frequências. Os sistemas B e C, com a mesma área, apresentaram valores semelhantes.

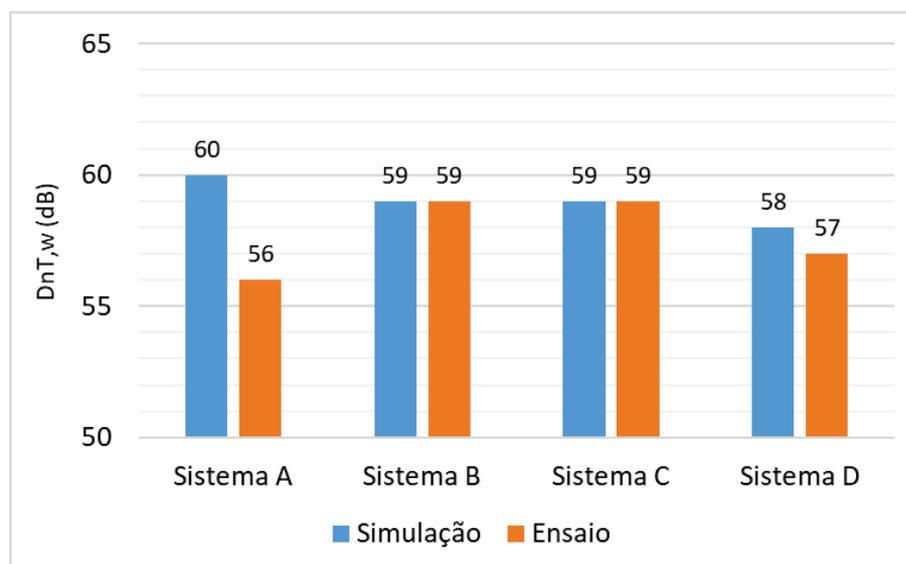
Figura 25 –  $L'_{nT,w}$  simulados nos sistemas de pisos

### 4.3 Comparativos entre resultados

#### 4.3.1 Comparativo dos resultados para o som aéreo

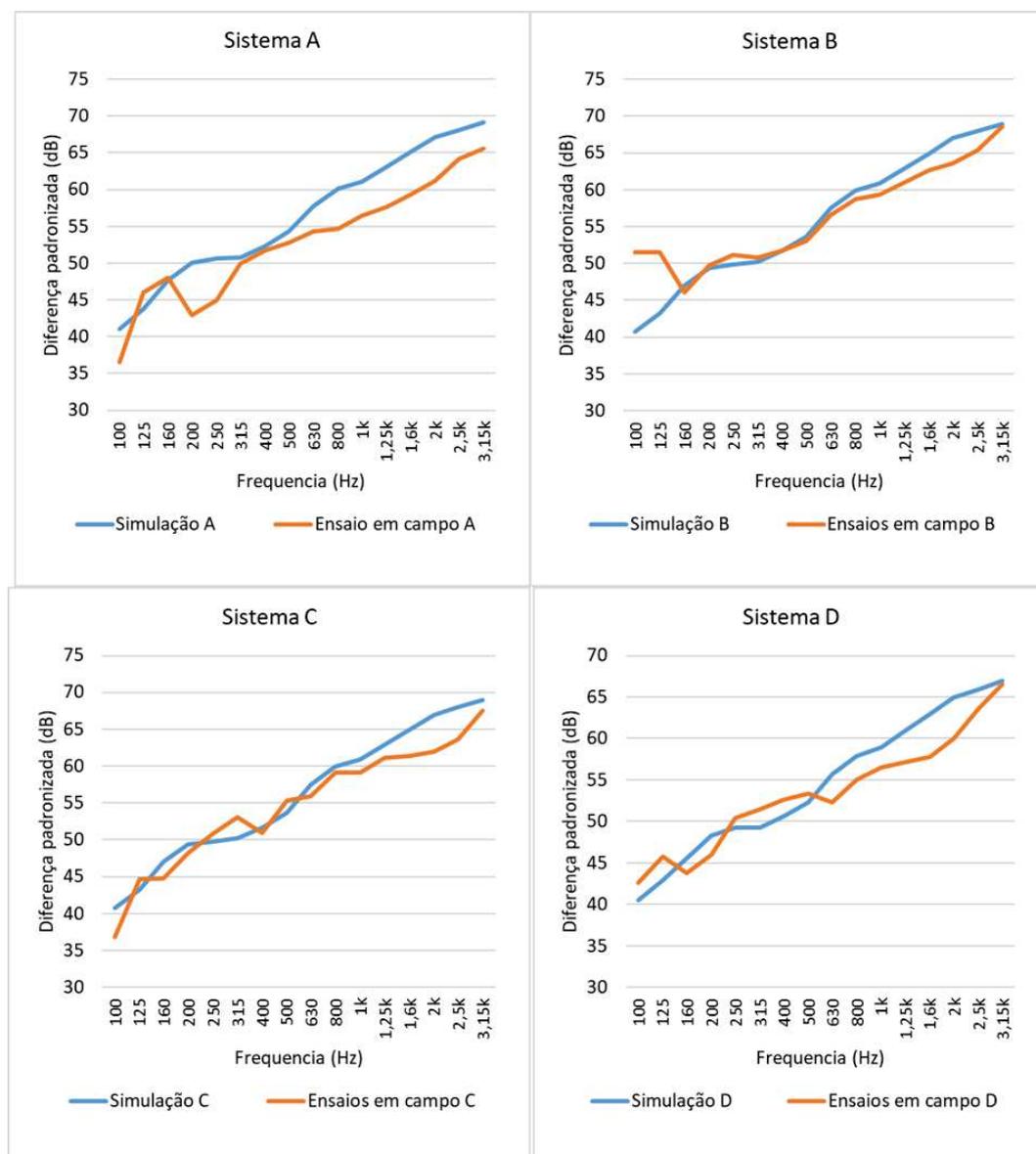
A comparação entre os valores ponderados medidos em ensaios em campo e obtidos por simulação computacional podem ser verificados na Figura 26 para o isolamento acústico do som aéreo. Para os sistemas B e C, com geometria retangular e área de aproximadamente 10 m<sup>2</sup>, não houve diferença entre a estimativa via modelo computacional e os valores dos ensaios em campo. Para o sistema D, a simulação apresentou valor de 1 dB maior que o ensaio em campo. No sistema A foi verificada a maior diferença, tendo a estimativa via modelo computacional o valor de  $D_{nT,w}$  4 dB maior que o resultado do ensaio em campo.

