

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

FELIPE SCHNEIDER DE LIMA

DESEMPENHO ACÚSTICO DE SISTEMAS DE PISOS COM A UTILIZAÇÃO DE
LAJES PRÉ-FABRICADAS NERVURADAS DE VIGOTAS PROTENDIDAS

São Leopoldo

2023

FELIPE SCHNEIDER DE LIMA

**DESEMPENHO ACÚSTICO DE SISTEMAS DE PISOS COM A UTILIZAÇÃO DE
LAJES PRÉ-FABRICADAS NERVURADAS DE VIGOTAS PROTENDIDAS**

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

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian
Coorientadora: Prof. Dra. Maria Fernanda de Oliveira

São Leopoldo
2023

L732d Lima, Felipe Schneider de.
Desempenho acústico de sistemas de pisos com a utilização de lajes pré-fabricadas nervuradas de vigotas protendidas / por Felipe Schneider de Lima. – 2023.
176 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, São Leopoldo, RS, 2023.
Orientador: Dr. Bernardo Fonseca Tutikian.
Coorientadora: Dra. Maria Fernanda de Oliveira.

1. Desempenho acústico. 2. Isolamento acústico. 3. Sistemas de piso. 4. Laje pré-fabricada de vigotas e lajotas. 5. Ruído de impacto. 6. Ruído aéreo. I. Título.

CDU: 72:534.84

Aos meus avós.

AGRADECIMENTOS

Início agradecendo à Deus, presente na vida de toda minha família em todos os momentos, de dificuldade e alegria.

Aos meus pais, irmãs e demais familiares; em especial minha mãe Inês, a quem devo aquilo que sou e um dia almejo ser.

Ao meu orientador: professor Bernardo Tutikian, referência técnica e grande líder, a quem tenho grande estima e admiração, e com quem compartilho grande amizade. Por seus ensinamentos, não apenas técnicos, extremamente valiosos em minha jornada profissional e pessoal. À minha coorientadora, professora Maria Fernanda de Oliveira, que participou ativamente deste trabalho, sempre solícita, com seu exímio conhecimento em acústica de edificações.

Ao amigo e referência pessoal e profissional, Felipe Rohr, pelas oportunidades e pelo apoio nesta e tantas outras ideias e trabalhos que desenvolvemos juntos. Estendo também ao Sr. José Plínio Rohr e Sra. Lenir Marilene Rohr.

Agradeço a muitos colegas e amigos que participaram de alguma forma deste trabalho: Fernando, Cristian, Alexandre, Ricardo e Eduardo da Construrohr; Rafael Heissler e Roberto Christ, do itt Performance/Unisinos; Rafael De Toni, da Nume Construções exclusivas; João Paulo e Irani, meus sogros; Sérgio Finger, nos trabalhos de campo. Reservo um agradecimento especial ao engenheiro Thomas Tortelli, que prontamente abriu as portas para a execução das atividades de campo desta pesquisa.

À Carol, minha companheira, que esteve comigo durante toda a pesquisa. Obrigado pelo incentivo e paciência, fundamentais nesta jornada; não há palavras para expressar meu carinho e gratidão.

Muito obrigado!

“Nada é permanente, exceto a mudança.”

Heráclito

RESUMO

Lajes pré-fabricadas nervuradas de vigotas protendidas e elementos inertes de enchimento constituem uma solução técnica de adoção frequente em edificações residenciais, onde exigências normativas de desempenho acústico são aplicáveis. Apesar desse contexto, ainda há uma lacuna considerável de conhecimento no tocante ao desempenho acústico desse sistema construtivo. Este estudo avaliou o comportamento de sistemas de piso de vigotas protendidas e lajotas cerâmicas em relação a ruídos aéreo e de impacto, analisando a influência de diferentes lajotas e diferentes camadas complementares à camada estrutural. O estudo realizou análise experimental (em laboratório) e numérica (estimativa computacional, com auxílio do software SONarchitect®) em 21 composições de piso distintas, com 2 dessas composições replicadas em uma edificação para análise experimental em campo. Verificou-se que o uso de lajotas de maior altura, apesar de não refletir melhor desempenho quando analisadas amostras compostas somente pela respectiva camada estrutural, influenciou o comportamento dos sistemas quando somadas camadas complementares de revestimento, tendo sido observada maior eficiência conferida pelas camadas de revestimento nos sistemas de maior rigidez (com lajotas de maior espessura). Os resultados evidenciaram que soluções que conferem maior eficiência aos sistemas de piso em relação aos ruídos aéreos não necessariamente constituem as soluções mais eficientes frente aos ruídos de impacto. Para ruídos aéreos, o acréscimo de massa a partir da adição de camadas complementares pouco impactou a eficiência dos sistemas, diferentemente do que se observa em sistemas construtivos homogêneos, reforçando a tese de que os meios de transmissão sonora em lajes heterogêneas são mais complexos. Em relação aos sons de impacto, a adição sucessiva de camadas proporcionou maior eficiência aos sistemas de piso analisados, com ganhos significativos quando da aplicação de camada de acabamento em piso laminado, reforçando a forte influência das características elásticas da superfície do sistema de piso. Em todos os sistemas avaliados neste estudo foi observado o efeito de ressonância no interior das cavidades das lajotas, seja nas análises experimentais em laboratório e campo, seja na análise numérica computacional. Contudo, a instalação de forro suspenso em gesso acartonado compensou parte da reduzida perda de transmissão sonora decorrente desse fenômeno, tanto nas amostras de laboratório quanto na análise de campo. Ainda, em

campo, os níveis de pressão sonora de impacto observados indicam que a presença de forro suspenso de gesso acartonado foi capaz de minimizar os efeitos de uma provável falha no sistema de amortecimento, possivelmente decorrente de inconsistência executiva na camada de contrapiso flutuante. As diferenças observadas entre os valores estimados e aferidos em campo podem indicar que variáveis não consideradas em métodos de análise estatística de energia, como a direção das nervuras e a vinculação do sistema de piso com os elementos estruturais adjacentes, influenciam os resultados em escala suficiente para alterar a classificação do sistema frente aos requisitos da NBR 15575-3.

