

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Eduardo Henrique Lucca Santos

**INFLUÊNCIA DO FORRO DE GESSO ACARTONADO NO
ISOLAMENTO AO RUÍDO DE IMPACTO DE SISTEMAS DE PISOS DE
LAJE COM VIGOTAS PROTENDIDAS E LAJOTAS CERÂMICAS**

Santa Maria, RS
2020

Eduardo Henrique Lucca Santos

**INFLUÊNCIA DO FORRO DE GESSO ACARTONADO NO ISOLAMENTO AO
RÚIDO DE IMPACTO DE SISTEMAS DE PISOS DE LAJE COM VIGOTAS
PROTENDIDAS E LAJOTAS CERÂMICAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos

Coorientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Pizzutti dos Santos

Santa Maria, RS
2020

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Santos, Eduardo Henrique Lucca

Influência do forro de gesso acartonado no isolamento ao ruído de impacto de sistemas de pisos de laje com vigotas protendidas e lajotas cerâmicas / Eduardo Henrique Lucca Santos. - 2020.

112 p.; 30 cm

Orientador: Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos

Coorientador: Jorge Luiz Pizzutti dos Santos

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2020

1. Desempenho acústico 2. Sistemas de pisos 3. Ruído de impacto 4. Laje pré-fabricada 5. Gesso acartonado I. Santos, Joaquim Cesar Pizzutti dos II. Santos, Jorge Luiz Pizzutti dos III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, EDUARDO HENRIQUE LUCCA SANTOS, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Eduardo Henrique Lucca Santos

**INFLUÊNCIA DO FORRO DE GESSO ACARTONADO NO ISOLAMENTO AO
RÚIDO DE IMPACTO DE SISTEMAS DE PISOS DE LAJE COM VIGOTAS
PROTENDIDAS E LAJOTAS CERÂMICAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Aprovado em 10 de março de 2020:

Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Jorge Luiz Pizzutti dos Santos, Dr. (UFSM)
(Coorientador)

Roberto Aizik Tenenbaum, Dr. (UFSM)

Maria Fernanda de Oliveira, Dra. (UNISINOS)

Santa Maria, RS
2020

DEDICATÓRIA

A todas as vítimas da tragédia do incêndio da boate Kiss, em especial aos meus queridos amigos Benhur Retzlaff Rodrigues e Juliana Speroni Lentz, que infelizmente tiveram seus sonhos interrompidos e suas vidas abreviadas devido ao referido acontecimento. Diversos motivos ocasionaram essa tragédia, dentre os quais gostaria de citar o tratamento acústico executado no local, pois foi utilizado um material altamente inflamável e que quando submetido a ação do fogo liberou fumaça com substâncias tóxicas. Sendo assim, peço cordialmente a quem estiver lendo o presente trabalho com o intuito de aprimorar seus conhecimentos acerca do desempenho acústico de sistemas de pisos, que também procure mais informações acerca do comportamento dos materiais que compõem os sistemas de pisos quando em situações de incêndio, a fim de que se torne menos provável que tragédias como a da Boate Kiss voltem a ocorrer.

AGRADECIMENTOS

A concretização deste trabalho ocorreu devido ao auxílio, compreensão e dedicação de várias pessoas. Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste estudo, em especial:

- Aos meus pais, meus maiores apoiadores e conselheiros. Obrigado por priorizarem, acima de tudo, uma educação de qualidade para mim e para as minhas irmãs. O seu suporte incondicional e os constantes incentivos ao longo da minha vida acadêmica atenuaram essa difícil caminhada. Por vocês, sempre terei o maior amor e gratidão;

- Às minhas irmãs, que são minha inspiração e fonte de orgulho;

- À minha namorada, Laureane Matter Donato, pelo carinho, pela cumplicidade e por me apoiar e motivar sempre;

- Aos professores Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos e Jorge Luiz Pizzutti dos Santos, pela orientação, confiança e conhecimentos compartilhados. Agradeço a oportunidade que me foi dada e o auxílio no desenvolvimento deste trabalho;

- Aos professores Dinara Xavier da Paixão, Maria Fernanda de Oliveira, Roberto Aizik Tenenbaum e Viviane Suzey Gomes de Melo pelas contribuições para o desenvolvimento deste trabalho;

- Aos servidores do Laboratório de Termo-Acústica (LaTA) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM): Eder Luiz Felipetto, José Luiz Guerra e Juraci Bortoluzzi, que foram essenciais para a realização dos ensaios desta pesquisa;

- Às direções do Centro de Tecnologia (CT) e do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM);

- Aos colegas de pesquisa: Alessandra Haas, Camila Taciane Rossi e William Magalhães de Lourenço, pelas experiências e conhecimentos compartilhados;

- Aos colegas de pós-graduação: Liliane Bonadiman Buligon, Selton Fernandes de Sousa Lima e Tobias Pigatto Ottoni, pelo companheirismo e pela prestatividade;

- Aos meus amigos, pelos momentos compartilhados e pela parceria de sempre;

- A todas as empresas que contribuíram para o desenvolvimento deste estudo;

- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pois o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Muito obrigado!

RESUMO

INFLUÊNCIA DO FORRO DE GESSO ACARTONADO NO ISOLAMENTO AO RUÍDO DE IMPACTO DE SISTEMAS DE PISOS DE LAJE COM VIGOTAS PROTENDIDAS E LAJOTAS CERÂMICAS

AUTOR: Eduardo Henrique Lucca Santos
ORIENTADOR: Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos
COORIENTADOR: Jorge Luiz Pizzutti dos Santos

O incômodo relacionado ao ruído de impacto em sistemas de pisos de edificações residenciais é um problema corriqueiro em edificações multifamiliares e é fonte de transtorno aos usuários de edificações. Nesse contexto, torna-se necessário estudar o desempenho acústico de diversas configurações de sistemas de pisos, a fim de dar embasamento científico à comparação entre os materiais existentes no mercado. O presente estudo busca conhecer o desempenho acústico quanto ao ruído de impacto de uma laje pré-fabricada com vigotas protendidas e lajotas cerâmicas adotando-se como solução de isolamento sonoro a utilização de forro de gesso acartonado. Foram realizados ensaios visando a determinação do nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado ($L'_{nT,w}$) de diversas configurações de sistemas de pisos. Os ensaios seguiram as prescrições da ISO 16283-2 (2018) e o tratamento dos dados seguiu os procedimentos descritos na ISO 717-2 (2013). A classificação do nível de desempenho dos sistemas de pisos foi feita com base nos valores de $L'_{nT,w}$ estabelecidos na ABNT NBR 15575-3 (2013). Foram utilizados dois sistemas de forros: forro com gesso acartonado (entreforro de 150 mm) e forro com gesso acartonado e manta de lã de PET de 50 mm no entreforro (entreforro de 150 mm). Foram ensaiadas variadas configurações de sistemas de pisos contendo esses forros, pisos cerâmicos, pisos vinílicos, pisos laminados de madeira e materiais resilientes. Denotou-se que a técnica de forro suspenso é uma solução eficiente para lajes pré-fabricadas, podendo ser uma alternativa à técnica de piso flutuante ou podendo ser utilizada juntamente a ela, em situações que um nível de desempenho superior é almejado para entrepisos que separam habitações. Para o sistema de piso com forro de gesso acartonado (entreforro de 150 mm) instalado sob a laje pré-fabricada, encontrou-se um $L'_{nT,w}$ de 74 dB, constatando-se uma melhora no isolamento ao ruído de impacto igual a 17 dB em relação ao $L'_{nT,w}$ da laje em osso. Observou-se que a eficiência da solução de forro suspenso depende do tipo de piso utilizado, sendo mais eficiente para sistemas com pisos cerâmicos ou vinílicos do que para sistemas com pisos laminados de madeira, também dependendo do isolamento ao ruído de impacto proporcionado pelas demais camadas do sistema de piso, sendo que quanto maior for o isolamento proporcionado pelo sistema sem o forro, menor eficiência terá a instalação do forro suspenso no isolamento ao ruído de impacto. Outrossim, a colocação da manta de lã de PET de 50 mm no entreforro pode proporcionar uma melhora de até 3 dB no isolamento ao ruído de impacto do sistema de piso, dependendo de quais forem os materiais que compõem as demais camadas do sistema. Observou-se que a colocação de material absorvente sonoro fibroso no entreforro é uma solução para o isolamento ao ruído de impacto em baixas frequências (abaixo de 125 Hz).

Palavras-chave: Desempenho acústico. Edificações residenciais. Forro suspenso. Gesso acartonado. Laje pré-fabricada. Ruído de impacto. Sistemas de pisos.

ABSTRACT

INFLUENCE OF A PLASTERBOARD CEILING IN THE IMPACT NOISE ISOLATION OF A PREFABRICATED SLAB COMPOSED OF PRESTRESSED CONCRETE JOISTS AND HOLLOW CERAMIC BLOCKS

AUTHOR: Eduardo Henrique Lucca Santos
ADVISOR: Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos
CO-ADVISOR: Jorge Luiz Pizzutti dos Santos

The discomfort related to impact noise in residential building floor systems is a common problem in multifamily buildings and is a source of inconvenience to users of buildings. In this context, it is necessary to study the acoustic performance of different configurations of floor systems, in order to provide scientific basis for the comparison between the materials available on the market. The present study seeks to analyse the acoustic performance regarding impact noise of a prefabricated slab with prestressed joists and ceramic blocks, adopting as a solution the use of plasterboard ceiling. Tests were carried out to determine the weighted standardized impact sound pressure level ($L'_{nT,w}$) of different floor system configurations. The tests followed the requirements of ISO 16283-2 (2018) and the treatment of the data followed the procedures described in ISO 717-2 (2013). The classification of the level of performance of the floor systems was made based on the values of $L'_{nT,w}$ established in ABNT NBR 15575-3 (2013). Two ceiling systems were used: ceiling with plasterboard (150 mm plenum) and ceiling with plasterboard and a 50 mm PET wool insulation (150 mm plenum). Various configurations of floor systems containing the ceilings described, ceramic floors, vinyl floors, laminate wood flooring and resilient materials were tested. The suspended ceiling technique is an efficient solution for impact noise reduction in floor systems with prefabricated slabs, being an alternative to the floating floor technique. For the floor system with plasterboard ceiling (150 mm plenum) installed under the prefabricated slab, a 74 dB $L'_{nT,w}$ was found, meaning an improvement in the insulation to impact noise equal to 17 dB in relation to the $L'_{nT,w}$ of the slab without the plasterboard ceiling. Also, the ceiling technique can be used together with the floating floor technique, in situations where a higher level of performance is desired for floors that separate dwellings. The efficiency of the suspended ceiling solution depends on the type of floor used, being more efficient for systems with ceramic or vinyl floors than for systems with laminate wood flooring. The efficiency of the suspended ceiling solution also depends on the impact noise insulation provided by the other layers of the floor system, the greater the insulation provided by the system without the ceiling, the less efficient the installation of the false ceiling is to insulate impact noise. Furthermore, the placement of the 50 mm PET wool insulation between the plasterboard and the slab can provide an improvement of up to 3 dB in the insulation to the impact noise of the floor system, depending on the materials of the other layers of the system. It was noted that the placement of fibrous sound absorbing material in the plenum is a solution to the insulation of impact noise at low frequencies (below 125 Hz).

Keywords: Acoustic performance. Floor systems. Impact noise. Plasterboard. Prefabricated slab. Residential buildings. Suspended ceiling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Estrutura do trabalho.....	21
Figura 02 - Transmissão de ruído aéreo e de ruído de impacto em edificações.....	24
Figura 03 - Transmissão de ruído de impacto entre compartimentos adjacentes.....	26
Figura 04 - Revestimentos têxteis para sistemas de pisos.....	28
Figura 05 - Sistema de piso flutuante.....	29
Figura 06 - Material resiliente instalado em um sistema de piso.....	31
Figura 07 - Forros mais utilizados pelas construtoras de Santa Maria/RS.....	32
Figura 08 - Sistema de forro de gesso acartonado.....	33
Figura 09 - Corte transversal à canaleta de detalhes típicos do perímetro do forro: A) cantoneira e tratamento de junta; B) dilatação com tabica metálica; e C) dilatação com chapa de gesso acartonado.....	34
Figura 10 - Exemplo genérico de sistema de piso.....	36
Figura 11 - Tipos de vigota: A) vigota com armadura simples; B) vigota com armadura protendida; e C) vigota com armadura treliçada.....	38
Figura 12 - Elementos de enchimento: A) lajota cerâmica; B) lajota de EPS; e C) lajota de concreto.....	40
Figura 13 - Pisos mais utilizados pelas construtoras de Santa Maria/RS.....	41
Figura 14 - Resultados das medições de L'_{nT} para sistemas de pisos com diferentes tipos de camada estrutural.....	43
Figura 15 - Resultados dos ensaios de laje pré-fabricada de vigotas protendidas com piso cerâmico.....	44
Figura 16 - Resultados dos ensaios de composições com piso cerâmico e materiais resilientes.....	45
Figura 17 - Resultados dos ensaios de composições com pisos vinílicos.....	46
Figura 18 - Resultados dos ensaios de composições com régua clicada vinílica e materiais resilientes.....	47
Figura 19 - Resultados dos ensaios de composições com manta vinílica e materiais resilientes.....	48
Figura 20 - Resultados dos ensaios de composições com piso laminado de madeira AC4 e materiais resilientes.....	49
Figura 21 - Resultados dos ensaios de composições com piso laminado de madeira AC3 e materiais resilientes.....	50
Figura 22 - Resultados de ensaios de composições com piso cerâmico e gesso acartonado para uma laje maciça.....	52
Figura 23 - Resultados de ensaios de composições com piso laminado de madeira e gesso acartonado para uma laje maciça.....	54
Figura 24 - Laje nervurada de concreto armado “em osso”.....	55
Figura 25 - Laje nervurada de concreto armado com forro de gesso acartonado (tabica fechada).....	55
Figura 26 - Laje nervurada de concreto armado com forro de gesso acartonado (tabica aberta).....	56
Figura 27 - Resultados das medições do isolamento ao ruído de impacto de laje nervurada de concreto armado com forro de gesso acartonado.....	56
Figura 28 - Posicionamento das luminárias embutidas.....	57
Figura 29 - Resultados dos ensaios dos sistemas de pisos com forros de gesso acartonado com luminárias embutidas.....	58
Figura 30 - Detalhamento da montagem das vigotas e das lajotas.....	59
Figura 31 - Laje montada no local de ensaio.....	60

Figura 32 - Detalhamento da laje em osso	60
Figura 33 - Planta Baixa da câmara.....	61
Figura 34 - Corte Longitudinal AA' da câmara	61
Figura 35 - Placa móvel de contrapiso	62
Figura 36 - Revestimento cerâmico utilizado nos ensaios	63
Figura 37 - Mantas vinílicas utilizadas nos ensaios: A) manta de 0,7 mm; B) manta de 1,4 mm; e C) manta de 2,4 mm.....	64
Figura 38 - Régua vinílicas utilizadas nos ensaios: A) régua 2 mm; B) régua de 3 mm; e C) régua clicada de 4 mm	64
Figura 39 - Piso de placas vinílicas utilizado nos ensaios.....	65
Figura 40 - Pisos laminados utilizados nos ensaios: A) laminado de madeira AC4 e B) laminado de madeira AC3	65
Figura 41 - Lã de vidro sob amostra de contrapiso	66
Figura 42 - Lã de PET sob amostra de contrapiso.....	67
Figura 43 - EPP sob amostra de contrapiso	67
Figura 44 - Borracha reciclada sob amostra de contrapiso.....	67
Figura 45 - Borracha reciclada ondulada sob amostra de contrapiso	68
Figura 46 - Composição de sistema de forro referência “GA”.....	68
Figura 47 - Composição de sistema de forro referência “GA+LP”.....	69
Figura 48 - Materiais utilizados para a execução dos forros: A) pendural metálico; B) massa de rejunte; C) lã de PET; D) placas de gesso acartonado; E) rolo de fita de papel especial microperfurado; e F) cantoneiras e canaletas de aço galvanizado.....	70
Figura 49 - Estrutura metálica para sistema de forro de gesso acartonado	70
Figura 50 - Lã de PET posicionada no entreforro	71
Figura 51 - Forro de gesso acartonado executado	71
Figura 52 - Equipamentos utilizados nas medições: A) máquina de impacto; B) fonte acústica; C) amplificador; D) calibrador; E) sonômetro; F) microfone e pré-amplificador; e G) termo-higrobarômetro.....	72
Figura 53 - Posicionamentos das fontes e dos microfones.....	73
Figura 54 - Posicionamentos das máquinas de impacto e dos microfones.....	74
Figura 55 - Curva de valores de referência para o ruído de impacto.....	77
Figura 56 - Procedimento para a obtenção do $L'_{nT,w}$	77
Figura 57 - Resultados dos ensaios para os sistemas de pisos de referência.....	81
Figura 58 - Resultados dos ensaios para os sistemas de pisos de referência com contrapiso ..	82
Figura 59 - Resultados dos ensaios para os sistemas de pisos de referência com piso cerâmico, materiais resilientes e referência “GA”	83
Figura 60 - Resultados dos ensaios para os sistemas de pisos de referência com piso cerâmico, materiais resilientes e referência “GA+LP”	84
Figura 61 - Desempenho dos sistemas com piso cerâmico e forro como elementos separadores de unidades habitacionais autônomas	85
Figura 62 - Desempenho dos sistemas com piso cerâmico e forro como elementos separadores de áreas de uso coletivo sobre unidades habitacionais autônomas.....	85
Figura 63 - Resultados dos ensaios para os sistemas de pisos de referência com pisos vinílicos e referência “GA”	86
Figura 64 - Resultados dos ensaios para os sistemas de pisos de referência com pisos vinílicos e referência “GA+LP”	87
Figura 65 - Resultados dos ensaios para os sistemas de pisos de referência com régua clicada vinílica, materiais resilientes e referência “GA”	88
Figura 66 - Resultados dos ensaios para os sistemas de pisos de referência com régua clicada vinílica, materiais resilientes e referência “GA+LP”	89

Figura 67 - Resultados dos ensaios para os sistemas de pisos de referência com manta vinílica materiais resilientes e referência “GA”	90
Figura 68 - Resultados dos ensaios para os sistemas de pisos de referência com manta vinílica, materiais resilientes e referência “GA+LP”	91
Figura 69 - Desempenho dos sistemas com piso vinílico e forro como elementos separadores de unidades habitacionais autônomas	92
Figura 70 - Desempenho dos sistemas com piso vinílico e forro como elementos separadores de áreas de uso coletivo sobre unidades habitacionais autônomas.....	93
Figura 71 - Resultados dos ensaios para os sistemas de pisos de referência com piso laminado de madeira AC4, materiais resilientes e referência “GA”	94
Figura 72 - Resultados dos ensaios para os sistemas de pisos de referência com piso laminado de madeira AC4, materiais resilientes e referência “GA+LP”	95
Figura 73 - Resultados dos ensaios para os sistemas de pisos de referência com piso laminado de madeira AC3, materiais resilientes e referência “GA”	96
Figura 74 - Resultados dos ensaios para os sistemas de pisos de referência com piso laminado de madeira AC3, materiais resilientes e referência “GA+LP”	97
Figura 75 - Desempenho dos sistemas com piso laminado de madeira e forro como elementos separadores de unidades habitacionais autônomas	98
Figura 76 - Desempenho dos sistemas com piso laminado de madeira e forro como elementos separadores de áreas de uso coletivo sobre unidades habitacionais autônomas....	99
Figura 77 - Curva da estimativa do isolamento proporcionado por forro de gesso acartonado para sistemas com revestimento de porcelanato	100
Figura 78 - Curva da estimativa do isolamento proporcionado por forro de gesso acartonado com material absorvente sonoro no entreforro para sistemas com revestimento de porcelanato.....	100
Figura 79 - Curva da estimativa do isolamento proporcionado por forro de gesso acartonado para sistemas com revestimento de piso vinílico.....	101
Figura 80 - Curva da estimativa do isolamento proporcionado por forro de gesso acartonado com material absorvente sonoro no entreforro para sistemas com revestimento de piso vinílico	101
Figura 81 - Curva da estimativa do isolamento proporcionado por forro de gesso acartonado para sistemas com revestimento de piso laminado de madeira	102
Figura 82 - Curva da estimativa do isolamento proporcionado por forro de gesso acartonado com material absorvente sonoro no entreforro para sistemas com revestimento de piso laminado de madeira	102

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 - Classificação do nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado....	78
Quadro 02 - Coeficientes para prever o isolamento do sistema com forro de gesso acartonado (entreforro de 150 mm).....	103
Quadro 03 - Coeficientes para prever o isolamento do sistema com forro de gesso acartonado + 50 mm de Lã de PET (entreforro de 150 mm).....	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Materiais resilientes utilizados para isolamento acústico	30
Tabela 02 - Composições de sistemas de pisos com diferentes tipos de camada estrutural.....	42
Tabela 03 - Resumo dos resultados dos ensaios para configurações com laje maciça, piso cerâmico e forro de gesso acartonado.....	51
Tabela 04 - Resumo dos resultados dos ensaios para configurações com laje maciça, piso laminado de madeira e forro de gesso acartonado.....	53
Tabela 05 - Caracterização dos sistemas de pisos ensaiados.....	57
Tabela 06 - Características dos pisos vinílicos utilizados nos ensaios	63
Tabela 07 - Características dos pisos laminados de madeira utilizados nos ensaios	65
Tabela 08 - Materiais resilientes	66
Tabela 09 - Equipamentos utilizados nas medições	72
Tabela 10 - Valores de referência para ruído de impacto de acordo com as bandas de frequência	76

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CIB	Conselho Internacional da Construção
CT	Centro de tecnologia
EPE	Polietileno expandido
EPP	Polipropileno expandido
EPS	Poliestireno Expandido
GA	Gesso Acartonado
I	Intermediário
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISO	International Organization for Standardization
LaTA	Laboratório de Termo-Acústica
LP	Lã de PET
M	Mínimo
NBR	Norma Técnica Brasileira
ONU	Organização das Nações Unidas
PC	Piso Cerâmico
PET	Poli tereftalato de Etileno
PLM	Piso Laminado de Madeira
PV	Piso Vinílico
PVC	Policloreto de Vinila
RS	Rio Grande do Sul
S	Superior
ST	Standard
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
VC	Vigota de concreto armado
VP	Vigota de concreto protendido
VT	Vigota com armadura treliçada
VUP	Vida útil de projeto

LISTA DE SÍMBOLOS

cm	Centímetro
c	Constante dissipativa
k	Constante elástica
dB	Decibel
Ø	Diâmetro
g	Grama
°	Graus
°C	Graus Celsius
Hz	Hertz
R_w	Índice de Redução Sonora
m	Massa
MPa	Megapascal
Δ	Melhoria no isolamento ao ruído de impacto
m	Metro
m ³	Metro cúbico
mm	Milímetro
L	Nível de pressão sonora de impacto
L_i	Nível de pressão sonora de impacto médio
L'_{nT}	Nível de pressão sonora de impacto padronizado
$L'_{nT,w}$	Nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado
%	Por cento
Kg	Quilograma
Kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
Kg/m ²	Quilograma por metro quadrado
KHz	Quilohertz
KN	Quilonewton
s	Segundo
T ₆₀	Tempo de Reverberação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	JUSTIFICATIVA	18
1.2	OBJETIVOS	19
1.2.1	Objetivo geral.....	19
1.2.2	Objetivos específicos.....	20
1.3	METODOLOGIA DA PESQUISA	20
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	SOM E RUÍDO.....	22
2.2	PROPAGAÇÃO DO RUÍDO	23
2.2.1	Transmissão de ruído de impacto pelos flancos.....	25
2.3	ISOLAMENTO SONORO PARA RUÍDO DE IMPACTO	26
2.3.1	Revestimentos têxteis para pisos	27
2.3.2	Pisos flutuantes	28
2.3.3	Forros suspensos	31
<i>2.3.3.1</i>	<i>Utilização de material absorvente sonoro no entreferro</i>	<i>34</i>
2.4	SISTEMAS DE PISOS	35
2.4.1	Lajes pré-fabricadas.....	37
<i>2.4.1.1</i>	<i>Vigotas.....</i>	<i>37</i>
<i>2.4.1.2</i>	<i>Elementos de enchimento</i>	<i>39</i>
2.4.2	Revestimentos	40
2.5	ESTUDOS SOBRE ISOLAÇÃO AO RUÍDO DE IMPACTO	42
2.5.1	Estudos com lajes pré-fabricadas.....	42
2.5.2	Estudos com forros de gesso acartonado.....	50
3	MATERIAIS E MÉTODOS	59
3.1	LOCAL DE ENSAIO	59
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS	62
3.2.1	Contrapiso	62
3.2.2	Revestimento cerâmico.....	62
3.2.3	Revestimentos vinílicos.....	63
3.2.4	Revestimentos laminados de madeira.....	65
3.2.5	Materiais resilientes.....	66
3.2.6	Sistemas de forros de gesso acartonado.....	68
3.3	EQUIPAMENTOS	72
3.4	PROCEDIMENTOS PARA AS MEDIÇÕES.....	73

3.5	PROCEDIMENTOS PARA OS CÁLCULOS	75
3.6	CLASSIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DOS SISTEMAS DE PISOS	78
3.7	INCERTEZA DE MEDIÇÃO	78
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	80
4.1	SISTEMAS DE REFERÊNCIA	80
4.2	COMPOSIÇÕES COM PISO CERÂMICO	82
4.3	COMPOSIÇÕES COM PISOS VINÍLICOS	86
4.4	COMPOSIÇÕES COM PISOS LAMINADOS DE MADEIRA	93
4.5	ESTIMATIVA DO ISOLAMENTO ACÚSTICO PROPORCIONADO PELA INSTALAÇÃO DE FORRO SUSPENSO EM LAJES PRÉ-FABRICADAS.....	99
5	CONCLUSÃO.....	104
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	105
	REFERÊNCIAS	107

1 INTRODUÇÃO

A população urbana mundial cresceu substancialmente nas últimas décadas. Em 1950 somente cerca de 30% da população mundial habitava áreas urbanas, percentual que em 2018 alcançou 55%. (ONU, 2018). Similarmente, no Brasil, o grau de urbanização passou de 75,6%, em 1991, para 84,4%, em 2010, apresentando indicativos da diminuição da população rural e do aumento da população urbana. (IBGE, 2011).

O crescimento da população urbana causou a necessidade da redistribuição e da otimização do espaço urbano, tendo como consequência o fenômeno do adensamento populacional nas cidades. Lee et al. (2016) explanam que uma das melhores práticas para lidar com o déficit habitacional em áreas urbanas com alta densidade populacional é a construção de edifícios residenciais multifamiliares, que têm como vantagem a utilização eficiente de pequenas áreas. Com o intuito de viabilizar a construção dessas edificações, Pereyron e Santos (2007, p. 1) apontam que “a crescente verticalização das cidades nos tempos modernos impulsionou uma busca por novas tecnologias que permitissem um menor custo uma maior agilidade no tempo de construção”.

É imperativo, porém, que essa busca por otimizar processos construtivos não vá de encontro a vertente de projetar e executar edificações com enfoque na qualidade do produto entregue aos usuários. De acordo com Oliveira e Mitidieri Filho (2012, p. 2) “cada vez mais a prática de projetar com enfoque em desempenho deve ser incorporada ao processo de projeto [...]”. Lee et al. (2016) destacam que o ruído advindo de apartamentos é uma consideração necessária no projeto de edifícios residenciais, pois os usuários de edificações estão cercados por vizinhos, estando separados apenas por uma parede ou uma laje.

Entretanto, da necessidade de racionar materiais decorre a diminuição das dimensões dos elementos construtivos, reduzindo-se as espessuras de painéis separadores de ambientes, o que, de acordo com Pedroso (2007), pode ocasionar níveis de ruído que causem desconforto aos usuários. Ainda, “para as edificações, uma série de novos materiais é empregada e, muitos deles, materiais leves, de baixo isolamento acústico”. (SOUZA; ALMEIDA; BRAGANÇA, 2012, p. 23).

O descontentamento dos usuários de edificações, preocupados com os padrões de conforto e exigentes quanto à compatibilidade da qualidade de vida no imóvel com o investimento financeiro na aquisição dele, obriga a indústria da construção civil a buscar o desenvolvimento tecnológico. (PEDROSO, 2007).

Nesse contexto, em julho de 2013, entrou em vigor no Brasil a norma ABNT NBR 15575 (2013), que determina exigências quanto à segurança, habitabilidade e sustentabilidade em habitações residenciais. Uma dessas exigências é relativa ao desempenho acústico, para a qual foram estabelecidos critérios, requisitos e métodos de avaliação referentes aos sistemas construtivos que envolvem o desempenho acústico de uma edificação residencial.

Dessa forma, oportuniza-se por meio dessa normativa que o produto da construção civil brasileira tenha ao menos um nível mínimo de qualidade. Entretanto, não é possível afirmar que edificações residenciais construídas após a entrada em vigor da ABNT NBR 15575 (2013) proporcionam os níveis mínimos de desempenho estabelecidos pela norma. Santana et al. (2017) observaram que os edifícios analisados em sua pesquisa não alcançaram os níveis de *performance* acústica preconizados pela ABNT NBR 15575 (2013), mesmo que os níveis mínimos de desempenho estipulados na norma brasileira para essa exigência estejam aquém dos preconizados pela maioria das normas internacionais.

A ABNT NBR 15575 (2013) também ganha notoriedade devido à necessidade do setor em relacionar o nível de desempenho das edificações aos investimentos financeiros realizados pelos adquirentes de imóveis. Polli (2007) observou que o isolamento acústico entre ambientes é indiferente ao padrão de acabamento estipulado para edificações, sendo que o isolamento acústico das edificações analisadas em sua pesquisa foi insuficiente, independentemente do padrão da edificação ser alto, médio, baixo ou popular.

Torna-se imprescindível, portanto, estudar o comportamento dos sistemas construtivos já existentes no setor da construção civil e analisar técnicas que possam ser utilizadas para melhorar os níveis de *performance* acústica das edificações residenciais brasileiras. Sendo assim, o presente trabalho tem como intuito analisar o comportamento de lajes pré-fabricadas quando utilizadas soluções de isolamento ao ruído de impacto.

1.1 JUSTIFICATIVA

Dentre os tipos de ruído que podem causar desconforto em habitações, merece destaque o ruído de impacto, cuja transmissão ocorre por meio do sistema de piso, sendo emitido, por exemplo, pelo caminhar de pessoas e animais, pelo arraste de móveis e pela queda de objetos. (MORENO; SOUZA; PENTEADO, 2017).

A ineficiência do isolamento acústico de sistemas de pisos é um grande problema em edificações residenciais. Em uma pesquisa realizada por Santana et al. (2017), acerca da percepção dos usuários de edificações quanto ao conforto acústico das suas moradias, 70% dos

entrevistados declararam não perceber isolamento acústico no sistema de piso do andar superior ao dos seus apartamentos, sendo que grande parte dos entrevistados afirmaram se sentir desconfortáveis devido ao ruído proveniente desse sistema.

Uma das soluções de isolamento ao ruído de impacto é a execução de forro suspenso no recinto de recepção do ruído. (SANTOS, 2012). No Brasil, existe pouca bibliografia acerca do isolamento acústico propiciado pela utilização de sistemas de forros, sendo que as pesquisas existentes indicam a ineficiência dessa solução para sistemas de pisos que têm laje maciça como camada de base.

Porém, Alonso, Patrício e Suárez (2019) concluíram que, quando se trata de avaliar a redução do impacto sonoro, o comportamento acústico de pisos difere significativamente se eles forem homogêneos ou não homogêneos. Oliveira e Patrício (2017) observaram que sistemas de pisos heterogêneos têm meios mais complexos de propagação do que sistemas homogêneos.

Dessa forma, embora a execução de forro suspenso seja uma técnica ineficiente para o isolamento acústico de lajes homogêneas, essa técnica pode ser eficiente para lajes não homogêneas, como por exemplo lajes pré-fabricadas, sendo necessário realizar ensaios para averiguar essa assertiva.

Portanto, faz-se necessário entender o comportamento da utilização de forros suspensos para o isolamento acústico de sistemas de pisos não homogêneos. A proposta do presente trabalho é a de avaliar o desempenho ao ruído de impacto de uma laje pré-fabricada com vigotas protendidas e lajotas cerâmicas, de forma a analisar composições de sistemas de pisos com a utilização de forro de gesso acartonado, estudando a utilização destes forros como solução de isolamento acústico ao ruído de impacto.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O presente estudo tem como objetivo avaliar o desempenho ao ruído de impacto de composições de sistemas de pisos com laje pré-fabricada de vigotas protendidas e lajotas cerâmicas como camada estrutural e com forro de gesso acartonado como técnica de isolamento sonoro.

1.2.2 Objetivos específicos

- I. Avaliar o isolamento ao ruído de impacto da laje pré-fabricada com vigotas protendidas e lajotas cerâmicas quando forem utilizados contrapiso de concreto, pisos cerâmicos, pisos laminados de madeira, pisos vinílicos e materiais resilientes simultaneamente à utilização de forros suspensos.
- II. Analisar a utilização de material absorvente sonoro no entreferro como técnica para melhorar o isolamento ao ruído de impacto.
- III. Comparar os resultados alcançados para os sistemas de pisos estudados com as exigências de desempenho para sistemas de pisos da ABNT NBR 15575-3 (2013).
- IV. Estimar a tendência do isolamento acústico que os sistemas de forros estudados podem propiciar para uma laje pré-fabricada nervurada com vigotas e lajotas.

1.3 METODOLOGIA DA PESQUISA

O presente estudo divide-se em duas partes. A primeira parte classifica-se como pesquisa exploratória, feita por meio de levantamento bibliográfico acerca dos temas pertinentes ao desenvolvimento do trabalho. Já a segunda parte classifica-se como uma pesquisa explicativa, decorrente da realização de procedimentos experimentais no Laboratório de Termo-Acústica (LaTA) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação é composta por cinco capítulos:

Capítulo 1 - Introdução: apresenta e contextualiza o trabalho, aponta a justificativa para a realização da pesquisa, os objetivos deste estudo, a metodologia utilizada e a estrutura do trabalho.

Capítulo 2 - Revisão bibliográfica: aborda os conceitos necessários para o entendimento acerca do assunto abordado.

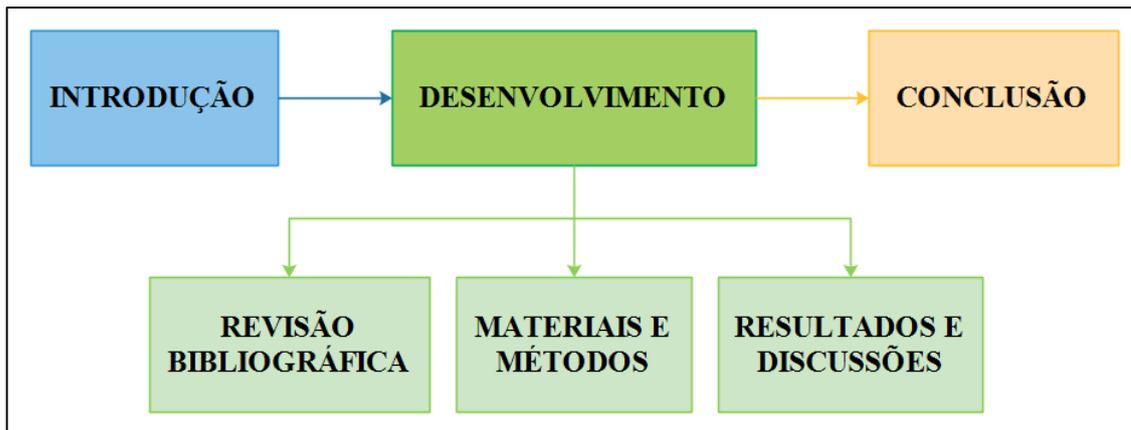
Capítulo 3 - Materiais e métodos: informa as características do local de ensaio, dos materiais e dos equipamentos utilizados na pesquisa, bem como indica os procedimentos utilizados para os ensaios, para os cálculos e para a classificação dos resultados.

Capítulo 4 - Resultados e discussões: apresenta os resultados encontrados na pesquisa e a análise deles.

Capítulo 5 - Conclusão: informa as conclusões referentes à pesquisa e apresenta recomendações para trabalhos futuros.

A estrutura do trabalho está representada na Figura 01.

Figura 01 - Estrutura do trabalho.



Fonte: Autor.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentadas temáticas pertinentes ao desenvolvimento da presente pesquisa. Sendo assim, abordam-se assuntos relacionados ao desempenho acústico de sistemas de pisos, como: som, ruído, propagação de ruído, técnicas de isolamento acústico e componentes de sistemas de pisos. Também, mostra-se um estado da arte com relevância ao presente estudo.

2.1 SOM E RUÍDO

O som caracteriza-se como uma forma de energia transmitida por meio da colisão sucessiva de partículas em um meio, seja este meio gasoso, líquido ou qualquer material sólido, podendo ser representado por uma série de compressões e rarefações durante a sua propagação. (PAIXÃO, 2002). As partículas não se deslocam se o meio não estiver em movimento, mas sim vibram em torno do seu centro de equilíbrio, transmitindo a energia sonora para as partículas próximas até que venha a se extinguir a flutuação da pressão sonora. (SOUZA; ALMEIDA; BRAGANÇA, 2012).

A definição de som, conforme a ABNT NBR 16313 (2014), é a de flutuações de pressão em torno da pressão ambiente nas frequências compreendidas entre 20 Hz e 20 kHz. Sons abaixo de 20 Hz são chamados de infrassons e sons acima de 20000 Hz de ultrassons; ambos não podem ser compreendidos pelo ouvido “padrão” humano. (PATRÍCIO, 2018).

A sensibilidade do aparato auditivo humano é variável com a frequência, ou seja, sons, com o mesmo nível de amplitude, porém com frequências diferentes, causarão distintas impressões subjetivas de volume sonoro. Os humanos são mais sensíveis a sons nas faixas de frequências entre 1000 Hz e 4000 Hz, sendo que a sensibilidade diminui abaixo e acima desse intervalo. Isso implica que, para que um som de baixa frequência produza a mesma sensação auditiva que um som de maior frequência, ele precisa ter maior amplitude. Adicionalmente, a variação da sensibilidade com a frequência também é um fenômeno dependente da amplitude da onda sonora. (BRANDÃO, 2016, p. 60).

Outrossim, a percepção desagradável, incômoda, irritante, e por vezes lesiva, da onda sonora é definida como ruído. (PEDROSO, 2007). Som e ruído são da mesma natureza física e, dependendo da situação, um som pode ser designado como ruído, estando estes conceitos

associados à sensação auditiva humana. (ABNT NBR 16313, 2014). A noção de incomodidade provocada pelo som é subjetiva, pois o mesmo tipo de som, dependendo de fatores como horários, circunstâncias e da pessoa sujeita a ele, pode ser agradável ou desagradável. (CABRAL, 2012).

O som sempre fez parte da vida cotidiana. Todavia, nas sociedades modernas, grande parte do som é entendido desagradavelmente pelo auditor, ou seja, como incomodativo e sem conteúdo informativo, sendo definido nesta circunstância como ruído. Por esta evidência se constata que o ruído, como “subconjunto” do som, não depende somente das suas características físicas (amplitude, frequência e duração) mas também da atitude que o ser humano tem relativamente à sua percepção. (PATRÍCIO, 2018, p. 5).