Esse comportamento não foi o mesmo encontrado no trabalho de Heissler (2018) que estudou sistemas de pisos homogêneos e, no qual, foram verificados resultados simulados com valores menores que os obtidos em ensaios em campo para o isolamento ao som aéreo.

Figura 26 – Comparativo de  $D_{nT,w}$  medidos e simulados

A comparação entre a estimativa por simulação computacional e ensaios em campo também pode ser feita pela análise dos valores parciais por bandas de terço de oitava. A Figura 27 apresenta as comparações para os 4 sistemas analisados, sendo que a diferença verificada no sistema A, no valor ponderado, está indicada nas bandas de frequências de 200-250 Hz e entre 630 Hz e 3,15 kHz. O sistema C apresenta a maior diferença nas bandas de 100 Hz e 125 Hz, o que já é indicado por outros trabalhos em que foi verificado que, nas bandas de baixas frequências, a incerteza de medição tende a ter um valor mais elevado (HEISSLER, 2018; ANTÓNIO; MATEUS, 2015; MACHIMBARRENA et al., 2015; NAVACERRADA; PEDRERO; DÍAZ, 2016). Os sistemas C e D apresentam as diferenças entre valores medidos em ensaios de campo e valores estimados por simulação computacional ao longo de todo o espectro analisado, sem que haja uma característica marcante no perfil gráfico.

As diferenças encontradas entre estimativas e ensaios experimentais da redução sonora ao ruído aéreo de sistemas construtivos é indicada por Gerretsen (2009) como sendo mais complexas para sistemas não homogêneos. Essa complexidade é explicada por Hopkins (2012) devido à diferenças de combinações entre materiais, sendo muitos deles leves e sem finalidade estrutural.