Palavras-chave: Desempenho acústico. Isolamento acústico. Laje pré-fabricada de vigotas e lajotas. Ruído de impacto. Ruído aéreo.

ABSTRACT

Precast beam-and-block floor systems of prestressed beams and inert filling elements are a frequent used technical solution in residential buildings, where normative requirements of acoustic performance are applicable. Despite this context, there is still a considerable gap in knowledge regarding the acoustic performance of this constructive system. This study evaluated the behavior of beam-and-block systems, with prestressed beams and ceramic hollow blocks towards air and impact sound, analyzing the influence of different blocks and different layers complementary to the structural layer. The study conducted experimental (laboratory) and numerical (computational estimate, with software SONarchitect®) analysis in 21 distinct slabs compositions, with 2 of these compositions replicated in a building for experimental analysis in the field. The use of higher thick blocks, although it did not reflect on better performance when analyzed slabs composed only by its structural layer, influenced the behavior of the systems when added complementary coating layers, and greater efficiency assigned by the coating layers was observed in the systems of greater rigidity (with the most thick blocks). The results showed that solutions that give greater efficiency to the floor systems in relation to airborne sound do not necessarily constitute the most efficient solutions to impact sound. For airborne sound, the increase of mass from the addition of complementary layers has little impacted systems efficiency, unlike expected on homogeneous constructive systems, reinforcing the thesis that sound means of transmission in heterogeneous slabs are more complex. Regarding impact sounds, the successive addition of layers provided greater efficiency to the analyzed floor systems, with significant gains when applying a laminate floor finish layer, reinforcing the strong influence of the elastic characteristics of the floor system surface. In all systems evaluated in this study, the resonance effect was observed within the cavities of the hollow blocks, either in experimental analyzes in laboratory and field, eather in the computational numerical analysis. However, the installation of suspended plasterboard lining compensated part of the reduced loss of sound transmission resulting from this phenomenon, both in the laboratory samples and in the field analysis. Still, in the field, the impact pressure levels observeds indicate that the presence of a suspended plasterboard lining was able to minimize the effects of a probable failure on the damping system (resilient layer), possibly due to executive inconsistency in the floating floor (resilient layer). Differences observed between

estimated and field values may indicate that variables not considered in statistical energy analysis methods, such as beams direction and floor system linking with adjacent structural elements, influence at sufficient scale the results to change system classification before the requirements of NBR 15575-3.

Keywords: Acoustic performance. Acoustic insulation. Precast beam-and-block floor system. Impact sound. Airborne noise.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Meios de transmissão sonora	26
Figura 2 – Isolamento acústico aos sons aéreos em sistemas homogêneos.....	27
Figura 3 – Esquema ilustrativo de sons aéreos (a) e de impacto (b)	29
Figura 4 – Esquema ilustrativo (a) e modelo físico simplificado (b) de um contrapiso flutuante	30
Figura 5 – Esquema genérico de um sistema de piso.....	33
Figura 6 – Países listados na Tabela 5	36
Figura 7 – Isolamento ao ruído aéreo entre unidades habitacionais exigido em diferentes países	38
Figura 8 – Níveis de pressão sonora de impacto entre unidades habitacionais exigido em diferentes países	38
Figura 9 – Esquema construtivo de lajes formadas por vigotas e lajotas	41
Figura 10 – Seção transversal típica de sistema de laje de vigotas e lajotas.....	41
Figura 11 – Tipos de vigotas e elementos de enchimento mais utilizados no Brasil .	42
Figura 12 – Países onde o sistema construtivo vigota e lajota cerâmica está presente	44
Figura 13 – Tipos de vigotas segundo o EN 15037-1 (EN, 2008)	49
Figura 14 – Seção transversal da laje antes (a) e após (b) o período de cura	50
Figura 15 – Sistema de laje com cobertura de concreto composta	53
Figura 16 - Modelos de lajotas cerâmicas	53
Figura 17 – Etapas da execução da metodologia	58
Figura 18 - Seção transversal e características da laje LP13	59
Figura 19 - Seção transversal e características da laje LP17	60
Figura 20 - Seção transversal e características da laje LP21	61
Figura 21 - Características das amostras ensaiadas em laboratório.....	63
Figura 22 – Planta baixa da edificação amostrada – pavimento tipo	70
Figura 23 – Corte transversal (a) e longitudinal (b) da edificação	71
Figura 24 – Planta baixa (a) e vista isométrica (b) dos ambientes amostrados	71
Figura 25 – Cortes transversal (a) e longitudinal (b) do ambiente amostrado (LP13G)	72
Figura 26 – Informações técnicas do material resiliente empregado na edificação ..	73
Figura 27 – Caracterização acústica dos SSVI (a) e SVVE (b)	74

Figura 28 – Sistemas construtivos dos ambientes amostrados.....	75
Figura 29 – Câmaras utilizadas nos ensaios.....	76
Figura 30 – Modelo 3D da edificação amostrada para estimativa de desempenho ..	78
Figura 31 – Locação dos ambientes amostrados na edificação.....	79
Figura 32 – Esquemático de montagem dos equipamentos	80
Figura 33 – Isolamento ao ruído aéreo por bandas de frequência em laboratório	82
Figura 34 - Resultados ponderados de isolamento ao ruído aéreo em laboratório ...	83
Figura 35 – Comportamento das composições A (sem revestimentos) em laboratório	84
Figura 36 – Isolamento sonoro por bandas de frequência para as composições A e B	85
Figura 37 - Contraste de isolamento sonoro relativo à adição de contrapiso	87
Figura 38 – Contraste de isolamento sonoro relativo à adição de contrapiso e piso cerâmico.....	88
Figura 39 – Comparação das amostras com camada de acabamento em piso cerâmico e laminado	89
Figura 40 - Comportamentonto de amostra sem (LP13G) e com (LP13H) revestimento argamassado na face inferior	90
Figura 41 – Níveis de pressão sonora de impacto em laboratório (perfil gráfico).....	92
Figura 42 - Níveis de pressão sonora de impacto em laboratório (resultados ponderados)	93
Figura 43 - Nível de pressão sonora de impacto em laboratório: composição A	94
Figura 44 - Nível de pressão sonora de impacto em laboratório: influência da presença de forro suspenso (composição B).....	95
Figura 45 - Nível de pressão sonora de impacto em laboratório: influência da adição de contrapiso.....	96
Figura 46 - Nível de pressão sonora de impacto em laboratório: composição G	97
Figura 47 - Nível de pressão sonora de impacto em laboratório: influência da adição de camada de acabamento em piso cerâmico	98
Figura 48 - Nível de pressão sonora de impacto em laboratório: influência da presença de forro suspenso (composição D).....	99
Figura 49 - Nível de pressão sonora de impacto em laboratório: composições F e G	100