Há sons que são ouvidos em frequência e intensidade suficientes para provocar lesões temporárias ou permanentes; esses sons podem estar presentes no trabalho, no lar, na escola, nas ruas ou em atividades de lazer. (SALIBA, 2014). Além disso, os efeitos nocivos dos ruídos ao ser humano, de acordo com Souza, Almeida e Bragança. (2002, p. 46),

Não se limitam às lesões do aparelho auditivo, podendo causar efeitos tanto físicos como psicológicos. Quanto aos aspectos físicos, podem ser citados: perda auditiva até a surdez permanente em casos limites, dores de cabeça, fadiga, distúrbios cardiovasculares, distúrbios hormonais, gastrites, disfunções digestivas, alergias, entre outros. Quanto aos aspectos psicológicos, a exposição ao ruído pode levar à perda de concentração e de reflexos, à irritação permanente, a perturbações do sono, à sensação de insegurança, entre outros.

2.2 PROPAGAÇÃO DO RUÍDO

Em se tratando do estudo do som e do conforto acústico classifica-se o ruído quanto à sua origem e propagação em: ruído aéreo e ruído de impacto. (PEREYRON; SANTOS, 2007).

Quanto à origem, o ruído aéreo é produzido pela pressão acústica incidente sobre uma estrutura ou elemento de vedação, enquanto que o ruído estrutural é produzido por força de impacto ou vibração incidente sobre uma estrutura. (PANOSSO, 2015).

Quanto à propagação, o “som aéreo é o som que se propaga pelo ar”. (ABNT NBR 16313, 2014, p. 1). Paixão (2002, p. 23) afirma que “quando a propagação sonora ocorre no ar, as ondas são apenas do tipo longitudinal, indicando que a vibração das partículas acontece na

mesma direção da propagação da onda”. Sons gerados por conversações ou por instrumentos musicais são exemplos de ruído aéreo produzidos em edificações. (FERRAZ, 2008).

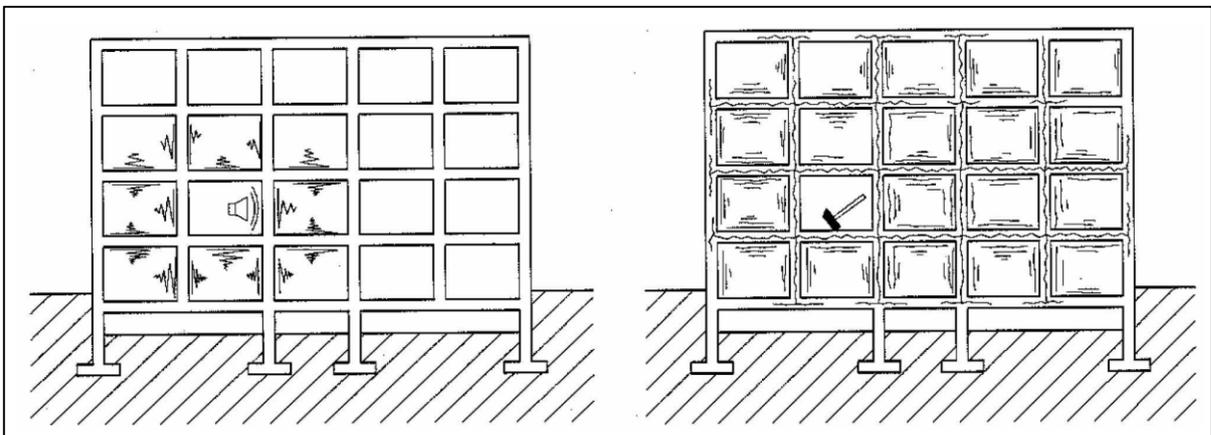
Quanto ao ruído de impacto, há a definição de que “o som de impacto é o som resultante do impacto entre materiais”. (ABNT NBR 16313, 2014, p. 3). Nesse tipo de ruído a transmissão sonora ocorre diretamente pelo impacto, seguida pela consequente vibração dos elementos construtivos. (SANTOS, 2012).

O ruído estrutural se propaga em todas as direções e, portanto, diferentemente do ruído aéreo, as ondas não são apenas do tipo longitudinal, podendo “[...] ser encontradas, também, ondas de cisalhamento, torção e de flexão”. (PAIXÃO, 2002, p. 23). Outrossim, ruídos estruturais apresentam maior velocidade de propagação do que ruídos aéreos, pois a velocidade de propagação do som em meios sólidos é maior do que em meios gasosos. (SANTOS, 2012).

O ruído de impacto é ocasionado, por exemplo, por passos, queda de objetos e arrastar de móveis, sendo o resultado de uma excitação de curta duração, podendo ser repetitivo, mas dificilmente periódico. (FERRAZ, 2008). Park e Lee (2017) apontam crianças correndo, adultos caminhando, movimentação de móveis e queda de pequenos objetos como as fontes mais frequentes desse tipo de ruído.

Cornacchia (2009) afirma que enquanto o ruído aéreo pode ser fonte de incômodo a ambientes próximos do local no qual se originou, o ruído de impacto pode se estender por toda a edificação. O alcance do ruído aéreo e do ruído de impacto em uma edificação está representado na Figura 02.

Figura 02 - Transmissão de ruído aéreo e de ruído de impacto em edificações.



Fonte: Meisser (1973 apud MEDEIROS, 2003, p.15).

Heissler et al. (2017) salientam que devido à rigidez das ligações entre os diversos elementos construtivos existentes em um edifício, a vibração gerada pela excitação de impacto irá se transmitir pela estrutura. A energia gerada desse impacto propaga-se por toda a malha definidora dos espaços da edificação, estabelecendo campos sonoros em compartimentos razoavelmente distantes do local de origem da excitação. (PATRÍCIO, 2010). Dessa forma, ruídos decorrentes de impacto caracterizam-se pela sua abrangência na edificação e pela maior velocidade de propagação do som. (HEISSLER et al., 2017).

Destaca-se que a transmissão de ruído de impacto não ocorre da mesma forma em sistemas de pisos com lajes homogêneas e sistemas de pisos com lajes não homogêneas. Lajes não homogêneas têm meios mais complexos para a transmissão de ruído de impacto. Para essas lajes é necessário entender as singularidades de cada material que compõe cada subsistema, bem como entender os tipos de conexões entre os elementos desses subsistemas. (OLIVEIRA; PATRÍCIO, 2017). Brunskog, Dickow e Ohlrich (2009) afirmam que a ortogonalidade e a periodicidade introduzida pelas nervuras das lajes nervuradas unidirecionais fazem com que a propagação de ruído pela estrutura não ocorra da mesma maneira que em lajes homogêneas.

2.2.1 Transmissão de ruído de impacto pelos flancos

A transmissão de ruído de impacto entre dois compartimentos adjacentes, de um piso superior para um ambiente adjacente inferior, tem uma parcela de transmissão direta, que ocorre por meio do elemento construtivo percutido, e uma parcela de transmissão indireta, que ocorre por meio dos elementos adjacentes ao percutido. (MATEUS; PEREIRA, 2012).

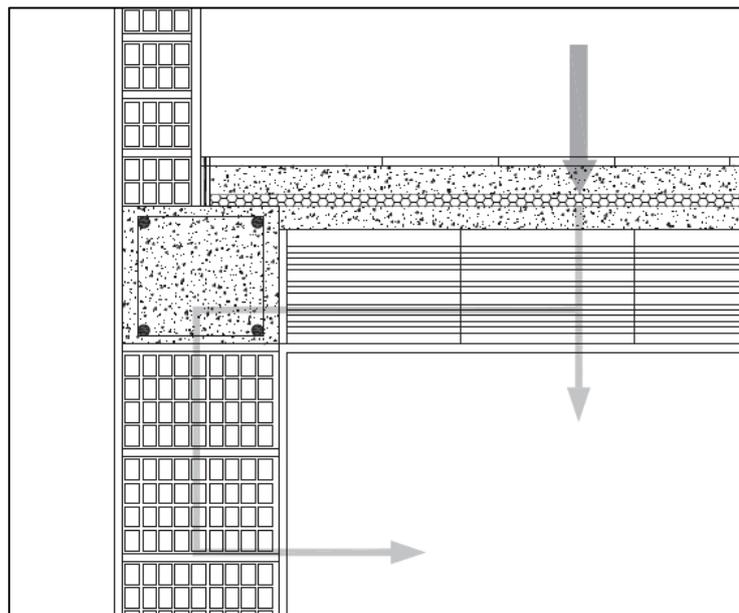
A transmissão indireta ou transmissão pelos flancos é a transmissão de energia sonora decorrente da excitação por impacto de um elemento construtivo, de um ambiente de emissão para um ambiente de recepção, por meio de caminhos estruturais, devido à vibração dos elementos construtivos adjacentes ao elemento percutido: paredes, pisos e tetos. (ISO 12354-2, 2017, p. 6, tradução do autor).

Semprini e Barbaresi (2013) afirmam que o desempenho acústico de um sistema de piso é influenciado pela transmissão do ruído de impacto pelas paredes laterais e que a quantia de energia sonora transmitida por meio desse elemento depende: do tipo de ligação entre as paredes e o sistema de piso e da massa e das dimensões dos sistemas de vedações verticais. Nunes et al. (2018) evidenciam que quanto maior for a massa de uma parede e menores forem as dimensões das aberturas executadas nessa parede para a instalação de esquadrias, menor será a

contribuição da resposta vibracional da parede e, portanto, melhor será o desempenho acústico do sistema de piso.

A Figura 03 ilustra a transmissão de ruído de impacto de forma direta e também de forma indireta por meio de uma parede lateral.

Figura 03 - Transmissão de ruído de impacto entre compartimentos adjacentes.



Fonte: Semprini e Barbaresi (2013, p. 1).

Considerar a contribuição da parcela indireta é o fator determinante que estabelece a diferença de uma medição feita *in situ* para uma realizada em laboratório, quando em laboratório o sistema de piso for executado sem que haja ligação rígida com o sistema de vedação vertical. (CORNACCHIA, 2009).

2.3 ISOLAMENTO SONORO PARA RUÍDO DE IMPACTO

Isolamento acústico é um tratamento acústico que consiste na redução da transmissão sonora entre ambientes distintos. (ABNT NBR 16313, 2014). Pode-se entender isolamento acústico como a atenuação da transmissão de energia sonora atrelada ao desempenho e às características dos diversos elementos e materiais empregados em um determinado sistema construtivo. (MEDEIROS, 2003).

A ABNT NBR 15575-3 (2013, p. 8) define que isolamento acústico do sistema de piso “é o conjunto de operações e técnicas construtivas (serviços), composto por uma ou mais camadas, que tem por finalidade atenuar a passagem de ruídos”.

Frente ao ruído de impacto, as características da laje e do sistema de revestimento de piso têm grande influência no comportamento do sistema como um todo, devendo esses elementos serem projetados de maneira a se complementarem e proporcionarem um desempenho adequado. (PATRÍCIO, 2010).

Inicialmente, pode-se imaginar que os efeitos do ruído de impacto podem ser convenientemente reduzidos com o aumento da rigidez da estrutura, o que poderia ser solucionado com o aumento da espessura da composição. [...]. Entretanto, estudos realizados demonstram que esse método se torna inviável economicamente, visto que o ganho de isolamento é na ordem de 0,5 a 1 dB a cada aumento de 1 cm na espessura da composição. (SANTOS, 2012, p. 76-77).

Assim, existem três estratégias convencionais para o isolamento ao ruído de impacto em edificações residenciais: isolamento na origem do impacto pela utilização de revestimentos macios; isolamento entre o piso e a laje com a utilização de material resiliente; e isolamento no recinto de recepção do ruído com a instalação de forro suspenso.

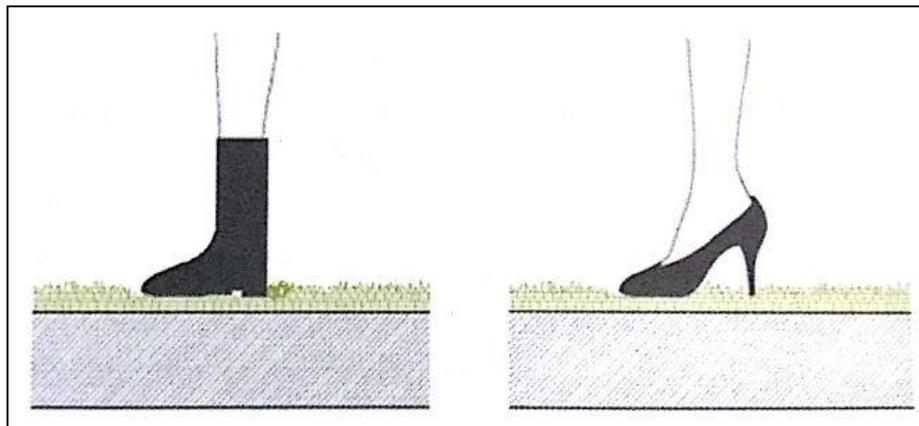
2.3.1 Revestimentos têxteis para pisos

Esta solução consiste na utilização de revestimento macio, como tapete ou carpete, sobre o sistema de piso. Revestimento têxtil de pisos é “o artigo flexível, composto de uma camada de superfície, constituída de material têxtil, com ou sem base, destinado ao revestimento de pisos”. (ABNT NBR 7686, 2016, p. 1).

Dentre os revestimentos têxteis existentes no mercado, os materiais com maior espessura, densidade e incompressibilidade são mais eficientes. (SANTOS, 2012). Deve-se ter o cuidado de que o peso aplicado sobre o material não exerça compressão acima da capacidade dele, pois isso faz com que o material fique rígido e perca a função de isolante acústico. (SOUZA; ALMEIDA; BRAGANÇA, 2012).

A Figura 04 apresenta um exemplo da utilização de revestimentos têxteis em um sistema de piso.

Figura 04 - Revestimentos têxteis para sistemas de pisos.



Fonte: Santos (2012, p. 93).

Embora essa solução seja eficiente para a exigência de desempenho acústico, este é um método pouco utilizado no Brasil, principalmente devido a questões culturais e sanitárias. (PEDROSO, 2007). Nesse contexto, os fabricantes de revestimentos têxteis vêm desenvolvendo produtos antialérgicos, como tapetes e carpetes antiácaros, a fim de ofertar um produto que seja compatível à demanda de pessoas que têm doenças respiratórias, como bronquite, asma e sinusite. Entretanto, Becher et al. (2018, p. 1, tradução do autor) afirmam que,

Os produtores de tapetes e carpetes argumentam regularmente que as avaliações anteriores estão obsoletas e que os tapetes modernos não representam mais um problema para a qualidade do ar interno. Ainda, eles agora afirmam que a utilização de revestimentos têxteis é uma boa opção, mesmo para pessoas com asma e alergias. [...]. Porém, até o momento, não há evidências de trabalhos científicos que sustentem a noção de que os tapetes e carpetes modernos não sejam problemáticos quando utilizados no interior de edificações. Pelo contrário, a literatura sugere que a utilização de tapetes e carpetes está relacionada a altos níveis de poeira, alérgenos e microorganismos, tendo também associação com um maior risco de desenvolvimento de problemas de saúde, como efeitos cognitivos leves, sintomas irritativos e asma.

2.3.2 Pisos flutuantes

Esta técnica tem como princípio cessar o vínculo rígido entre a fonte de impacto e a estrutura da edificação. É utilizado um material resiliente elástico para isolar o contrapiso e o revestimento da laje, sendo que quanto maior for a resiliência do material, maior será a sua

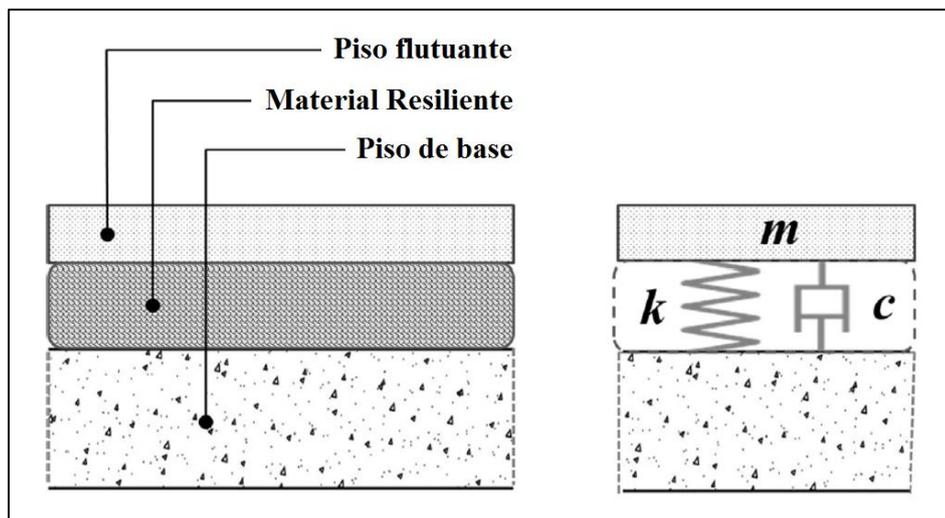
eficiência. (SANTOS, 2012). Esse sistema é definido como massa-mola-amortecimento. (GERGES, 2000).

Um piso flutuante consiste em um piso desacoplado da camada de base por meio de uma camada resiliente contínua. Em termos gerais, pode ser representado como um sistema massa-mola-amortecimento sobre uma base de suporte inercial, em que a massa é o piso flutuante e a mola (e amortecedor) é a camada resiliente contínua. (SCHIAVI, 2018, p. 2, tradução do autor).

Dessa forma, são duas superfícies compostas uma sobre a outra, com um material flexível colocado entre elas para absorver a onda sonora. (SOUZA; ALMEIDA; BRAGANÇA, 2012).

A Figura 05 apresenta um exemplo de um sistema de piso flutuante sobre uma laje de concreto armado, sendo o material resiliente caracterizado pela sua rigidez (mola com constante elástica k) e amortecimento (amortecedor com constante dissipativa c) e o piso flutuante caracterizado por sua inércia (massa m).

Figura 05 - Sistema de piso flutuante.



Fonte: Adaptado de Schiavi (2018, p. 2).

Oliveira e Patrício (2017) verificaram que um comportamento típico de decaimento dos níveis sonoros a partir da banda de 500 Hz devido ao amortecimento proporcionado pela utilização dessa técnica.

A Tabela 01 apresenta e descreve alguns dos materiais resilientes existentes no mercado da construção civil brasileiro.

Tabela 01 - Materiais resilientes utilizados para isolamento acústico.

Material resiliente	Descrição do material
Lã de rocha	Material fibroso produzido pela conglomeração de fibras de rocha.
Lã de vidro	Material fibroso produzido pela conglomeração de fibras de vidro.
Lã de PET	Material fibroso confeccionado a partir de materiais plásticos do tipo PET reciclados, oriundos da indústria de produção de garrafas e embalagens.
Polietileno expandido (EPE)	Termoplástico derivado do etileno produzido a partir de um processo de expansão.
Polipropileno expandido (EPP)	Material produzido a partir da resina de polipropileno, que é combinada com outros elementos para posteriormente ser expandida.
Borracha reciclada	Material produzido a partir de grânulos de borracha reciclada aglomerados com poliuretano.

Fonte: Adaptado de Haas (2019), Asdrubali, D'Alessandro e Schiavoni (2015), ABNT NBR 13047 (2014) e ABNT NBR 11361 (2013).

Pedroso (2007) ensaiou diversos materiais resilientes em composições de sistemas de pisos que tinham como camada de base uma laje de concreto armado de 12 cm de espessura. Nesses ensaios, o material que teve melhor desempenho foi a lã de vidro e o que teve pior desempenho foi um material produzido a partir de resíduos de borracha.

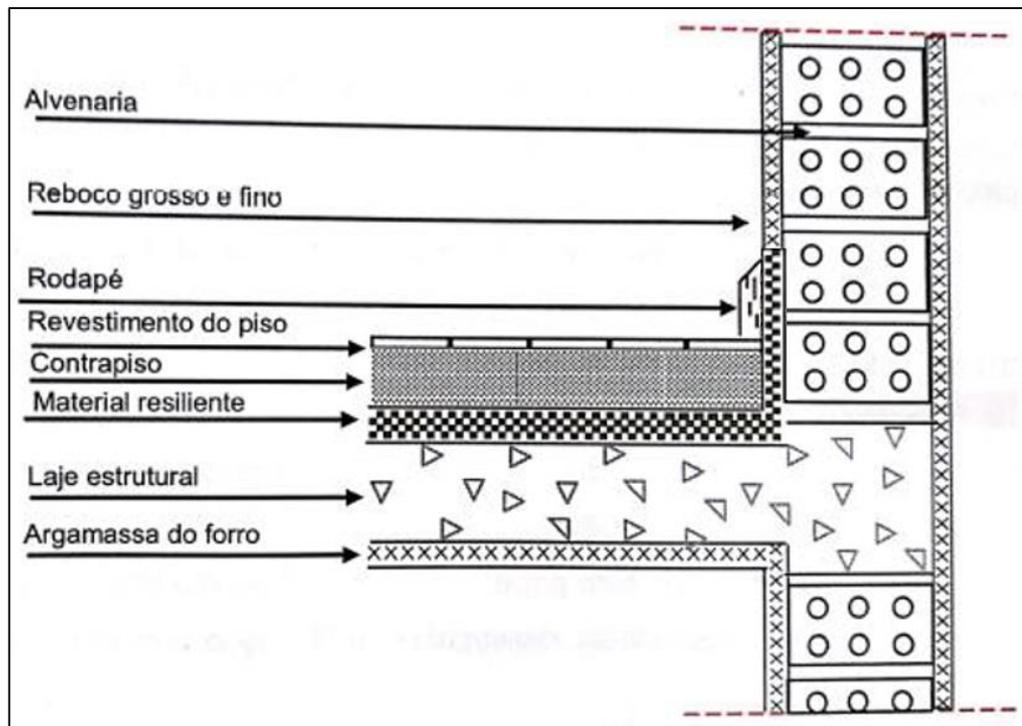
Na instalação de um material resiliente é necessário que se tenha o cuidado de evitar pontes acústicas, que ocorrem se houverem ligações rígidas entre os elementos estruturais que deveriam estar separados pelo material flexível, criando, assim, caminhos para que as vibrações se propaguem. (PEDROSO, 2007).

Sendo assim, deve ser utilizado um material resiliente resistente à perfuração e à combustão. (SANTOS, 2012). O material resiliente deve ser instalado de forma a evitar pontes acústicas, seguindo as orientações dos fabricantes quanto à instalação do produto.

Ainda, os materiais resilientes ficam submetidos a cargas durante a sua vida útil. Disso decorre que há uma tendência do material se deformar ao longo do tempo, de modo que a rigidez dinâmica desse material tende a aumentar e o isolamento acústico proporcionado por ele tende a diminuir. (LEE et al., 2016).

A Figura 06 apresenta detalhes da instalação de um material resiliente.

Figura 06 - Material resiliente instalado em um sistema de piso.



Fonte: Santos (2012, p. 127).

2.3.3 Forros suspensos

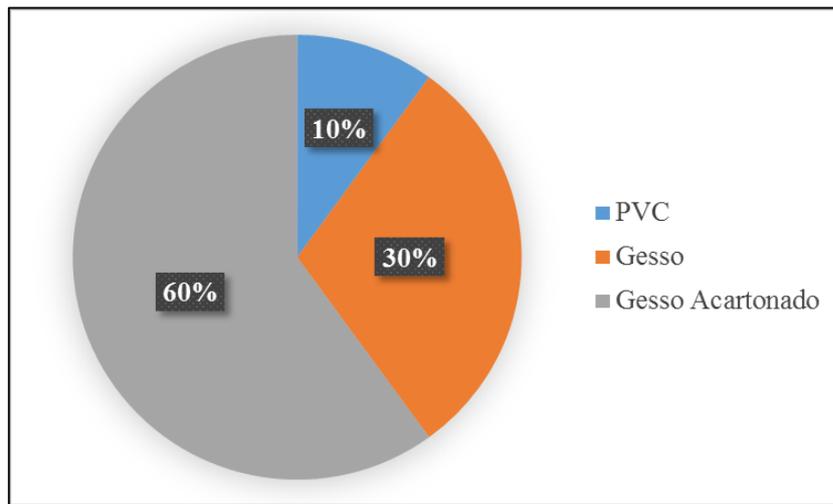
A execução desta solução ocorre por meio da instalação de um forro suspenso no ambiente receptor dos ruídos. (SANTOS, 2012). Forro é um revestimento inferior da cobertura ou da laje de entrepiso, que pode ser aderido, ser suspenso ou ter estrutura independente em relação ao elemento sob o qual for instalado. (ABNT NBR 15575-5).

Os forros têm a função de revestir a face inferior de uma laje ou de um telhado de uma edificação, formando a superfície interna de um compartimento fechado. Contribuem para o isolamento térmico e acústico, podendo esconder os componentes dos sistemas hidráulico-sanitários e elétricos instalados abaixo das lajes. São geralmente constituídos por módulos, placas ou chapas, aderidas ou suspensas por dispositivos ou estrutura com perfis de aço ou de madeira. Os sistemas são formados pela estrutura de fixação e pelo acabamento, constituído pelos módulos, chapas ou placas. (ARAÚJO; LIRA; SPOSTO, 2018, p. 3).

A utilização de forros suspensos é prática comum no cenário construtivo brasileiro. Uma pesquisa realizada por Lourenço et al. (2018) contou com a participação de dez construtoras da

cidade de Santa Maria/RS e apresentou o cenário local no que tange a utilização de forros suspensos em edificações residenciais. A Figura 07 apresenta o resultado encontrado para o questionamento acerca de qual forro era o mais utilizado pelas construtoras na execução de edificações residenciais multifamiliares.

Figura 07 - Forros mais utilizados pelas construtoras de Santa Maria/RS.



Fonte: Adaptado de Lourenço et al. (2018, p. 14).

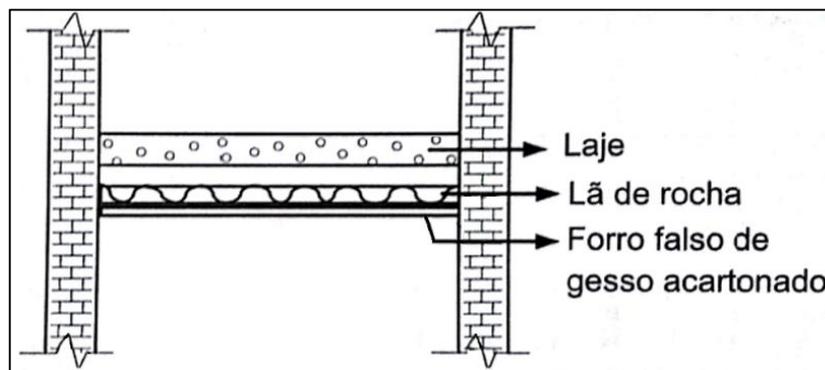
Denota-se pelos resultados dessa pesquisa que há pouca variedade nos tipos de forros utilizados na construção de edifícios residenciais e que a utilização de materiais absorventes sonoros no entreforro (*plenum*) não é prática comum das construtoras da cidade. Ainda, a partir dos resultados apresentados na Figura 07, pode-se inferir que, ao menos localmente, a utilização de forros suspensos é uma prática vastamente utilizada, cabendo destacar que o forro mais utilizado é o de gesso acartonado, seguido pelo de placas de gesso e pelo de PVC.

Sistema de forro de gesso acartonado é o conjunto de componentes formado por chapas de gesso acartonado, estrutura de perfis de aço, dispositivos de fixação e insumos. Esse sistema é destinado a atender a determinadas funções estéticas, de isolamento acústico e térmico, e de resistência ao fogo. (ABNT NBR 15758-2, 2009, p. 1).

Chapas de gesso acartonado são chapas fabricadas industrialmente mediante um processo de laminação contínua de uma mistura de gesso, água e aditivos entre duas lâminas de cartão, onde uma é virada sobre as bordas longitudinais e colada sobre a outra. (ABNT NBR 14715-1, 2010, p. 1).

A forma e a montagem dos forros com chapas de gesso acartonado estabelecem o nível de desempenho que pode ser alcançado pelo sistema, estando a *performance* desse sistema associada à dimensão e ao posicionamento da estrutura-suporte, à quantidade de chapas e à incorporação de componentes termoacústicos no *plenum* do forro. (ABNT NBR 15758-2, 2009). Um exemplo de sistema de forro de gesso acartonado está apresentado na Figura 08.

Figura 08 - Sistema de forro de gesso acartonado.



Fonte: Adaptado de Santos (2012, p. 78).

Souza, Almeida e Bragança (2012) defendem que a utilização de elementos antivibratórios como conexão entre o forro e a laje proporciona uma isolamento por amortecimento e evita pontes acústicas, aumentando o isolamento ao ruído de impacto.

Outra questão são as transmissões parasitas, que podem ocorrer devido a cortes no forro. Medeiros (2003) comparou o desempenho de um forro de gesso acartonado com um furo de 20 mm para a passagem de fiação elétrica e o de um forro instalado de forma idêntica ao outro, mas sem o furo. O autor concluiu que o furo de 20 mm não influenciou no isolamento ao ruído de impacto proporcionado pelo sistema.

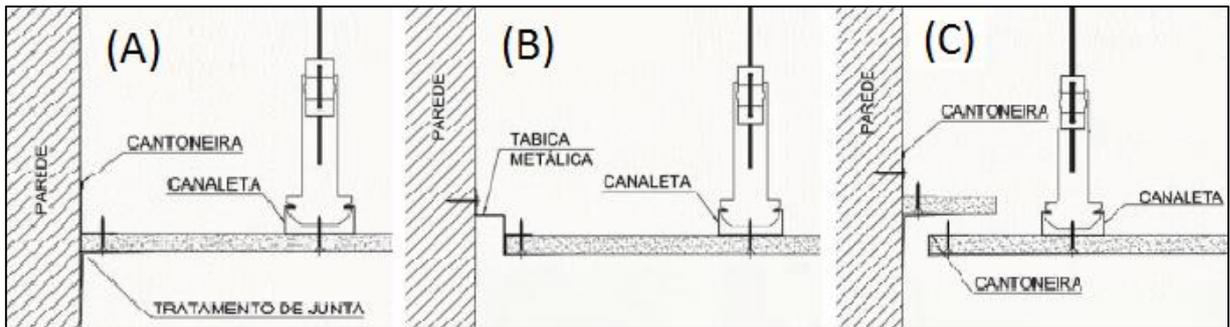
Entretanto, cortes maiores no forro podem influenciar consideravelmente no isolamento ao ruído de impacto. Ensaio realizados por Monaco et al. (2018) com luminárias embutidas em um sistema de forro, encaixadas por meio de cortes na placa de gesso acartonado, comprovaram perda significativa do isolamento acústico após os cortes serem realizados.

Ainda, a escolha do acabamento utilizado no perímetro do forro pode influenciar no isolamento acústico do sistema. Ensaio realizados por Bet et al. (2019) apontaram que a existência de negativos (tabica) pode prejudicar o desempenho do forro.

A Figura 09 apresenta os três detalhes típicos que constam na ABNT NBR 15758-2 (2009) para o acabamento do sistema de forro de gesso acartonado no encontro com o sistema

de vedação vertical: utilização de cantoneira e tratamento de junta, dilatação com tabica metálica e dilatação com chapa de gesso acartonado.

Figura 09 - Corte transversal à canaleta de detalhes típicos do perímetro do forro: A) cantoneira e tratamento de junta; B) dilatação com tabica metálica; e C) dilatação com chapa de gesso acartonado.



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15758-2 (2009, p. 5).

2.3.3.1 Utilização de material absorvente sonoro no entreforro

A capacidade de absorção de um material é indicada pelo coeficiente de absorção, cujo valor é a razão entre a energia sonora absorvida por um determinado material e a energia sonora incidente sobre este. (SOUZA; ALMEIDA; BRAGANÇA, 2012). O valor do coeficiente de absorção é compreendido entre 0 e 1 e este valor está diretamente relacionado às propriedades físicas do material e com a frequência sonora analisada. (ABNT NBR 16313, 2014). Um material absorvente melhora o desempenho acústico de um sistema, principalmente nas frequências em que esse material tem maior coeficiente de absorção. (SANTOS, 2012).

Materiais absorventes fibrosos podem ser utilizados para a atenuação do ruído aéreo. Santos (2012) aponta que a utilização de absorventes sonoros fibrosos para preencher o espaço de ar no interior de painéis duplos aumenta consideravelmente o Índice de Redução Sonora (R_w) dessas composições, melhorando o isolamento ao ruído aéreo para as bandas de frequência de 125 a 4000 Hz.

Já acerca do isolamento acústico ao ruído de impacto proporcionado pela colocação de material absorvente sonoro no entreforro de um sistema de forro, existe pouca bibliografia. Medeiros (2003) ensaiou diversas composições de forro de gesso acartonado executadas sob uma laje maciça, sendo que algumas dessas composições continham lã de rocha no entreforro. Nesses ensaios, a lã de rocha colocada no *plenum* teve pouca influência no isolamento ao ruído

de impacto proporcionado pelo sistema de piso, embora tenha melhorado o desempenho do sistema de piso nas baixas frequências.

No Brasil, materiais fibrosos como lã de rocha e a lã de vidro são comumente utilizados na construção civil. Para serem utilizados, esses materiais precisam ter condições específicas de condutividade térmica, densidade de massa aparente, teor de cloretos, fluoretos, silicatos e sódio e absorção de umidade. (ABNT NBR 13047, 2014; ABNT NBR 11361, 2013).

Também, é importante que esses materiais estejam em conformidade com as normas vigentes de segurança contra incêndios. A Instrução Técnica Nº 10/2019 do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo deve ser observada para que, na ocorrência de incêndio, esses materiais tenham comportamento adequado quanto à propagação de fogo e ao desenvolvimento de fumaça.

Outrossim, a evolução tecnológica tem colocado à disposição dos profissionais de engenharia e de arquitetura materiais alternativos de baixo custo que são subprodutos industriais ou que são sustentáveis. (RIGHI, 2013). Existe uma grande variedade de materiais alternativos que têm bom desempenho como materiais de absorção sonora no mercado, como por exemplo a lã de PET, que apresenta a vantagem de ser hipoalergênica, o que facilita a sua instalação. (REY et al., 2011).

Isolamento acústico em edificações é comumente realizado com materiais obtidos de petroquímicos, como o poliestireno, ou de fontes naturais processados com um alto nível de energia. Esses materiais causam significantes efeitos negativos ao meio ambiente devido ao consumo de energia fóssil e às dificuldades em reutilizar e reciclar estes materiais após a vida útil dos elementos construtivos aos quais foram associados. (ASDRUBALI; D'ALESSANDRO; SCHIAVONI, 2015, p. 1, tradução do autor).

2.4 SISTEMAS DE PISOS

Sistema de piso é um “sistema horizontal ou inclinado composto por um conjunto parcial ou total de camadas (por exemplo, camada estrutural, camada de contrapiso, camada de fixação, camada de acabamento) destinado a atender à função de estrutura, vedação e tráfego”. (ABNT NBR 15575-3, 2013, p. 7).

A Figura 10 apresenta um exemplo genérico de um sistema de piso.

Figura 10 - Exemplo genérico de sistema de piso.



Fonte: ABNT NBR 15575-3 (2013, p. 7).

Um sistema de piso interno deve ser projetado considerando uma vida útil de projeto (VUP) de no mínimo 13 anos. (ABNT NBR 15575-1, 2013). Ao escolher os materiais que irão compor um sistema de piso o projetista deve levar em conta questões técnicas, como o desempenho acústico do sistema.

Os sistemas de pisos se destinam ao atendimento de diversas funções como, por exemplo, estruturais, de vedação, de segurança ao tráfego e de isolamento acústico, para as quais devem ser contemplados requisitos que assegurem a adequada união entre elementos, estabilidade para assegurar o caminhar e a manutenção de suas propriedades ao longo da vida útil do sistema de piso. (ZUCHETTO; NUNES; PATRÍCIO, 2016, p. 2).

Pode-se classificar a camada estrutural de um sistema de piso como homogênea ou não homogênea. Lajes pré-fabricadas são consideradas como não homogêneas, devido à variedade dos materiais utilizados na sua montagem.

Uma laje homogênea pode ser definida como uma camada única de espessura uniforme, que é o caso das lajes de concreto armado. Já uma laje não homogênea possui uma geometria mais complexa e é em geral composta de vários componentes sólidos, permitindo a utilização de diversos tipos de materiais, com várias possibilidades de *design*. (ALONSO; PATRÍCIO; SUÁREZ, 2019, p. 2, tradução do autor).

2.4.1 Lajes pré-fabricadas

Flório (2003) e Acker (2002) citam como principais vantagens das lajes pré-fabricadas a facilidade executiva, a redução de custos com estrutura e escoramentos, a rapidez da construção, a diversidade de tipos e a representativa redução do peso próprio da laje. A ABNT NBR 14859-1 (2016, p. 3) define laje pré-fabricada como,

Elemento estrutural plano, constituído por elementos pré-fabricados, estruturais e inertes de enchimento e/ou de forma permanente, armaduras e concreto complementar de obra, podendo ser maciço, nervurada unidirecional seção “T”, nervurada unidirecional seção duplo “T”, nervurada bidirecional também seção “T” e nervurada bidirecional seção duplo “T”, capaz de vencer vão e suportar carregamento conforme especificações de projeto.

Os elementos pré-fabricados que compõem esse tipo de laje podem ser divididos em pré-fabricados estruturais (vigotas ou painéis concebidos fora do local de uso final) e não estruturais (elementos inertes industrializados fora do local de uso final). (ABNT NBR 14859-1, 2016). Após o posicionamento dos elementos pré-fabricados, executa-se uma camada de concreto sobre eles, para dar acabamento e rigidez ao sistema.

Optando-se por lajes nervuradas unidirecionais com vigotas pré-fabricadas, evitam-se perdas excessivas de materiais durante a execução da laje e a mão-de-obra necessária é substancialmente reduzida, porém existem limitações quanto a utilização desse tipo de laje para grandes vãos ou para suportar ações de valores elevados, em virtude do conseqüente aumento da taxa de armadura necessária e da altura final da laje. (SILVA, 2012).

2.4.1.1 Vigotas

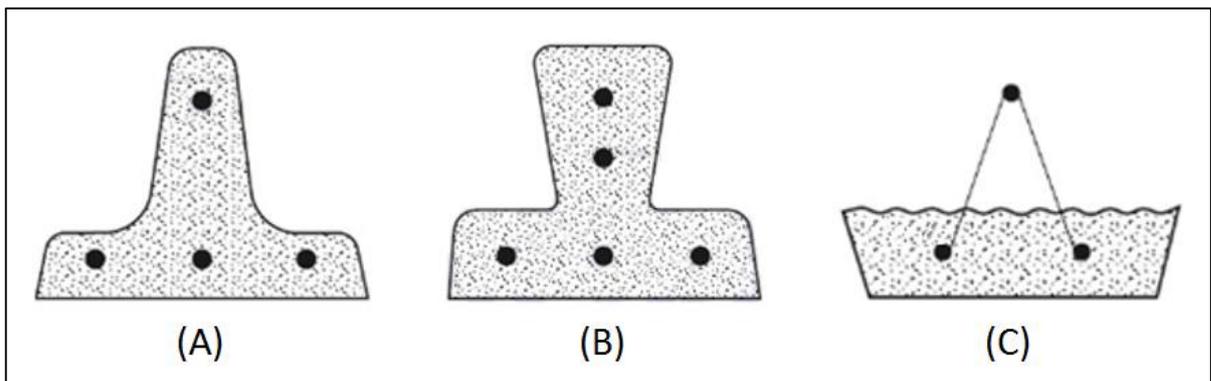
Vigotas são elementos pré-fabricados estruturais, constituídos de concreto e armadura, que podem ser utilizadas em lajes pré-fabricadas, sendo essas lajes classificadas de acordo com o tipo de vigota utilizada. (SILVA, 2012).