Figura 27 – Comparativos de  $D_{nT}$  medidos e simulados

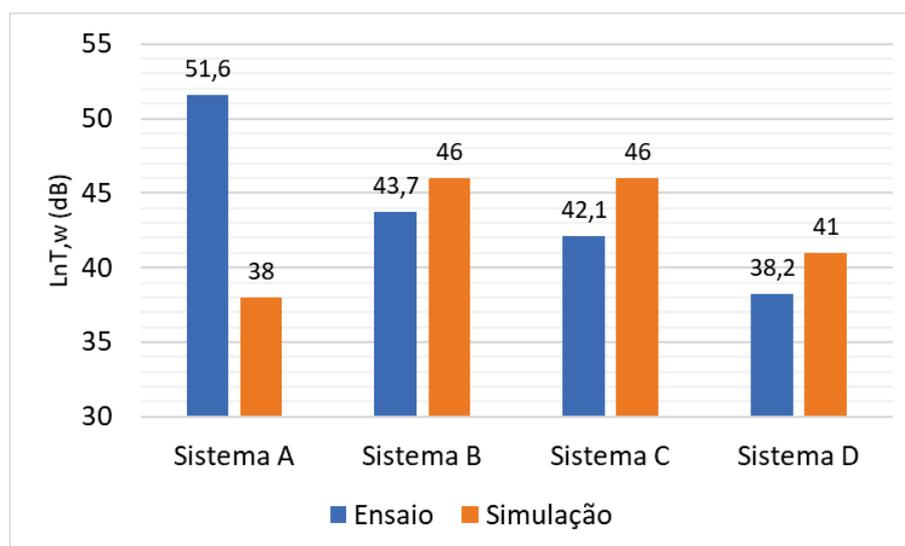
#### 4.3.2 Comparativo dos resultados para o som de impacto

A comparação entre os valores ponderados medidos em ensaios em campo e obtidos por simulação computacional para o som de impacto pode ser verificada na Figura 28. A maior diferença foi verificada para o sistema A, sendo o único em que o valor obtido em ensaio de campo ficou maior que o simulado via *software*. Os sistemas B, C e D apresentaram, respectivamente, diferenças de 2,3 dB, 3,9 dB e 2,8 dB.

Conforme mencionado anteriormente, os sistemas construtivos não homogêneos apresentam maior complexidade nas estimativas. Segundo Patrício

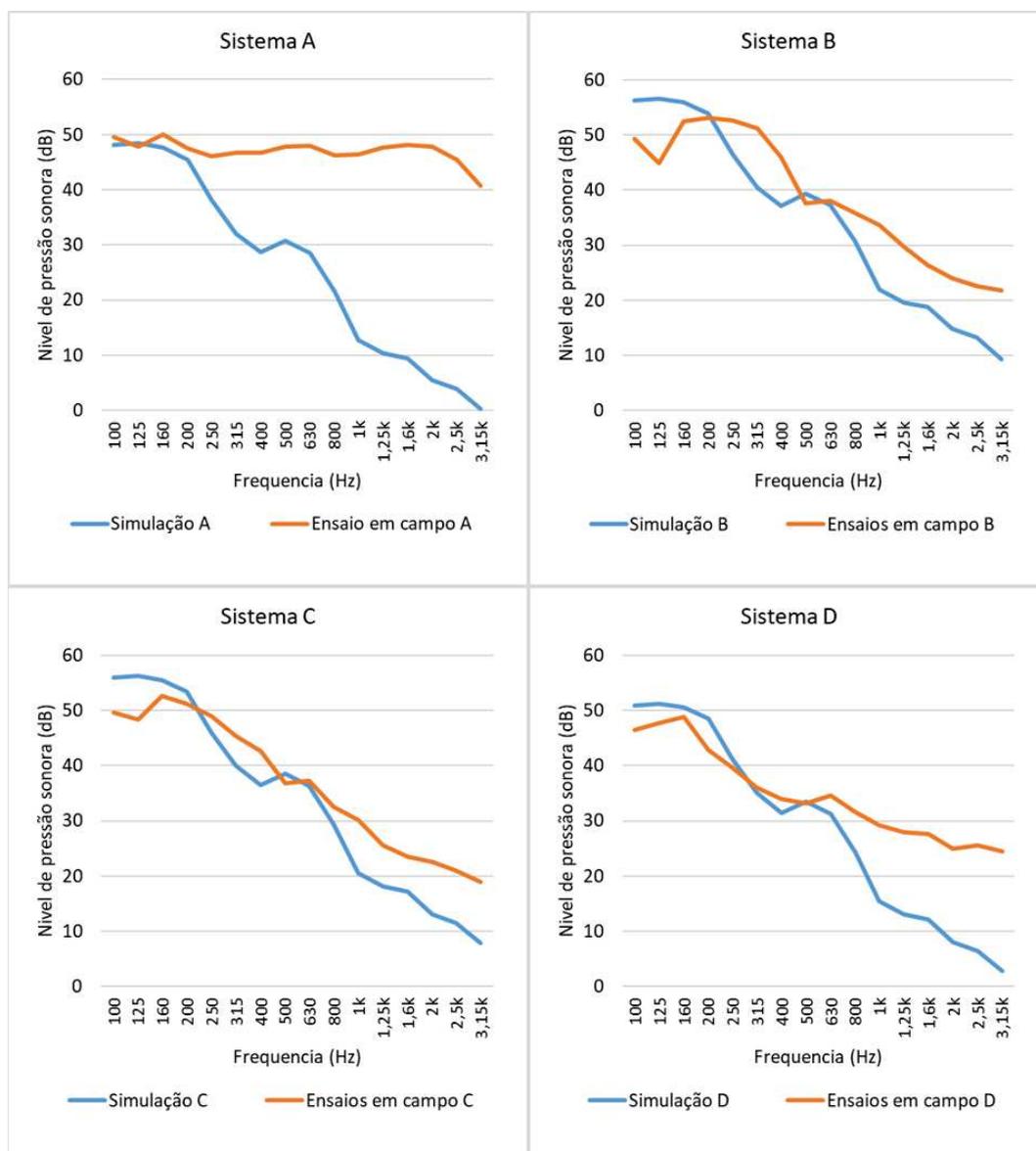
(2001) em lajes não homogêneas os mecanismos de transmissão por flancos são diferentes de lajes de concreto maciço, pois a transmissão pelos flancos apresenta maior quantidade de variáveis, mesmo quando comparado com lajes com densidade semelhante.