Figura 50 - Nível de pressão sonora de impacto em laboratório: composições D e E	101
Figura 51 - Nível de pressão sonora de impacto em laboratório: composições G e H	102
Figura 52 – Vias de transmissões marginais para sons aéreos	103
Figura 53 - Vias de transmissões marginais para sons de impacto	106
Figura 54 – Estimativa de isolamento ao ruído aéreo estimado via software por bandas de frequência.....	108
Figura 55 - Resultados ponderados da estimativa de desempenho acústico (ruído aéreo).....	109
Figura 56 - Redução do isolamento aéreo nas simulações.....	110
Figura 57 - Comportamento da composição A (sem revestimentos) nas simulações	112
Figura 58 – Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP13A.....	113
Figura 59 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP17A	114
Figura 60 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP21A	114
Figura 61 - Comportamento da composição B (com forro suspenso) nas simulações	115
Figura 62 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP13B	116
Figura 63 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP17B	116
Figura 64 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP21B	117
Figura 65 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP13C	118
Figura 66 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP21C	118
Figura 67 - Comportamento da composição D nas simulações	119
Figura 68 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP13D	120
Figura 69 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP17D	120
Figura 70 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP21D	121
Figura 71 - Comportamento da composição E nas simulações	121
Figura 72 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP13E	122
Figura 73 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP17E	122
Figura 74 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP21E	123
Figura 75 - Comportamento da composição F nas simulações.....	124
Figura 76 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP13F.....	124
Figura 77 Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP17F.....	125

Figura 78 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP21F.....	125
Figura 79 - Comportamento da composição G nas simulações	126
Figura 80 – Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP13G	126
Figura 81 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP17G	127
Figura 82 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP21G	127
Figura 83 - Estimativa de isolamento ao ruído de impacto estimado via software por bandas de frequência.....	129
Figura 84 - Resultados ponderados da estimativa de desempenho acústico (ruído de impacto).....	130
Figura 85 - Redução do isolamento aéreo nas simulações.....	131
Figura 86 - Comportamento da composição A (sem revestimentos) nas simulações	132
Figura 87 – Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP13A.....	132
Figura 88 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP17A	133
Figura 89 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP21A	133
Figura 90 - Comportamento da composição B (com forro suspenso) nas simulações	134
Figura 91 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP13B	134
Figura 92 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP17B	135
Figura 93 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP21B	135
Figura 94 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP13C	136
Figura 95 – Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP21C	137
Figura 96 – Comportamento da composição D nas simulações	138
Figura 97 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP13D	138
Figura 98 – Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP17D	139
Figura 99 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP21D	139
Figura 100 - Comportamento da composição E nas simulações	140
Figura 101 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP13E	140
Figura 102 – Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP17E	141
Figura 103 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP21E	141
Figura 104 – Comportamento da composição F nas simulações.....	142
Figura 105 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP13F	143
Figura 106 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP17F	143
Figura 107 – Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP21F.....	144

Figura 108 – Comportamento da composição G nas simulações	144
Figura 109 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP13G	145
Figura 110 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP17G	145
Figura 111 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP21G	146
Figura 112 – Estágio executivo dos ambientes na fase de ensaios em campo da pesquisa.....	147
Figura 113 – Portas (a) e janelas (b) provisórias instaladas para os ensaios em campo	148
Figura 114 - Tratamento nos pontos elétricos nos SSVI (a) e sistemas de piso (b)	149
Figura 115 - Isolamento ao ruído aéreo verificado em campo	151
Figura 116 - Comparativo: isolamento ao ruído aéreo estimado e medido em campo	152
Figura 117 – Vinculação das lajes na edificação amostrada.....	153
Figura 118 – Transmissão de ruído de impacto verificada em campo	155
Figura 119 - Comparativo: transmissão de ruído de impacto estimada e medida em campo	156

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Critérios de diferença padronizada de nível ponderada	34
Tabela 2 – Critérios e nível de pressão sonora de impacto-padrão ponderado	34
Tabela 3 – Valores mínimos da diferença padronizada de nível ponderada da vedação externa de dormitório	35
Tabela 4 – Isolamento de ruído de impacto para coberturas acessíveis de uso coletivo	36
Tabela 5 - Requisitos de isolamento acústico em diferentes países	37
Tabela 6 – Sistemas de laje de vigotas e lajotas previstos no EN 15037-1 (EN, 2008)	43
Tabela 7 – Tipos de vigotas segundo a NBR 14859-1 (ABNT, 2016a)	46
Tabela 8 – Aço para utilização em lajes pré-fabricadas	47
Tabela 9 – Inereixos mínimos segundo a NBR 14859-1 (ABNT, 2016a) e NBR 14859-2 (ABNT, 2016b)	48
Tabela 10 – Elementos segundo a NBR 14859-2 (ABNT, 2016b)	51
Tabela 11 – Espessuras mínimas para a capa de concreto segundo o EN 15037-1 (EN, 2008)	55
Tabela 12 – Características dos materiais das camadas complementares à estrutural	62
Tabela 13 – Equipamentos utilizados nos ensaios	77
Tabela 14 – Valores de isolamento ao ruído aéreo por bandas de frequência	83
Tabela 15 - Nível de pressão sonora de impacto em laboratório (valores tabelados)	93
Tabela 16 – Valores de isolamento ao ruído aéreo estimados via software para a edificação	107
Tabela 17 – Estimativa de nível de pressão sonora de impacto (valores tabelados)	128
Tabela 18 – Isolamento ao ruído aéreo estimado e medido em campo	150
Tabela 19 – Transmissão de ruído de impacto estimada e medida em campo	154

ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BIM	<i>Building Information Modelling</i>
BSTH	<i>Building Standards Technical Handbook</i>
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
DIN	Deutsches Institut für Normung
DS	<i>Dansk Standard</i>
EN	<i>European Standard</i>
EPS	Poliestireno expandido
IRAM	<i>Instituto Argentino de Normalización y Certificación</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IST	<i>Icelandic Standards</i>
JIS	<i>Japanese Industrial Standards</i>
Kij	Fator de redução de transmissão de vibração
LP	Laje protendida
M_{Rd}	Momento fletor resistente de cálculo
NBCC	<i>National Building Code of Canada</i>
NBN	<i>Bureau voor Normalisatie</i>
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
NCC	<i>National Construction Code Australia</i>
NS	<i>Standards Norway</i>
OIB	<i>Österreichisches Institut für Bautechnik</i>
RRAE	Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios
UNI	<i>Unità Immobiliari</i>
VP	Vigota protendida

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	18
1.2 JUSTIFICATIVA	20
1.3 OBJETIVOS	22
1.3.1 Objetivo geral	22
1.3.2 Objetivos específicos.....	22
1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	22
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1 ACÚSTICA EM EDIFICAÇÕES.....	23
2.1.1 Ruído, conforto acústico e salubridade humana	23
2.1.2 Isolamento acústico	25
2.2.2.1 Isolamento ao ruído aéreo.....	27
2.2.2.2 Isolamento ao ruído de impacto	28
2.2.2.3 Estimativa de desempenho acústico em edificações	30
2.2.2.4 Normalização	32
2.2 LAJES NERVURADAS DE VIGOTAS PRÉ-FABRICADAS E ELEMENTOS INERTES DE ENCHIMENTO.....	41
2.2.1 Vigotas pré-fabricadas.....	45
2.2.2 Elementos inertes de enchimento	50
2.2.3 Capa complementar de concreto.....	53
3 MATERIAIS E MÉTODOS	58
3.1 MATERIAIS	58
3.2 EDIFICAÇÃO AMOSTRADA.....	70
3.3 ENSAIOS EM LABORATÓRIO	75
3.4 ESTIMATIVA DE DESEMPENHO: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	77
3.5 ENSAIOS EM CAMPO	79
4. RESULTADOS.....	81
4.1 ENSAIOS EM LABORATÓRIO	81
4.1.1 Ruído aéreo.....	81
4.1.2 Ruído de impacto	91
4.2 ESTIMATIVA DE DESEMPENHO – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	102
4.2.1 Ruído aéreo.....	106

4.2.2 Ruído de impacto	128
4.3 ENSAIOS EM CAMPO	147
4.3.1 Ruído aéreo.....	149
4.3.2 Ruído de impacto	154
5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	158
5.1 CONCLUSÕES GERAIS.....	158
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	160
REFERÊNCIAS.....	161

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A concepção das edificações habitacionais tem como uma de suas principais premissas o atendimento às necessidades de seus usuários, sendo parte delas ligadas à habitabilidade (VOORDT; WEGEN, 2013). Conforto térmico, conforto acústico e qualidade do ar impactam significativamente a produtividade dos ocupantes de um determinado ambiente (HORR *et al.*, 2016).

Em relação ao conforto acústico, é consenso que o ruído tem repercussões negativas que podem afetar a saúde humana (OMS, 2011). Além de ser nocivo ao sistema auditivo, há evidências científicas que demonstram que a exposição ao ruído está associada ao aumento dos níveis de hormônio do estresse, afetando negativamente o desempenho cognitivo (MÜNZEL *et al.*, 2014).

Na esteira do desenvolvimento socioeconômico e tecnológico, a sociedade vive em constante processo de transformação, modificando continuamente as formas de viver, morar e trabalhar (GATTI *et al.*, 2018), bem como os anseios acerca do consumo de produtos e serviços, o que ocorre em escala jamais vista, dada à velocidade do avanço tecnológico (GOMES, 2019). Guiadas por esse movimento, as expectativas dos usuários relacionadas ao espaço habitacional se modificam continuamente (PARMEGGIANI, 2014), o que, nas últimas décadas, se refletiu em níveis crescentes de exigências relativas ao conforto, decorrentes dos novos estilos de vida das pessoas (PEREYRON, 2008; CHMELÍK *et al.*, 2020).

Paralelamente às mudanças da sociedade também a construção civil se modifica. Avalizada pela necessidade de racionalização de recursos e aumento da produtividade para suprir o crescente déficit habitacional, a partir da década de 1970, a construção civil brasileira recebeu grande propulsão financeira, estimulando o desenvolvimento de novos sistemas construtivos (BORGES, 2008) o que, de fato, constitui avanço para a cadeia produtiva e consumidora. Na esteira da industrialização da construção segue-se o aumento da adoção de soluções pré-fabricadas, que proporcionam obras executadas mais rapidamente, contenção de desperdícios e ganhos de qualidade e durabilidade das edificações, em função dos controles de qualidade inerentes aos processos industrializados de concepção dos elementos (TERRADOS-CEPEDA; LIZANA, 2020). Por outro lado, a introdução nas edificações

de sistemas construtivos cada vez mais leves e esbeltos, observada nas últimas décadas, ocorreu sem que necessariamente fosse mensurada a perda de desempenho ocasionada por tais modificações (PIERRARD; AKKERMAN, 2013). Encaixam-se nesse cenário as lajes pré-fabricadas compostas por vigotas de concreto e elementos inertes de enchimento, solução construtiva utilizada em todo o mundo (RIBAS; CLADERA, 2013). No Brasil, especificamente, vigotas de concreto protendido e lajotas cerâmicas são utilizadas em larga escala em edificações habitacionais (HAAS *et al.*, 2022) em função do desempenho apresentado pelo sistema construtivo em relação a outros tipos de lajes, como o menor peso próprio em relação às características dos empreendimentos e ao desempenho de outros sistemas analisados para a mesma função.