De acordo com a ABNT NBR 14859-1 (2016), existem três tipos de vigotas: vigota com armadura simples ou comum (VC), vigota com armadura protendida (VP) e vigota com armadura treliçada (VT).

As vigotas pré-fabricada são dispostas em uma única direção (lajes unidirecionais) - normalmente na direção do menor vão da laje - e apoiadas apenas nas suas extremidades. Desse modo, as vigas ou paredes em que as vigotas pré-fabricadas se apoiam recebem a maior parte das ações atuantes na laje. Quando existem vigotas transversais (perpendiculares às vigotas longitudinais principais) tem-se a configuração de laje bidirecional, com comportamento semelhante a uma grelha. Neste caso opta-se por vigotas com armadura treliçada. (SILVA, 2012, p. 22).

A Figura 11 ilustra os três tipos de vigotas utilizados para a montagem de lajes pré-fabricadas.

Figura 11 - Tipos de vigota: A) vigota com armadura simples; B) vigota com armadura protendida; e C) vigota com armadura treliçada.



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 14859-1 (2016, p. 3-4).

As vigotas com armadura simples possuem barras ou fios longitudinais como armadura passiva (principal) e têm como formato uma seção “T” invertida, para facilitar o apoio dos blocos de enchimento. (BRASIL, 2017). A fabricação dessas vigotas ocorre em grandes fôrmas metálicas que permitem a variação de comprimento das peças. (BOTELHO, 1991).

Os defeitos que limitam o campo de aplicação desse tipo de vigota são a ausência de estribos, a má aderência entre o capeamento e a superfície lisa das vigotas e a impossibilidade de vencer grandes vãos. (GASPAR, 1997).

A vigota de concreto protendido também apresenta seção de formato de “T” invertido, semelhante à vigota de concreto armado. No entanto, além de armadura passiva, ela possui fios aderentes como armadura ativa (principal). (ABNT NBR 14859-1, 2016). A armadura ativa possibilita vencer grandes vãos com menores deformações, além de apresentar resistência ao cisalhamento maior que a dos demais tipos de vigotas. (BRASIL, 2017).

Por fim, as vigotas treliçadas são compostas por treliças espaciais soldadas por eletrofusão e uma placa de concreto como base. (GASPAR, 1997). A armadura treliçada é constituída por um fio de aço no banzo superior interligado por dois fios de aço laterais em diagonal a dois fios de aço no banzo inferior. (FLÓRIO, 2003). Essas armaduras diagonais possuem a função de resistir às tensões de cisalhamento. (GASPAR, 1997). Brasil (2017) enfatiza que essas vigotas possuem maior resistência e aderência que as vigotas com armadura simples.

2.4.1.2 Elementos de enchimento

A utilização de elementos de material leve em lajes pré-fabricadas está ligada à ideia de substituir parte do concreto da região tracionada das lajes, estes elementos também servem como fôrma para a camada de concreto fresco. (GASPAR, 1997).

A classificação do tipo de enchimento depende dos elementos estruturais utilizados nas lajes pré-fabricadas. Quando são utilizadas vigotas, os elementos de enchimento utilizados são do tipo lajota (tabela).

Elemento de enchimento lajota: caracterizado por ruptura dúctil ou frágil, a ser disposto entre vigotas, capaz de resistir às solicitações previstas durante a fase de trabalho, proporcionando alívio no peso próprio da laje acabada e permitindo obter a seção final conforme projeto. (ABNT NBR 14859-2, 2016, p. 1).

Gaspar (1997) apresenta alguns requisitos básicos para elementos leves: resistência à carga de trabalho durante a montagem da laje, resistência ao lançamento do concreto fresco, boa aderência ao concreto e bom isolamento acústico. Existem diversos materiais inertes que podem ser utilizados na fabricação de elementos de enchimento, podendo os blocos serem maciços ou vazados. (ABNT NBR 14859-2, 2016).

Um dos blocos de enchimento tipo lajota mais utilizados em lajes pré-fabricadas é a lajota cerâmica, que é um produto derivado da argila. Esse tipo de bloco é amplamente difundido no mercado por apresentar baixo custo, boa aderência e variadas opções de dimensões. (GASPAR, 1997). Esse elemento de enchimento é caracterizado por ruptura frágil. (ABNT NBR 14859-2, 2016).

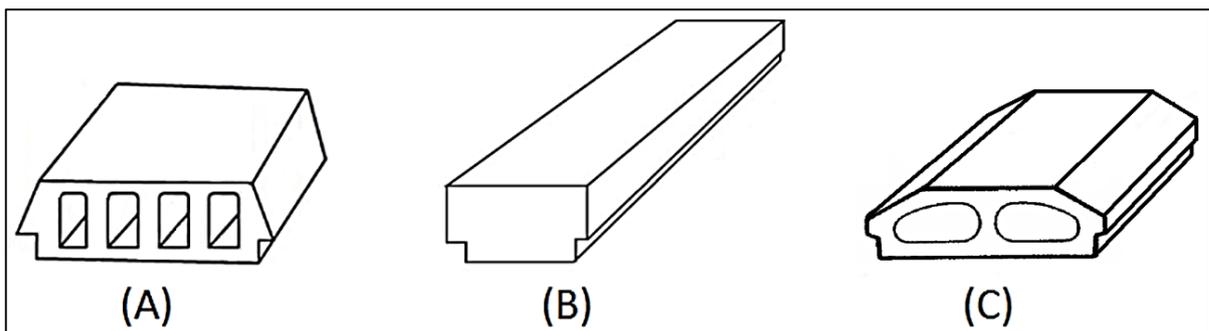
Outrossim, blocos de enchimento de poliestireno expandido (EPS) e de concreto também são utilizados com frequência em lajes pré-fabricadas.

Blocos de EPS são materiais de pouca massa e que permitem um maior espaçamento entre vigotas. (BRASIL, 2017). Esses materiais proporcionam redução das perdas com materiais e facilidade no transporte e na montagem das lajes. Esse elemento de enchimento é caracterizado por ruptura dúctil. (ABNT NBR 14859-2, 2016).

Já blocos de concreto são materiais que apresentam maior resistência mecânica e por isso são indicados para resistir condições adversas de lançamento de concreto. (BRASIL, 2017). Convencionalmente, para a fabricação desses blocos utiliza-se concreto leve. Esse elemento de enchimento é caracterizado por ruptura dúctil. (ABNT NBR 14859-2, 2016).

A Figura 12 ilustra os elementos de enchimento utilizados em lajes nervuradas com vigotas pré-fabricadas.

Figura 12 - Elementos de enchimento: A) lajota cerâmica; B) lajota de EPS; e C) lajota de concreto.



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 14859-2 (2016) e Acker (2002).

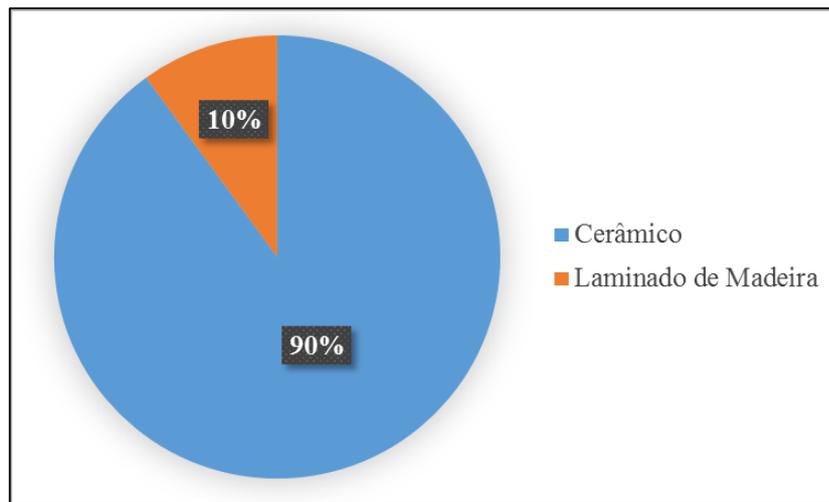
2.4.2 Revestimentos

Os revestimentos são classificados conforme o tipo de material e a forma com que os pisos são fabricados. No Brasil, os pisos mais tradicionalmente utilizados são os revestimentos de cerâmica e de madeira. (SANTOS, 2012).

Uma pesquisa realizada por Lourenço et al. (2018) contou com a participação de dez construtoras da cidade de Santa Maria/RS e apresentou o cenário local quanto aos tipos de pisos mais utilizados em edificações residenciais.

A Figura 13 apresenta o resultado encontrado para o questionamento acerca de qual era o tipo de revestimento mais utilizado para os sistemas de pisos dos empreendimentos residenciais das construtoras.

Figura 13 - Pisos mais utilizados pelas construtoras de Santa Maria/RS.



Fonte: Adaptado de Lourenço et al. (2018, p. 13).

Como esperado, os resultados dessa pesquisa mostraram que o tipo de piso mais utilizado é o piso cerâmico. As placas de pisos cerâmicos são produzidas a partir de material composto de argila e outras matérias-primas inorgânicas, podendo ser esmaltadas ou não. (ABNT NBR 13816, 1997).

A pesquisa também apontou que pisos laminados de madeira têm sido utilizados em algumas obras. Esse tipo de piso é geralmente utilizado na área íntima de apartamentos residenciais de médio e alto padrão.

Piso laminado de madeira é o piso composto de camadas de uma ou mais folhas finas de material lignocelulósico impregnado de resinas aminoplásticas termofixadas (geralmente resina melamínica), sobre e sob um substrato composto de partículas de madeira. (ABNT NBR 14833-1, 2014).

Outro tipo de piso que existe no mercado é o piso vinílico, que é mais utilizado em edificações comerciais, mas também pode ser utilizado em habitações. A grande variedade de cores, padrões e texturas permite a criação de ambientes diversificados, principalmente quando o interesse é imitar materiais naturais (madeiras e pedras). (MARTINS, 2012).

Pisos vinílicos são materiais fabricados a partir de Policloreto de Vinila (PVC), que podem ser apresentados em forma de placas, réguas ou mantas, podendo ser homogêneos ou em camadas heterogêneas e também conter reforços. (ABNT NBR 14917-1, 2017).

2.5 ESTUDOS SOBRE ISOLAÇÃO AO RUÍDO DE IMPACTO

Neste item estão apresentados estudos que foram desenvolvidos envolvendo o desempenho ao ruído de impacto de lajes pré-fabricadas e também estudos realizados contendo o desempenho de sistemas de pisos com a utilização de forro de gesso acartonado como técnica de isolamento ao ruído de impacto.

2.5.1 Estudos com lajes pré-fabricadas

Nunes, Zini e Pagnussat (2014) analisaram o comportamento ao ruído de impacto de diferentes tipos de laje. Como demonstrado na Tabela 02, foram realizados ensaios em lajes maciças de diferentes espessuras, uma laje nervurada de concreto armado e uma laje pré-fabricada de vigotas treliçadas.

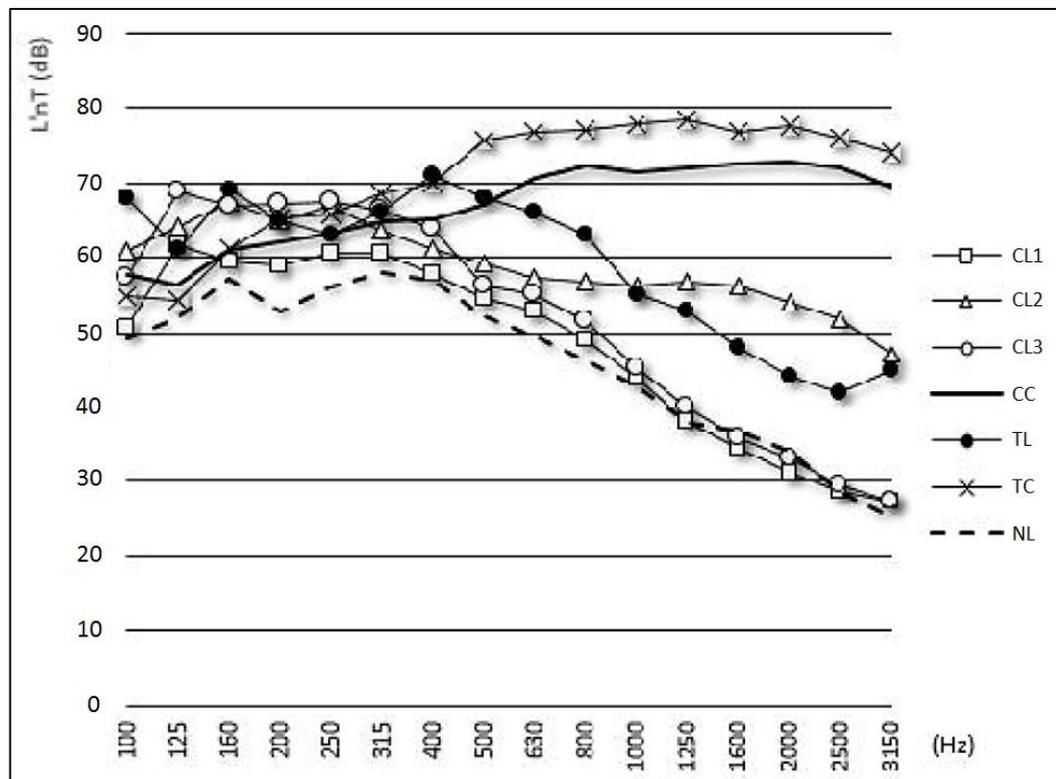
Tabela 02 - Composições de sistemas de pisos com diferentes tipos de camada estrutural.

Sigla	Tipo de laje	Revestimento	Área (m ²)	L' _{nT,w} (dB)
CL1	Concreto maciço 10 cm	Laminado de madeira (7mm) + manta de polipropileno (5mm) + Contrapiso de argamassa comum (5cm)	17,56	54
CL2	Concreto maciço 10 cm	Laminado de madeira (7mm) + manta polietileno expandido (2mm) + Contrapiso de argamassa comum (5cm)	12,24	56
CL3	Concreto maciço 12 cm	Laminado de madeira (7mm) + manta polietileno expandido (2mm) + Contrapiso de argamassa com brita leve 1:2:3 (4cm)	11,31	60
CC	Concreto maciço 12 cm	Porcelanato + Contrapiso de argamassa com brita leve 1:2:3 (4cm)	16,15	78
TL	Treliçada com enchimento de EPS 5cm e capa de concreto armado 4cm	Laminado de madeira (7mm) + Contrapiso de concreto (4cm)	7,57	63
TC	Treliçada com enchimento de EPS 5cm e capa de concreto armado 4cm	Cerâmica esmaltada + Contrapiso de concreto (4cm)	7,79	85
NL	Nervurada com cubetas de EPS	Laminado de madeira (7mm) + Contrapiso de argamassa com brita leve 1:1:4 (5cm) e argamassa comum (2cm)	10,5	50

Fonte: Adaptado de Nunes, Zini e Pagnussat (2014, p. 2-3).

As medições foram realizadas *in situ* e feitas de acordo com os procedimentos descritos na norma ISO 140-7 (1998). Na Figura 14 estão representados os valores de Nível Sonoro de Impacto Padronizado (L'_{nT}) encontrados para os sete sistemas de pisos ensaiados.

Figura 14 - Resultados das medições de L'_{nT} para sistemas de pisos com diferentes tipos de camada estrutural.



Fonte: Nunes, Zini e Pagnussat (2014, p. 5).

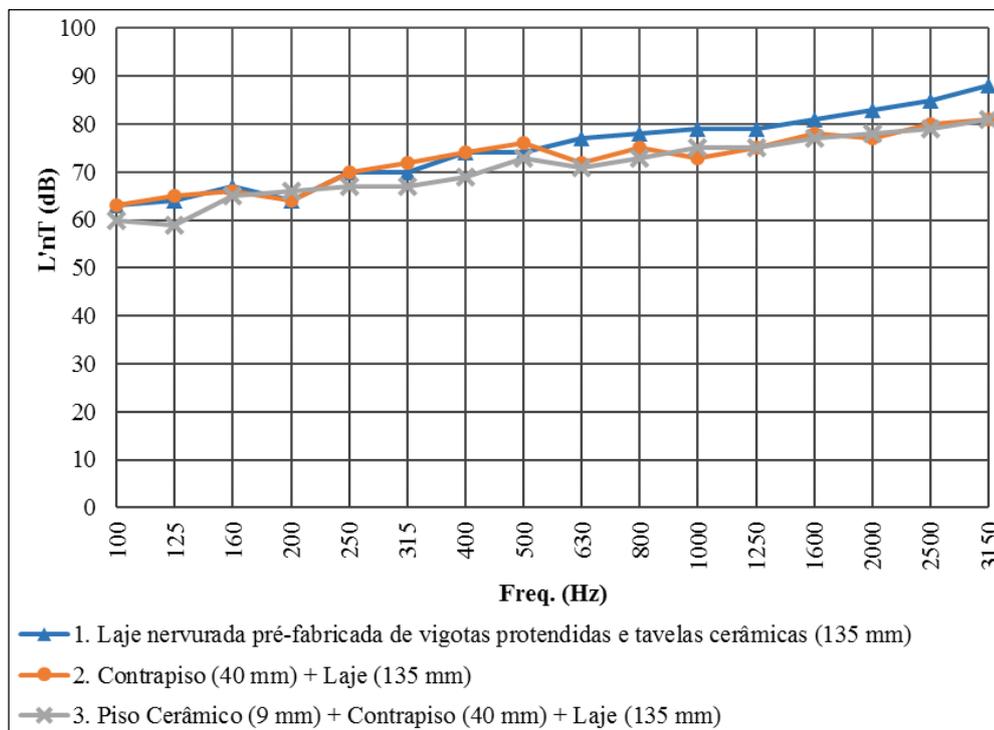
Verifica-se ao analisar os sistemas com laje treliçada (TL e TC) e com laje de concreto maciço com espessura de 12 cm (CL3 e CC) que o piso laminado de madeira aumenta o isolamento acústico ao ruído de impacto na comparação com o revestimento cerâmico, especialmente quando são analisadas as altas frequências.

Avaliando-se apenas o comportamento dos pisos TC e CC, pode-se denotar que a laje pré-fabricada confere um isolamento acústico maior nas frequências de 100 e 125 Hz e pior nas demais frequências, demonstrando uma *performance* substancialmente pior que a laje maciça quando analisados os resultados para as bandas a partir de 500 Hz. Esse comportamento tem relação com a não homogeneidade e com a menor massa da laje treliçada.

Também, pode-se observar a partir dos resultados dos ensaios que o aumento de espessura do sistema de piso nem sempre resulta em melhor desempenho acústico e que o contrapiso de argamassa comum apresentou resultados melhores que o de argamassa com brita leve. Ainda, ressalta-se que embora o sistema de piso com laje nervurada (NL) confira amortecimento eficiente, essa é uma solução dificilmente praticável, pois foram utilizadas várias camadas de materiais, o que aumenta consideravelmente a espessura do sistema de piso.

Em outra pesquisa envolvendo o desempenho ao ruído de impacto de lajes pré-fabricadas, Haas (2019) realizou ensaios em uma laje nervurada pré-fabricada de vigotas protendidas e lajotas cerâmicas, utilizando revestimento cerâmico e materiais resilientes sobre a laje. Os ensaios seguiram os procedimentos especificados pela ISO 16283-2 (2018). Os resultados das medições para laje em osso, laje com contrapiso e laje com piso cerâmico estão apresentados na Figura 15.

Figura 15 - Resultados dos ensaios de laje pré-fabricada de vigotas protendidas com piso cerâmico.



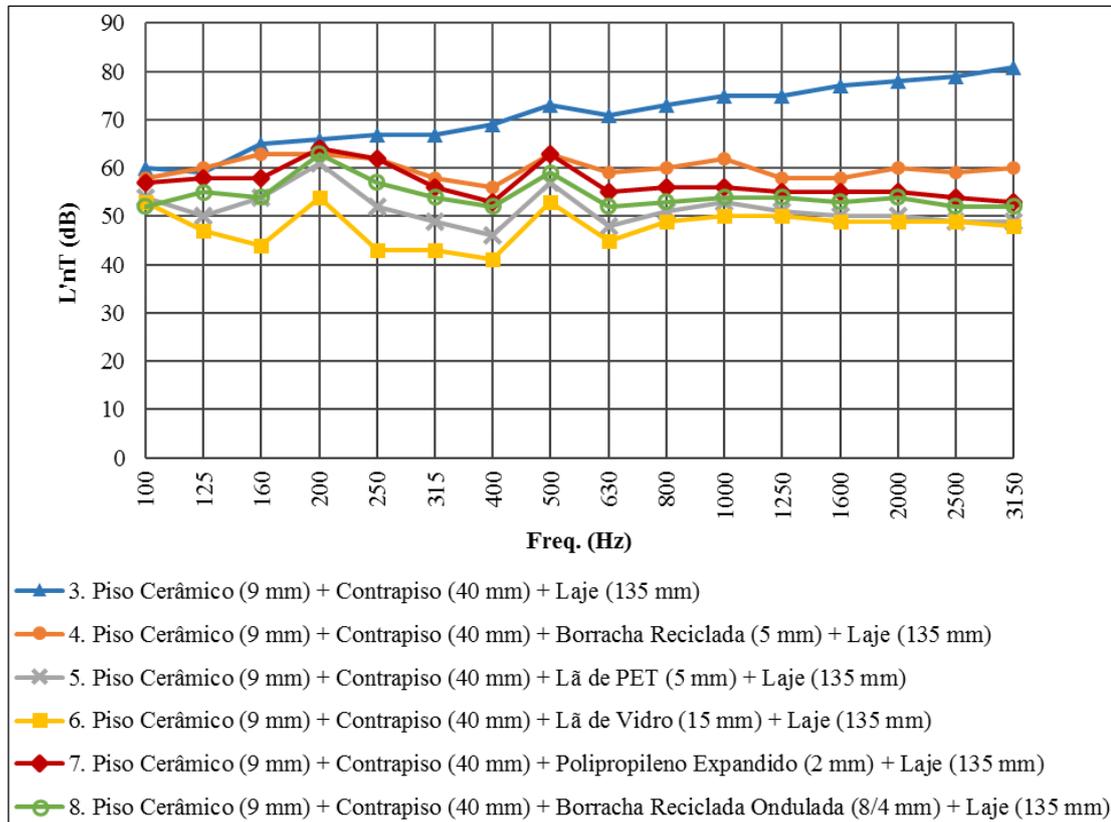
Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	L'nT,w (dB)
L'nT 1 (dB)	63	64	67	64	70	70	74	74	77	78	79	79	81	83	85	88	91
L'nT 2 (dB)	63	65	66	64	70	72	74	76	72	75	73	75	78	77	80	81	84
L'nT 3 (dB)	60	59	65	66	67	67	69	73	71	73	75	75	77	78	79	81	83

Fonte: Adaptado de Haas (2019).

A adição do contrapiso de 4 cm à composição da laje pré-fabricada propiciou uma melhora no isolamento ao ruído de impacto de 7 dB, obtendo-se um L'nT,w de 84 dB. Portanto, o aumento da espessura melhorou o desempenho acústico do sistema. Outrossim, a utilização de piso cerâmico sobre o contrapiso não influenciou significativamente o sistema. Sendo assim, para se obter um desempenho acústico adequado com esse tipo de revestimento, torna-se necessário utilizar um material resiliente sob o contrapiso.

A Figura 16 apresenta os resultados das medições para a utilização de piso cerâmico em conjunto com materiais resilientes.

Figura 16 - Resultados dos ensaios de composições com piso cerâmico e materiais resilientes.



Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	L'nT,w (dB)
L'nT 3 (dB)	60	59	65	66	67	67	69	73	71	73	75	75	77	78	79	81	83
L'nT 4 (dB)	58	60	63	63	62	58	56	63	59	60	62	58	58	60	59	60	65
L'nT 5 (dB)	54	50	54	61	52	49	46	57	48	51	53	51	50	50	49	49	57
L'nT 6 (dB)	53	47	44	54	43	43	41	53	45	49	50	50	49	49	49	48	55
L'nT 7 (dB)	57	58	58	64	62	56	53	63	55	56	56	55	55	55	54	53	61
L'nT 8 (dB)	52	55	54	63	57	54	52	59	52	53	54	54	53	54	52	52	59

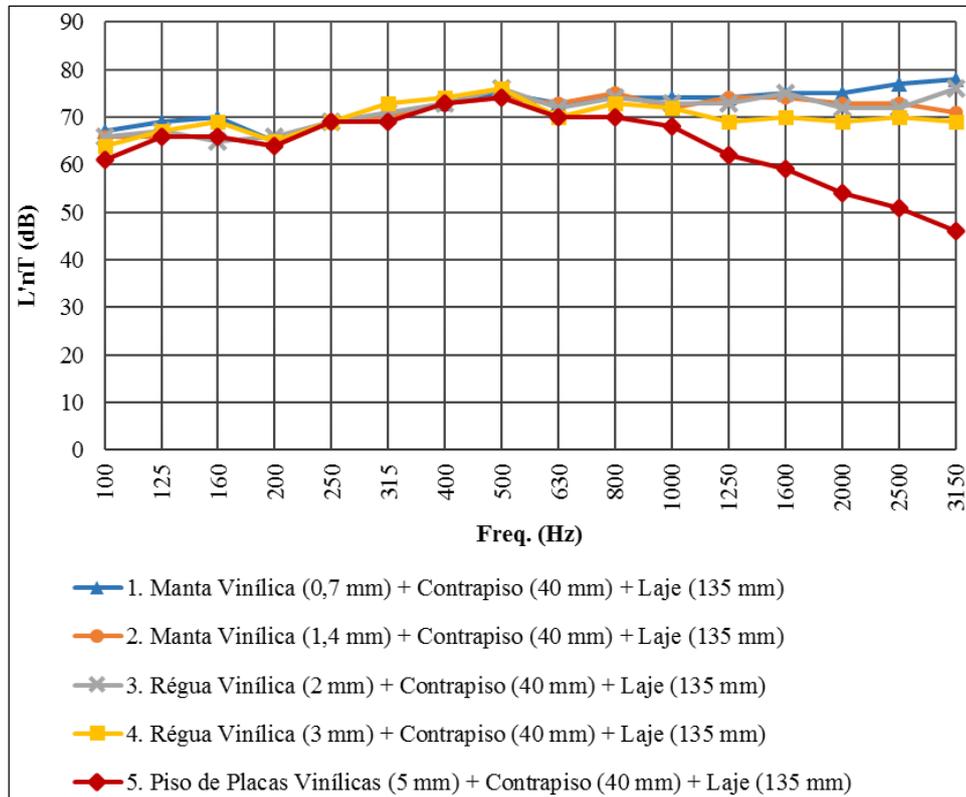
Fonte: Adaptado de Haas (2019).

Percebe-se que todos os sistemas com piso flutuante ensaiados apresentaram melhoria no isolamento ao ruído de impacto quando comparados ao sistema de piso com revestimento cerâmico e contrapiso sobre a laje. Essa melhoria ocorre principalmente a partir da banda de 500 Hz, o que ratifica o comportamento verificado por Oliveira e Patrício (2017). Outrossim, os materiais fibrosos apresentaram um comportamento melhor que os demais.

Rossi (2020) realizou ensaios na mesma laje que Haas (2019), também seguindo os procedimentos de medição estabelecidos na ISO 16283-2 (2018), porém a autora utilizou

revestimentos vinílicos nos seus ensaios. Os resultados de alguns dos pisos vinílicos ensaiados estão apresentados na Figura 17.

Figura 17 - Resultados dos ensaios de composições com pisos vinílicos.



Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	L'nT,w (dB)
L'nT 1 (dB)	67	69	70	65	69	70	73	75	73	74	74	74	75	75	77	78	82
L'nT 2 (dB)	66	67	65	66	69	71	73	76	72	74	73	73	75	72	72	76	80
L'nT 3 (dB)	66	66	66	64	69	70	73	74	73	75	72	74	74	73	73	71	79
L'nT 4 (dB)	64	67	69	65	69	73	74	76	70	73	72	69	70	69	70	69	76
L'nT 5 (dB)	61	66	66	64	69	69	73	74	70	70	68	62	59	54	51	46	67

Fonte: Adaptado de Rossi (2020).

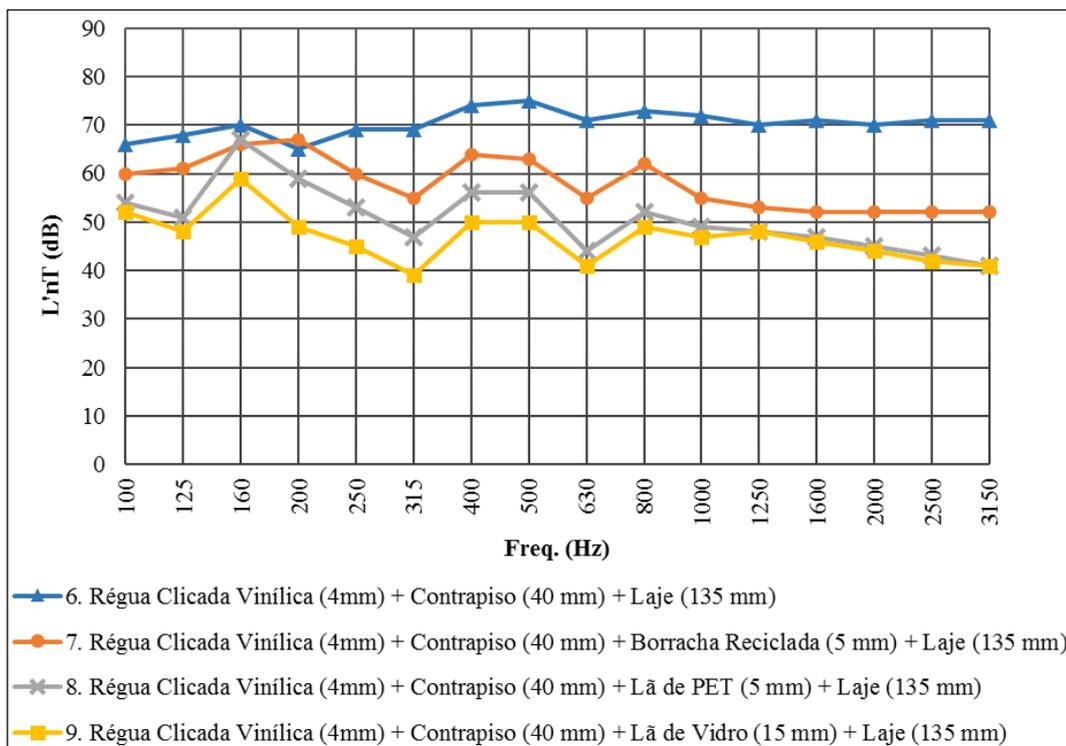
A partir dos dados apresentados na Figura 17, observa-se que o tipo de piso vinílico (placa, régua ou manta) afeta o isolamento acústico do sistema de piso. Analisando-se pisos do mesmo tipo, quanto maior a espessura do piso, maior o isolamento proporcionado.

Outrossim, as curvas dos valores de L'_{nT} medidos para as mantas e régua vinílicas ensaiadas assemelham-se às curvas apresentadas na Figura 15, o que sugere que, assim como o piso cerâmico, esses pisos modificam apenas sensivelmente o isolamento acústico do sistema de piso.

Por outro lado, a utilização de placas vinílicas melhora consideravelmente o desempenho do sistema, especialmente quando analisadas as bandas de frequência acima de 800 Hz.

Rossi (2020) também realizou ensaios com materiais resilientes. A Figura 18 expõe os valores encontrados nas medições de ruído de impacto com régua clicada vinílica e materiais resilientes.

Figura 18 - Resultados dos ensaios de composições com régua clicada vinílica e materiais resilientes.



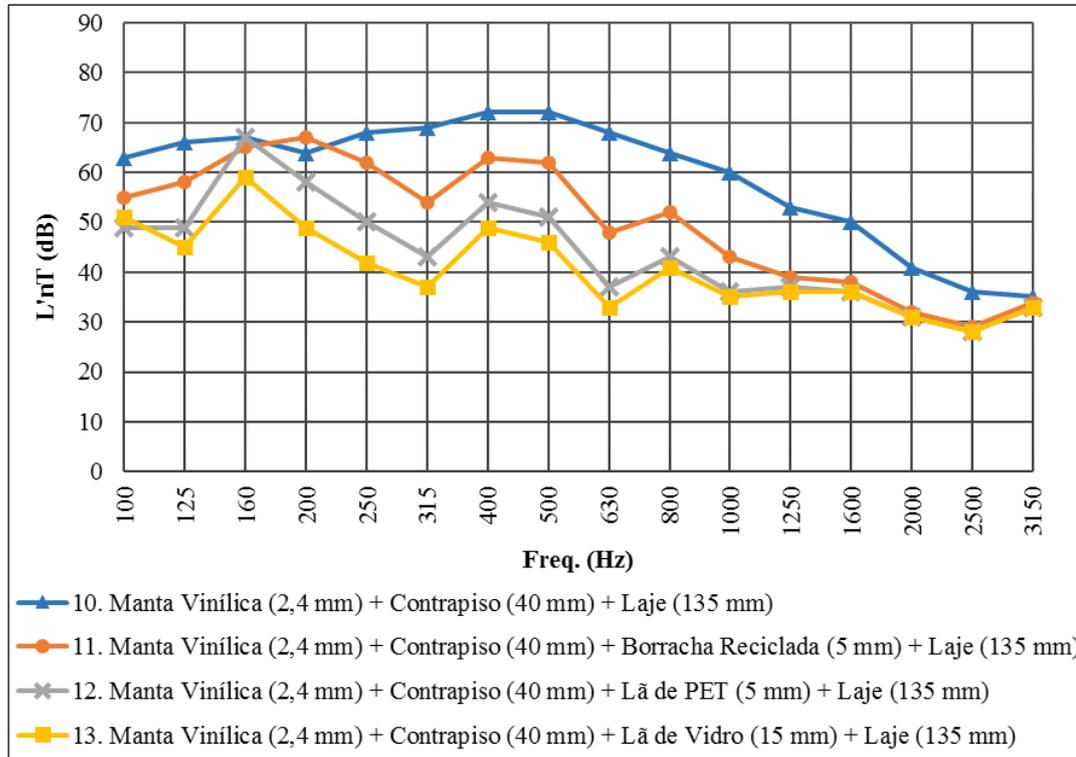
Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	L'nT,w (dB)
L'nT 6 (dB)	66	68	70	65	69	69	74	75	71	73	72	70	71	70	71	71	77
L'nT 7 (dB)	60	61	66	67	60	55	64	63	55	62	55	53	52	52	52	52	61
L'nT 8 (dB)	54	51	67	59	53	47	56	56	44	52	49	48	47	45	43	41	54
L'nT 9 (dB)	52	48	59	49	45	39	50	50	41	49	47	48	46	44	42	41	51

Fonte: Adaptado de Rossi (2020).

A partir dos resultados das medições, conclui-se que a utilização de materiais resilientes melhora a *performance* desse tipo de piso de maneira considerável. Assim como observado por Haas (2019), os materiais fibrosos tiveram um melhor desempenho que a manta de borracha reciclada.

Os valores encontrados nas medições de ruído de impacto com manta vinílica e materiais resilientes estão representados na Figura 19.

Figura 19 - Resultados dos ensaios de composições com manta vinílica e materiais resilientes.



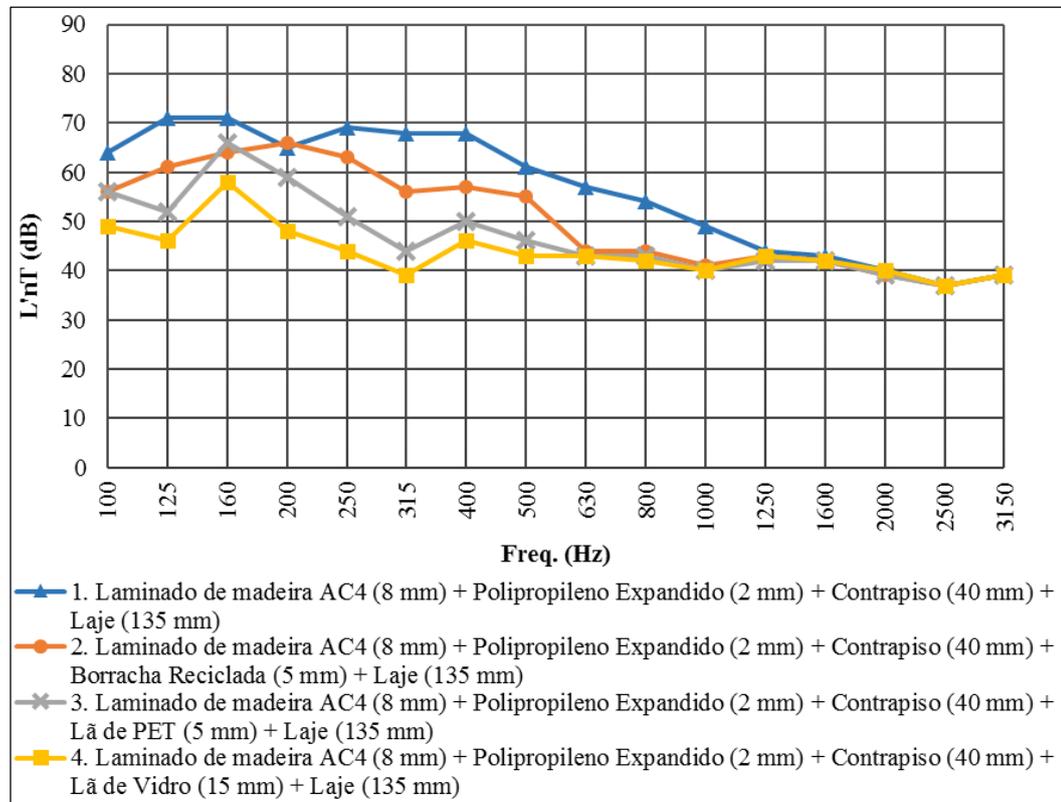
Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	L'nT,w (dB)
L'nT 10 (dB)	63	66	67	64	68	69	72	72	68	64	60	53	50	41	36	35	64
L'nT 11 (dB)	55	58	65	67	62	54	63	62	48	52	43	39	38	32	29	34	56
L'nT 12 (dB)	49	49	67	58	50	43	54	51	37	43	36	37	36	31	28	33	49
L'nT 13 (dB)	51	45	59	49	42	37	49	46	33	41	35	36	36	31	28	33	45

Fonte: Adaptado de Rossi (2020).

Percebe-se na Figura 19 que o piso de manta vinílica ensaiado apresentou uma boa *performance* nas bandas de altas frequências e que os materiais resilientes melhoraram o desempenho acústico do sistema, principalmente nas bandas de 200 a 1600 Hz.