Figura 28 – Comparativo de  $L'_{nT,w}$  medidos e simulados



A Figura 29 mostra a comparação entre as simulações via *software* e os ensaios em campo por bandas de terço de oitava.

O sistema A apresentou maiores diferenças entre os valores medidos e os simulados, com perfis gráficos completamente diferentes. Nesse sentido, pode-se indicar algum problema construtivo que distorceu os resultados do ensaio em campo, pois segundo Hopkins (2012) e Patrício (2018) sistemas de piso sem contrapiso flutuante tendem a apresentar um perfil gráfico em *flat* nas bandas de frequência acima de 315 Hz para os sons de impacto. Além disso, os parâmetros da ISO 717-2:2013 para obtenção do valor único ponderado, os resultados que mais influenciam são os apresentados nas bandas de altas frequências. Dessa forma, considerando-se que o sistema A é composto por dois tipos de contrapiso, convencional e com brita leve, separados por manta de polietileno expandido 10 mm, a expectativa de resultado é mais coerente com os valores obtidos na simulação via *software*.

Figura 29 – Comparativos de  $L'_{nT}$  medidos e simulados

Nesse sentido, os perfis gráficos dos demais sistemas analisados apresentam maior coerência, com decaimento dos valores por bandas de terço de oitava a partir da banda de 500 Hz para sistemas com pisos flutuantes, conforme estudos de Nunes e Patrício (2016) e de Heissler et al. (2017). Os sistemas B e C têm como diferença a composição do contrapiso, sendo utilizado no sistema B contrapiso convencional e contrapiso com brita leve e, no sistema C, somente o contrapiso convencional, ambos com igual espessura total. Dessa forma, os resultados do ensaio em campo expressaram de forma mais real a diferença entre os sistemas,

pois as curvas dos valores simulados não apresentam diferença significativa em seus perfis gráficos.

Ao contrário do que foi verificado no estudo de Heissler (2018), os resultados simulados não se mostraram mais próximos dos resultados de ensaios em campo para os sons de impacto, quando comparados aos resultados de isolamento ao ruído aéreo.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho buscou analisar e comparar o desempenho acústico obtido por ensaios em campo e por simulação computacional, sendo delimitada a análise de sistemas de pisos de laje nervurada bidirecional.

Foram realizados 8 ensaios de caracterização acústica do empreendimento, sendo quatro de diferença padronizada de nível de pressão sonora e quatro de nível de pressão sonora de impacto padronizado.

As medições foram realizadas na sala, dormitório 1, dormitório 2 e suíte, de uma edificação habitacional, cômodos estes que estão apresentados no Capítulo 4 como: “Sistema A”, “Sistema B”, “Sistema C” e “Sistema D”, respectivamente.