Paralelamente, amadureceu no Brasil a discussão relacionada ao desempenho das edificações habitacionais. Movimentos como a elaboração do Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H) e o Sistema Nacional de Avaliações Técnicas (Sinat) surgiram para assegurar a qualidade da produção de edificações, culminando posteriormente na publicação da norma brasileira de desempenho de edificações habitacionais (BORGES, 2008). Ainda, a abordagem de desempenho materializada pela NBR 15575 (ABNT, 2021a) tem se estendido à outros tipos de edificações, além da habitacional. Como exemplo pode-se citar a elaboração de diretrizes técnicas para projetos de edificações destinadas ao ensino público, que contém requisitos de desempenho a serem observados (HEISSLER, 2018).

Também amparadas pelo avanço da globalização e o surgimento de novas tecnologias (RAFALSKI; ANDRADE, 2015), as relações de trabalho têm se transformado ao longo das últimas décadas (CASTAÑON *et al.*, 2016). Respaladas pelo avanço da tecnologia da informação e comunicação, as empresas têm buscado adotar novas estratégias de trabalho, com foco em maior produtividade (SAP, 2015). Dentre essas estratégias, destaca-se o *home office*, praticado desde a década de 1970 (RAFALSKI; ANDRADE, 2015). De adoção crescente no Brasil, em 2014, 36% das companhias já tinham colaboradores atuando nesse regime (SAP, 2015), o que foi abruptamente acentuado pela pandemia de COVID-19 (SPURK; STRAUB, 2020). Esse movimento incrementa as necessidades dos usuários ao ocupar o espaço habitacional, uma vez que a execução de tarefas cognitivas ligadas ao exercício profissional depende de condições ambientais adequadas (FRONTCAZAK *et al.*, 2011),

reforçando a necessidade de que as edificações habitacionais tenham desempenho adequado.

1.2 JUSTIFICATIVA

Em edificações habitacionais de múltiplos pavimentos, o excesso de ruídos constitui o motivo preponderante ligado ao desconforto dos usuários (FERRAZ, 2018), em especial o ruído de impacto nos sistemas de piso (HAAS et al., 2022) estando sua incidência e intensidade relacionados às características dos elementos construtivos utilizados (HEISSLER, 2018).

Ao longo das últimas décadas, o surgimento de novas tecnologias e o adensamento urbano aumentaram os tipos e os níveis de ruídos nas edificações habitacionais, prejudicando o bem-estar dos usuários e dificultando a execução de tarefas que exijam concentração (ALONSO *et al.*, 2020). Recentemente, a pandemia de COVID-19 acentuou esse processo (SPURK; STRAUB, 2020), dadas as medidas de distanciamento social adotadas em todo o mundo, com o intuito de frear a disseminação da doença (SOMANI *et al.*, 2020). Um dos impactos socioeconômicos mais notórios consistiu na adoção do *home office*, levando muitas pessoas, de diversos ramos profissionais, a trabalharem a partir de suas casas (VON GAUDECKER *et al.*, 2020). No estado de São Paulo, mais de 75% das empresas aderiram ao *home office* como resposta às condições impostas pela pandemia (CORREIO POPULAR, 2020).

Esse movimento evidenciou que muitas edificações habitacionais não dispõem de condições adequadas de habitabilidade e segurança. Após o início do isolamento social, as reclamações relacionadas ao ruído excessivo aumentaram 32% em Porto Alegre (GAUCHAZH, 2020) e a ocorrência de incêndios elevou-se em 60% no estado de São Paulo (BBC, 2020). É factível, no entanto, que a ocupação adequada do espaço habitacional e o exercício do trabalho em *home office* necessitem de condições mínimas de habitabilidade e segurança (SILVEIRA; ROSSI; VUONO, 2020).

Ainda que, de forma geral, soluções tradicionais mais robustas e maciças apresentem desempenho superior em relação a sistemas leves e pré-fabricados, especialmente no tocante à resistência ao fogo e ao desempenho acústico, é possível a partir de elementos pré-fabricados conceber soluções com desempenho adequado

(TERRADOS-CEPEDA; LIZANA, 2020), desde que sejam corretamente projetadas e executadas (LABRES *et al.*, 2018). No caso particular dos sistemas de piso, apesar de sua importância para o desempenho acústico da unidade habitacional, este subsistema ainda não é devidamente considerado como elemento responsável por separar diferentes unidades habitacionais, não possuindo espessuras mínimas na maioria dos códigos de obras, diferentemente do que ocorre com os sistemas de vedação vertical. Dessa forma, o principal critério considerado pelos projetistas para especificação em projeto de um sistema de piso é a capacidade resistente do elemento, ou seja, o vão admissível em função das cargas atuantes, considerando, além de possível redução de custos (OLIVEIRA; ZINI; PAGNUSSAT, 2014), a interface com outros sistemas como instalações prediais, vedações verticais, distribuição interna dos espaços e possibilidade de modificações pelos usuários.

Nesse contexto, é reforçada a necessidade de garantir o desempenho adequado dos sistemas construtivos nas edificações (HEISSLER, 2018; ALONSO *et al.*, 2020), o que confere relevância ao estudo do desempenho dos sistemas construtivos pré-fabricados, haja visto que, a exemplo do sistema de lajes pré-fabricadas de vigotas protendidas e elementos inertes de enchimento, extensamente utilizados em edificações habitacionais no país (HAAS *et al.*, 2022). A produção atual no Brasil deste sistema construtivo é de aproximadamente 900.000 m² mensais (SINAPROCIM, 2021). Para fins comparativos, a geração de habitações de interesse social no país através do programa Casa Verde Amarela no 2º trimestre de 2021 foi de 28.723 unidades (CBIC, 2021). Considerando a área mínima de 39,00 m², estabelecida para unidades habitacionais em empreendimentos verticais através da Portaria nº 959 (BRASIL, 2021), as referidas unidades representariam 925.197 m² de área construída, ou seja, equivalente a pouco mais de um mês de produção de lajes protendidas no Brasil. Contudo, seu desempenho acústico ainda é pouco conhecido, seja a nível acadêmico (HAAS *et al.*, 2022; SOUZA *et al.*, 2020) e em relação ao mercado, onde há quantidade muito pequena de dados disponíveis (BET *et al.*, 2019). Destaca-se a necessidade da realização de ensaios experimentais, pois métodos analíticos de mensuração de isolamento sonoro têm se mostrado menos eficazes em sistemas não homogêneos, ou seja, mais eficazes em sistemas construtivos maciços (DI BELLA *et al.*, 2011; SOUZA *et al.*, 2020),