Lourenço (2020) fez ensaios na mesma laje que Haas (2019) e Rossi (2020). O autor analisou o comportamento ao ruído de impacto do sistema de piso com pisos laminados de madeira sobre essa laje. Os ensaios foram realizados em conformidade com a normativa ISO 16283-2 (2018). A Figura 20 contém os resultados das medições realizadas com um piso laminado de madeira AC4 e materiais resilientes.

Figura 20 - Resultados dos ensaios de composições com piso laminado de madeira AC4 e materiais resilientes.



Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	L'nT,w (dB)
L'nT 1 (dB)	64	71	71	65	69	68	68	61	57	54	49	44	43	40	37	39	62
L'nT 2 (dB)	56	61	64	66	63	56	57	55	44	44	41	43	42	39	37	39	55
L'nT 3 (dB)	56	52	66	59	51	44	50	46	43	43	40	42	42	39	37	39	51
L'nT 4 (dB)	49	46	58	48	44	39	46	43	43	42	40	43	42	40	37	39	48

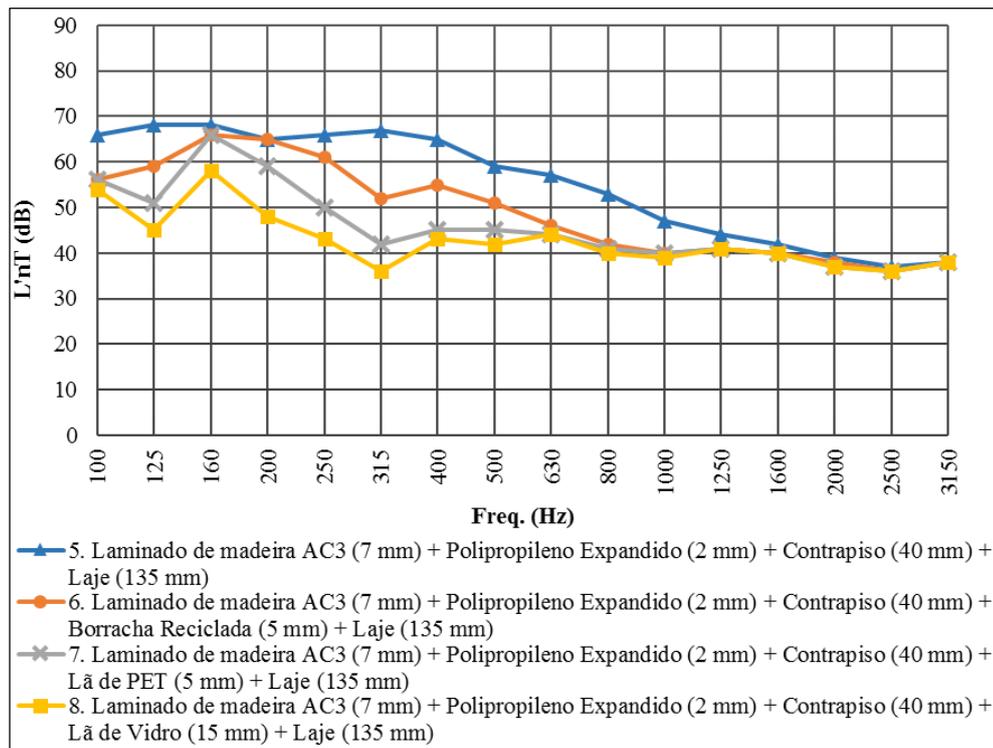
Fonte: Adaptado de Lourenço (2020).

Observa-se que o piso laminado de madeira confere uma melhoria no isolamento acústico do sistema de piso, especialmente nas bandas de frequências a partir de 500 Hz, o que está relacionado com a manta de polipropileno expandido que é instalada sob o revestimento. Devido a esse isolamento proporcionado pelo revestimento, a técnica de piso flutuante foi efetiva somente até a frequência de 1000 Hz.

Lourenço (2020) também realizou ensaios com um piso laminado de madeira AC3. Os resultados das medições realizadas com o piso laminado de madeira AC3 e com materiais resilientes estão apresentados na Figura 21. Comparando os resultados expostos na Figura 20 com os expostos na Figura 21, percebe-se que o piso laminado de madeira AC3 proporcionou um melhor isolamento que o piso AC4. Também, nota-se que quando utilizados materiais

resilientes nos sistemas com o piso AC3 a técnica de piso flutuante foi efetiva somente até a frequência de 1000 Hz.

Figura 21 - Resultados dos ensaios de composições com piso laminado de madeira AC3 e materiais resilientes.



Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	L'nT,w (dB)
L'nT 5 (dB)	66	68	68	65	66	67	65	59	57	53	47	44	42	39	37	38	60
L'nT 6 (dB)	56	59	66	65	61	52	55	51	46	42	40	41	40	38	36	38	54
L'nT 7 (dB)	56	51	66	59	50	42	45	45	44	41	40	41	40	37	36	38	50
L'nT 8 (dB)	54	45	58	48	43	36	43	42	44	40	39	41	40	37	36	38	47

Fonte: Adaptado de Lourenço (2020).

2.5.2 Estudos com forros de gesso acartonado

Medeiros (2003) estudou a utilização de forro de gesso acartonado como solução de isolamento ao ruído de impacto para uma laje maciça com a adição de pisos cerâmicos, pisos laminados de madeira, materiais resilientes e materiais absorventes sonoros. O autor analisou diversas composições do sistema de forro modificando a espessura do entreforro, a quantidade de chapas, a colocação de materiais absorventes sonoros no entreforro e a utilização de uma placa de gesso acartonado furada, como citado anteriormente neste trabalho. Os ensaios foram

realizados de acordo com a ISO 140-7 (1998). A Tabela 03 apresenta um resumo dos dados encontrados para um sistema de piso de referência com piso cerâmico sobre a laje maciça.

Tabela 03 - Resumo dos resultados dos ensaios para configurações com laje maciça, piso cerâmico e forro de gesso acartonado.

Composição	$L'_{nT,w}$ (dB)	Δ (dB)
REFERÊNCIA "C": Piso cerâmico + contrapiso em argamassa (40 mm) + Laje maciça de concreto (100 mm) + argamassa (20 mm)	69	0
REFERÊNCIA "C" + espaço de ar (100 mm) + painel de gesso (12,5 mm) + painel de gesso (12,5 mm)	64	5
REFERÊNCIA "C" + espaço de ar (100 mm) + painel de gesso (12,5 mm)	66	3
REFERÊNCIA "C" + espaço de ar (100 mm) + painel de gesso (12,5 mm) + lâ de rocha (50 mm) + painel de gesso (12,5 mm)	65	4
REFERÊNCIA "C" + espaço de ar (100 mm) + painel de gesso (12,5 mm) + lâ de rocha (50 mm) + painel de gesso (12,5 mm) + painel de gesso (12,5 mm)	66	3
REFERÊNCIA "C" + espaço de ar (50 mm) + lâ de rocha (50 mm) + painel de gesso (12,5 mm)	64	5
REFERÊNCIA "C" + espaço de ar (50 mm) + lâ de rocha (50 mm) + painel de gesso (12,5 mm) + painel de gesso (12,5 mm)	63	6
REFERÊNCIA "C" + espaço de ar (300 mm) + painel de gesso (12,5 mm)	65	4
REFERÊNCIA "C" + espaço de ar (300 mm) + painel de gesso (12,5 mm) com orifício (diâmetro = 20 mm) para fiação	65	4
REFERÊNCIA "C" + espaço de ar (300 mm) + painel de gesso (12,5 mm) + painel de gesso (12,5 mm)	63	6
REFERÊNCIA "C" + espaço de ar (250 mm) + lâ de rocha (50 mm) + painel de gesso (12,5 mm)	64	5
REFERÊNCIA "C" + espaço de ar (250 mm) + lâ de rocha (50 mm) + painel de gesso (12,5 mm) + espaço de ar (70 mm) + painel de gesso (12,5 mm)	63	6
REFERÊNCIA "C" + espaço de ar (250 mm) + lâ de rocha (50 mm) + painel de gesso (12,5 mm) + painel de gesso (12,5 mm)	63	6
REFERÊNCIA "C" + espaço de ar (300 mm) + painel de gesso (12,5 mm) + lâ de rocha (50 mm) + painel de gesso (12,5 mm)	66	3
REFERÊNCIA "C" + espaço de ar (300 mm) + painel de gesso (12,5 mm) + lâ de rocha (50 mm) + painel de gesso (12,5 mm) + painel de gesso (12,5 mm)	64	5

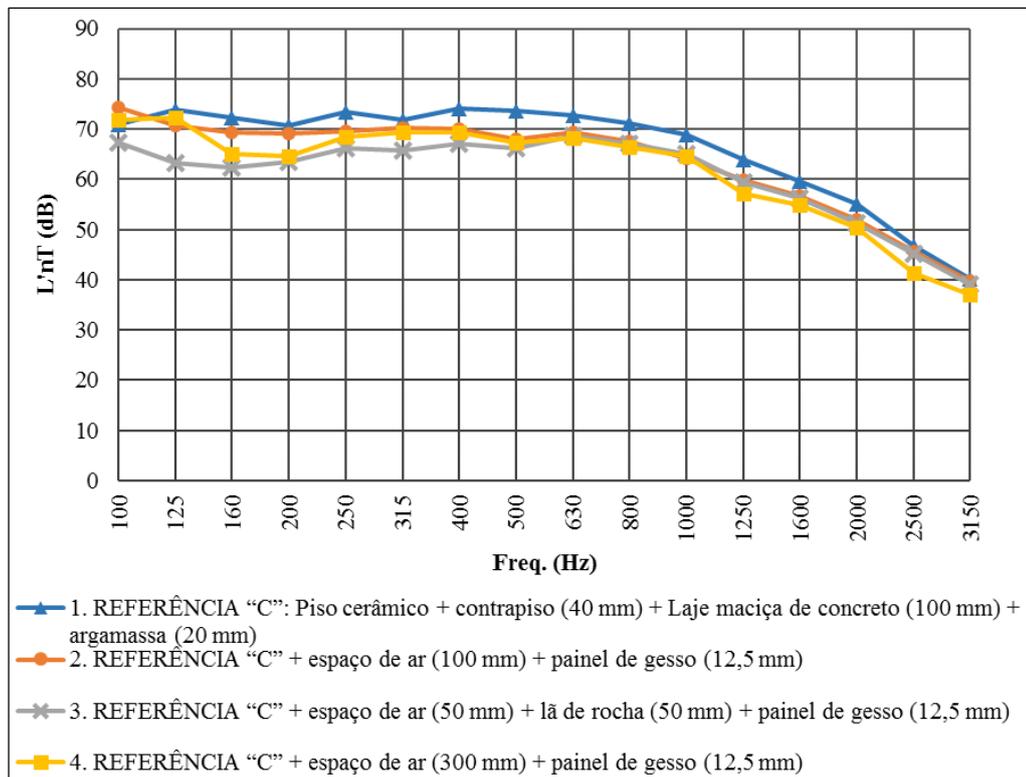
Fonte: Adaptado de Medeiros (2003).

Com base nos resultados apresentados na Tabela 03, pode-se depreender que a utilização do forro de gesso acartonado não é uma solução eficiente para o isolamento ao ruído de impacto em sistemas de pisos que possuem laje homogênea como camada de base.

Quanto ao grau de isolamento proporcionado pelos diferentes sistemas de forros, percebe-se que quanto maior a espessura da camada do entreforro, maior eficiência tem a utilização de forro suspenso. Também, nota-se uma melhora sensível no desempenho do sistema devido à colocação de lâ de rocha no entreforro e à utilização de mais camadas com

placas de gesso acartonado. Na Figura 22 estão representados os valores de Nível Sonoro de Impacto Padronizado de algumas das configurações apresentadas na Tabela 03.

Figura 22 - Resultados de ensaios de composições com piso cerâmico e gesso acartonado para uma laje maciça.



Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	L'nT,w (dB)
L'nT 1 (dB)	70,9	73,8	72,2	70,7	73,3	71,9	74,1	73,7	72,8	71,2	68,9	63,9	59,7	55,1	46,8	40,3	69
L'nT 2 (dB)	74,4	70,6	69,3	69,2	69,5	70,3	70,0	68,0	69,3	67,6	64,2	59,9	56,6	51,9	45,7	39,7	66
L'nT 3 (dB)	67,2	63,3	62,4	63,4	66,2	65,8	67,1	66,1	68,7	67,1	65,1	59,4	56,2	51,2	45,1	39,1	64
L'nT 4 (dB)	71,8	72,3	65,0	64,7	68,4	69,3	69,4	67,3	68,2	66,5	64,5	57,1	54,9	50,3	41,3	37,1	65

Fonte: Adaptado de Medeiros (2003).

É perceptível que a utilização do sistema de forro não modificou o comportamento da curva de referência do sistema de piso analisado. Outrossim, percebe-se que a colocação de lã de rocha no entreforro melhora o desempenho do sistema nas baixas frequências e que a existência de um orifício de 20 mm em um dos painéis de gesso acartonado não alterou a *performance* acústica do sistema de piso.

A Tabela 04 apresenta um resumo dos dados encontrados por Medeiros (2003) para um sistema de piso com piso laminado de madeira sobre laje maciça como referência.

Tabela 04 - Resumo dos resultados dos ensaios para configurações com laje maciça, piso laminado de madeira e forro de gesso acartonado.

Composição	$L'_{nT,w}$ (dB)	Δ (dB)
REFERÊNCIA "M": Piso laminado de madeira (6 mm) + poliestireno expandido (4 mm) + contrapiso em argamassa (40 mm) + Laje maciça de concreto (100 mm) + argamassa (20 mm)	64	0
REFERÊNCIA "M" + espaço de ar (100 mm) + painel de gesso (12,5 mm) + painel de gesso (12,5 mm)	59	5
REFERÊNCIA "M" + espaço de ar (100 mm) + painel de gesso (12,5 mm)	61	3
REFERÊNCIA "M" + espaço de ar (100 mm) + painel de gesso (12,5 mm) + lâ de rocha (50 mm) + painel de gesso (12,5 mm)	57	7
REFERÊNCIA "M" + espaço de ar (100 mm) + painel de gesso (12,5 mm) + lâ de rocha (50 mm) + painel de gesso (12,5 mm) + painel de gesso (12,5 mm)	59	5
REFERÊNCIA "M" + espaço de ar (50 mm) + lâ de rocha (50 mm) + painel de gesso (12,5 mm)	55	9
REFERÊNCIA "M" + espaço de ar (50 mm) + lâ de rocha (50 mm) + painel de gesso (12,5 mm) + painel de gesso (12,5 mm)	57	7
REFERÊNCIA "M" + espaço de ar (300 mm) + painel de gesso (12,5 mm)	59	5
REFERÊNCIA "M" + espaço de ar (300 mm) + painel de gesso (12,5 mm) com orifício (diâmetro = 20 mm) para fiação	59	5
REFERÊNCIA "M" + espaço de ar (300 mm) + painel de gesso (12,5 mm) + painel de gesso (12,5 mm)	57	7
REFERÊNCIA "M" + espaço de ar (250 mm) + lâ de rocha (50 mm) + painel de gesso (12,5 mm)	58	6
REFERÊNCIA "M" + espaço de ar (250 mm) + lâ de rocha (50 mm) + painel de gesso (12,5 mm) + espaço de ar (70 mm) + painel de gesso (12,5 mm)	57	7
REFERÊNCIA "M" + espaço de ar (250 mm) + lâ de rocha (50 mm) + painel de gesso (12,5 mm) + painel de gesso (12,5 mm)	55	9
REFERÊNCIA "M" + espaço de ar (300 mm) + painel de gesso (12,5 mm) + lâ de rocha (50 mm) + painel de gesso (12,5 mm)	60	4
REFERÊNCIA "M" + espaço de ar (300 mm) + painel de gesso (12,5 mm) + lâ de rocha (50 mm) + painel de gesso (12,5 mm) + painel de gesso (12,5 mm)	59	5

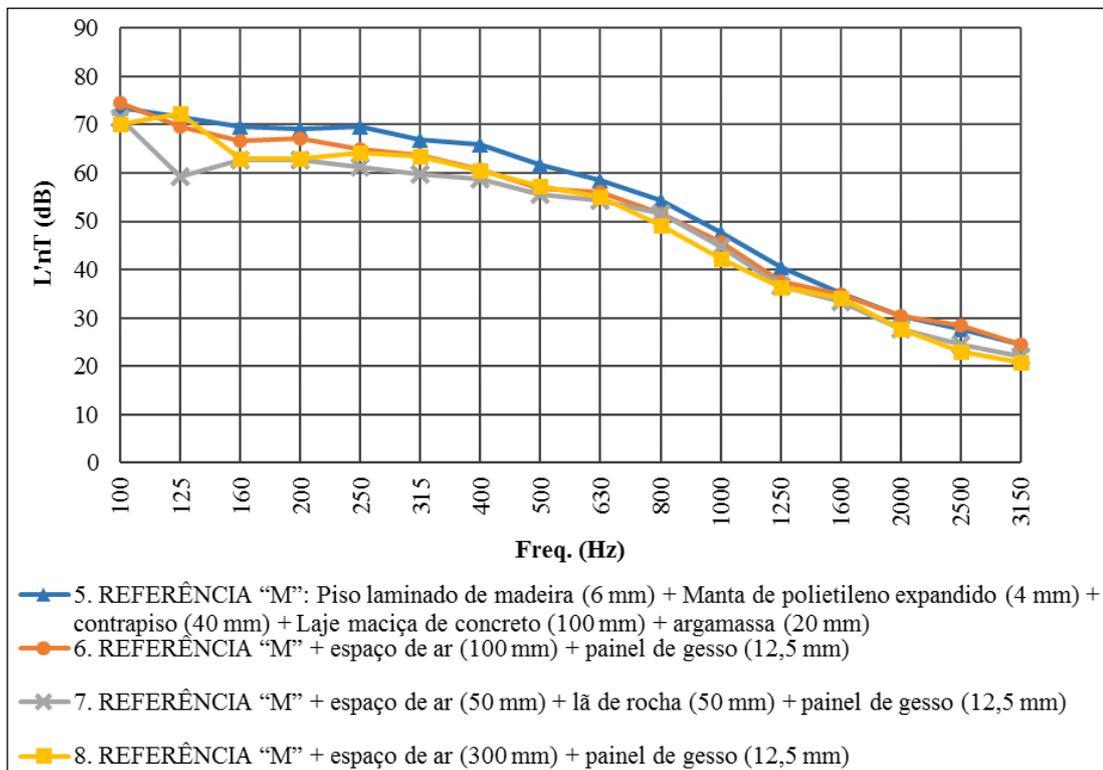
Fonte: Adaptado de Medeiros (2003).

A partir dos resultados apresentados pode-se ponderar que a utilização de painéis duplos e de painéis triplos não possui um bom custo-benefício considerando a melhoria que a utilização desse tipo de técnica proporciona para o desempenho acústico do sistema, sendo uma técnica pouca atrativa também pois diminui consideravelmente o pé-direito do ambiente receptor.

Além disso, nota-se que as soluções estudadas não se comportaram da mesma maneira para os pisos de madeira e para os pisos cerâmicos, apresentando variações nos resultados encontrados para as diferentes composições de forro adotadas. A utilização de lâ de rocha no entreforro tornou o sistema mais eficaz quando foi utilizado piso laminado de madeira, como

pode ser observado na Figura 23, que apresenta os valores de Nível Sonoro de Impacto Padronizado (L'_{nT}) de algumas das configurações apresentadas na Tabela 04.

Figura 23 - Resultados de ensaios de composições com piso laminado de madeira e gesso acartonado para uma laje maciça.



Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	$L'_{nT,w}$ (dB)
L'_{nT} 5 (dB)	73,6	71,6	69,6	69,0	69,6	66,9	65,9	61,7	58,4	54,4	47,7	40,6	35,2	30,5	27,7	24,6	64
L'_{nT} 6 (dB)	74,5	69,5	66,7	67,1	65,0	63,7	60,8	56,9	56,1	51,7	45,6	37,6	34,9	30,5	28,5	24,6	61
L'_{nT} 7 (dB)	71,3	59,2	62,6	62,6	61,2	59,8	58,7	55,5	54,4	51,7	44,6	36,7	33,4	27,7	24,6	22,1	55
L'_{nT} 8 (dB)	70,2	72,3	62,9	62,9	64,1	63,4	60,6	57,2	55,1	49,2	42,2	36,3	34,0	27,6	23,1	20,8	59

Fonte: Adaptado de Medeiros (2003).

Percebe-se que em um sistema de piso com revestimento de piso laminado de madeira a colocação de material absorvente sonoro aumenta a eficiência do isolamento ao ruído de impacto da técnica de forro suspenso.

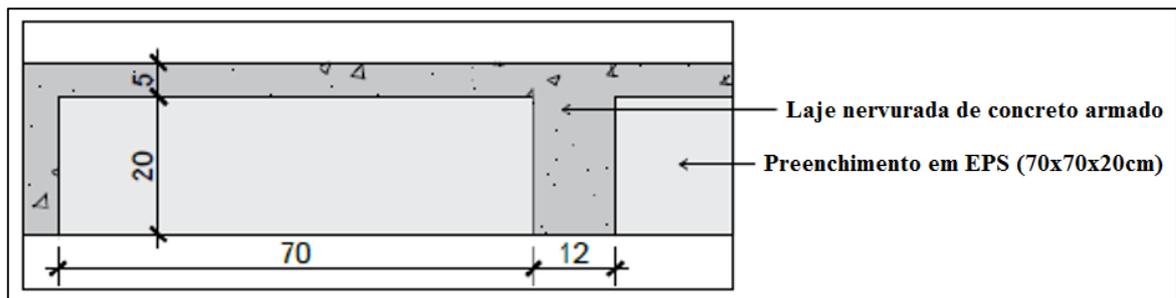
Observa-se na Figura 23 que a utilização desse material melhora o desempenho do sistema para as baixas frequências. Portanto, a utilização de material absorvente no entreforro complementa o isolamento proporcionado por pisos laminados de madeira, que é mais eficiente para altas frequências.

Outra pesquisa na qual foram ensaiados sistemas de pisos com forro de gesso acartonado é a de Bet et al. (2019). Nessa pesquisa, foram utilizados dois tipos de acabamento no encontro do sistema de forro com o sistema de vedação: tabica fechada e tabica aberta.

A laje ensaiada foi uma laje nervurada de concreto armado com as cavidades preenchidas com blocos de enchimento de EPS com dimensões de 70×70×20 cm, mesa com espessura de 5 cm e nervura com altura de 20 cm, totalizando uma altura de 25 cm para a laje.

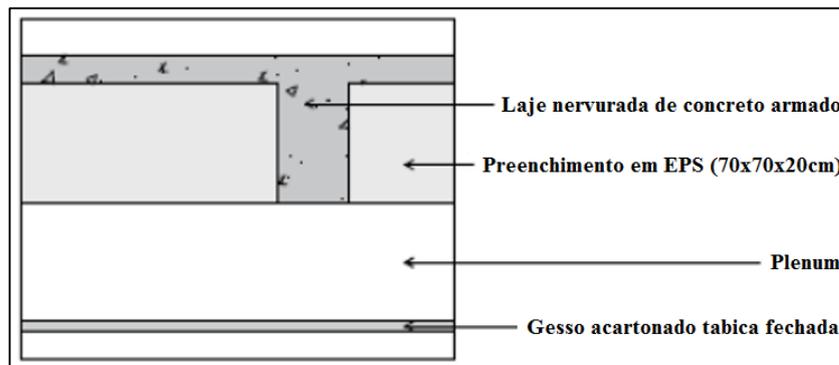
A Figura 24 ilustra a laje nervurada (Laje 0) utilizada nos ensaios. Nas composições com forro de gesso acartonado, foi utilizado um *plenum* de 20 cm. A Figura 25 apresenta a composição com forro de gesso acartonado com acabamento de tabica fechada (LNPF), enquanto que a Figura 26 apresenta a composição com forro de gesso acartonado com acabamento de tabica aberta (LNPA).

Figura 24 - Laje nervurada de concreto armado “em osso”.



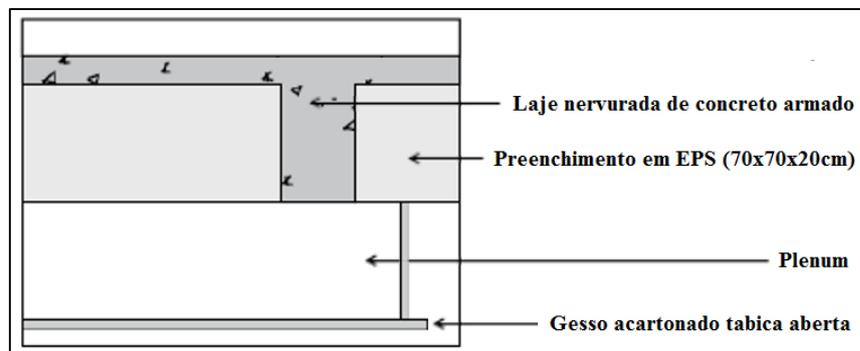
Fonte: Adaptado de Bet et al. (2019, p. 4).

Figura 25 - Laje nervurada de concreto armado com forro de gesso acartonado (tabica fechada).



Fonte: Adaptado de Bet et al. (2019, p. 4).

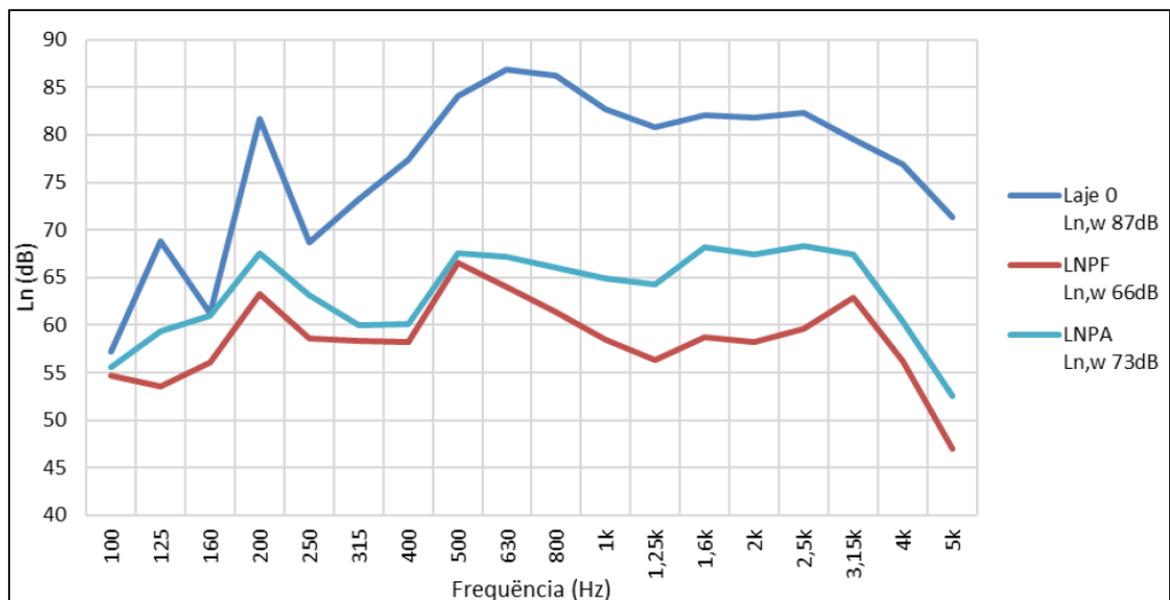
Figura 26 - Laje nervurada de concreto armado com forro de gesso acartonado (tabica aberta).



Fonte: Adaptado de Bet et al. (2019, p. 4).

Os ensaios foram realizados em laboratório e seguiram os procedimentos indicados pela ISO 10140-3 (2010). Os resultados das medições do isolamento ao ruído de impacto das três composições citadas estão apresentados na Figura 27.

Figura 27 - Resultados das medições do isolamento ao ruído de impacto de laje nervurada de concreto armado com forro de gesso acartonado.



Fonte: Bet et al. (2019, p. 8).

Da análise dos resultados para a LNPF e a LNPA depreende-se que o comportamento das curvas dos valores de $L'nT$ dessas duas lajes se assemelha ao da “Laje 0” e que a utilização do forro melhorou o isolamento proporcionado pelo sistema de piso. O forro de gesso acartonado com tabica fechada melhorou em 21 dB o isolamento do sistema de piso, enquanto

que o forro com tabica aberta mostrou-se menos eficiente, melhorando o isolamento do sistema de piso em 14 dB. Disso pode-se depreender que o acabamento em tabica aberta permite transmissões parasitas e diminui a eficiência da solução de forro suspenso.

Monaco et al. (2018) também realizaram ensaios com composições de sistemas de pisos que continham forro de gesso acartonado. Os sistemas de pisos ensaiados pelos autores estão descritos na Tabela 05.

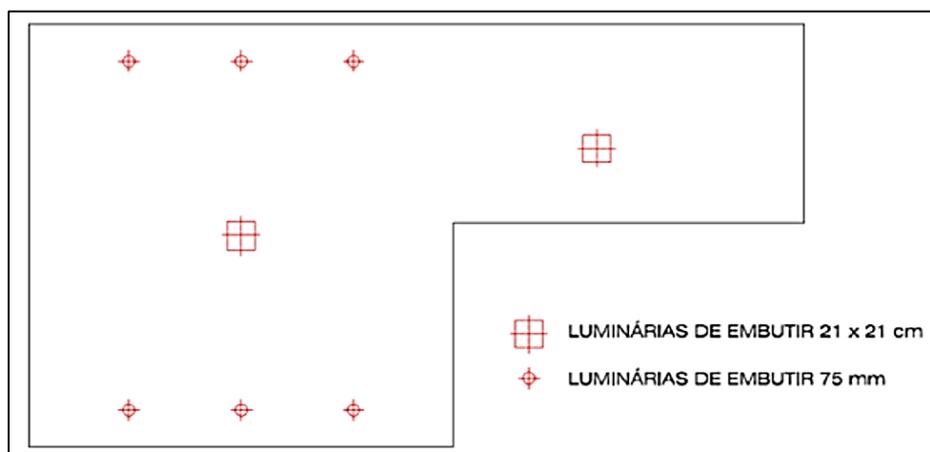
Tabela 05 - Caracterização dos sistemas de pisos ensaiados.

Legenda	Sistema de piso
LC	Contrapiso (5 cm) + Manta de poliéster (8 mm) + Laje maciça de concreto armado (12 cm)
LCF1	Contrapiso (5 cm) + Manta de poliéster (8 mm) + Laje maciça de concreto armado (12 cm) + Forro de gesso acartonado (1,25 cm)
LCF2	Contrapiso (5 cm) + Manta de poliéster (8 mm) + Laje maciça de concreto armado (12 cm) + Forro de gesso acartonado com luminárias embutidas (1,25 cm)
LCFV1	Revestimento laminado vinílico (2 mm) + Contrapiso (5 cm) + Manta de poliéster (8 mm) + Laje maciça de concreto armado (12 cm) + Forro de gesso acartonado (1,25 cm)
LCFV2	Revestimento laminado vinílico (2 mm) + Contrapiso (5 cm) + Manta de poliéster (8 mm) + Laje maciça de concreto armado (12 cm) + Forro de gesso acartonado com luminárias embutidas (1,25 cm)

Fonte: Adaptado de Monaco et al. (2018, p. 3-4).

Como exposto na Tabela 05, alguns dos sistemas de forros foram executados com luminárias embutidas, para a instalação das quais foi necessário cortar as placas de gesso acartonado. A Figura 28 mostra o posicionamento dessas luminárias no local ensaiado.

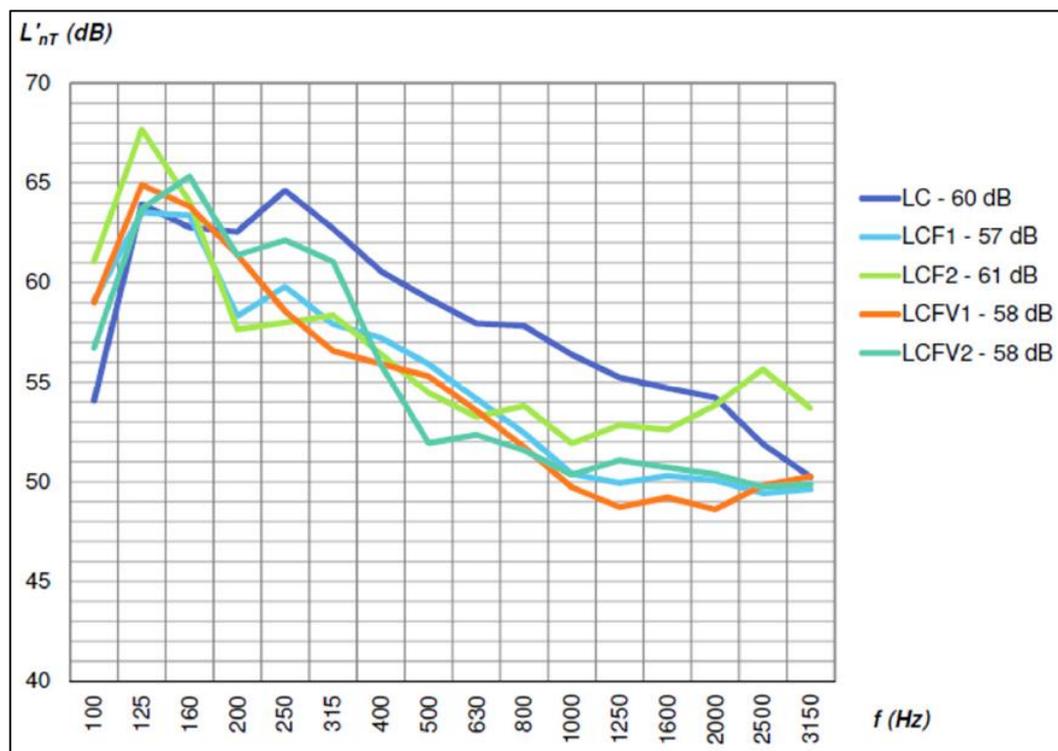
Figura 28 - Posicionamento das luminárias embutidas.



Fonte: Adaptado de Monaco et al. (2018, p. 4).

As composições utilizadas por Monaco et al. (2018) possibilitam a análise do quanto a utilização de luminárias embutidas afeta a eficiência da solução de forro suspenso. Os ensaios foram realizados conforme as prescrições da ISO 16283-2 (2018) e os resultados dos ensaios estão apresentados na Figura 29.

Figura 29 - Resultados dos ensaios dos sistemas de pisos com forros de gesso acartonado com luminárias embutidas.



Fonte: Monaco et al. (2018, p. 8).

Os resultados indicam que a maior contribuição ao isolamento do ruído de impacto foi do material resiliente (manta de poliéster) e que o forro de gesso acartonado melhorou sensivelmente o desempenho do sistema LC (Laje de concreto e contrapiso flutuante), o que comprova que a solução de forro suspenso é ineficiente para sistemas de pisos com laje maciça como camada de base, assim como foi observado por Medeiros (2003). Ainda, verifica-se que em LCF1 o forro proporcionou uma melhoria no isolamento ao ruído de impacto de 3 dB, enquanto que em LCF2 (sistema de forro com luminárias embutidas) não se observou melhoria no isolamento ao ruído de impacto. Portanto, os cortes realizados no forro para a instalação das luminárias fizeram com que o forro não proporcionasse melhoria no isolamento ao ruído de impacto do sistema de piso.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

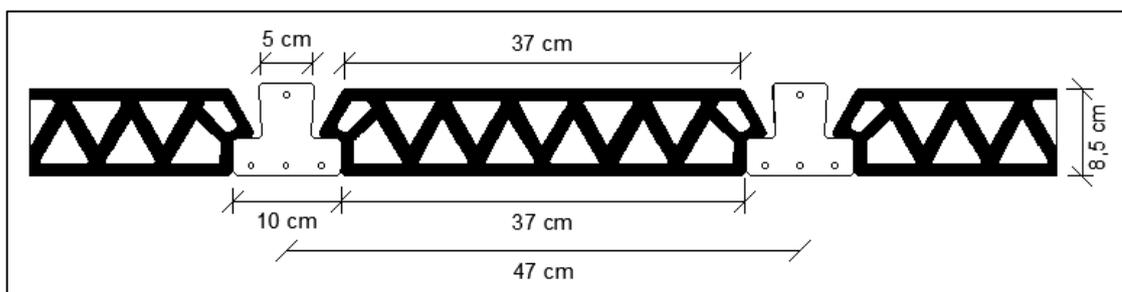
O presente capítulo discorre acerca dos materiais e métodos utilizados neste trabalho. São caracterizados o local de ensaio, os equipamentos utilizados e os materiais ensaiados, bem como são introduzidos os procedimentos e parâmetros adotados para a obtenção e análise dos dados.

3.1 LOCAL DE ENSAIO

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Termo-Acústica (LaTA) da UFSM, em uma câmara construída especificamente para ensaios de medição de ruído de impacto. As paredes da câmara são de alvenaria estrutural de blocos de concreto com 19 cm de espessura, os quais foram preenchidos com argamassa de traço 1:4 e revestidos com chapisco e reboco, totalizando 3 cm de revestimento em ambas as faces das paredes. Dessa forma, as paredes apresentam uma espessura final 25 cm.

Sobre essas paredes, foi construída uma laje nervurada pré-fabricada com vigotas protendidas e lajotas cerâmicas, com espessura total de 13,5 cm. As vigotas protendidas possuem largura de base de 10 cm, altura de 8,5 cm e 4 barras de aço longitudinais com diâmetros de 5 mm. Já as lajotas possuem largura de base de 37 cm, altura de 8 cm e profundidade de 20 cm. A distância entre os eixos das vigotas é de 47 cm. A montagem das vigotas e das lajotas está detalhada na Figura 30.

Figura 30 - Detalhamento da montagem das vigotas e das lajotas.



Fonte: Autor.

A mesa foi executada com malha de aço de 15×15 cm (Ø 4,2 mm) e eletrodutos de ¾ de polegada de diâmetro embutidos na capa de concreto. Os materiais descritos podem ser

visualizados na Figura 31, que é uma fotografia da laje após o processo de montagem e previamente à concretagem da mesa.

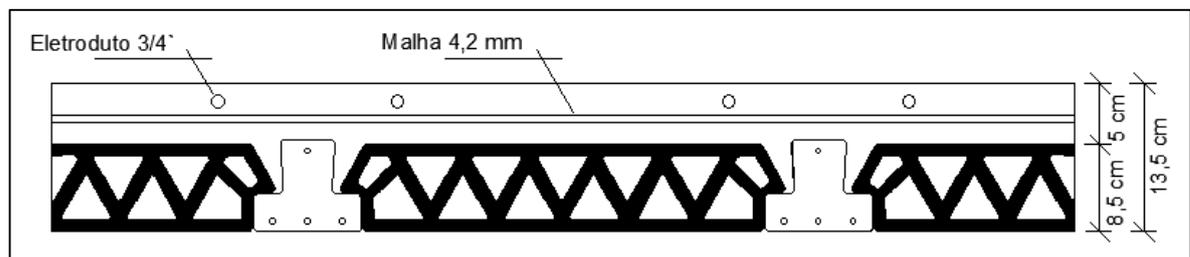
Figura 31 - Laje montada no local de ensaio.