A diferença padronizada de nível de pressão sonora ponderado apresentada pelos sistemas construtivos foi de 56 dB para a sala de estar, 59 dB para o dormitório 1, 59 dB para o dormitório 2 e 57 dB para a suíte. Já o nível de pressão sonora de impacto padronizado desses sistemas ficou em 52 dB para a sala de estar, 44 dB para o dormitório 1, 42 dB para o dormitório 2 e 38 dB para a suíte.

Paralelamente aos ensaios em campo, foram realizadas simulações computacionais com a utilização do *software* SONarchtect dos ambientes ensaiados na edificação, sendo modelado todo o empreendimento.

A diferença padronizada de nível de pressão sonora ponderada obtida através de simulações para os sistemas construtivos foi de 60 dB para a sala de estar, 59 dB para o dormitório 1, 59 dB para o dormitório 2 e 58 dB para a suíte. A mesma simulação apresentou nível de pressão sonora de impacto padronizado desses sistemas de 38 dB para a sala de estar, 46 dB para o dormitório 1, 46 dB para o dormitório 2 e 41 dB para a suíte.

Quando comparado os valores dos resultados obtidos para a diferença padronizada de nível de pressão sonora ponderada, é visto que, para os dormitórios, não houve diferença entre a simulação computacional e os valores dos ensaios em campo.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, G. T. L., **Análise de soluções construtivas para a verificação de requisitos térmicos e acústicos em edifícios de habitação**. Faculdade de Ciências e Tecnologias. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2009

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

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

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

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

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

BARON, N.; BONFIGLIO, P.; FAUSTI, P. **Dynamic stiffness of materials used for reduction in impact noise: comparison between different measurement techniques**. Guimarães, 2004

BISTAFA, Sylvio R. **Acústica Aplicada ao Controle do Ruído**. 2 Ed. ed. São Paulo: Blucher, 2011. 384 p.

BORGES, J. K.; PACHECO, F.; TUTIKIAN, B.; DE OLIVEIRA, M. F. An experimental study on the use of waste aggregate for acoustic attenuation: EVA and rice husk composites for impact noise reduction. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 501–508, 2018.

BRÜEL & KJÆR, BE 1712-22 - **Instruction Manual - Hand-Held Analyzer Types 2250, 2250-L, 2270 for use with microphone type 4189**, Brüel & Kjær, 2015

DIAS, Ricardo Manuel de Abreu. **Análise comparativa dos métodos normalizados de previsão da transmissão sonora por via aérea**. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2009

EEA, European Environment Agency. **Noise in Europe**. Luxemburgo, 2014 DOI: 10.2800/763331

EMB CONSTRUCCIÓN. **Aislación térmica y acústica: Tecnologías, avances y desafíos**. Ano XV, Edição 171, Santiago, 2016

HASSAN, Osama A. B. **Building acoustics and vibration: theory and practice**. [S.I.]: World Scientific, 2009. p. 947

HEISSLER, Rafael Ferreira. **Análise comparativa do isolamento acústico em diferentes geometrias: ensaios em campo e simulações computacionais**. Unisinos, 2018. 89 p.

HEISSLER, R. F.; LABRES, H. S.; KLIPPEL FILHO, S.; PIRES, J. R.; OLIVEIRA, M. F. Análise crítica do desempenho acústico de sistemas de revestimentos de pisos. **XXVII Encontro Nacional da Sociedade Brasileira de Acústica**. Anais... , 2017. Brasília.

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

HOPKINS, Carl. **Sound Insulation**. [S.l: s.n.], 2007. 3-8 p. 33 v. .9781604138795

**ISO 12354-1**. Building acoustics — Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements — Part 1: Airborne sound insulation between rooms. International Organization for Standardization. Geneva, 2017a.

**ISO 12354-2**. Building acoustics — Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements — Part 2: Impact sound insulation between rooms. International Organization for Standardization. Geneva, 2017b.

**ISO 9052-1**. Acoustics – Determination of dynamic stiffness. Part 1: Materials used under floating floor in dwellings. International Organization for Standardization. Geneva: [s.n.], 1989.

**ISO 12999-1**, Acoustics -- Determination and application of measurement uncertainties in building acoustics -- Part 1: Sound insulation, International Organization for Standardization, 2014

LIINARES, J., LLOPIS, A., SANCHO, J., **Acustica Arquitectonica Y Urbanistica**. Universidade Politecnica de Valencia. Valencia, 1996

MACHIMBARRENA, María; RASMUSSEN, Birgit; MONTEIRO, Carolina. Regulatory sound insulation requirements in South America: status for housing, schools, hospitals and office buildings. 2019, **Madri: Sociedad Española de Acústica**, 2019.