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho é investigar o desempenho acústico de diferentes sistemas de piso confeccionados com lajes pré-fabricadas nervuradas compostas por vigotas protendidas e elementos inertes de enchimento, avaliando a influência de camadas de acabamento e forro de gesso acartonado, estudando seu comportamento em laboratório e quando inseridos no contexto de uma edificação, por meio de simulação computacional e ensaio em campo (obra), sob a luz da NBR 15575-3 (ABNT, 2021b).

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Determinar e analisar o índice de redução sonora ponderado, em laboratório, para as composições de piso propostas;
- b) Determinar e analisar o nível de pressão sonora de impacto normalizado, em laboratório, para as composições de piso propostas;
- c) Estimar o isolamento acústico para a edificação mostrada com as composições de piso propostas;
- d) Determinar e analisar o índice de redução sonora ponderado, em campo, para duas das composições de piso propostas;
- e) Analisar, comparativamente, o comportamento acústico do sistema construtivo em laboratório, em estimativa computacional e em campo, avaliando a influência das camadas complementares adicionadas aos sistemas.

1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

Este trabalho tem como tema o comportamento acústico de sistemas de piso compostos por lajes pré-fabricadas de vigotas e elementos inertes de enchimento, sendo as vigotas de concreto protendido e os elementos inertes de enchimento de cerâmica, com foco em ensaios experimentais realizados com amostras em escala real em laboratório, estimativa de desempenho por meio de simulações computacionais e ensaio em campo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ACÚSTICA EM EDIFICAÇÕES

2.1.1 Ruído, conforto acústico e salubridade humana

Entende-se o som como uma forma de energia decorrente de qualquer variação na pressão em um determinado meio de propagação compressível. A partir do choque entre as moléculas existentes no meio, ocorre a variação de suas velocidades e, conseqüentemente, flutuações na pressão existente, perceptíveis ao ouvido humano (PATRÍCIO, 2018). Conforme destaca o autor, a percepção pelo ouvido humano ocorre apenas se a amplitude das flutuações de pressão e sua taxa de variação de ocorrência no tempo (frequência) estiver dentro de um determinado intervalo de valores, que para a NBR 16313 (ABNT, 2014) corresponde a faixa entre 20 Hz e 20 kHz.

Em acústica, o conceito de ruído está associado a sons desagradáveis ou indesejados (BISTAFA, 2018; PATRÍCIO, 2018), o que atribui ao termo certo grau de subjetividade, uma vez que os mais variados sons podem ser desagradáveis ou não a depender das percepções pessoais de cada indivíduo (BISTAFA, 2018). Logo, o conceito de ruído depende não apenas de suas características físicas, como amplitude, frequência e duração, mas também da resposta comportamental que o ser humano tem frente à sua percepção (PATRÍCIO, 2018).

A qualidade da vida humana em geral está associada às condições de habitabilidade (SOUZA, A. R. De, 2017), e, não diferente, à execução de tarefas cognitivas depende de condições ambientais adequadas (FRONTCAZAK *et al.*, 2011). Conforto térmico, conforto acústico e qualidade do ar impactam significativamente a produtividade dos ocupantes de um determinado ambiente (HARR *et al.*, 2016). Os conceitos de conforto e desempenho diferem-se por sua subjetividade. Enquanto o conforto situa-se no campo intangível, relacionado às noções pessoais de cada usuário, o desempenho refere-se a exigências normativas, definidas claramente por meio de requisitos e critérios de avaliação (PARMEGGIANI, 2014).

Com relação ao conforto acústico, pode-se entender o ruído como uma sensação auditiva desagradável ao ser humano (HEISSLER, 2018). É sabido que em níveis inadequados o ruído prejudica a saúde humana (OMS, 2011), não apenas no

tocante ao sistema auditivo, mas também elevando os níveis de estresse (MÜNZEL *et al.*, 2014). Pesquisas indicam que o nível de ruído equivalente a 65 dB constitui o limiar de conforto acústico para a medicina preventiva, sendo a exposição contínua à valores acima desse limite motivo causador de distúrbios psíquicos e fisiológicos diversos (PAZ; FERREIRA; ZANNIN, 2005; SILVA *et al.*, 2010).

Nas edificações habitacionais, graças ao aumento da densidade populacional nos espaços urbanos e a verticalização das edificações, os sistemas de piso passaram a ter papel destacado no conforto acústico (OLIVEIRA; ZINI; PAGNUSSAT, 2014), sendo o excesso de ruídos motivo fortemente associado ao desconforto dos ocupantes nas edificações habitacionais de múltiplos pavimentos (FERRAZ, 2018), o que tem sido alvo de diversos estudos acadêmicos (ARAÚJO; PAUL; VERGARA, 2016).

Já no ambiente de escritório, a expressão do ruído contempla todas as manifestações sonoras percebidas pelo ser humano durante o exercício das atividades de trabalho desenvolvidas (GRAZZIOTTI; TIBIRIÇÁ, 2007), enquanto que nas edificações de uso residencial, as fontes de ruído decorrem da prática de atividades cotidianas, a exemplo da interação entre si dos usuários ao falarem, caminharem, bem como da utilização de aparelhos de uso doméstico (SCHERER *et al.*, 2019). Para Souza (2014), o ruído constitui uma das principais fontes de problemas ergonômicos no ambiente de trabalho, haja vista que, quando presente em níveis excessivos, o ruído causa fadiga física e mental, reduzindo o nível de concentração dos trabalhadores e, por consequência, afeta sua produtividade (GOLMOHAMMADI; ALIABADI; NEZAMI, 2017). Ainda segundo os autores, a perda de concentração é a principal consequência atribuída ao ruído excessivo, sendo necessários aproximadamente oito minutos para que o indivíduo retome o nível de concentração após ter sua atividade interrompida por evento ligado ao ruído em excesso (KIM; DEAR, 2013). Logo, torna-se fundamental que o ambiente de trabalho disponha de condições que promovam níveis adequados de ruído durante a execução das tarefas ali desenvolvidas (MARTINS; MIRANDA, 2019).