Fonte: Haas (2019, p. 54).

A mesa foi executada com concreto usinado de 25 MPa e possui 5 cm de espessura. Assim, obteve-se uma laje em osso com altura de 13,5 cm, como mostrado na Figura 32.

Figura 32 - Detalhamento da laje em osso.

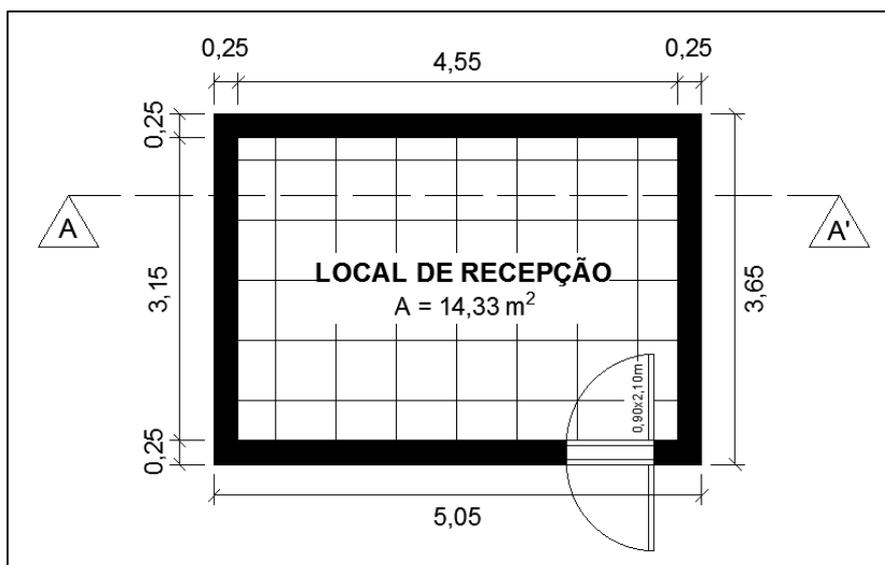


Fonte: Autor.

A câmara foi o local onde as medições foram realizadas, caracterizando-se como o local de recepção, enquanto que o local sobre a laje é considerado o local de emissão, visto que é o local de origem do ruído. (ABNT NBR 16313, 2014).

As Figuras 33 e 34 detalham a câmara onde foram realizadas as medições. A Figura 33 apresenta a planta baixa da câmara e a Figura 34 um corte que detalha o local de emissão, o local de recepção e a laje de apoio.

Figura 33 - Planta Baixa da câmara.



Fonte: Autor.

Figura 34 - Corte Longitudinal AA' da câmara.



Fonte: Autor.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Neste tópico estão elencados os materiais utilizados nos ensaios e as suas propriedades físicas relevantes.

3.2.1 Contrapiso

A fim de viabilizar a realização de ensaios com diferentes revestimentos e materiais resilientes, o tamanho das amostras de contrapiso utilizadas nos ensaios foi definido de acordo com o que está prescrito na ISO 10140-1 (2016), que define que, para lajes leves, as amostras devem ter dimensões de no mínimo 650×350 mm.

Sendo assim, foram utilizadas placas de contrapiso de argamassa armada com dimensões de 1000×1000 mm e espessura de 40 mm, classificadas na ISO 10140-1 (2016) como de Categoria I (Small specimens). Durante os procedimentos de medição essas placas variaram de posição juntamente com a máquina de impacto padrão.

As placas de contrapiso foram produzidas com argamassa de traço 1:4 (cimento: areia), com alças laterais para facilitar o deslocamento. A Figura 35 apresenta uma amostra de contrapiso utilizada nos ensaios.

Figura 35 - Placa móvel de contrapiso.



Fonte: Autor.

3.2.2 Revestimento cerâmico

Como material de revestimento cerâmico utilizou-se porcelanatos com dimensões de 50×50 cm e 9 mm de espessura, o mesmo revestimento utilizado por Haas (2019) em seus ensaios. O referido revestimento está apresentado na Figura 36.

Figura 36 - Revestimento cerâmico utilizado nos ensaios.



Fonte: Autor.

3.2.3 Revestimentos vinílicos

Os pisos vinílicos ensaiados neste trabalho foram utilizados por Rossi (2020) em seus ensaios. Foram selecionadas 7 amostras de revestimentos de pisos de variadas dimensões, densidades, tipos (manta, régua e placa) e formas de instalação (colado e clicado). As características dos pisos vinílicos ensaiados estão descritas na Tabela 06.

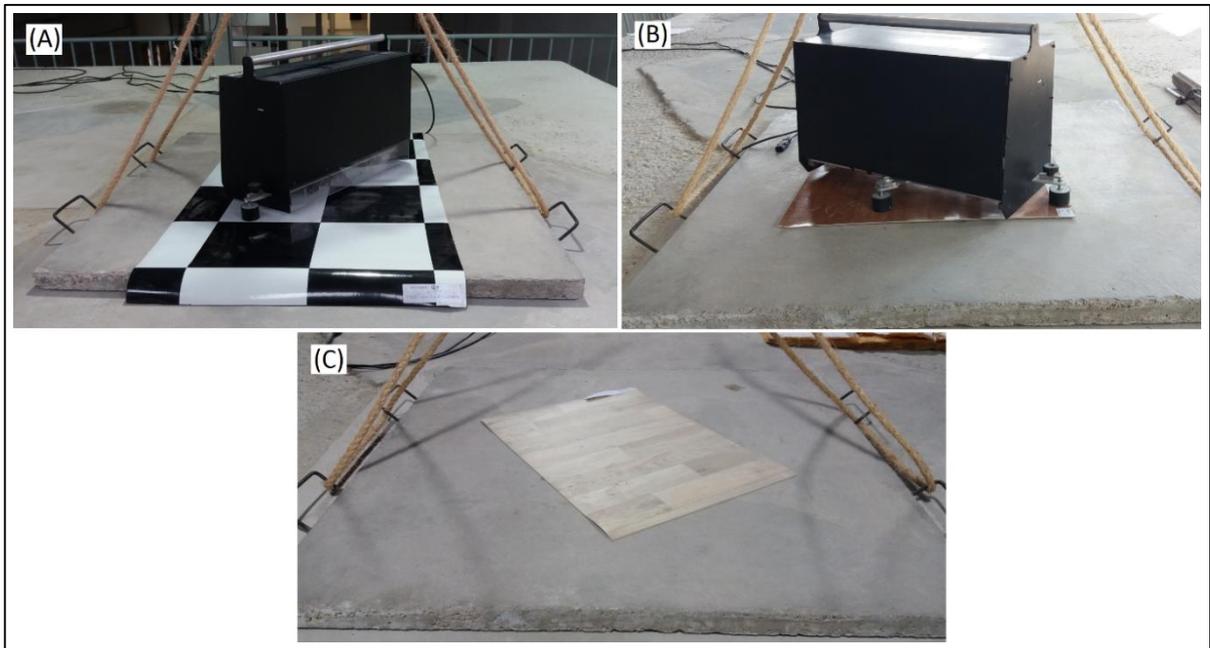
Tabela 06 - Características dos pisos vinílicos utilizados nos ensaios.

Tipo	Espessura (mm)	Dimensões para venda	Peso médio (Kg/m ²)	Densidade (Kg/m ³)
Manta	0,7	Rolos de 2×12 m	0,920	1314,29
Manta	1,4	Rolos de 2×20 m	1,820	1300,00
Manta	2,4	Rolos de 2×25 m	2,150	895,83
Placa	5,0	Placas de 50×50 cm	5,195	1039,00
Régua	2,0	Réguas de 18,4×95 cm	3,760	1880,00
Régua	3,0	Réguas de 22,8×183 cm	5,500	1833,33
Régua	4,0	Réguas de 20×122 cm	7,052	1763,00

Fonte: Autor.

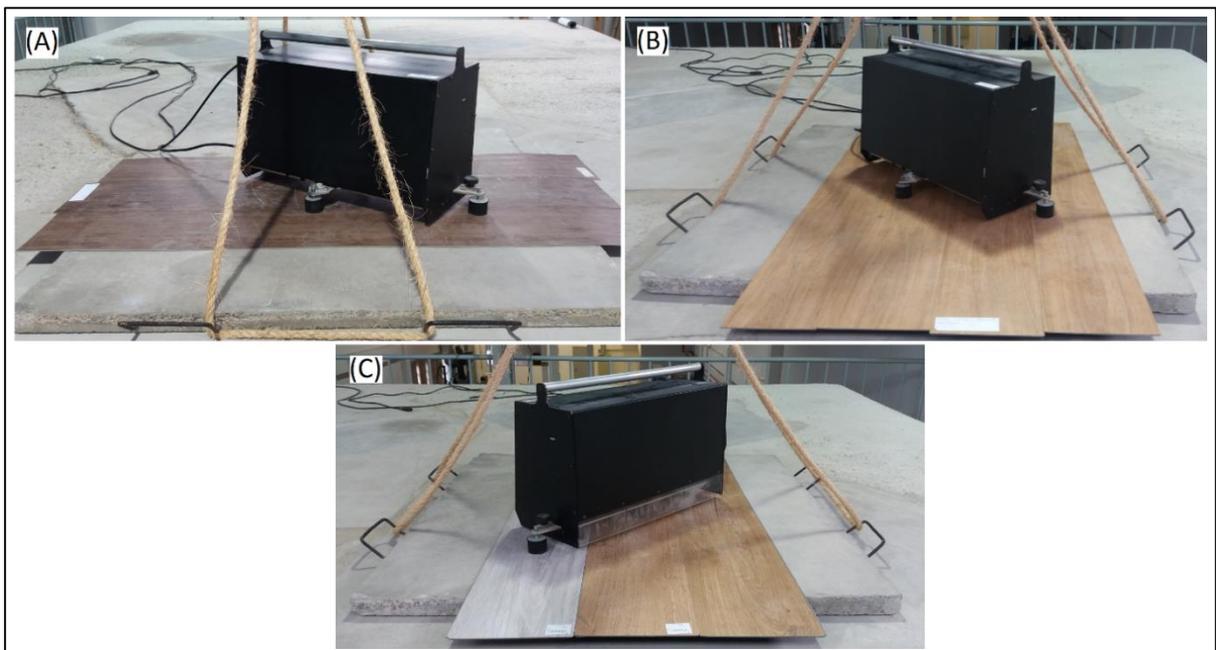
A Figura 37 apresenta as mantas vinílicas utilizadas nos ensaios, a Figura 38 réguas vinílicas e a Figura 39 as placas vinílicas.

Figura 37 - Mantas vinílicas utilizadas nos ensaios: A) manta de 0,7 mm; B) manta de 1,4 mm; e C) manta de 2,4 mm.



Fonte: Autor.

Figura 38 - Régua vinílicas utilizadas nos ensaios: A) régua 2 mm; B) régua de 3 mm; e C) régua clicada de 4 mm.



Fonte: Autor.

Figura 39 - Piso de placas vinílicas utilizado nos ensaios.



Fonte: Autor.

3.2.4 Revestimentos laminados de madeira

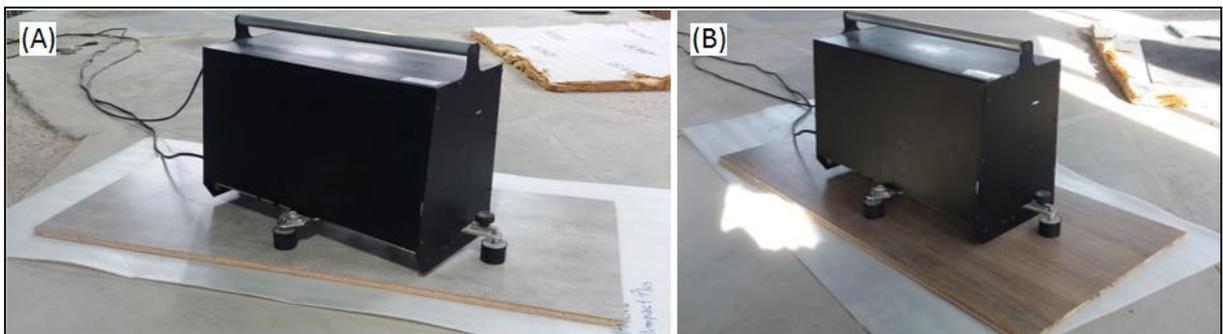
Foram utilizados dois tipos de pisos laminados de madeira nos ensaios, ambos utilizados previamente por Lourenço (2020) em seus ensaios. A Tabela 07 apresenta as características dos dois pisos utilizados e a Figura 40 apresenta imagens dos dois pisos.

Tabela 07 - Características dos pisos laminados de madeira utilizados nos ensaios.

Tipo de piso	Espessura (mm)	Dimensões para venda
Piso laminado de madeira AC3	7	Réguas de 21,7×135,7 cm
Piso laminado de madeira AC4	8	Réguas de 44,5×135,7 cm

Fonte: Autor.

Figura 40 - Pisos laminados utilizados nos ensaios: A) laminado de madeira AC4 e B) laminado de madeira AC3.



Fonte: Autor.

3.2.5 Materiais resilientes

A Tabela 08 apresenta os materiais resilientes utilizados neste trabalho.

Tabela 08 - Materiais resilientes.

Material Resiliente	Densidade (Kg/m ³)	Espessura (mm)
Lã de Vidro	60	15
Lã de PET	60	5
Polipropileno Expandido (EPP)	42	2
Borracha Reciclada	600	5
Borracha reciclada ondulada	750	8/4

Fonte: Autor.

Como descrito na Tabela 03 serão utilizados: dois materiais fibrosos, a lã de vidro (Figura 41) e a lã de PET (Figura 42); um material do tipo expandido, a manta de EPP (Figura 43); e dois materiais do tipo aglomerado, a borracha reciclada (Figura 44) e a borracha reciclada ondulada (Figura 45).

Figura 41 - Lã de vidro sob amostra de contrapiso.



Fonte: Autor.

Figura 42 - Lã de PET sob amostra de contrapiso.



Fonte: Autor.

Figura 43 - EPP sob amostra de contrapiso.



Fonte: Autor.

Figura 44 - Borracha reciclada sob amostra de contrapiso.



Fonte: Autor.

Figura 45 - Borracha reciclada ondulada sob amostra de contrapiso.

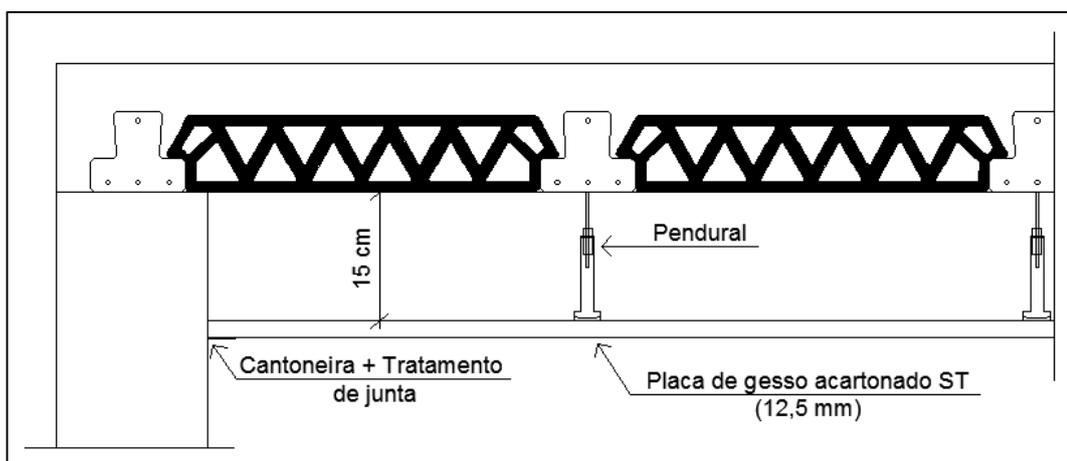


Fonte: Autor.

3.2.6 Sistemas de forros de gesso acartonado

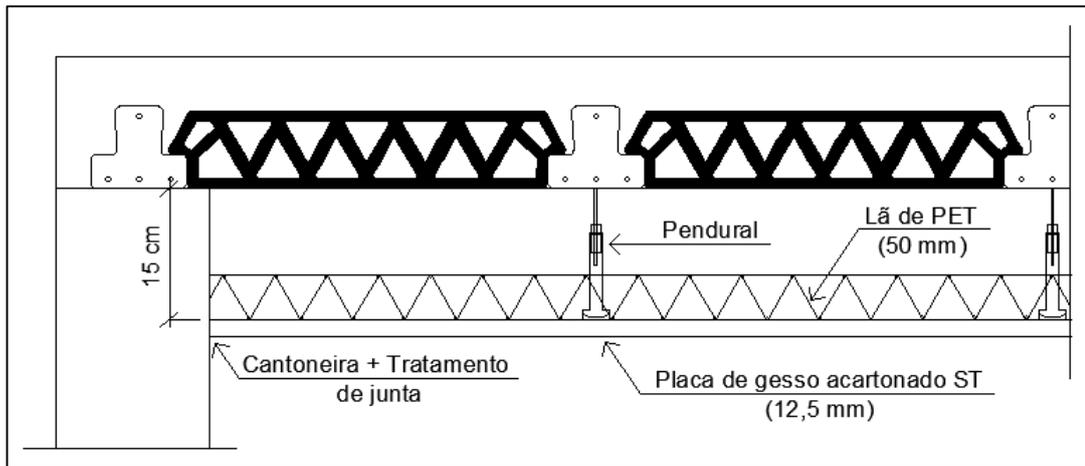
Foram definidas duas composições de forro para os ensaios: referência “GA” com forro de gesso acartonado e entreferro de 150 mm (Figura 46) e referência “GA+LP” com forro de gesso acartonado, lã de PET de 50 mm e entreferro de 150 mm (Figura 47). Em ambos os casos o detalhe de execução do forro no encontro com a parede foi feito com cantoneira e tratamento de junta.

Figura 46 - Composição de sistema de forro referência “GA”.



Fonte: Autor.

Figura 47 - Composição de sistema de forro referência “GA+LP”.



Fonte: Autor.

Os seguintes materiais foram utilizados para a instalação dos sistemas de forros:

- Cantoneiras de aço galvanizado (galvanização Z 275) com 0,5 mm de espessura, dimensões de 23×23 mm e 3 m de comprimento;
- Canaletas de aço galvanizado S47 (galvanização Z 275) com 0,5 mm de espessura, 48 mm de largura e 3 m de comprimento;
- Pendurais com capacidade de carga máxima de 0,75 KN por pendural, compostos por tirantes metálicos e reguladores S47 (galvanização Z 275);
- Parafusos cabeça trombeta e ponta agulha;
- Chapas de gesso acartonado do tipo *standard* (chapas ST) com dimensões individuais de 12,5 mm de espessura, 1200 mm de largura e 1800 mm de comprimento;
- Rolo de lâã de PET de gramatura 0,350 Kg/m² e classificação II-A quanto à reação ao fogo, com 50 mm de espessura, 600 mm de largura e 25 m de comprimento;
- Saco de 20 Kg de massa de rejunte em pó para drywall;
- Rolo de fita de papel especial microperfurado para *drywall* com 3 mm de espessura, 50 mm de largura e 150 m de comprimento.

Os materiais listados aparecem na Figura 48.

Figura 48 - Materiais utilizados para a execução dos forros: A) pendural metálico; B) massa de rejunte; C) lã de PET; D) placas de gesso acartonado; E) rolo de fita de papel especial microperfurado; e F) cantoneiras e canaletas de aço galvanizado.



Fonte: Autor.

Quanto ao processo de montagem dos forros, inicialmente foram fixadas as cantoneiras no perímetro da sala a uma distância de 150 mm da laje, com a utilização de parafusos e com o auxílio de nível a laser. Após, foram fixados os pendurais nas vigotas, sendo instalados cinco pendurais por vigota. Em seguida, as canaletas foram acopladas aos pendurais. A Figura 49 mostra a estrutura metálica para o forro de gesso acartonado.

Figura 49 - Estrutura metálica para o sistema de forro de gesso acartonado.



Fonte: Autor.

Em seguida, as placas de gesso acartonado foram fixadas à estrutura metálica. No sistema de forro em que foi utilizada a lã de PET, a manta foi posicionada no entreforro com o auxílio de um nível a laser e de uma baliza metálica, sobre as placas de gesso acartonado. A Figura 50 mostra a lã de PET posicionada no entreforro.

Figura 50 - Lã de PET posicionada no entreforro.



Fonte: Autor.

Por fim, nas juntas entre as placas de gesso acartonado aplicou-se sequencialmente: demão de massa a base de gesso, fita de papel microperfurado e outra demão de massa a base de gesso. Nos locais em que as placas foram perfuradas também foi aplicada massa a base de gesso. O aspecto final do forro executado sob a laje pode ser visualizado na Figura 51.

Figura 51 - Forro de gesso acartonado executado.



Fonte: Autor.

3.3 EQUIPAMENTOS

Os equipamentos utilizados nos ensaios foram disponibilizados pelo LaTA da UFSM, estando listados na Tabela 09 e apresentados graficamente na Figura 52.

Tabela 09 - Equipamentos utilizados nas medições.

Equipamento	Fabricante	Modelo
Amplificador	01 dB	AMPLI 12
Calibrador de nível sonoro	01 dB	4230, classe 1
Fonte acústica dodecaédrica	01 dB	OMNI 12
Máquina de impacto padrão	01 dB	CALPEST-one
Medidor de nível sonoro	01 dB	Black Solo, classe 1
Microfone capacitivo	GRAS	MCE 212
Pré-amplificador de microfone 01dB	Metravib	PRE 21 S
Software 01dB	dBbati Building acoustics	Versão 5.3
Termo-higrobarômetro digital	InstruTerm	THB 100

Fonte: Autor.

Figura 52 - Equipamentos utilizados nas medições: A) máquina de impacto; B) fonte acústica; C) amplificador; D) calibrador; E) sonômetro; F) microfone e pré-amplificador; e G) termo-higrobarômetro.



Fonte: Autor.

3.4 PROCEDIMENTOS PARA AS MEDIÇÕES

Na ABNT NBR 15575-3 (2013) consta que os ensaios de ruído de impacto para sistemas de pisos devem ser realizados de acordo com a ISO 140-7 (1998), norma que foi substituída pela ISO 16283-2 (2018). Na realização de medições de isolamento ao ruído de impacto em sistemas de pisos determinam-se três parâmetros: tempo de reverberação, nível de ruído residual e nível de pressão sonora de impacto padronizado.

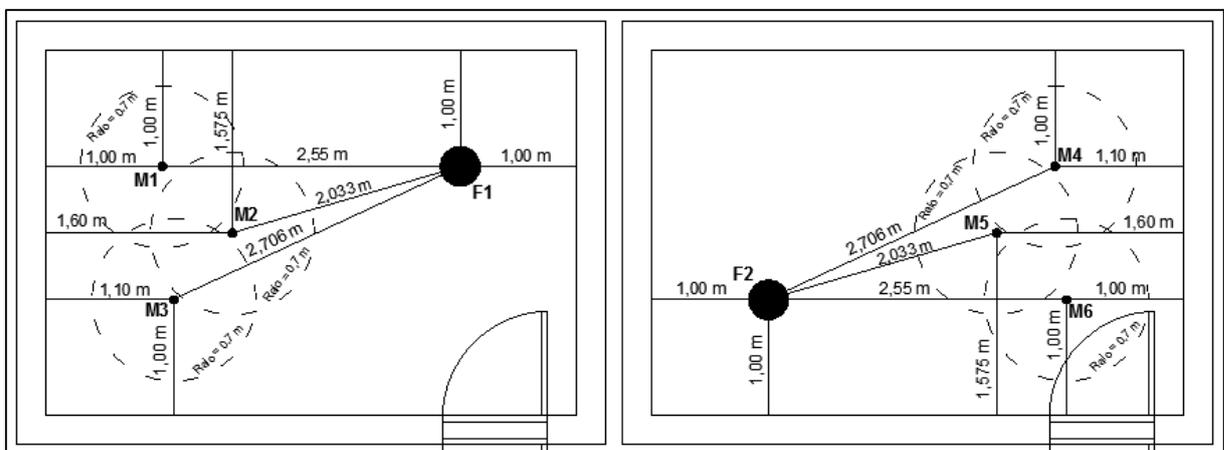
O tempo de reverberação é expresso em segundos e é a “[...] duração requerida para a média espacial da densidade de energia sonora em um recinto decair 60 dB após a interrupção da emissão sonora”. (ABNT NBR 16313, 2014, p. 9).

O tempo de reverberação foi medido utilizando-se o método do ruído interrompido descrito na ABNT NBR ISO 3382-2 (2017), no qual são obtidas curvas de decaimento do nível de pressão sonora em uma sala, a partir da gravação direta do decaimento, em função do tempo decorrido após a interrupção da fonte sonora. (ABNT NBR ISO 3382-2, 2017).

Para as medições, foram utilizadas duas posições de fonte e três posições de microfones para cada posição de fonte. Foram feitas duas medições para cada posição de microfone, totalizando 12 medições para a determinação do tempo de reverberação. Para cada posição de microfone foram utilizadas as seguintes alturas: M1 e M6 (1,30 m), M2 e M5 (1,90 m) e M3 e M4 (2,30 m).

O croqui dos posicionamentos utilizados para as fontes e para os microfones na medição do tempo de reverberação está representado na Figura 53.

Figura 53 - Posicionamentos das fontes e dos microfones.



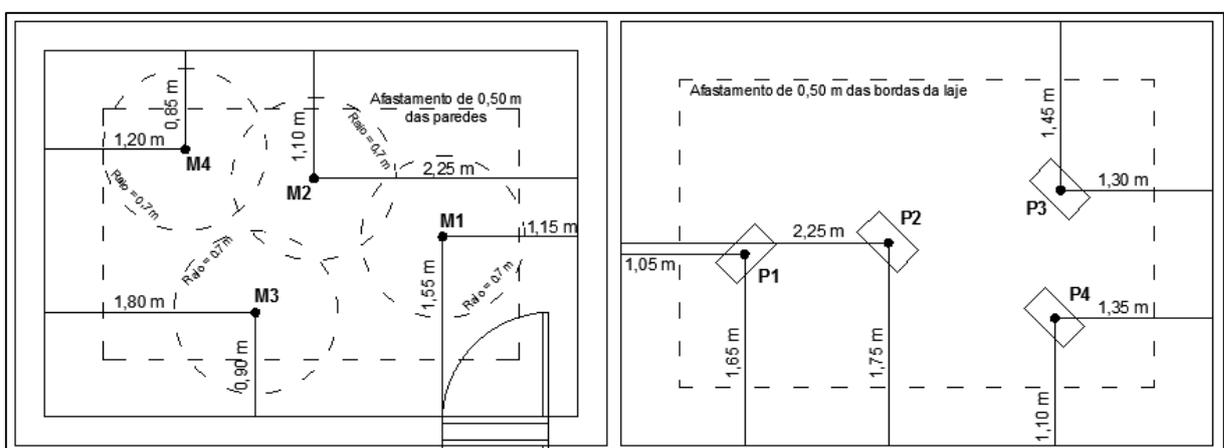
Fonte: Autor.

Já para a medição do nível de ruído residual e do nível de pressão sonora de impacto padronizado (L'_{nT}) foram realizadas medições no intervalo de 100 Hz a 3150 Hz para bandas de terço de oitava, utilizando-se os procedimentos descritos na ISO 16283-2 (2018). As medições de nível de ruído residual são feitas para certificar que os valores medidos na sala de recepção não tenham sido alterados devido a ruídos externos, permitindo a correção dos valores medidos quando necessário.

Para as medições relativas ao nível de pressão sonora de impacto padronizado determinaram-se quatro posições para a máquina de impacto, as quais foram distribuídas respeitando-se a distância de 0,50 m das bordas do piso. Posicionou-se a máquina de impacto de maneira que a linha dos martelos sempre estivesse sobre as nervuras da laje e em um ângulo de 45° quanto à direção das nervuras. A máquina de impacto utilizada nos ensaios possui cinco martelos de 500 g cada, que caem em queda livre repetidamente de uma altura de 40 mm.

Também, foram definidas quatro posições de microfone para cada posição da máquina de impacto. As posições do microfone foram distribuídas respeitando as seguintes distâncias mínimas: 0,70 m entre as posições dos microfones fixos; 0,50 m entre as posições de microfone e os limites da sala de recepção; e 1,0 m entre qualquer posição de microfone e a laje excitada pela máquina de impacto. Outrossim, foram feitas duas medições para cada posição de microfone, totalizando 32 medições de nível de ruído residual e 32 medições de nível de pressão sonora de impacto padronizado. Para cada posição de microfone foram utilizadas as seguintes alturas: M1 (1,20 m), M2 (1,60 m), M3 (2,10) e M4 (1,50 m). A Figura 54 ilustra os posicionamentos que serão utilizados para as máquinas de impacto e para os microfones.

Figura 54 - Posicionamentos das máquinas de impacto e dos microfones.



Fonte: Autor.

Previamente a cada um dos ensaios os microfones foram ajustados com um calibrador, sendo esse procedimento repetido no final dos ensaios, considerando-se que, para que os valores medidos fossem validados, a diferença do valor encontrado entre os valores do primeiro e do segundo procedimento deveria ser menor ou igual a 0,5 dB.

3.5 PROCEDIMENTOS PARA OS CÁLCULOS

Para os cálculos foram utilizadas as fórmulas determinadas pela ISO 16283-2 (2018). Primeiramente, foi necessário verificar a diferença entre o nível de ruído de fundo e o nível de pressão sonora de impacto medidos para cada banda de frequência e, quando necessário, fazer correções. Essas correções foram realizadas de acordo com a ISO 16283-2 (2018). Quando a diferença entre o nível de ruído de fundo e a combinação do nível de ruído de fundo e do nível de pressão sonora de impacto era menor que 10 dB, mas não menor que 6 dB, o nível de pressão sonora de impacto (L) foi ajustado utilizando-se a Equação 1. Já nos casos em que essa diferença era menor ou igual a 6 dB, utilizou-se o valor de 1,3 dB para realizar o ajuste.

$$L = 10 \log(10^{L_{sb}/10} - 10^{L_b/10}) \quad (1)$$

Onde:

L_b : é o nível do ruído de fundo, em dB.

L_{sb} : é o nível de pressão sonora de impacto e do ruído de fundo combinados, em dB.

Após, obteve-se o nível de pressão sonora de impacto médio (L_i) com a Equação 2.

$$L_i = 10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{L_j/10}\right) \quad (2)$$

Onde:

L_j : é o nível de pressão sonora de impacto para cada posição de microfone j , em dB.

n : é o número de posições de microfone para cada posição da máquina de impacto.

Na sequência, calculou-se o nível de pressão sonora de impacto padronizado (L'_{nT}) para cada posição da máquina de impacto, conforme a Equação 3.

$$L'_{nT} = L_i - 10 \log \frac{T}{T_0} \quad (3)$$

Onde:

L_i : é o nível de pressão sonora de impacto médio, em dB.

T : é o tempo de reverberação (T_{60}) na sala de recepção, em s.

T_0 : é a referência do tempo de reverberação, para moradias $T_0 = 0,50$ s.

Por fim, calcula-se o nível de pressão sonora de impacto padronizado (L'_{nT}) para cada banda de frequência. Para isso, utiliza-se a Equação 4.

$$L'_{nT} = 10 \log \left(\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m 10^{L'_{nTj}/10} \right) \quad (4)$$

Onde:

m : é o número de posições da máquina de impacto.

L'_{nTj} : é o nível de pressão sonora padronizado para cada posição da máquina de impacto j , em dB.

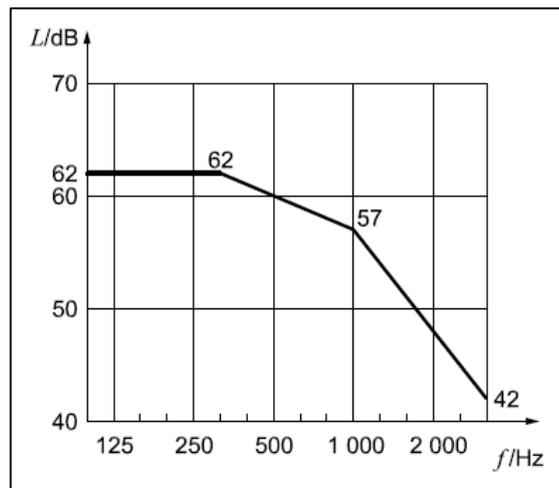
Para a obtenção do nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado ($L'_{nT,w}$), o tratamento dos dados foi realizado com a utilização de valores de referência estabelecidos na ISO 717-2 (2013), os quais estão descritos na Tabela 10 e plotados na curva de referência da Figura 55.

Tabela 10 - Valores de referência para ruído de impacto de acordo com as bandas de frequência.

Frequência (Hz)	Valores de referência para bandas de terço de oitava (dB)
100	62
125	62
160	62
200	62
250	62
315	62
400	61
500	60
630	59
800	58
1000	57
1250	54
1600	51
2000	48
2500	45
3150	42

Fonte: Adaptado da ISO 717-2 (2013).

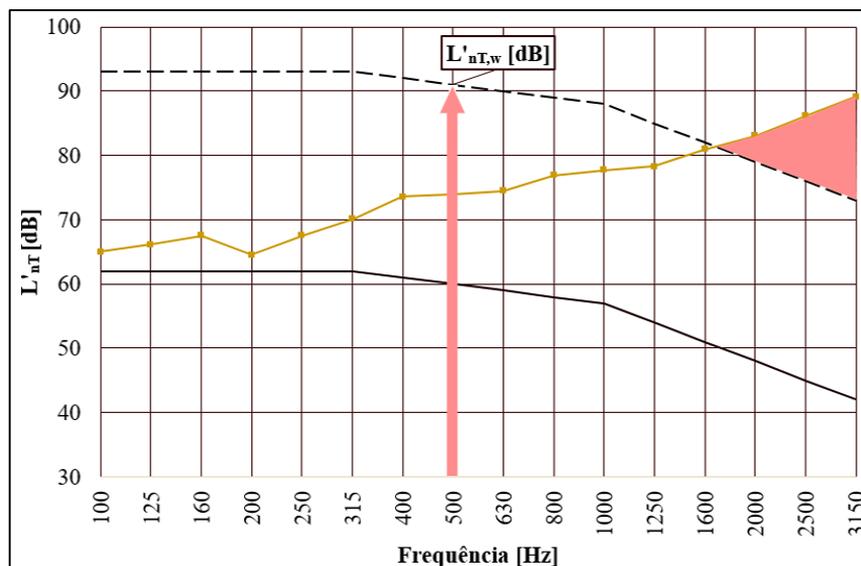
Figura 55 - Curva de valores de referência para o ruído de impacto.



Fonte: ISO 717-2 (2013).

Os valores de L'_{nT} encontrados nas medições foram plotados em um gráfico juntamente com os valores de referência citados. Em seguida, a curva plotada dos valores de referência foi deslocada em incrementos de 1 dB em direção a curva medida até que a soma dos desvios desfavoráveis fosse tão grande quanto o possível, mas não maior que 32 dB. Finalizado esse processo, considerou-se o $L'_{nT,w}$ como o valor da curva de referência deslocada para 500 Hz. A Figura 56 ilustra o procedimento descrito.

Figura 56 - Procedimento para a obtenção do $L'_{nT,w}$.



Fonte: Autor.

Esse valor único ($L'_{nT,w}$) serve como referência para os profissionais especificarem e detalharem sistemas de pisos conforme o isolamento desejado. Entretanto, esse número único não dispensa a análise do espectro sonoro obtido nas medições, pois um mesmo elemento construtivo pode apresentar um elevado isolamento em algumas faixas de frequências e reduzido em outras.

3.6 CLASSIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DOS SISTEMAS DE PISOS

A ABNT NBR 15575 (2013) é a norma brasileira que estabelece as diretrizes quanto ao desempenho de edificações residenciais. Na Parte 3 dessa norma estão prescritos os valores de nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado ($L'_{nT,w}$) para que um sistema de piso alcance o nível mínimo (M) de desempenho quanto ao ruído de impacto, bem como os valores para que o sistema seja considerado de nível de desempenho intermediário (I) ou superior (S). O Quadro 01 expõe os valores previstos na ABNT NBR 15575-3 (2013).

Quadro 01 - Classificação do nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado.

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

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15575 (2013).

3.7 INCERTEZA DE MEDIÇÃO

O grau de incerteza de medições relacionadas ao desempenho acústico de edificações é indicado pela ISO 12999-1 (2014). O Anexo C.1 dessa norma aponta fatores que influenciam os valores estabelecidos para a incerteza de medição quanto à reprodutibilidade dos ensaios realizados, como por exemplo diferentes geometrias dos locais de ensaios, diferentes condições de contorno, equipamentos utilizados para as medições e efeitos de temperatura, umidade e

pressão estática. Para medições relativas ao isolamento do ruído de impacto, a ISO 12999-1 (2014) estima uma incerteza de 1,5 dB para a reprodutibilidade dos valores de $L'_{nT,w}$.

Destaca-se que os valores obtidos no presente estudo estão relacionados às características: das amostras ensaiadas, dos sistemas de vedação vertical e de piso do local do ensaio e do tipo de ligação entre esses sistemas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo contempla a apresentação e a análise dos resultados desta pesquisa. Os resultados estão expressos em gráficos que contêm os valores de L'_{nT} por banda de frequência de terço de oitava, acompanhados pela descrição da composição do sistema de piso e pelo nível de pressão sonora padronizado ponderado ($L'_{nT,w}$).

Inicialmente tem-se a análise dos resultados para os sistemas de pisos utilizados como referência. Após, tem-se a análise dos resultados dos ensaios com pisos cerâmicos, pisos vinílicos, pisos laminados de madeira e materiais resilientes. Por fim, introduz-se um modelo para estimar o isolamento ao ruído de impacto que a solução de forro suspenso pode proporcionar a sistemas de pisos que possuem laje pré-fabricada como camada estrutural.

4.1 SISTEMAS DE REFERÊNCIA

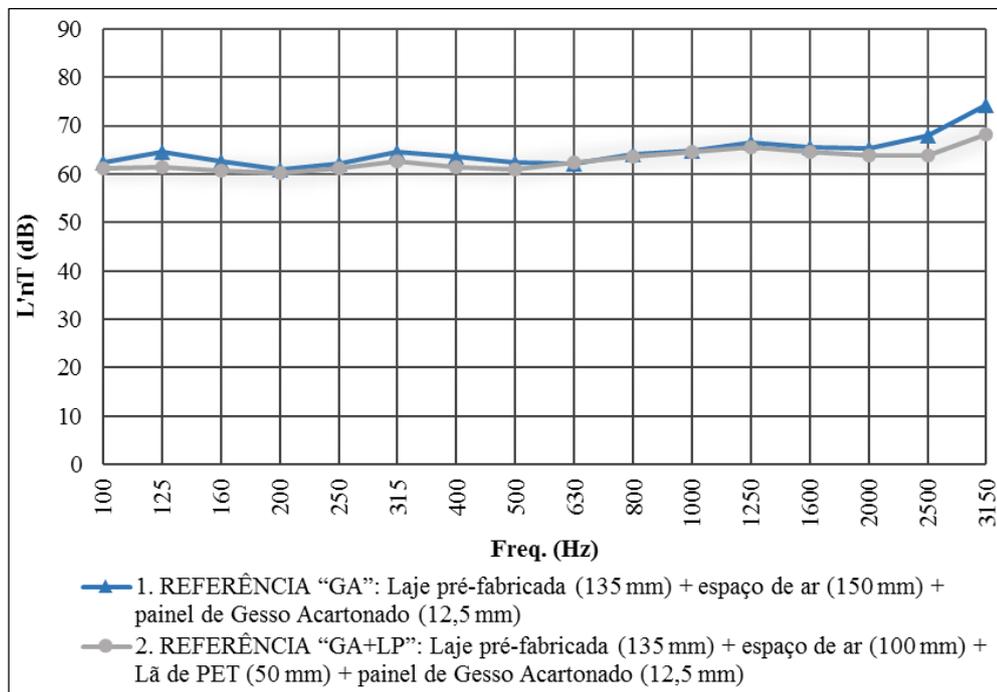
Como citado na metodologia, foram definidas duas configurações de forros para os ensaios: referência “GA”, com forro de gesso acartonado e entreforro de 150 mm, e referência “GA+LP”, com forro de gesso acartonado, lã de PET de 50 mm e entreforro de 150 mm. A Figura 57 apresenta os resultados dos ensaios realizados com essas configurações.