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. **22nd International Congress on Acoustics ICA 2016** n. September , 2016.

MAGALHÃES, Max de Castro. **Fundamentos de Acústica Estrutural**. Editora All Print. Mogi das Cruzes, 2013

MARTINS, J. T. P., **Acústica de Edifícios – Validação Experimental do Cálculo de transmissões marginais a sons aéreos em edifícios**. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. Porto, 2008

OLIVEIRA, M. F.; PATRICIO, J. V. Impact Noise of Non-homogeneous Floors: Analysis of Different Input Parameters for Computational Modeling Predictions. **Journal of Civil Engineering and Architecture**, v. 11, n. 3, p. 274–281, 2017.

PARGA, Pedro. **Cálculo do Preço de Venda na Construção Civil**. 2ª Ed. Editora Pini. São Paulo, 2004

PATRÍCIO, Jorge Viçoso. **Acústica nos edifícios**. 1 ed ed. Lisboa: [s.n.], 2018.

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

QUEIRÓS, D. M. D., **Caracterização do comportamento acústico de edifícios reabilitados**. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. Porto, 2010

QUEIROZ, Cíntia Serra. **Avaliação do Isolamento Sonoro nas Fachadas de Edifícios Residenciais. Estudo de Caso: O Processo Evolutivo na Avenida Beira mar/Florianópolis**. Universidade de Santa Catarina, 2007

RASMUSSEN, B.; MACHIMBARRENA, M.; RYCHTÁRIKOVÁ, M.; HORVAT, M. Building acoustics throughout Europe - Volume 1: towards a common framework in building acoustics throughout Europe, Chapter 7: Developing a Methodology for Performing Listening Tests Related to Building Acoustics, **COST Action TU0901**; 2014. p. 133–156.

SCHIAVI, Alessandro; ASTOLFI, Arianna. The prediction of the vibration reduction index Kij for brick and concrete rigid junctions. **Applied Acoustics** v. 71, n. 6, p. 523–530 , jun. 2010.

SANTANA, Wylliam Bessa. **Desempenho Acústico das Edificações Segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013): Desempenho das Vedações e Validação dos Requisitos Normativos com Base na Opinião dos Usuários**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém-Pará, 2016

SILVA, Pérides. **Acústica Arquitetônica e Condicionamento de Ar**. 5ª Ed. Editora Brochura. São Paulo 2005.

SILVA, Renata Costa da. **Avaliação de Ferramenta de Simulação da Transmissão Sonora para Projetos de Isolamento Acústico em Edificações Habitacionais**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2014.

SMITH, B. J., PETERS, R. J., OWEN, S., **Acoustics and Noise Control**. Editora Harlow, Essex, England ; New York, 2011

SIQUEIRA, A. P. L.; PIRES, J. R.; HEISSLER, R.; OLIVEIRA, M. F. Análise do desempenho acústico de camadas elásticas de pisos flutuantes. **SOBRAC 2018. Anais...** , 2018. Porto Alegre: SOBRAC.

WHO. Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy life years lost in Europe. **World Health Organization** p. 1–106 , 2011.

TUTIKIAN, B. F. F.; NUNES, M. F. O. F. O.; LEAL, L. C. C.; MARQUETTO, L. Lightweight Concrete With Eva Recycled Aggregate For Impact Noise Attenuation. **Building Acoustics**, v. 19, n. 2, p. 75–88, 2012.

TUTIKIAN, B. F.; ZUCHETTO, L. K.; SOUZA, R. P.; OLIVEIRA, M. F. Uso de agregado leve de EVA em contrapiso argamassado para isolamento ao ruído de impacto em edificações residenciais. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 3, p. 295–306, 2017.

YOURHOME. **Noise Control**. 2018. Disponível em: <<http://www.yourhome.gov.au/housing/noise-control>>. Acesso em: 14 de julho de 2018.

ZUCHETTO, L.K. Leticia Kauer; NUNES, Maria Fernanda De O M.F.D.O.; PATRÍCIO, J.V. Jorge V. The effect of addition of layers on impact sound insulation of floors. 2016, Hamburg: European Acoustics Association, 2016.