Na literatura há diferentes conclusões acerca de qual condicionante é mais significativa em relação ao conforto ambiental em espaços onde sejam desenvolvidas tarefas que exijam alto desempenho cognitivo por longos períodos, a exemplo de um escritório. A privacidade e o conforto acústico são apontados por Frontczak *et al.*

(2011) e Sakellaris *et al.* (2016). Ncube e Riffat (2012) indicam a qualidade do ar, enquanto Chiang e LAI (2002) reportam o conforto térmico.

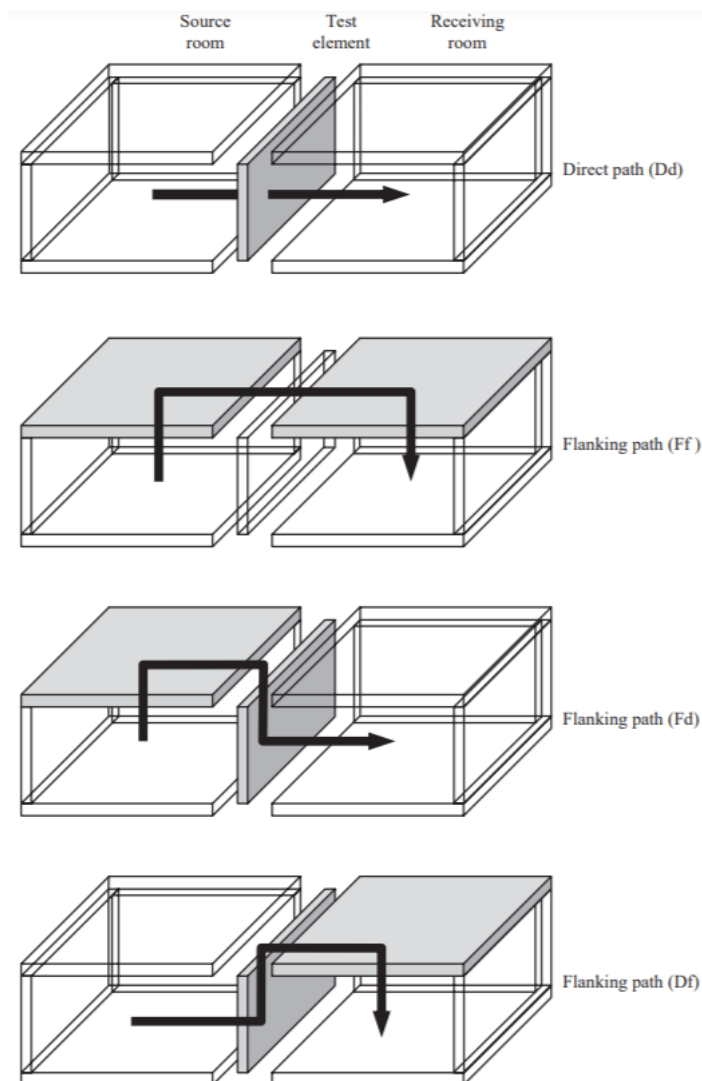
O isolamento acústico adequado dos sistemas construtivos é fundamental na contribuição do conforto acústico de usuários de ambientes internos.

2.1.2 Isolamento acústico

Para a NBR 16313 (ABNT, 2014), o conceito de isolamento acústico se refere à redução da transmissão sonora entre recintos distintos. Ou seja, no tocante aos sistemas construtivos que delimitam os ambientes, o isolamento acústico remete à capacidade que estes têm de reduzir a transmissão do som por meio aéreo ou através dos elementos construtivos em si (OLIVEIRA *et al.*, 2021b).

Regida por fenômenos complexos, a transmissão do som através dos elementos construtivos em uma edificação se dá de maneira distinta para ruídos aéreos e ruídos de impacto (PATRÍCIO, 2018), de forma que os sistemas construtivos nem sempre apresentem comportamento satisfatório em relação aos dois requisitos concomitantemente (OLIVEIRA *et al.*, 2021a). Para ambas as situações, a transmissão sonora pode ocorrer por meios diretos (através do elemento construtivo delimitador entre os ambientes) e indiretos (através de outros sistemas construtivos conectados ao elementos responsável pela separação dos ambientes) (HOPKINS, 2012), conforme ilustra a Figura 1.

Figura 1 – Meios de transmissão sonora



Fonte: Hopkins (2012, pág. 248).

Dessa forma, a transmissão sonora está diretamente ligada não apenas às propriedades do elemento construtivo, mas também às características inerentes a ligação do elemento com os demais sistemas construtivos (PATRÍCIO, 2018).

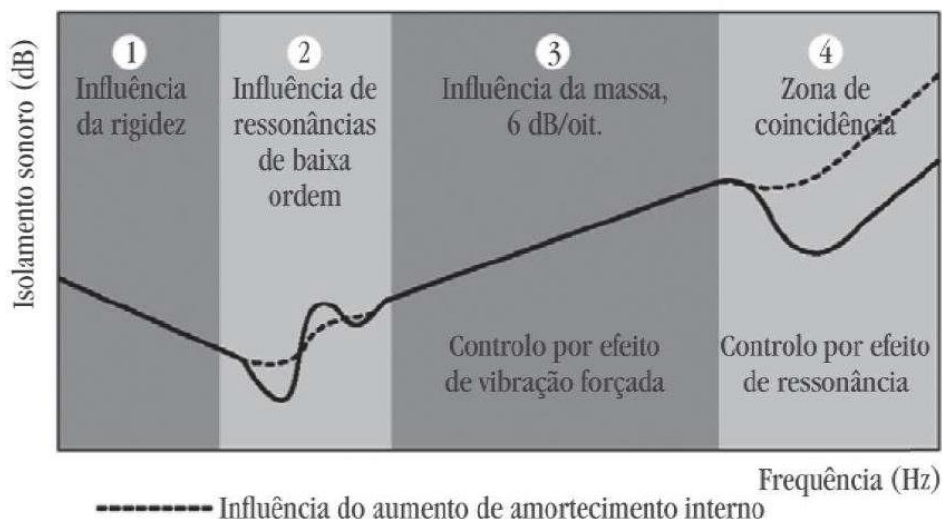
A determinação do isolamento acústico de um sistema construtivo é realizada através de ensaios em laboratório, por meio de amostras do sistema acopladas em câmaras acústicas, desvinculadas da amostra ensaiada para que não exista transmissão indireta e assim se possa aferir o comportamento atrelado ao sistema construtivo isoladamente (HOPKINS, 2012; PATRÍCIO, 2018).