Observando os dados expostos na Figura 57 e comparando com os resultados de Medeiros (2003) conclui-se que a utilização de forros suspensos como solução para o isolamento ao ruído de impacto é mais eficiente para lajes pré-fabricadas do que para lajes maciças. Encontrou-se um $L'_{nT,w}$ de 74 dB para a referência “GA”, constatando-se uma melhora do isolamento igual a 17 dB em relação à laje em osso sem forro.

Isso está relacionado com a não homogeneidade das lajes pré-fabricadas, que faz com que o ruído se propague de forma mais complexa do que em lajes homogêneas. Como a solução de forro suspenso é uma solução executada sob a laje, pode-se inferir que nas lajes pré-fabricadas há uma maior parcela de transmissão direta do ruído de impacto, o que pode estar relacionado com a ortogonalidade e a periodicidade introduzida pelas nervuras das lajes nervuradas unidirecionais e com o fato de lajes pré-fabricadas possuírem menor massa que lajes maciças.

Também, na Figura 57 observa-se que a colocação da manta de lã de PET de 50 mm no entreforro proporcionou uma melhora de 3 dB no isolamento ao ruído de impacto do sistema de piso, não alterando significativamente o desempenho desse sistema.

Figura 57 - Resultados dos ensaios para os sistemas de pisos de referência.



Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	L'nT,w (dB)
L'nT 1 (dB)	62,5	64,6	62,7	61,0	62,2	64,5	63,5	62,3	62,2	64,1	64,9	66,6	65,5	65,2	68,0	74,2	74
L'nT 2 (dB)	61,1	61,3	60,6	60,2	61,1	62,6	61,4	60,9	62,4	63,6	64,6	65,4	64,5	63,8	63,9	68,3	71

Fonte: Autor.

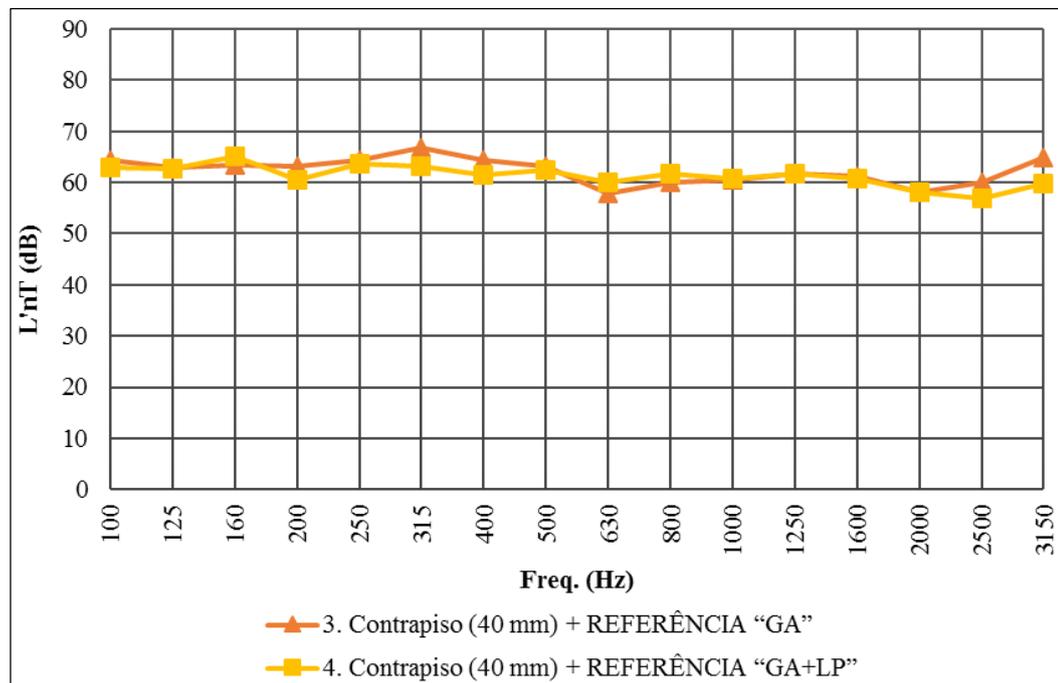
Sobre as configurações de referência citadas anteriormente foi colocada a placa de contrapiso de 40 mm descrita previamente neste trabalho. Os resultados dos ensaios com a amostra de contrapiso sobre as configurações referência "GA" e referência "GA+LP" estão exibidos na Figura 58.

Nos ensaios realizados por Haas (2019) a adição do contrapiso proporcionou um acréscimo de 7 dB no isolamento ao ruído de impacto do sistema de piso.

Percebe-se na Figura 58 que a adição do contrapiso sobre a referência "GA" também proporcionou um isolamento de 7 dB ao sistema de piso.

Também, nota-se que a colocação da manta de lã de PET de 50 mm no entreferro proporcionou uma melhora de 1 dB no isolamento ao ruído de impacto do sistema de piso. Portanto, nessa situação, a utilização desse material não proporciona uma melhoria significativa no isolamento ao ruído de impacto do sistema de piso.

Figura 58 - Resultados dos ensaios para os sistemas de pisos de referência com contrapiso.



Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	L'nT,w (dB)
L'nT 3 (dB)	64,4	63,0	63,3	63,2	64,4	66,8	64,3	63,3	57,9	59,9	60,4	61,7	61,3	58,1	60,1	64,8	67
L'nT 4 (dB)	62,9	62,8	65,1	60,5	63,6	63,2	61,4	62,5	60,1	61,6	60,7	61,7	60,7	58,2	56,8	59,8	66

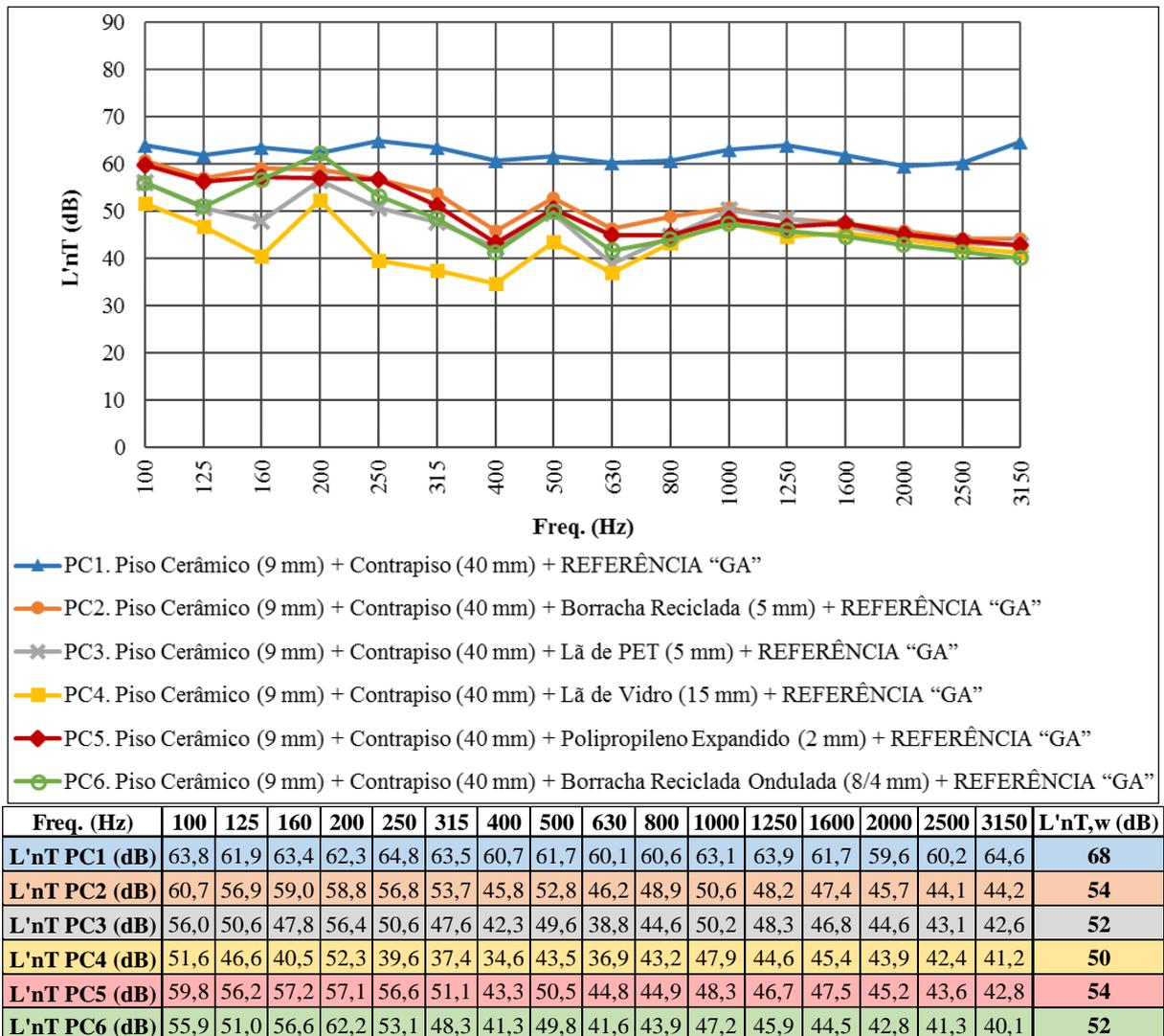
Fonte: Autor.

4.2 COMPOSIÇÕES COM PISO CERÂMICO

Sobre as composições de referência “GA” e referência “GA+LP” foi ensaiado um revestimento cerâmico colado sobre uma placa de contrapiso de 40 mm. Os resultados dos ensaios dessa amostra sobre a referência “GA” estão mostrados na Figura 59.

Nos ensaios realizados por Haas (2019) a utilização de piso cerâmico proporcionou um aumento de isolamento de 1 dB ao sistema de piso, o que, como percebe-se na Figura 59, também ocorre para o sistema com forro de gesso acartonado. Também se nota que a utilização simultânea de piso flutuante e forro suspenso faz com que haja um aumento considerável de desempenho, especialmente a partir da banda de 500 Hz. O forro propiciou uma melhoria de isolamento entre 5 e 11 dB aos sistemas com materiais resilientes. Outrossim, a diferença observada por Haas (2019) entre o isolamento proporcionado por diferentes materiais resilientes diminuiu consideravelmente com a utilização do forro.

Figura 59 - Resultados dos ensaios para os sistemas de pisos de referência com piso cerâmico, materiais resilientes e referência “GA”.



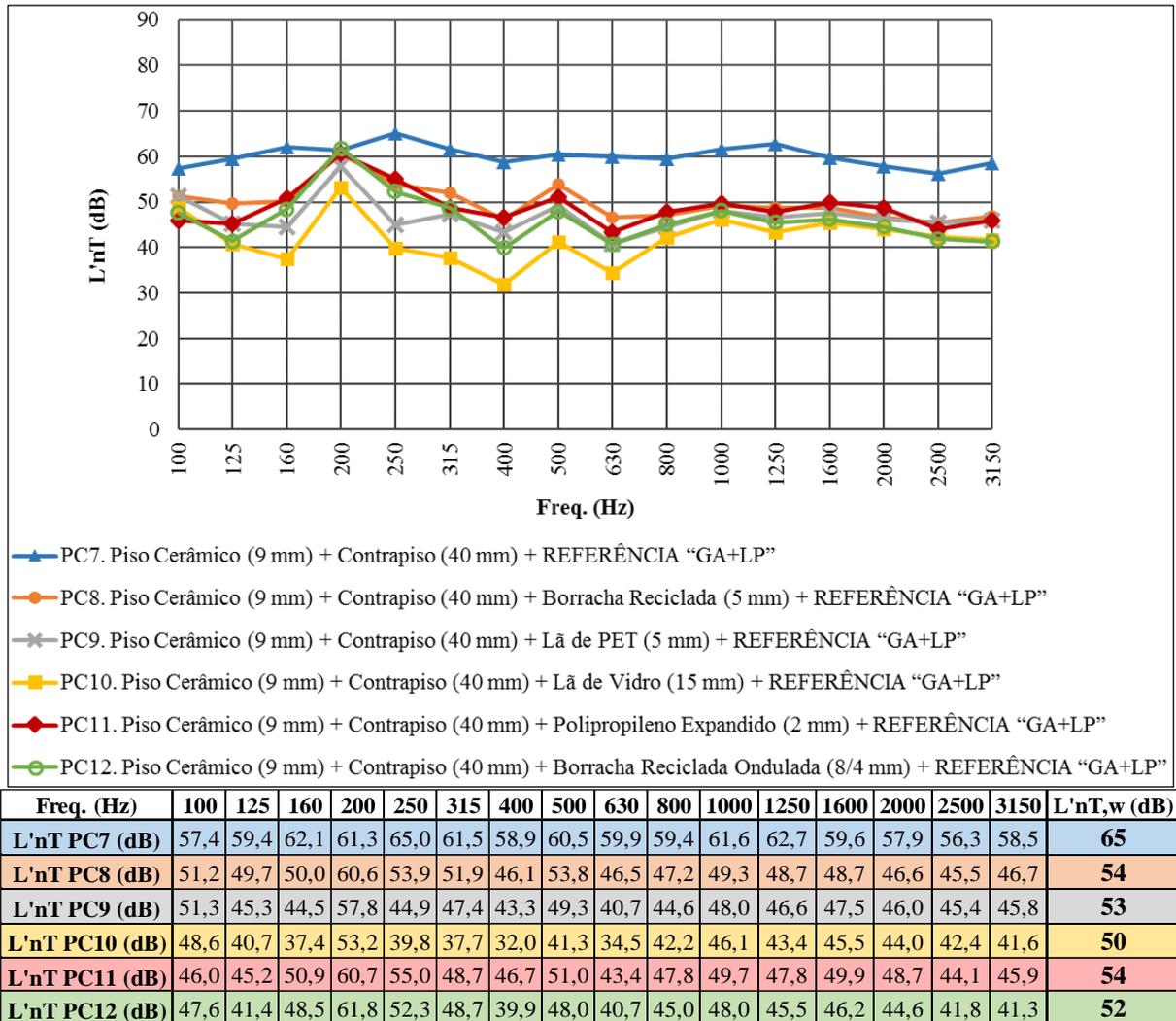
Fonte: Autor.

Já a Figura 60 apresenta os resultados da amostra de piso cerâmico sobre a referência “GA+LP”. O $L'_{nT,w}$ da composição PC7, descrita na Figura 60, foi de 65 dB, o mesmo valor encontrado por Haas (2019) para uma composição com piso cerâmico, contrapiso, borracha reciclada e laje. Portanto, a instalação de um forro suspenso ao invés de um piso flutuante pode ser vista como uma alternativa para sistemas de pisos com lajes pré-fabricadas e pisos cerâmicos.

Ainda, a colocação da manta de lã de PET de 50 mm no entreferro proporcionou uma sensível melhora no isolamento ao ruído de impacto do sistema sem piso flutuante. Nos sistemas de pisos com materiais resilientes observa-se que os valores de $L'_{nT,w}$ encontrados para as composições sem lã de PET no entreferro (Figura 59) são iguais aos encontrados para as

composições com lã de PET no entreferro (Figura 60). Embora os valores de $L'_{nT,w}$ sejam iguais, analisando-se os valores de L'_{nT} encontrados, observa-se um aumento considerável no isolamento ao ruído de impacto nas bandas de 100 e 125 Hz.

Figura 60 - Resultados dos ensaios para os sistemas de pisos de referência com piso cerâmico, materiais resilientes e referência “GA+LP”.

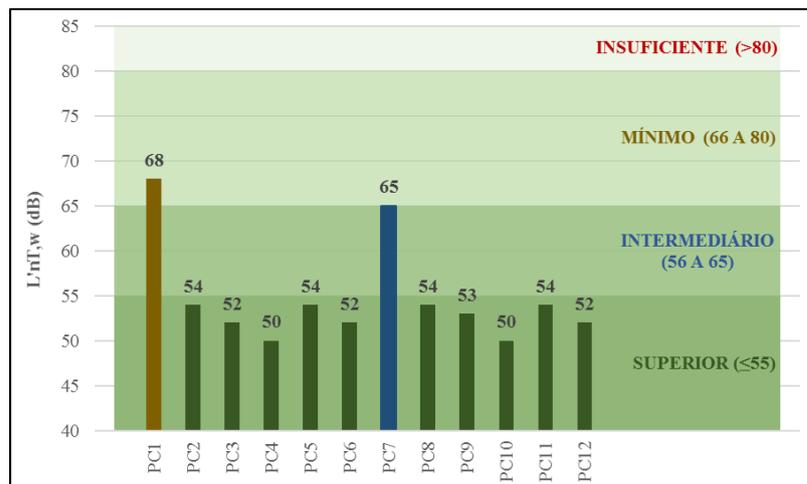


Fonte: Autor.

Os valores obtidos nos ensaios foram comparados com os valores de $L'_{nT,w}$ especificados na ABNT NBR 15575-3 (2013). A Figura 61 exibe a classificação do desempenho ao ruído de impacto dos sistemas de pisos com revestimento cerâmico estudados nesta pesquisa como elementos separadores de unidades habitacionais autônomas. A configuração com piso cerâmico, contrapiso e laje, ensaiada por Haas (2019), apresentou $L'_{nT,w}$ igual a 83 dB, um desempenho insuficiente de acordo com a ABNT NBR 15575-3 (2013). Com

a utilização de forro de gesso acartonado o sistema alcançou o nível de desempenho mínimo, enquanto que com a colocação da manta de lã de PET de 50 mm no entreforro o sistema alcançou o de desempenho intermediário. Ainda, percebe-se na Figura 61 que todas as configurações com forro e piso flutuante atingiram o nível de desempenho superior.

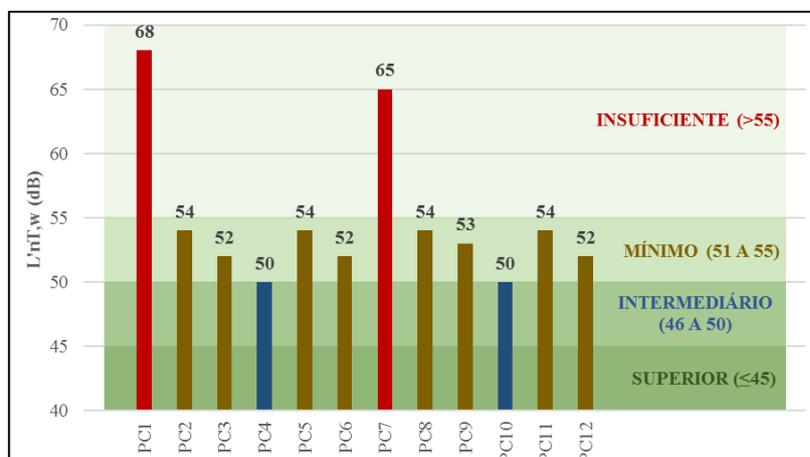
Figura 61 - Desempenho dos sistemas com piso cerâmico e forro como elementos separadores de unidades habitacionais autônomas.



Fonte: Autor.

Já a Figura 62 expõe a classificação do desempenho ao ruído de impacto dos sistemas de pisos com revestimento cerâmico estudados nesta pesquisa com elementos separadores de áreas de uso coletivo sobre unidades habitacionais autônomas.

Figura 62 - Desempenho dos sistemas com piso cerâmico e forro como elementos separadores de áreas de uso coletivo sobre unidades habitacionais autônomas.



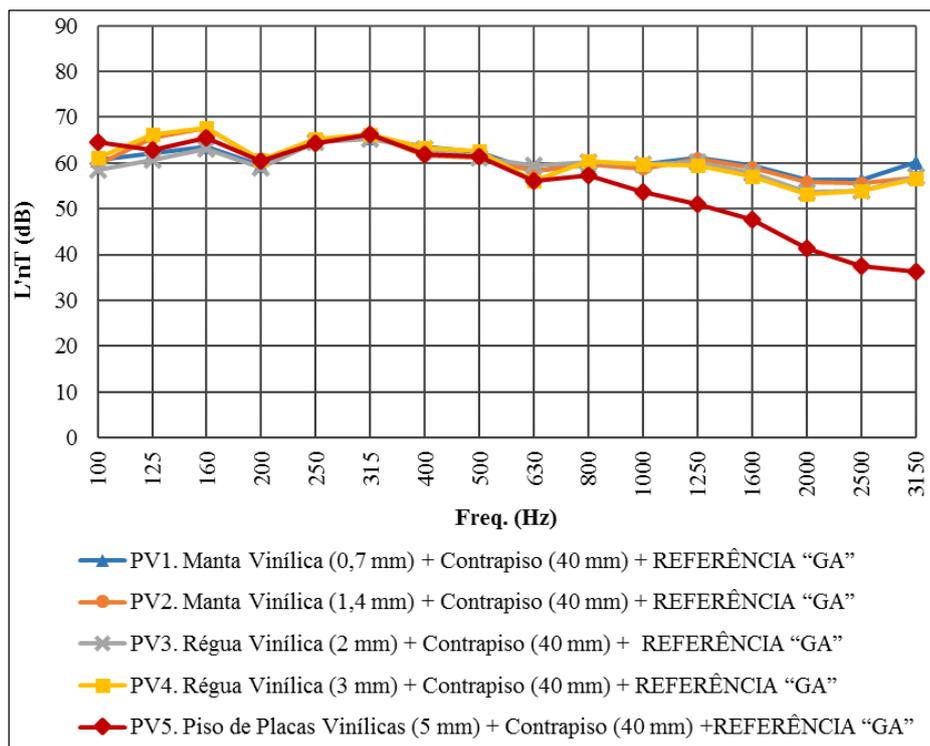
Fonte: Autor.

Na Figura 62 nota-se que apenas os sistemas que tinham materiais resilientes alcançaram o nível de desempenho mínimo como elementos separadores de áreas de uso coletivo sobre unidades habitacionais autônomas, sendo que somente os sistemas que possuíam lã de vidro (15 mm) como material resiliente atingiram o nível de desempenho intermediário.

4.3 COMPOSIÇÕES COM PISOS VINÍLICOS

Sobre as composições de referência “GA” e referência “GA+LP” foram ensaiadas amostras de pisos vinílicos colocadas sobre uma placa de contrapiso de 40 mm. Os resultados de alguns dos pisos vinílicos ensaiados sobre a referência “GA” estão expostos na Figura 63.

Figura 63 - Resultados dos ensaios para os sistemas de pisos de referência com pisos vinílicos e referência “GA”.



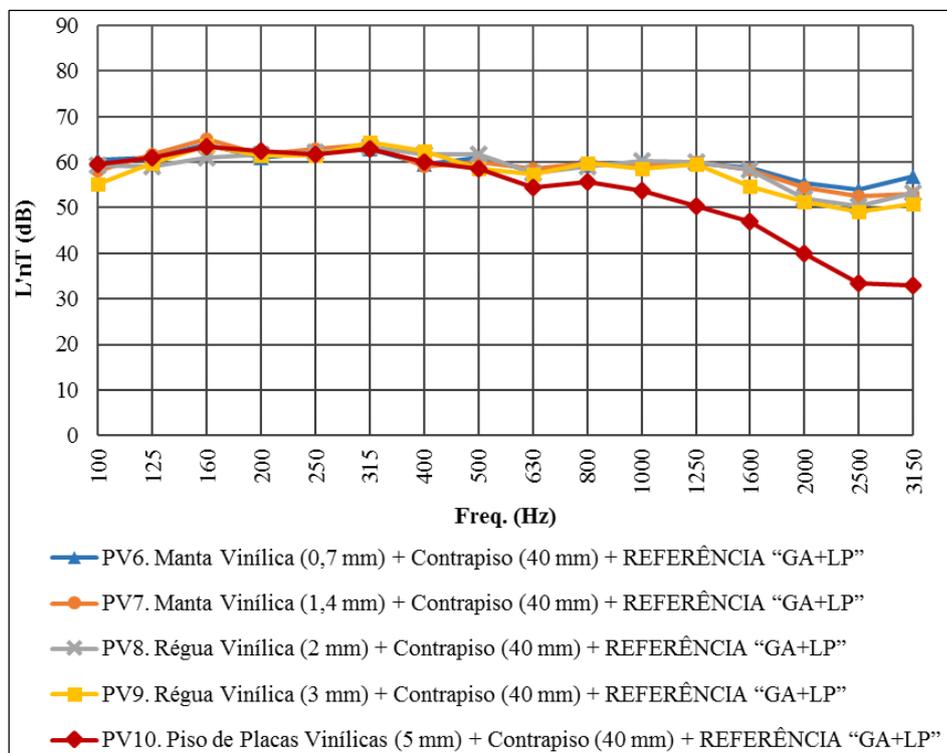
Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	L'nT,w (dB)
L'nT PV1 (dB)	60,7	62,1	63,6	59,4	64,8	65,5	63,5	62,3	58,2	59,8	59,8	61,1	59,6	56,3	56,3	60,2	65
L'nT PV2 (dB)	59,8	65,6	67,8	60,7	64,7	66,4	61,5	61,1	58,4	59,7	58,7	61,0	58,9	55,8	55,5	56,8	64
L'nT PV3 (dB)	58,4	60,8	63,2	59,1	64,6	65,2	63,2	61,3	59,4	60,2	59,6	60,2	57,8	53,7	53,9	56,9	63
L'nT PV4 (dB)	61,2	66,1	67,7	60,7	65,3	66,3	63,5	62,6	56,0	60,4	59,7	59,5	57,1	53,2	53,9	56,6	63
L'nT PV5 (dB)	64,6	62,8	65,6	60,4	64,2	66,4	61,8	61,3	56,1	57,3	53,7	51,1	47,6	41,3	37,5	36,3	58

Fonte: Autor.

Observa-se que a instalação do forro propiciou uma melhoria de isolamento entre 9 e 17 dB para os pisos ensaiados, em comparação com os resultados de Rossi (2020), sendo que quanto maior o isolamento proporcionado pelo sistema de piso, menor a eficiência da solução de forro suspenso.

A Figura 64 apresenta os resultados de alguns dos pisos vinílicos ensaiados sobre a referência “GA+LP”.

Figura 64 - Resultados dos ensaios para os sistemas de pisos de referência com pisos vinílicos e referência “GA+LP”.



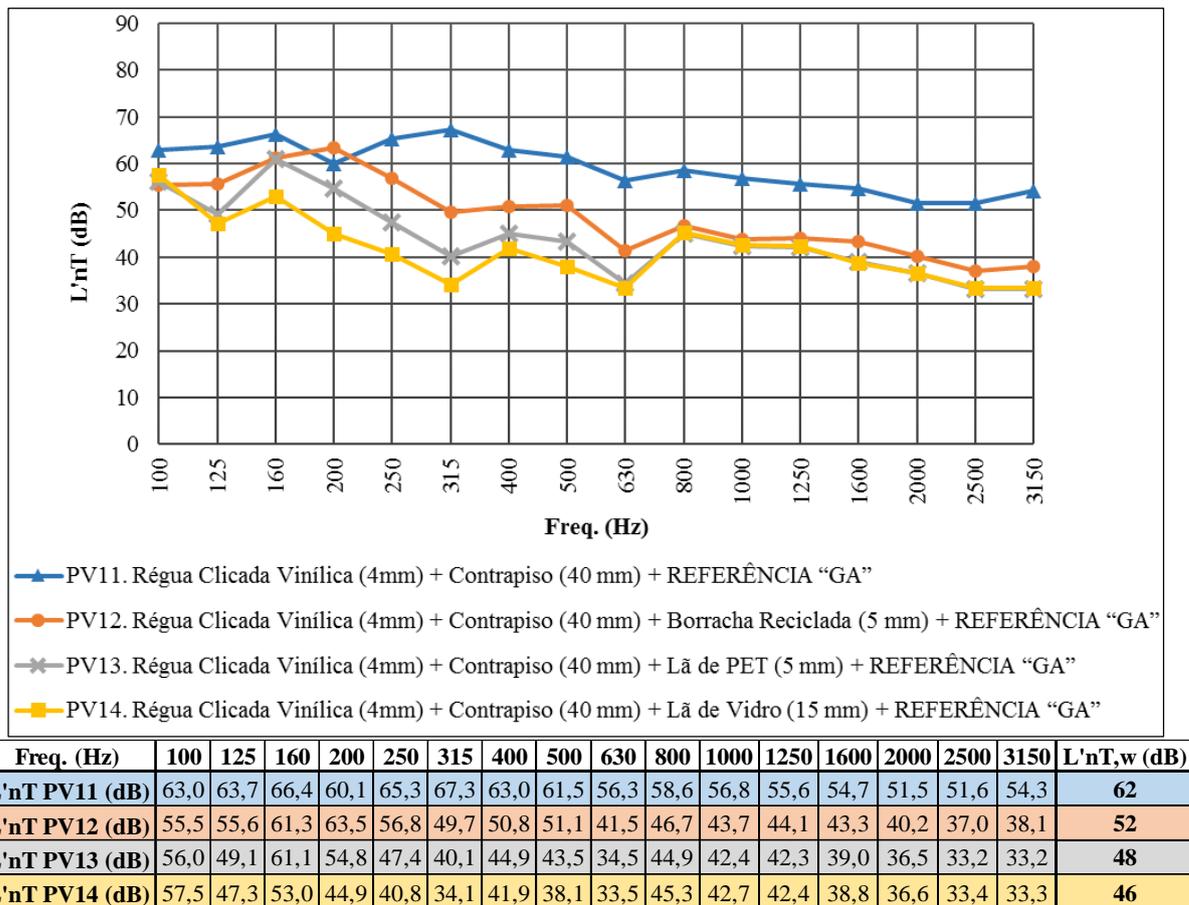
Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	L'nT,w (dB)
L'nT PV6 (dB)	60,4	61,0	63,9	61,1	62,1	62,8	59,6	61,1	58,1	59,2	60,1	59,8	58,9	55,4	54,1	56,8	63
L'nT PV7 (dB)	58,1	61,7	65,2	61,6	62,8	63,8	59,0	59,9	58,6	59,9	59,3	60,0	58,5	54,5	52,4	53,0	62
L'nT PV8 (dB)	59,2	59,0	60,9	61,8	62,2	63,4	61,7	61,7	57,7	59,0	60,4	60,0	58,4	52,1	50,3	53,2	62
L'nT PV9 (dB)	55,2	59,9	63,6	61,5	61,4	64,4	62,4	58,6	57,4	59,8	58,6	59,6	54,7	51,2	49,0	50,9	61
L'nT PV10 (dB)	59,5	60,9	63,5	62,4	61,8	63,0	59,9	58,5	54,5	55,6	53,9	50,4	47,1	39,9	33,5	32,8	56

Fonte: Autor.

Pode-se denotar que, assim como nos sistemas de pisos ensaiados com revestimento cerâmico, a colocação da manta de lã de PET de 50 mm no entreforro proporcionou uma sensível melhora de, em média, 2 dB no isolamento ao ruído de impacto dos sistemas de pisos com pisos vinílicos.

A Figura 65 exibe os resultados dos ensaios com uma régua clicada vinílica e materiais resilientes sobre a referência “GA”.

Figura 65 - Resultados dos ensaios para os sistemas de pisos de referência com régua clicada vinílica, materiais resilientes e referência “GA”.



Fonte: Autor.

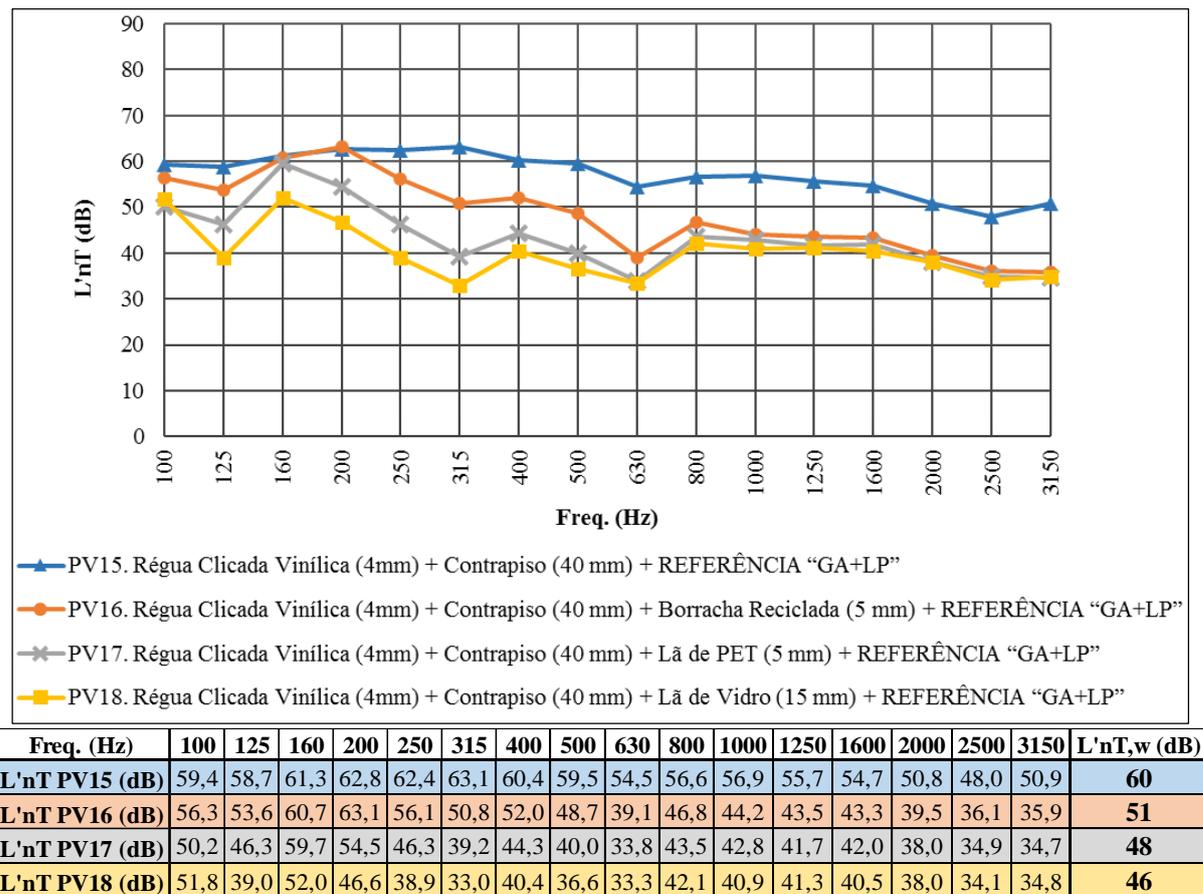
Nos ensaios realizados por Rossi (2020) a utilização dessa régua clicada vinílica proporcionou um isolamento de 7 dB ao sistema de piso, enquanto que na Figura 65 observa-se que a instalação do piso e do forro de gesso acartonado proporcionou um isolamento de 22 dB. Também, nota-se que a utilização simultânea de piso flutuante e forro suspenso faz com que haja um aumento considerável de desempenho, especialmente a partir da banda de 400 Hz, tendo o forro propiciado uma melhoria de isolamento entre 5 e 9 dB aos sistemas com materiais resilientes.

O $L'_{nT,w}$ da composição PV11, apresentada na Figura 65, foi de 62 dB, enquanto que Rossi (2020) encontrou 61 dB para uma composição com o mesmo piso vinílico, contrapiso, borracha reciclada e laje. Portanto, a instalação de um forro suspenso ao invés de um piso

flutuante pode ser vista como uma alternativa para sistemas de pisos com lajes pré-fabricadas e pisos vinílicos.

A Figura 66 traz os resultados dos ensaios com uma régua clicada vinílica e materiais resilientes sobre a referência “GA+LP”.

Figura 66 - Resultados dos ensaios para os sistemas de pisos de referência com régua clicada vinílica, materiais resilientes e referência “GA+LP”.



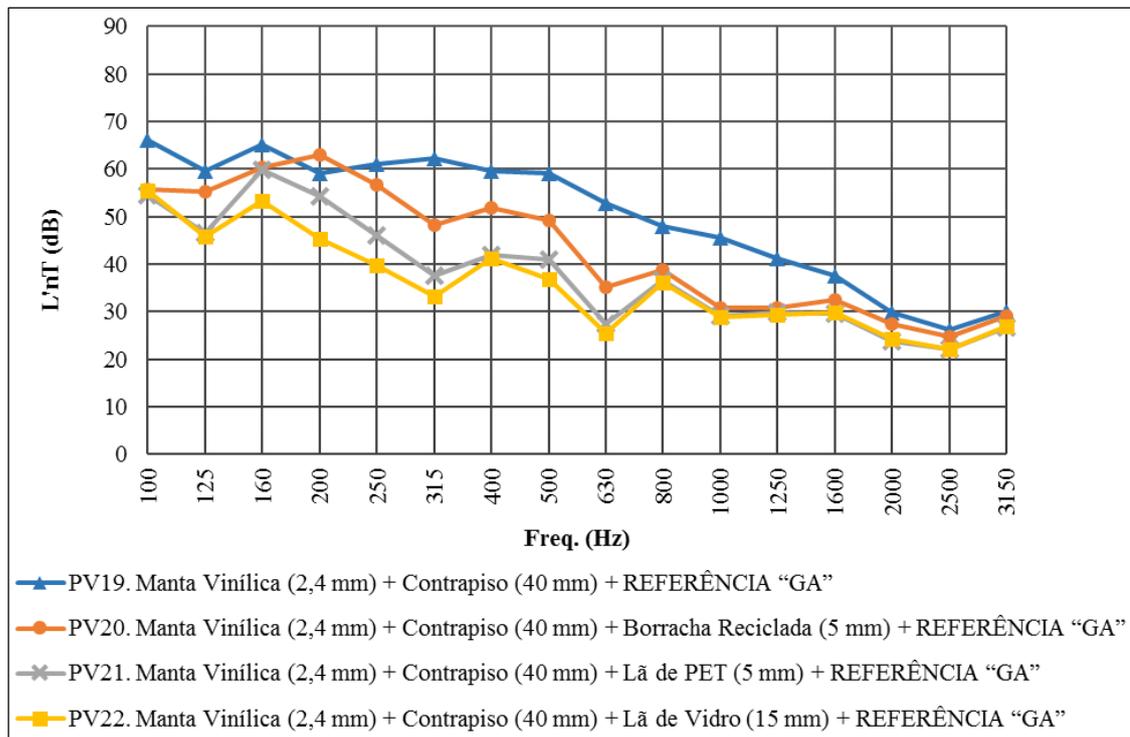
Fonte: Autor.

Observou-se que a colocação da manta de lã de PET de 50 mm no entreferro não alterou de forma significativa os valores de $L'_{nT,w}$ encontrados, mas que houve um aumento do isolamento ao ruído de impacto nas bandas de 100 e 125 Hz, principalmente quando foram utilizados materiais resilientes fibrosos no sistema de piso.

O $L'_{nT,w}$ da composição PV15, apresentada na Figura 66, foi de 60 dB, valor menor do que o encontrado com a referência “GA”. Porém, faz-se necessário analisar se o custo benefício dessa solução favorece o seu uso.

A Figura 67 introduz os resultados dos ensaios com uma manta vinílica e materiais resilientes sobre a referência “GA”.

Figura 67 - Resultados dos ensaios para os sistemas de pisos de referência com manta vinílica, materiais resilientes e referência “GA”.



Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	$L'nT_w$ (dB)
$L'nT$ PV19 (dB)	66,1	59,6	65,2	59,2	61,1	62,3	59,5	59,2	52,9	48,0	45,6	41,3	37,6	29,8	26,2	30,2	56
$L'nT$ PV20 (dB)	55,6	55,4	60,3	63,1	56,8	48,3	51,8	49,3	35,2	38,7	30,9	30,9	32,5	27,4	24,7	29,3	50
$L'nT$ PV21 (dB)	54,5	46,4	59,9	54,4	45,9	37,7	41,9	41,1	27,5	36,6	29,2	29,8	29,6	23,9	22,1	26,8	45
$L'nT$ PV22 (dB)	55,5	45,8	53,3	45,5	39,8	33,2	41,1	36,9	25,5	36,2	29,0	29,5	29,9	24,2	22,2	27,1	42

Fonte: Autor.

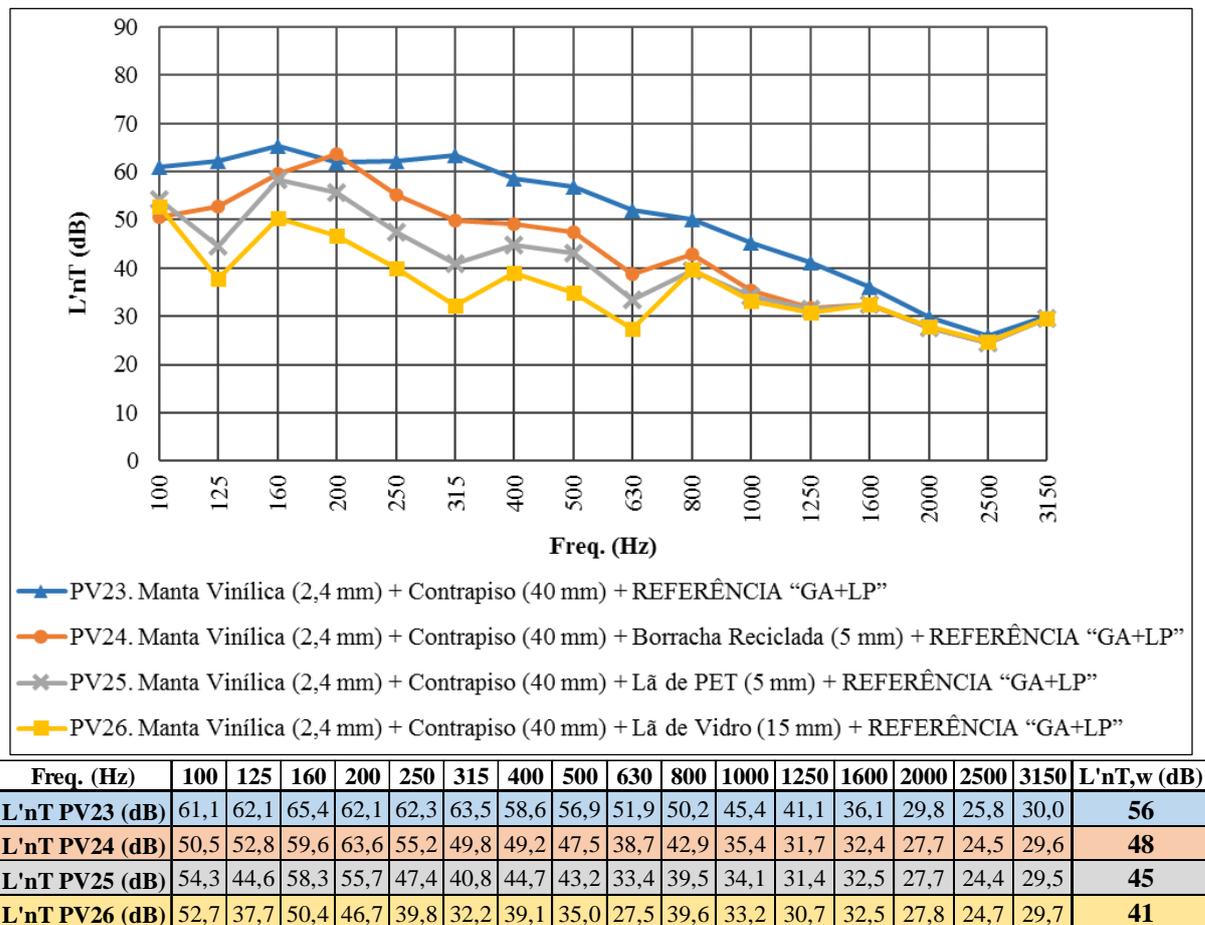
Nos ensaios realizados por Rossi (2020) a utilização dessa manta vinílica proporcionou um isolamento de 20 dB ao sistema de piso, enquanto que a instalação do piso e do forro de gesso acartonado proporcionou um isolamento de 28 dB. Também, nota-se que a utilização simultânea de piso flutuante e forro suspenso faz com que haja um aumento considerável de desempenho, especialmente a partir da banda de 400 Hz, tendo o forro propiciado uma melhoria de isolamento entre 3 e 6 dB aos sistemas com materiais resilientes.

O $L'nT_w$ da composição PV11, apresentada na Figura 65, foi de 56 dB, mesmo valor encontrado por Rossi (2020) para uma composição com o mesmo piso vinílico, contrapiso,

borracha reciclada e laje. Portanto, a utilização de forro suspenso pode ser uma alternativa à utilização de piso flutuante para sistemas de pisos com lajes pré-fabricadas e manta vinílica.

A Figura 68 mostra os resultados dos ensaios com uma manta vinílica e materiais resilientes sobre a referência “GA+LP”.

Figura 68 - Resultados dos ensaios para os sistemas de pisos de referência com manta vinílica, materiais resilientes e referência “GA+LP”.



Fonte: Autor.

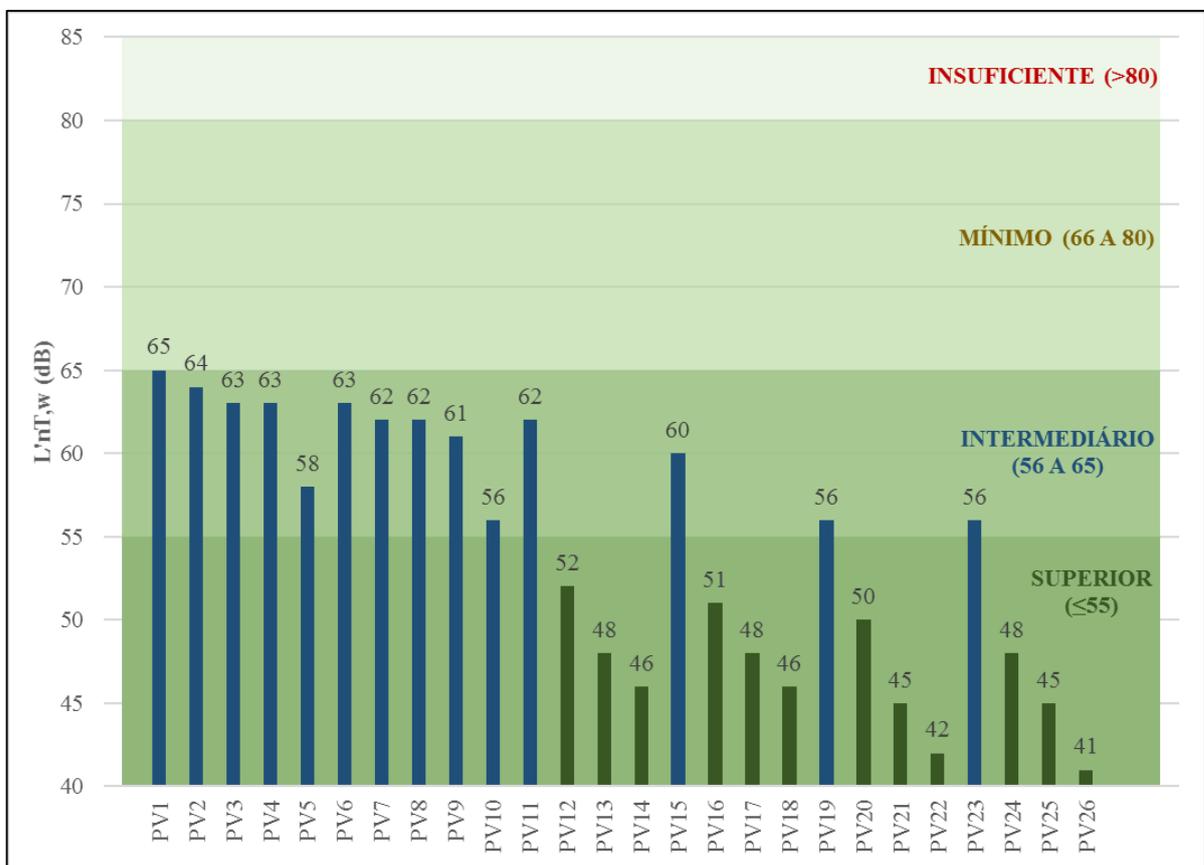
Observou-se que a colocação da manta de lã de PET de 50 mm no entreforro não alterou de forma significativa os valores de $L'_{nT,w}$ encontrados, mas percebeu-se um aumento considerável do isolamento ao ruído de impacto nas bandas de 100 e 125 Hz.

Os valores obtidos nos ensaios foram comparados com os valores de $L'_{nT,w}$ especificados na ABNT NBR 15575-3 (2013). A Figura 69 exhibe a classificação do desempenho ao ruído de impacto dos sistemas de pisos com revestimento vinílico estudados nesta pesquisa como elementos separadores de unidades habitacionais autônomas.

Todos os pisos vinílicos ensaiados com forro alcançaram pelo menos o nível de desempenho intermediário, percebe-se também que a colocação de uma manta de lã de PET de 50 mm no entreferro não influenciou a classificação do nível do desempenho dos sistemas de pisos.

Ainda, percebe-se na Figura 69 que todas as configurações com forro e piso flutuante atingiram o nível de desempenho superior.

Figura 69 - Desempenho dos sistemas com piso vinílico e forro como elementos separadores de unidades habitacionais autônomas.



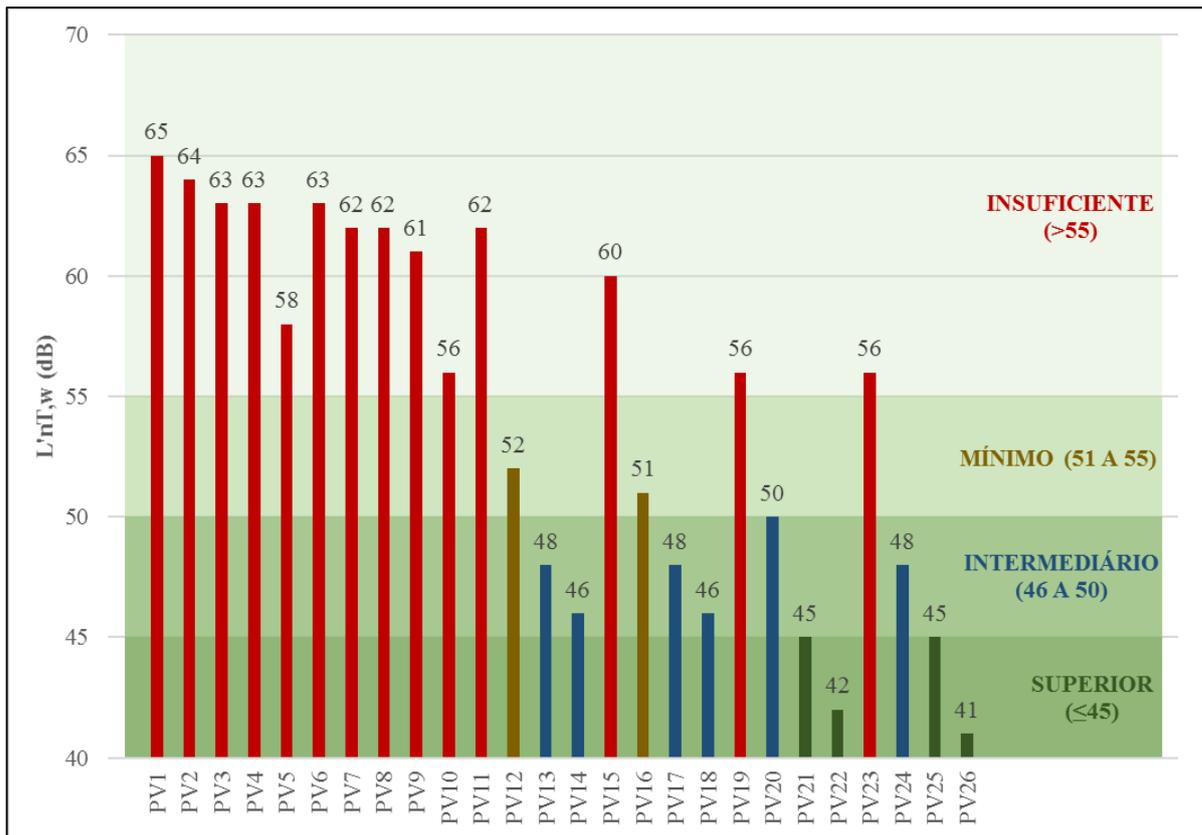
Fonte: Autor.

Já a Figura 70 expõe a classificação do desempenho ao ruído de impacto dos sistemas de pisos com revestimento vinílico estudados nesta pesquisa como elementos separadores de áreas de uso coletivo sobre unidades habitacionais autônomas.

Percebe-se que apenas as configurações com forro e piso flutuante alcançaram pelo menos o nível de desempenho mínimo, sendo que a utilização de manta vinílica como piso e

materiais fibrosos como material resiliente possibilitou que o sistema alcançasse o nível de desempenho superior.

Figura 70 - Desempenho dos sistemas com piso vinílico e forro como elementos separadores de áreas de uso coletivo sobre unidades habitacionais autônomas.



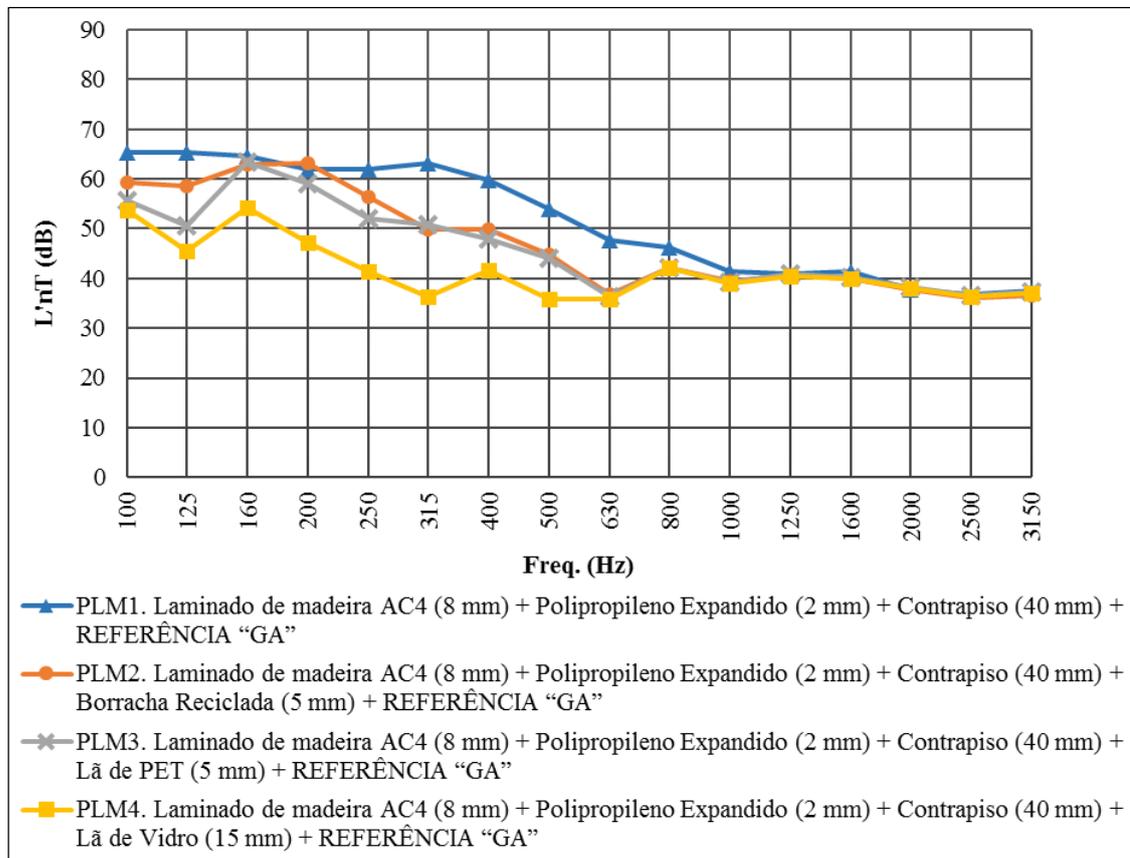
Fonte: Autor.

4.4 COMPOSIÇÕES COM PISOS LAMINADOS DE MADEIRA

Sobre as composições de referência “GA” e referência “GA+LP” foram ensaiadas amostras de pisos laminados de madeira posicionadas sobre uma manta de polipropileno expandido (2 mm) colocada sobre uma placa de contrapiso de 40 mm.

A Figura 71 apresenta os resultados dos ensaios para os sistemas de pisos de referência com piso laminado de madeira AC4, materiais resilientes e referência “GA”. Nos ensaios de Lourenço (2020) realizados com esse piso obteve-se um isolamento de 22 dB, o que está relacionado com a manta de polipropileno instalada sob o piso.

Figura 71 - Resultados dos ensaios para os sistemas de pisos de referência com piso laminado de madeira AC4, materiais resilientes e referência “GA”.



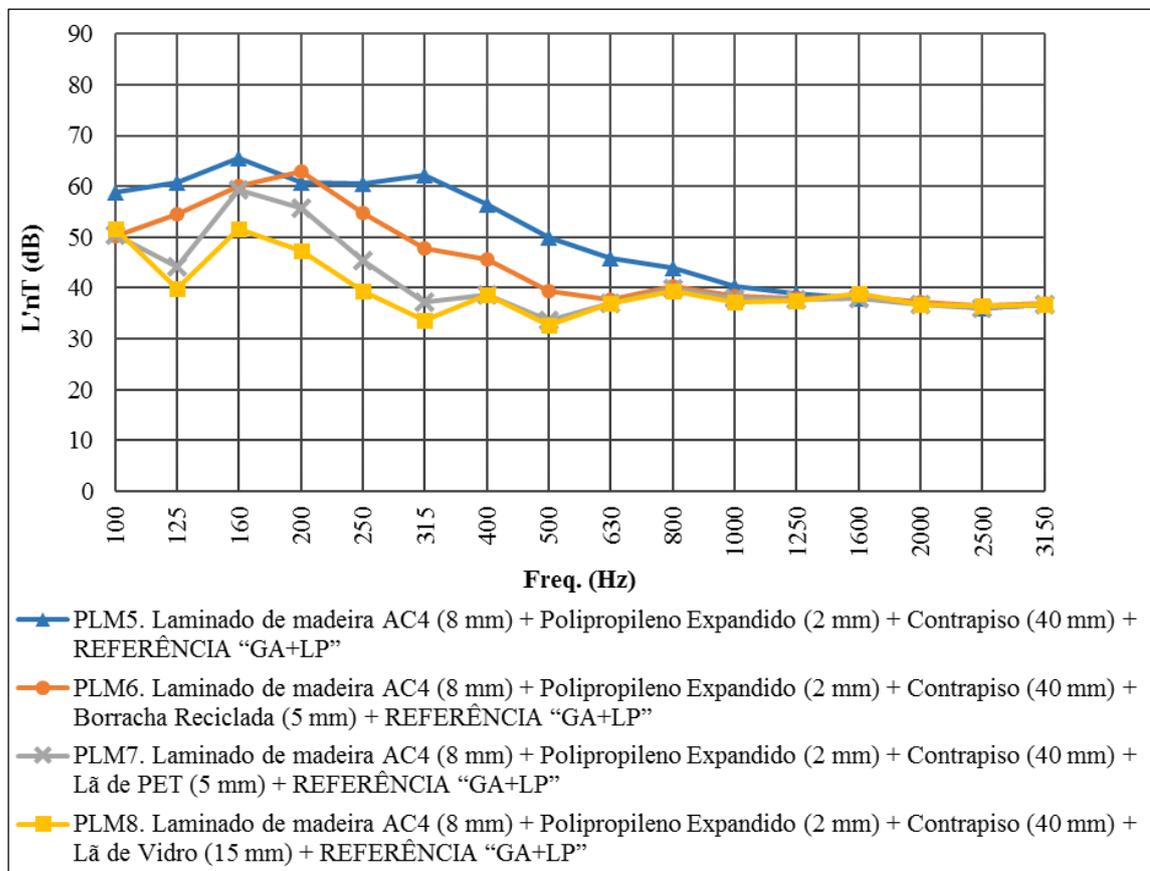
Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	L'nT,w (dB)
L'nT PLM1 (dB)	65,3	65,4	64,5	62,0	62,0	63,2	59,7	53,9	47,8	46,2	41,4	40,9	41,3	37,9	36,8	37,5	57
L'nT PLM2 (dB)	59,3	58,7	63,0	63,3	56,4	49,8	49,8	44,8	36,9	42,2	39,5	40,7	39,9	37,8	36,1	36,7	53
L'nT PLM3 (dB)	55,6	50,6	63,4	59,1	52,1	50,8	48,0	44,1	36,3	42,2	39,3	40,8	40,2	38,2	36,5	37,2	50
L'nT PLM4 (dB)	53,6	45,5	54,3	47,2	41,4	36,4	41,6	35,9	35,9	42,1	39,0	40,4	40,0	38,1	36,4	37,1	47

Fonte: Autor.

Os resultados apontam que a utilização de forro de gesso acartonado não é uma solução tão eficiente para esse tipo de piso, pois proporcionou um aumento no isolamento ao ruído de impacto de 5 dB. Ainda, comparando os resultados da configuração PLM1 com os resultados de Lourenço (2020), observa-se que a utilização da técnica de piso flutuante é mais eficiente para esse piso do que a utilização de forro de gesso acartonado. Outrossim, a utilização simultânea de piso flutuante e forro suspenso não apresenta um bom custo-benefício, pois nos sistemas com piso flutuante o forro propicia uma melhoria de isolamento entre 1 e 2 dB.

A Figura 72 mostra os valores encontrados nas medições quando se utilizou lã de PET no entreforro.

Figura 72 - Resultados dos ensaios para os sistemas de pisos de referência com piso laminado de madeira AC4, materiais resilientes e referência “GA+LP”.



Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	L'nT,w (dB)
L'nT PLM5 (dB)	58,8	60,7	65,6	60,9	60,5	62,1	56,5	49,9	45,8	44,0	40,4	39,0	37,9	37,2	36,0	36,6	55
L'nT PLM6 (dB)	50,1	54,5	60,1	62,9	54,6	47,7	45,5	39,3	37,7	40,2	38,3	38,0	38,4	37,2	36,6	37,0	50
L'nT PLM7 (dB)	50,5	44,1	59,4	55,7	45,3	37,2	38,7	33,5	37,1	39,9	38,0	37,8	37,9	36,7	36,1	36,6	47
L'nT PLM8 (dB)	51,7	40,0	51,6	47,2	39,3	33,6	38,6	32,6	36,9	39,3	37,2	37,4	38,9	36,7	36,5	36,8	46

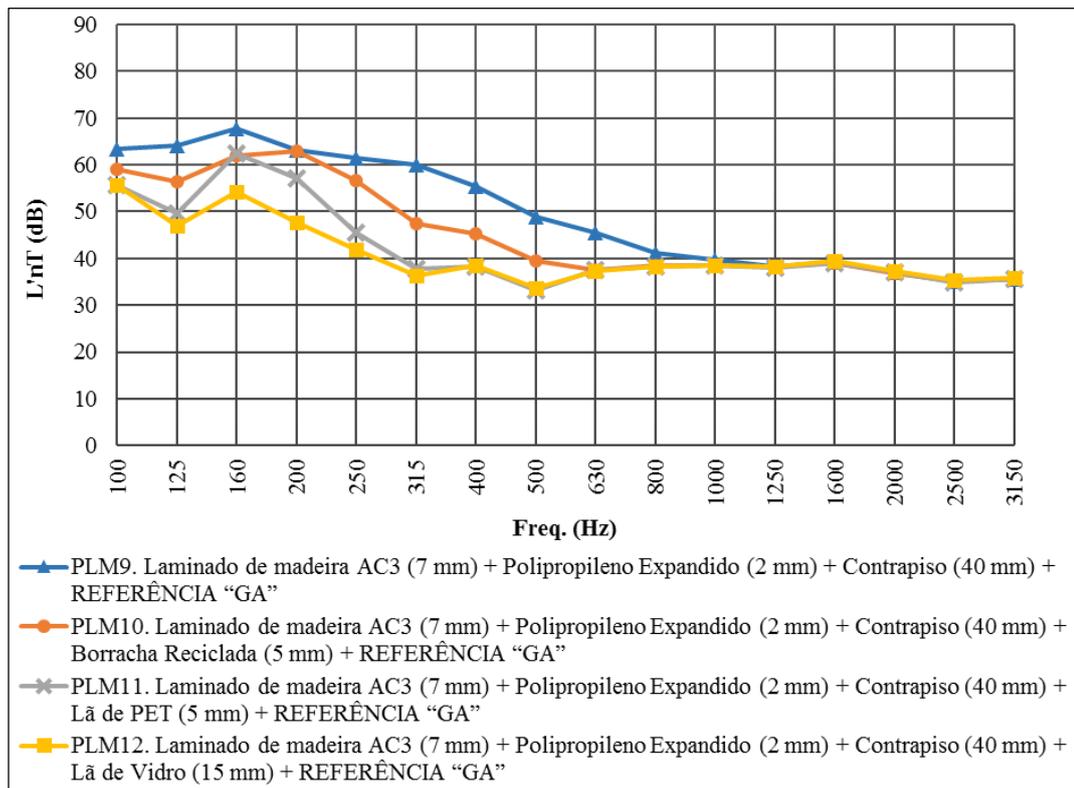
Fonte: Autor.

Percebe-se que a colocação da manta de lã de PET de 50 mm no entreferro melhora de 2 a 7 dB o isolamento dos sistemas de pisos analisados em relação aos resultados encontrados por Lourenço (2020). Ainda, notou-se um aumento considerável no isolamento ao ruído de impacto nas bandas de 100 e 125 Hz. Portanto, a colocação desse material aumenta a eficiência da solução de forro suspenso quanto à isolação do ruído de impacto quando sobre as lajes pré-fabricadas forem utilizados pisos laminados de madeira.

Lourenço (2020) também realizou ensaios com um piso laminado AC3. Os resultados das medições realizadas com o piso laminado de madeira AC3 e materiais resilientes sobre a referência “GA+LP” estão apresentados na Figura 73. Nos ensaios de Lourenço (2020)

realizados com esse piso obteve-se um isolamento de 24 dB, o que está relacionado com a manta de polipropileno instalada sob o piso.

Figura 73 - Resultados dos ensaios para os sistemas de pisos de referência com piso laminado de madeira AC3, materiais resilientes e referência “GA”.



Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	L'nT,w (dB)
L'nT PLM9 (dB)	63,4	64,1	67,9	63,2	61,5	59,9	55,3	48,8	45,5	41,1	39,6	38,3	39,2	37,0	35,1	35,7	57
L'nT PLM10 (dB)	59,1	56,4	62,0	63,0	56,6	47,3	45,4	39,6	37,7	38,4	38,5	38,2	39,0	36,8	35,1	35,5	52
L'nT PLM11 (dB)	55,8	49,6	62,5	57,1	45,5	37,7	38,2	33,2	37,5	38,3	38,5	38,1	39,1	37,0	35,0	35,6	49
L'nT PLM12 (dB)	55,7	47,0	54,3	47,6	41,8	36,2	38,5	33,6	37,4	38,3	38,6	38,3	39,5	37,3	35,4	36,0	47

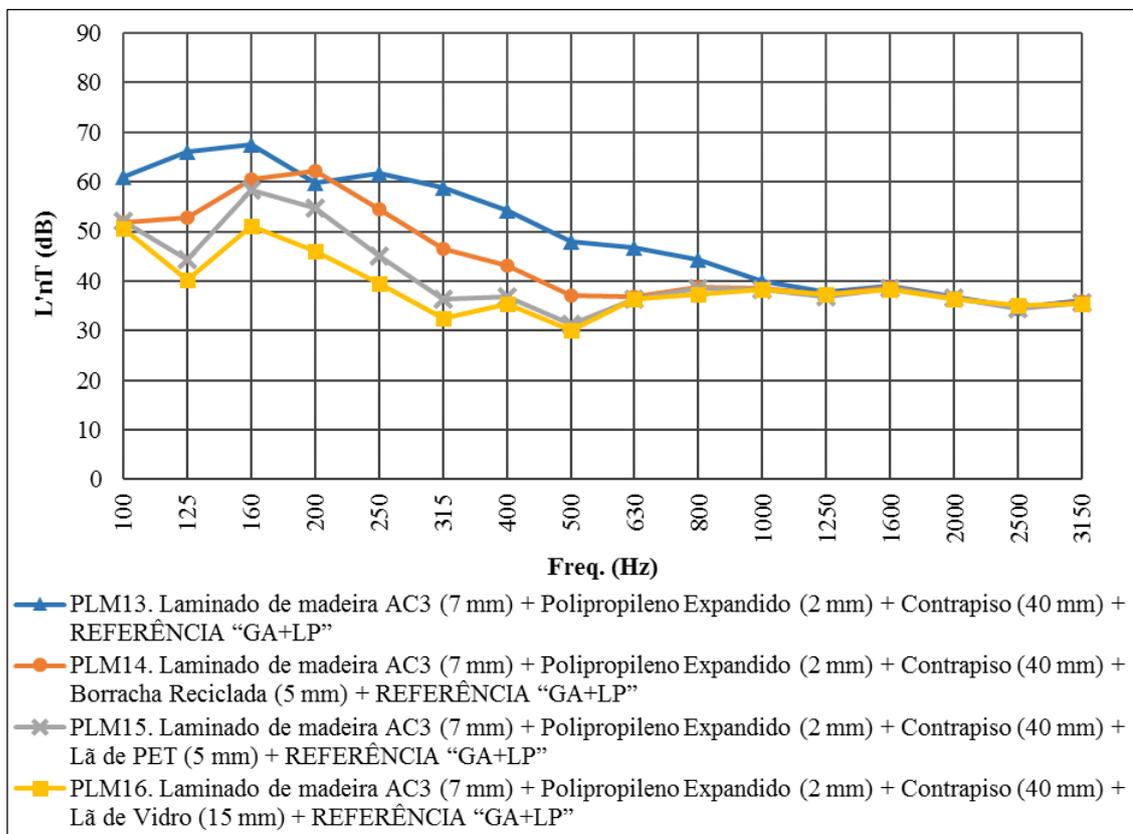
Fonte: Autor.

Os dados apontam que a utilização de forro de gesso acartonado proporcionou um aumento no isolamento ao ruído de impacto de 3 dB ao sistema de piso. Fazendo uma comparação dos resultados da configuração PLM9 com os resultados de Lourenço (2020), nota-se que a utilização da técnica de piso flutuante é mais eficiente para esse piso do que a utilização de forro de gesso acartonado. Outrossim, a utilização simultânea de piso flutuante e forro suspenso não apresenta um bom custo-benefício, pois nos sistemas com piso flutuante o forro propicia uma melhoria de isolamento de até 3 dB.

A Figura 74 contém os valores encontrados nas medições quando se utilizou lã de PET no entreforro. Assim como observado para o piso AC4, a colocação da manta de lã de PET de

50 mm no entreforro melhorou o isolamento proporcionado pelo sistema de forro. Ainda, percebeu-se um aumento considerável no isolamento ao ruído de impacto nas bandas de 100 e 125 Hz. O material absorvente posicionado no plenum proporcionou uma melhora de 2 a 4 dB no isolamento dos sistemas de pisos analisados em relação aos resultados encontrados por Lourenço (2020).

Figura 74 - Resultados dos ensaios para os sistemas de pisos de referência com piso laminado de madeira AC3, materiais resilientes e referência “GA+LP”.



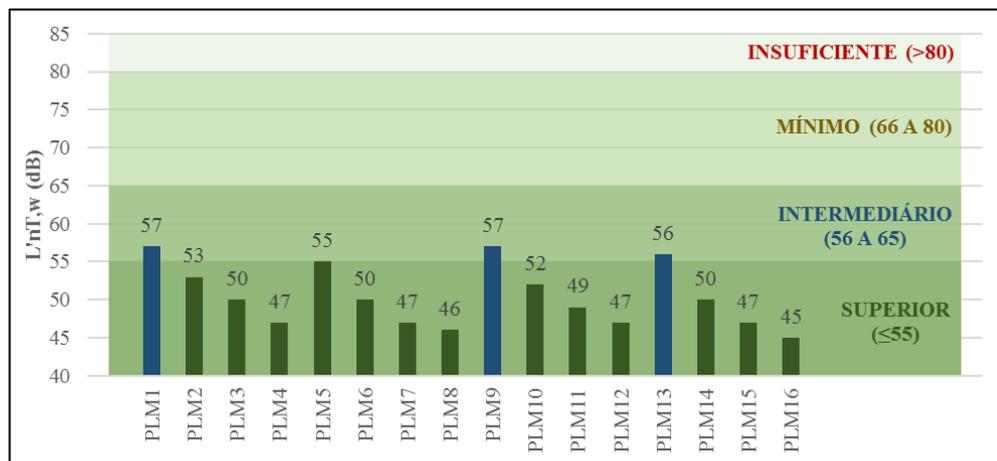
Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	L'nT,w (dB)
L'nT PLM13 (dB)	61,0	66,2	67,5	59,9	61,8	58,9	54,2	48,0	46,6	44,4	40,0	37,7	39,0	36,8	34,6	36,0	56
L'nT PLM14 (dB)	51,7	52,9	60,5	62,2	54,5	46,4	43,0	37,0	36,9	38,8	38,5	37,3	38,9	36,7	34,6	35,9	50
L'nT PLM15 (dB)	52,1	44,3	58,3	54,8	45,0	36,5	36,9	31,2	36,2	38,5	38,2	36,9	38,5	36,5	34,5	35,6	47
L'nT PLM16 (dB)	50,6	40,3	51,1	46,1	39,4	32,6	35,3	30,1	36,3	37,4	38,4	37,4	38,4	36,2	35,2	35,5	45

Fonte: Autor.

Os valores obtidos nos ensaios foram comparados com os valores de $L'_{nT,w}$ especificados na ABNT NBR 15575-3 (2013). A Figura 75 compreende a classificação do desempenho ao ruído de impacto dos sistemas de pisos com revestimento laminado estudados nesta pesquisa como elementos separadores de unidades habitacionais autônomas.

Nos ensaios realizados por Lourenço (2020) o sistema com o piso AC4 apresentou $L'_{nT,w}$ igual a 62 dB e o com o piso AC3 $L'_{nT,w}$ igual a 60 dB, sendo ambos sistemas, portanto, classificados como sistemas de pisos com nível de desempenho intermediário. Ainda de acordo com os resultados obtidos por Lourenço (2020), todos os sistemas com pisos laminados de madeira e materiais resilientes classificaram-se como sistemas de pisos com nível de desempenho superior. Os dados expostos na Figura 75 indicam que a utilização de material fibroso no entreferro pode melhorar o desempenho dos pisos estudados, embora apenas o piso AC4 tenha alcançado o nível superior de desempenho com a utilização desse sistema de forro.

Figura 75 - Desempenho dos sistemas com piso laminado de madeira e forro como elementos separadores de unidades habitacionais autônomas.



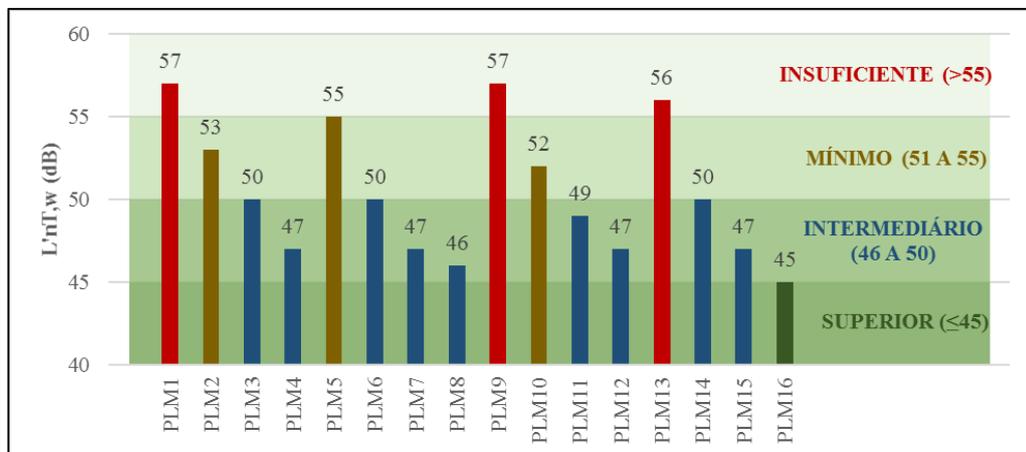
Fonte: Autor.

Já a Figura 76 expõe a classificação do desempenho ao ruído de impacto dos sistemas de pisos com revestimento laminado estudados nesta pesquisa como elementos separadores de áreas de uso coletivo sobre unidades habitacionais autônomas.

Para essa situação, a utilização de forro com manta de lã de PET de 50 mm no *plenum* possibilitou que o sistema com piso AC4 alcançasse o nível de desempenho mínimo prescrito na norma de desempenho.

Já quanto às composições com piso flutuante, a instalação de forro com lã de PET no entreferro possibilitou que os sistemas de pisos melhorassem a sua classificação quanto ao nível de desempenho. Destaca-se a configuração PLM16, que alcançou o nível superior de desempenho.

Figura 76 - Desempenho dos sistemas com piso laminado de madeira e forro como elementos separadores de áreas de uso coletivo sobre unidades habitacionais autônomas.



Fonte: Autor.

4.5 ESTIMATIVA DO ISOLAMENTO ACÚSTICO PROPORCIONADO PELA INSTALAÇÃO DE FORRO SUSPENSO EM LAJES PRÉ-FABRICADAS

A partir dos resultados dos ensaios foi possível desenvolver um modelo para estimar, de forma aproximada, o quanto a utilização dos forros ensaiados pode melhorar o isolamento ao ruído de impacto de lajes pré-fabricadas.

Para desenvolver esse modelo, partiu-se do princípio que as seguintes asserções são verdadeiras: se o $L'_{nT,w}$ sem o forro é igual a 0 dB, o isolamento proporcionado pelo forro também é igual a 0 dB; e se o $L'_{nT,w}$ sem o forro é igual a 91 dB, o isolamento proporcionado pelo revestimento do sistema de piso é igual a 0 dB.

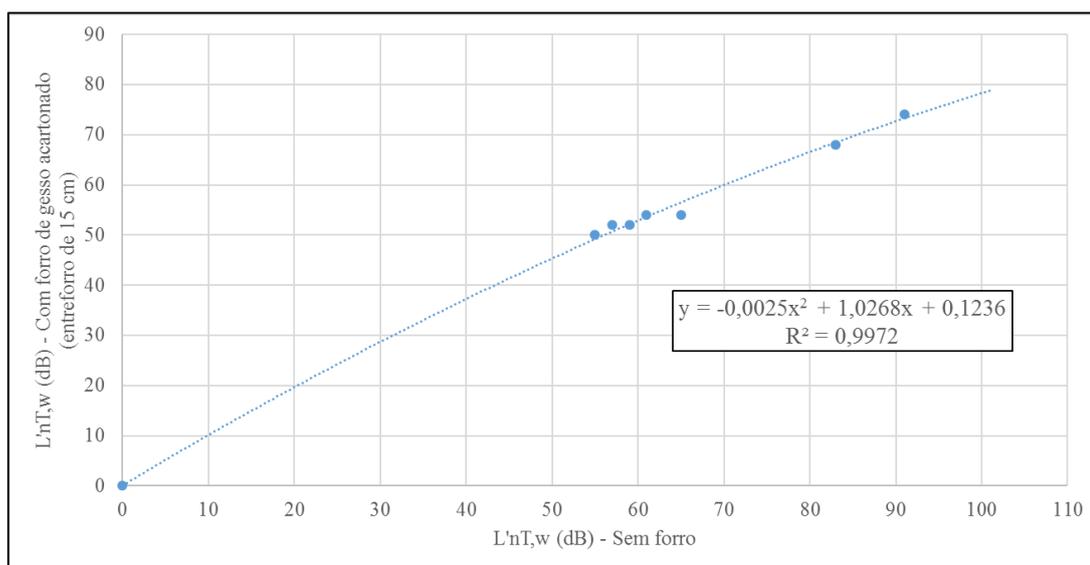
Foram realizadas regressões lineares a fim de encontrar as fórmulas que melhor representassem a relação dos valores de $L'_{nT,w}$ dos sistemas de pisos sem forro (eixo x dos gráficos que apresentam os resultados) com os valores de $L'_{nT,w}$ dos sistemas de pisos com forro (eixo y dos gráficos que apresentam os resultados).

Chegou-se à conclusão de que o tipo de piso utilizado influenciava na estimativa dos resultados e que as equações que melhor representam os dados são polinomiais de segunda ordem, as quais, além de apresentarem coeficientes de determinação (R^2) próximos de 1, representam corretamente a tendência do isolamento proporcionado pelo forro (Δ) convergir a zero quanto mais baixos forem os valores de $L'_{nT,w}$ encontrados para os sistemas sem forro.

Os resultados dos ensaios realizados com amostras de piso de porcelanato e as linhas de tendência que representam as equações encontradas estão plotados nos gráficos expostos na

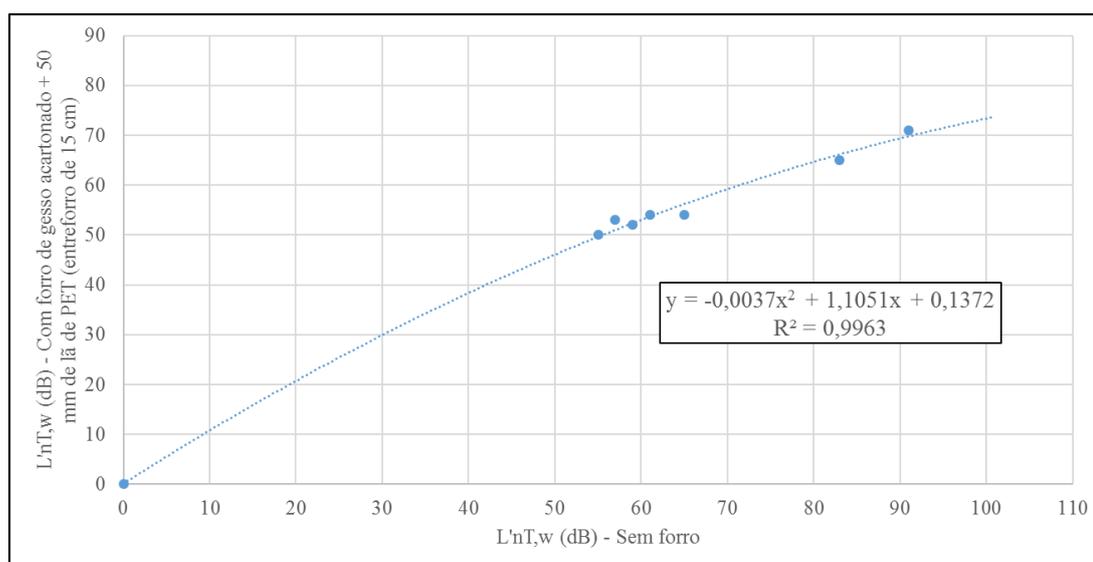
Figura 77, para sistemas com forro de gesso acartonado, e na Figura 78, para sistemas com forro de gesso acartonado e lã de PET no entreferro.

Figura 77 - Curva da estimativa do isolamento proporcionado por forro de gesso acartonado para sistemas com revestimento de porcelanato.



Fonte: Autor.

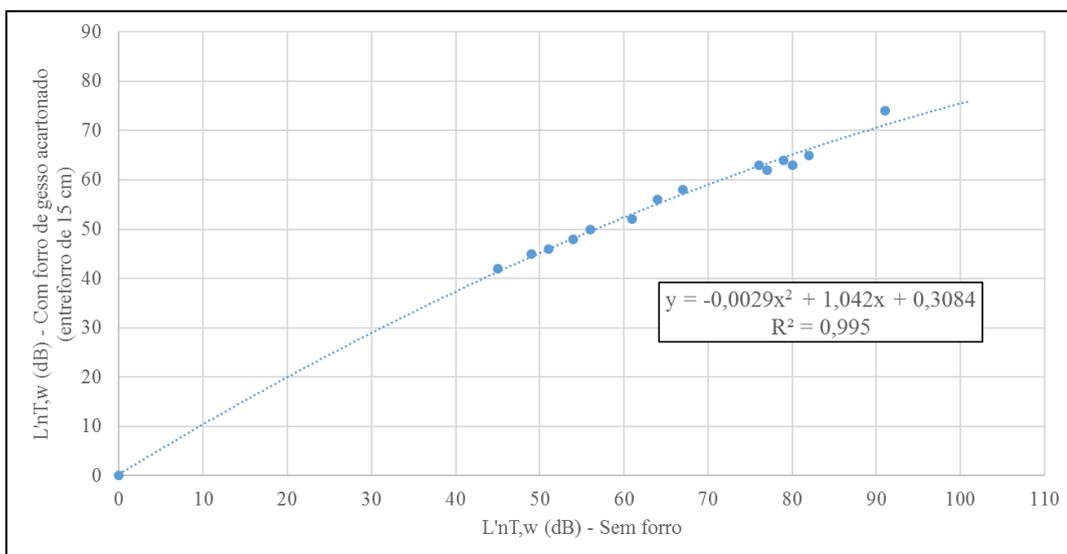
Figura 78 - Curva da estimativa do isolamento proporcionado por forro de gesso acartonado com material absorvente sonoro no entreferro para sistemas com revestimento de porcelanato.



Fonte: Autor.

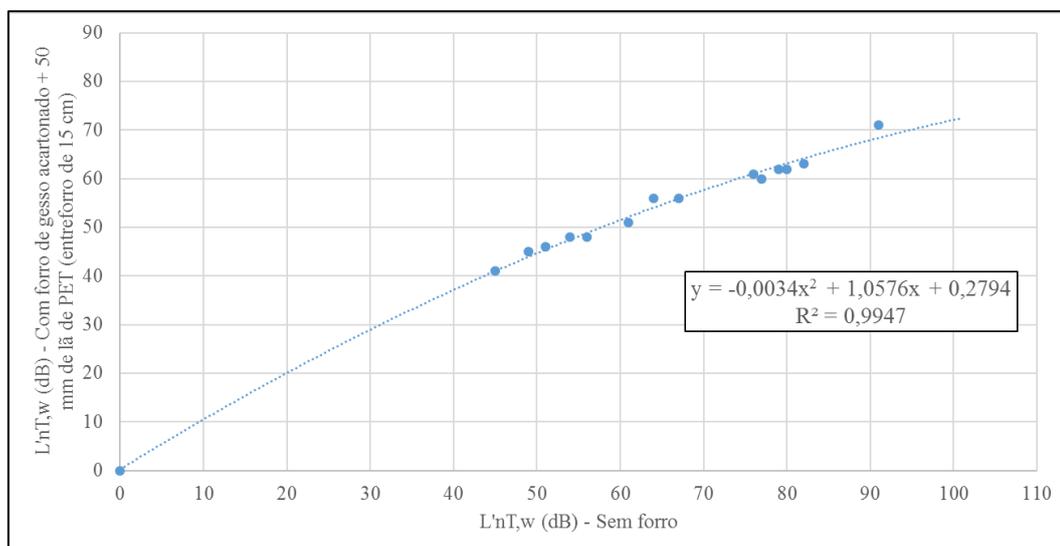
Já os resultados dos ensaios realizados com amostras de pisos vinílicos e as linhas de tendência que representam as equações encontradas estão plotados nos gráficos exibidos na Figura 79, para sistemas com forro de gesso acartonado, e na Figura 80, para sistemas com forro de gesso acartonado e lã de PET no entreforro.

Figura 79 - Curva da estimativa do isolamento proporcionado por forro de gesso acartonado para sistemas com revestimento de piso vinílico.



Fonte: Autor.

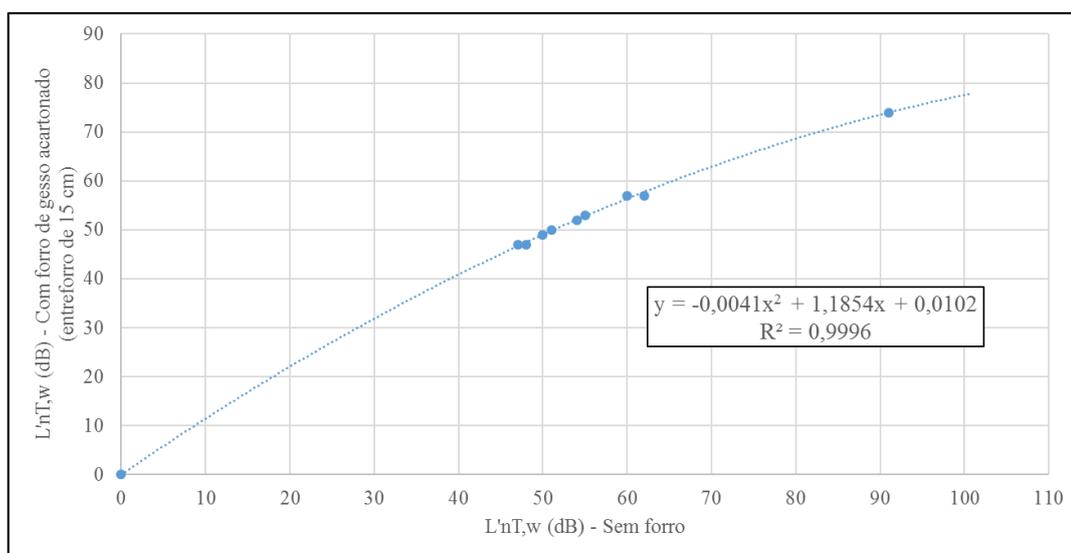
Figura 80 - Curva da estimativa do isolamento proporcionado por forro de gesso acartonado com material absorvente sonoro no entreforro para sistemas com revestimento de piso vinílico.



Fonte: Autor.

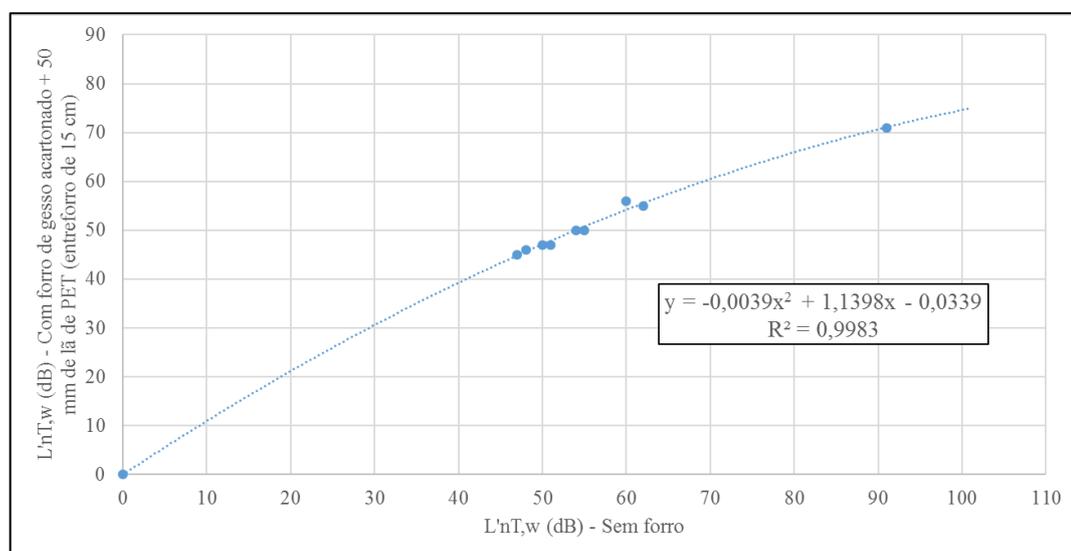
Por fim, os resultados dos ensaios realizados com amostras de pisos laminados de madeira e as linhas de tendência que representam as equações encontradas estão plotados nos gráficos apresentados na Figura 81, para sistemas com forro de gesso acartonado, e na Figura 82, para sistemas com forro de gesso acartonado e lã de PET no entreforro.

Figura 81 - Curva da estimativa do isolamento proporcionado por forro de gesso acartonado para sistemas com revestimento de piso laminado de madeira.



Fonte: Autor.

Figura 82 - Curva da estimativa do isolamento proporcionado por forro de gesso acartonado com material absorvente sonoro no entreforro para sistemas com revestimento de piso laminado de madeira.



Fonte: Autor.

A partir dos dados citados, a Equação 5 foi desenvolvida.

$$(L'_{nT,w} - \Delta) = a(L'_{nT,w})^2 + b(L'_{nT,w}) + c \quad (5)$$

Onde:

"a", "b" e "c": são os coeficientes relativos ao tipo de piso.

Δ : é a melhoria no isolamento ao ruído de impacto proporcionada pelo forro.

$L'_{nT,w}$: é o nível de pressão sonora padronizado ponderado.

Os coeficientes “a”, “b” e “c”, que devem ser utilizados na Equação 5 conforme o tipo de piso e o coeficiente de determinação (R^2) de cada equação, estão apresentados no Quadro 02, para sistemas com forro de gesso acartonado, e no Quadro 3, para sistemas com forro de gesso acartonado e lã de PET no entreforro.

Quadro 02 - Coeficientes para prever o isolamento do sistema com forro de gesso acartonado (entreforro de 150 mm).

Tipo de piso	Coeficientes para a fórmula			Coeficiente de determinação
	a	B	c	R^2
Piso cerâmico	-0,0025	1,0268	0,1236	0,9972
Piso vinílico	-0,0029	1,042	0,3084	0,995
Piso laminado de madeira	-0,0041	1,1854	0,0102	0,9996

Fonte: Autor.

Quadro 03 - Coeficientes para prever o isolamento do sistema com forro de gesso acartonado + 50 mm de Lã de PET (entreforro de 150 mm).

Tipo de piso	Coeficientes para a fórmula			Coeficiente de determinação
	A	B	c	R^2
Piso cerâmico	-0,0037	1,1051	0,1372	0,9963
Piso vinílico	-0,0034	1,0576	0,2794	0,9947
Piso laminado de madeira	-0,0039	1,1398	-0,0339	0,9983

Fonte: Autor.

Cabe destacar que essa ferramenta foi desenvolvida a partir dos resultados da presente dissertação e que os valores encontrados estão relacionados às características da laje ensaiada, das amostras utilizadas e do local de ensaio. Portanto, a ferramenta necessita ser aprimorada para tornar-se mais precisa, levando em consideração resultados encontrados para outros sistemas de pisos com lajes pré-fabricadas e forros suspensos.

5 CONCLUSÃO

Conhecer o desempenho acústico de sistemas de pisos que apresentam laje pré-fabricada como camada estrutural e saber quão eficiente é a instalação de forro suspenso como técnica de isolamento ao ruído de impacto para esses sistemas são demandas existentes no mercado da construção civil brasileira. Sendo assim, o presente trabalho foi desenvolvido com o intuito de estudar o desempenho ao ruído de impacto de composições de sistemas de pisos com laje pré-fabricada de vigotas protendidas e lajotas cerâmicas como camada estrutural e com forro de gesso acartonado como técnica de isolamento sonoro.

A utilização de forro suspenso se mostrou uma solução eficiente para amenizar o ruído de impacto para o sistema de piso com laje pré-fabricada como camada estrutural analisado. Para o sistema de piso com forro de gesso acartonado (entreforro de 150 mm) instalado sob a laje pré-fabricada, encontrou-se um $L'_{nT,w}$ de 74 dB, constatando-se uma melhora no isolamento ao ruído de impacto igual a 17 dB em relação ao $L'_{nT,w}$ da laje em osso.

Observa-se que a utilização de forro suspenso como solução para o isolamento ao ruído de impacto é mais eficiente para lajes pré-fabricadas do que para lajes maciças. Isso está relacionado com a não homogeneidade das lajes pré-fabricadas, que faz com que o ruído se propague de forma mais complexa do que em lajes homogêneas. Como a solução de forro suspenso é uma solução executada sob a laje, pode-se inferir que nas lajes pré-fabricadas há uma maior parcela de transmissão direta do ruído de impacto, o que está relacionado com a ortogonalidade e a periodicidade introduzida pelas nervuras das lajes nervuradas unidirecionais e com as lajes pré-fabricadas caracterizarem-se por terem menor massa. Sendo assim, para sistemas de pisos com esse tipo de laje a instalação de forro apresenta-se como uma alternativa à utilização de revestimentos têxteis e de pisos flutuantes. Destaca-se que a eficiência da solução de forro suspenso depende de detalhes na sua instalação, devendo-se evitar cortes nas placas de gesso acartonado, como pode-se verificar nos estudos de Bet et al. (2019) e Monaco et al. (2018).

Quanto à eficiência da solução de forro suspenso, os resultados da pesquisa permitem afirmar que ela depende da composição do sistema de piso sob o qual o forro será instalado, sendo uma técnica mais eficiente para sistemas com pisos vinílicos ou cerâmicos do que para sistemas com pisos laminados de madeira. É possível estimar o isolamento ao ruído de impacto que o forro irá proporcionar de acordo com o tipo de piso e com o isolamento proporcionado pelo sistema de piso sem o forro, sendo que quanto maior o isolamento proporcionado pelo sistema sem o forro, menor será a eficiência da instalação do forro suspenso.

Quanto à classificação conforme a ABNT NBR 15575-3 (2013) do desempenho das amostras ensaiadas, a instalação de forro de gesso acartonado sob a laje proporcionou que o sistema com piso cerâmico e sem material resiliente alcançasse o nível mínimo de desempenho para entrepisos que separam habitações e que os sistemas com pisos vinílicos e sem materiais resilientes atingissem o nível intermediário de desempenho para entrepisos que separam habitações. Portanto, a instalação de forro suspenso sob uma laje pré-fabricada é uma técnica eficiente para isolar o ruído de impacto quando o sistema de piso analisado apresentar desempenho insuficiente ou mínimo como elemento separador de unidades habitacionais autônomas. Já a utilização conjunta da solução de piso flutuante e da técnica de forro suspenso permitiu que todos os pisos estudados alcançassem o desempenho superior para entrepisos que separam habitações e, ao menos, o desempenho mínimo para sistemas de pisos de áreas de uso coletivo sobre unidades habitacionais autônomas.

Outrossim, a colocação de material fibroso com 50 mm de espessura no entreforro não proporcionou a *performance* esperada. Observa-se que a colocação de material absorvente sonoro no entreforro apresentou-se como uma solução para o isolamento ao ruído de impacto em baixas frequências (abaixo de 125 Hz). Faz-se necessário destacar que materiais fibrosos podem ser utilizados para melhorar o isolamento ao som aéreo de sistemas de pisos.

Espera-se que a presente pesquisa possa auxiliar os profissionais da área de construção civil a especificarem e detalharem sistemas de pisos conforme o isolamento acústico desejado. Acredita-se, também, que os dados coletados possam contribuir de forma mais ampla, abastecendo a bibliografia que se tem no Brasil na temática de ruído de impacto em edificações residenciais e motivando a pesquisa e a busca pela qualidade de desempenho na cadeia produtiva da construção civil.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em vista da relação que o desempenho ao ruído de impacto dos sistemas de pisos utilizados como entrepisos que separam habitações tem com a qualidade de vida dos usuários de edificações multifamiliares, far-se-á necessário dar continuidade à presente pesquisa com estudos que busquem:

- Compreender a transmissão do ruído de impacto pelos flancos em edificações com sistemas de pisos que possuem lajes pré-fabricadas como camada estrutural.

- Conhecer o desempenho ao ruído de impacto das diversas tipologias de laje empregadas na construção civil com a utilização da técnica de forro suspenso.
- Analisar o desempenho de outros tipos de forro (PVC, lambri, gesso) como possíveis alternativas de isolamento ao ruído de impacto.
- Estudar a influência da utilização de diferentes espessuras de entreforro no desempenho ao ruído de impacto de uma laje pré-fabricada com forro suspenso.
- Comparar o custo-benefício da instalação de um forro suspenso com o da instalação de um piso flutuante, a fim de analisar as situações em que o forro suspenso é uma alternativa economicamente viável ao piso flutuante.
- Avaliar a utilização de um material fibroso no entreforro de um forro suspenso como solução para o isolamento ao ruído de impacto em baixas frequências (abaixo de 125 Hz).
- Analisar o desempenho ao ruído aéreo de sistemas de pisos com materiais fibrosos no entreforro de forros de gesso acartonado.
- Verificar o isolamento ao ruído de impacto proporcionado por outros materiais absorventes sonoros colocados no entreforro de um sistema de piso com forro suspenso.

REFERÊNCIAS

ACKER, A. V. **Manual de sistemas pré-fabricados de concreto**. Tradução: Marcelo Ferreira. França: FIB - Fédération Internationale du Béton, 2002.

ALONSO A.; PATRÍCIO J.; SUÁREZ R. On the efficiency of impact sound insulation systems on prefabricated lightweight floor and on standard homogeneous base-floor. **Engineering Structures**, v. 191, p. 649 - 657, jul. 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029618341907>>. Acesso em: 05 dez. 2019.

ARAÚJO, L. G.; LIRA, J. S. de M. M.; SPOSTO R. M. Forros de gesso e PVC comparativamente ao forro de madeira: avaliação do ciclo de vida de emissões de CO₂. **REEC: Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 14, n. 2, p. 1-17, jul./dez. 2018. Disponível em: <<https://www.revistas.ufg.br/reec/article/view/47763>>. Acesso em: 15 mar. 2019.

ASDRUBALI, F.; D'ALESSANDRO F.; SCHIAVONI S. A review of unconventional sustainable building insulation materials. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 4, p. 1-17, jul. 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993715000068>>. Acesso em: 10 ago. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR ISO 3382-2: Acústica - Medições de parâmetros de acústica de salas - Parte 2: Tempo de reverberação em salas comuns**. Rio de Janeiro, 2017. 19 p.

_____. **NBR 14917-1: Revestimentos resilientes para pisos - Manta (rolo) ou placa (régua) vinílica flexível homogênea ou heterogênea em PVC - Parte 1: Requisitos, características e classes**. Rio de Janeiro, 2017. 18 p.

_____. **NBR 14859-1: Lajes pré-fabricadas de concreto. Parte 1: Vigotas, minipainéis e painéis - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2016. 8 p.

_____. **NBR 14859-2: Lajes pré-fabricadas de concreto. Parte 2: Elementos inertes para enchimento e fôrma - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2016. 18 p.

_____. **NBR 7686: Revestimentos têxteis de piso - Terminologia**. Rio de Janeiro, 2016. 31 p.

_____. **NBR 16313: Acústica - Terminologia**. Rio de Janeiro, 2014. 11 p.

_____. **NBR 14833-1: Revestimento de pisos laminados melamínicos de alta resistência - Parte 1: Requisitos, características, classificações e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2014. 44 p.

_____. **NBR 13047: Mantas termoisolantes à base de lã de rocha**. Rio de Janeiro, 2014. 4 p.

_____. **NBR 11361: Mantas termoisolantes à base de lã de vidro**. Rio de Janeiro, 2013. 4 p.

_____. **NBR 15575: Edificações Habitacionais - Desempenho**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 15575-1: Edificações habitacionais - Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2013. 71 p.

_____. **NBR 15575-3:** Edificações habitacionais - Desempenho. Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos. Rio de Janeiro, 2013. 42 p.

_____. **NBR 15575-5:** Edificações habitacionais - Desempenho. Parte 5: Requisitos para sistemas de coberturas. Rio de Janeiro, 2013. 73 p.

_____. **NBR 14715-1:** Chapas de gesso para drywall - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2010. 7 p.

_____. **NBR 15758-2:** Sistemas construtivos em chapas de gesso para drywall - Projeto e procedimentos executivos para montagem - Parte 2: Requisitos para sistemas usados como forros. Rio de Janeiro, 2009. 23 p.

_____. **NBR 13816:** Placas cerâmicas para revestimento - Terminologia. Rio de Janeiro, 1997. 4 p.

BECHER, R. et al. Do carpets impair indoor air quality and cause adverse health outcomes: A review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 15(2), p. 184-197, feb. 2018. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29360764>>. Acesso em: 15 mar. 2019.

BET, K. et al. Avaliação do desempenho acústico de laje nervurada com diferentes composições de pisos. XV ENCAC XI ELACAC, 2019, João Pessoa, PB. **Anais...** João Pessoa: XV ENCAC XI ELACAC, 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/337683519_AVALIACAO_DO_DESEMPENHO_ACUSTICO_DE_LAJE_NERVURADA_COM_DIFERENTES_COMPOSICOES_DE_PISOS>. Acesso em: 18 dez. 2019.

BOTELHO, M. H. C. **Lajes Pré-moldadas de Concreto Armado**. São Paulo: Programações Técnicas e Culturais, 1991.

BRANDÃO, E. **Acústica de salas**. São Paulo: Edgard Blucher, 2016.

BRASIL, C. H. Lajes pré-fabricadas de concreto: tipologias, dimensionamento, detalhamento, métodos executivos e patologias. 101 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2017.

BRUNSKOG J.; DICKOW K.; OHLRICH M. Modal density and modal distribution in a ribbed plate. InterNoise 2009, 2009, Ottawa, Canadá. **Anais...** Ottawa: InterNoise 2009, 2009. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/264849746_Modal_density_and_modal_distribution_in_a_ribbed_plate>. Acesso em: 18 dez. 2019.

CABRAL, C. M. **Acústica Industrial:** aplicação da análise de vibrações e ruído à identificação de fontes de ruído em ambiente industrial. 2012. 88 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Tecnologia e Gestão do Ambiente) - Faculty of Sciences and Technology of the University of Coimbra, Coimbra, Portugal, 2012.

CORNACCHIA, G. M. M. **Investigação in situ do isolamento sonoro ao ruído de impacto em edifícios residenciais**. 2009. 161 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2009.

FERRAZ, R. **Atenuação de ruído de impacto em pisos de edificações de pavimentos múltiplos**. 2008. 156 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2008.

FLÓRIO, M. C. **Projeto e execução de lajes unidirecionais com vigotas em concreto armado**. 2003. 240 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2003.

GASPAR, R. **Análise da segurança estrutural das lajes pré-fabricadas na fase de construção**. 1997. 112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas e Fundações) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1997.

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

HAAS, A. **Isolamento a ruído de impacto de laje pré-fabricada nervurada composta de vigotas protendidas e lajotas cerâmicas com revestimento cerâmico**. 2019. 83 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2019.

HEISSLER, R. F. et al. Análise crítica do desempenho acústico de sistemas de revestimentos de pisos. In: XXVII SOBRAC, Brasília, DF, 2017. **Anais...** Brasília: XXVII SOBRAC, 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/317290930_ANALISE_CRITICA_DO_DESEMPENHO_ACUSTICO_DE_SISTEMAS_DE_REVESTIMENTOS_DE_PISOS>. Acesso em: 07 ago. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo demográfico 2010**. 2011. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/saude/9662-censo-demografico-2010.html?=&t=publicacoes>>. Acesso em: 02 out. 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO. **ISO 16283-2: Acoustics - Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 2: Impact sound insulation**. Switzerland, 2018. 45 p.

_____. **ISO 12354-2: Building acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 2: Impact sound insulation between rooms**, Switzerland, 2017. 46 p.

_____. **ISO 10140-1: Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 1: Application rules for specific products**. Switzerland, 2016. 55 p.

_____. **ISO 12999-1: Acoustics - Determination and application of measurement uncertainties in building acoustics**. Switzerland, 2014. 20 p.

_____. **ISO 717-2: Acoustics - Rating sound insulation in buildings and of building elements. Part 2: Impact sound insulation**. Switzerland, 2013. 17 p.

_____. **ISO 10140-3: Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements. Part 3: Measurement of impact sound insulation**. Switzerland, 2010. 12 p.

_____. **ISO 140-7: Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part VII: Field measurements of impact sound insulation of floors.** Switzerland, 1998. 17 p.

LEE, J.-Y. et al. Evaluation of the long-term sound reduction performance of resilient materials in floating floor systems. **Journal of Sound and Vibration**, v. 366, p. 199-210, mar. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022460X15009827>> Acesso em: 15 mar. 2019.

LOURENÇO, W. M. **Desempenho ao ruído de impacto de laje pré-fabricada nervurada de vigotas protendidas e tavelas cerâmicas com revestimentos de pisos laminados de madeira.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2020.

LOURENÇO, W. M. et al. O impacto da norma de desempenho ABNT NBR 15575/2013 nas tipologias construtivas da cidade de Santa Maria/RS. 7º Fórum Internacional Ecoinnovar, 2018, Santa Maria, RS. **Anais...** Santa Maria: 7º Fórum Internacional Ecoinnovar, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/331023634_THE_IMPACT_OF_THE_PERFORMANCE_STANDARD_ABNT_NBR_155752013_IN_THE_CONSTRUCTIVE_TYPOLOGIES_OF_THE_CITY_OF_SANTA_MARIARS>. Acesso em: 10 jan. 2019.

MATEUS, D.; PEREIRA, A. Transmissão indireta do ruído de percussão: proposta de metodologias simplificadas de previsão. VIII Congresso Iberoamericano de Acústica, 2012, Évora, Portugal. **Anais...** Évora: VIII Congresso Iberoamericano de Acústica, 2012. Disponível em: <<https://www.sea-acustica.es/fileadmin/Evora12/70.pdf>> Acesso em: 15 mar. 2019.

MEDEIROS, P. R. S. **Forros em Gesso Acartonado: Combinações de Utilização e Desempenho como Isolantes Acústicos para Ruído de Impacto.** 2003. 199 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2003.

MEISSER, M. **Acustica de los edificios.** Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 1973.

MONACO, R. et al. Transmissão sonora em sistema de piso: análise do ruído aéreo e do ruído de impacto nas diferentes etapas construtivas do sistema. XXVIII SOBRAC, 2018, Porto Alegre, RS. **Anais...** Porto Alegre: XXVIII SOBRAC, 2018. Disponível em: <<https://proceedings.science/sobrac/papers/transmissao-sonora-em-sistema-de-piso%3A-analise-do-ruído-aéreo-e-do-ruído-de-impacto-nas-diferentes-etapas-construtivas-do>>. Acesso em: 08 abr. 2019.

MORENO, O. A. R.; SOUZA, L. C. L. de; PENTEADO L. D. Isolamento do ruído de impacto em diferentes tipologias construtivas de sistemas de piso. In: XIV ENCAC X ELACAC, 2017, Balneário Camboriú, SC. **Anais...** Balneário Camboriú: XIV ENCAC X ELACAC, 2017. Disponível em: <https://docgo.net/info-doc.html?utm_source=anais-xiv-encac-x-elacac-a-29-de-setembro-de-pdf> Acesso em: 15 mar. 2019.

NUNES, B. de O. et al. Influência dos sistemas de vedação vertical no desempenho acústico de lajes ao ruído de impacto. XXVIII SOBRAC, 2018, Porto Alegre, RS. **Anais...** Porto Alegre: XXVIII SOBRAC, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/327961267_Influencia_dos_sistemas_de_vedacao_vertical_no_desempenho_acustico_de_lajes_ao_ruído_de_impacto>. Acesso em: 08 abr. 2019.

NUNES, M. F. de O.; ZINI, A.; PAGNUSSAT, D. T. Desempenho acústico de sistemas de pisos: estudo de caso para isolamento ao ruído aéreo e de impacto. **Revista Acústica e Vibrações**, n. 46, p. 13-19, dez. 2014. Disponível em: <<http://acustica.org.br/revistas/>>. Acesso em: 07 ago. 2018.

OLIVEIRA, L. A.; MITIDIERI FILHO, C. V. O projeto de edifícios habitacionais considerando a norma brasileira de desempenho: análise aplicada para as vedações verticais. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, v. 7, n.1, p. 90-100, mai. 2012. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/gestaodeprojetos/article/view/51022>>. Acesso em: 07 ago. 2018.

OLIVEIRA, M. F. de; PATRÍCIO, 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, mar. 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/317310083_Impact_Noise_of_Non-homogeneous_Floors_Analysis_of_Different_Input_Parameters_for_Computational_Modeling_Predictions>. Acesso em: 15 ago. 2019.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU. **Population Facts 2018/1 - The speed of urbanization around the world**. 2018. Disponível em: <<https://population.un.org/wup/Publications/>>. Acesso em: 02 out. 2019.

PAIXÃO, D. X. **Caracterização do isolamento acústico de uma parede de alvenaria, utilizando análise estatística de energia (SEA)**. 2002. 182 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2002.

PANOSSO, A. S. **Avaliação subjetiva do desempenho de soluções de isolamento sonoro ao ruído de impacto**. 2015. 279 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2015.

PATRÍCIO, J. **Acústica nos edifícios**. 7 ed. Publindústria: Porto, 2018.

_____. **Reabilitação Acústica - Linhas Guia**. 2 ed. Verlag Dashofer: Lisboa, 2010.

PARK, S. H.; LEE, P. J. Effects of floor impact noise on people - annoyance and physiological responses. 12th ICBEN, 2017, Zurique, Suíça. **Anais...** Zurique: 12th ICBEN, 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/319007518_Effects_of_floor_impact_noise_on_people_-_annoyance_and_physiological_responses>. Acesso em: 21 dez. 2019.

PEDROSO, M. A. T. **Estudo comparativo entre as modernas composições de pisos flutuantes quanto ao desempenho no isolamento ao ruído de impacto**. 2007. 141 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2007.

PEREYRON, D.; SANTOS, J. L. P. dos. Laje nervurada: análise da performance acústica para ruído de impacto. In: IX ENCAC V ELACAC, 2007, Ouro Preto, MG. **Anais...** Ouro Preto: IX ENCAC V ELACAC, 2007. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/71871709-Laje-nervurada-analise-da-performance-acustica-para-ruído-de-impacto.html>>. Acesso em: 01 jun. 2019.

POLLI, T. **O isolamento acústico comparado aos investimentos financeiros em edifícios multifamiliares de Florianópolis**. 2007. 94 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2007.

REY, R. del et al. Nuevos materiales absorbentes acústicos obtenidos a partir de restos de botellas de plástico. **Materiales de Construcción**, 2011. v. 61, n. 304, p. 547-558. Disponível em: <<http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/34069>>. Acesso em: 20 dez. 2019.

RIGHI, P. C. da R. **Ferramenta para análise do desempenho acústico das edificações para fins de financiamento imobiliário**. 2013. 159 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2013.

ROSSI, C. T. **Desempenho ao ruído de impacto de laje pré-fabricada nervurada de vigotas protendidas e tavelas cerâmicas com revestimentos de pisos vinílicos**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2020.

SALIBA, T. M. **Manual prático de avaliação e controle de ruído: PPRA**. 8. ed. São Paulo: LTr, 2014.

SANTANA, W. B. et al. Rating of acoustic performance levels of NBR 15575 (2013) based on user perception: A case study in the Brazilian Amazon. **Building Acoustics**, v. 24(4), p. 239-254, nov. 2017. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1351010X17738107>>. Acesso em: 07 ago. 2018.

SANTOS, J. L. P. **Isolamento sonoro de partições arquitetônicas**. Editora UFSM: Santa Maria, 2012.

SCHIAVI, A. Improvement of impact sound insulation: A constitutive model for floating floors. **Applied Acoustics**, v. 129, p. 64-71, jan. 2018. Disponível em: <<https://www.science-direct.com/science/article/abs/pii/S0003682X17304176>>. Acesso em: 20 fev. 2019.

SEMPRINI, G.; BARBARESI, L. Experimental results of flanking transmission in hollow brick and concrete-slab floor. In: AIA-DAGA 2013, 2013, Merano, Itália. **Anais...** Merano: AIA-DAGA 2013, 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/303920640_Experimental_Results_of_Flanking_Transmission_in_Hollow_Brick_and_Concrete-Slab_Floor>. Acesso em: 01 jun. 2019.

SILVA, B. R. da. **Contribuições à análise estrutural de lajes pré-fabricadas com vigotas treliçadas**. 2012. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2012.

SOUZA, L. C. L. de.; ALMEIDA, M. G. de.; BRAGANÇA, L. **Bê-a-bá da acústica arquitetônica: ouvindo a arquitetura**. 4 ed. São Carlos: Edufscar, 2012.

ZUCHETTO, L. K.; NUNES, M. F. de O.; PATRÍCIO, J. V. Influence of the compression conditions in the acoustic performance of resilient layer of floors. In: 22^o International Congress on Acoustics, 2016, Buenos Aires, Argentina. **Anais...** Buenos Aires: 22^o International Congress on Acoustics, 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/308019175_Influence_of_the_compression_conditions_in_the_acoustic_performance_of_resilient_layers_of_floors>. Acesso em: 10 jun. 2019.