2.2.2.1 Isolamento ao ruído aéreo

Os sons aéreos decorrem da excitação do ar originada por uma fonte de emissão sonora, que no caso das edificações, correspondem às atividades que ocorrem no ambiente externo ao edifício, a exemplo do tráfego rodoviário, e em seu ambiente interno, a partir da utilização de equipamentos relacionados ao uso da edificação, como aparelhos domésticos e aos demais sons produzidos por seus usuários, como a conversação e demais atividades cotidianas (ABNT, 2013a; PATRÍCIO, 2018). Em se tratando de sistemas de piso, a transmissão dos sons aéreos entre diferentes unidades ocorre de forma direta, através do sistema de piso, e indireta, através dos demais sistemas construtivos associados, como o sistema estrutural e o sistema de vedação vertical (HOPKINS, 2012).

O isolamento ao ruído aéreo depende, em linhas gerais, da inércia, massa e propriedades elásticas dos sistemas construtivos (LUNDH, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2021b; PATRÍCIO, 2018). No caso de sistemas homogêneos, a atenuação sonora varia em função da frequência, sendo possível dividir tal comportamento em quatro regiões. A Figura 2 apresenta um gráfico que ilustra o comportamento de fechamentos (sistemas construtivos) frente a um som composto de várias frequências, sendo as regiões 1 e 2 influenciadas pela ressonância que é controlada com a adoção de maior rigidez do sistema construtivo; a região 3 que sofre influência da massa do fechamento; e a região 4 que é afetada pela frequência crítica, sendo assim denominada zona de coincidência.

Figura 2 – Isolamento acústico aos sons aéreos em sistemas homogêneos



Fonte: Patrício (2018, pág. 61).

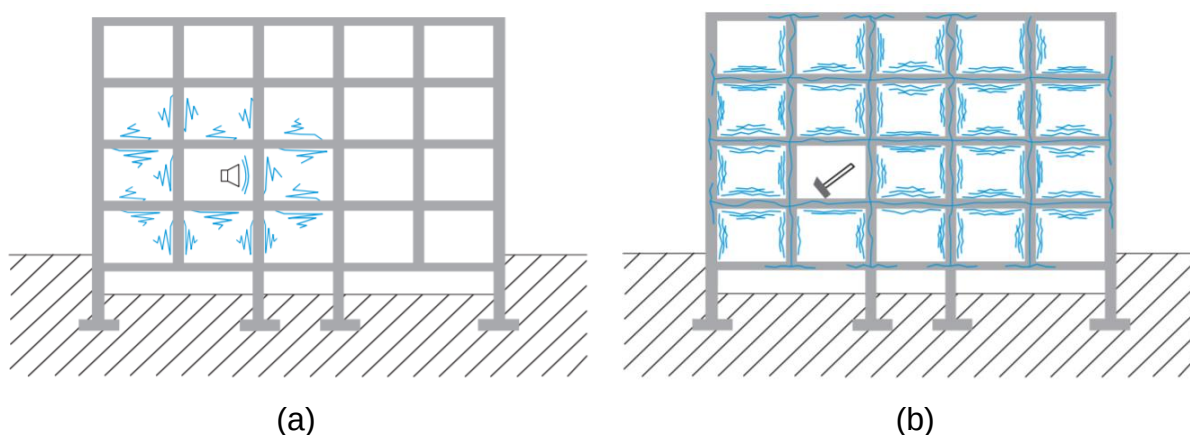
Para os sistemas de piso a capacidade de atenuação sonora relativa a sons aéreos pode ser estimada através dos mesmos princípios adotados para predição do comportamento de sistemas de vedação vertical, como os princípios da lei da massa e do sistema massa-mola-massa (OLIVEIRA *et al.*, 2021a). Contudo, a transmissão sonora em sistemas de piso não homogêneos, a exemplo das lajes de vigotas e lajotas (HOPKINS, 2012; OLIVEIRA *et al.*, 2021a), é mais complexa quando comparada à sistemas homogêneos, como lajes maciças, em função dos meios ortotrópicos de transmissão (OLIVEIRA; PATRÍCIO, 2017).

2.2.2.2 Isolamento ao ruído de impacto

Os ruídos de impacto decorrem de choques mecânicos empreendidos na superfície de elementos de compartimentação, verticais ou horizontais, que produzem excitações que se propagam por ondas elásticas através do elemento construtivo em si e dos elementos aos quais está conectado (PATRÍCIO, 2018). Como exemplos, pode-se citar os sons gerados ao caminhar ou pela queda de um objeto por sobre uma laje (ABNT, 2013; BISTAFA, 2018).

Normalmente as ações de impacto pouco são observadas nas vedações verticais, ocorrendo com maior prevalência nos sistemas de piso (PATRÍCIO, 2018), fazendo com que este requisito seja considerado apenas para os sistemas de piso. O sistema estrutural da edificação, quando este possuir ligações rígidas e monolíticas entre os elementos, constitui caminho favorável para a transmissão da vibração gerada por fontes de impactos mecânicos, havendo pouca perda de energia (HASSAN, 2009; PATRÍCIO, 2018). Esse fenômeno faz com que a propagação dos sons de impacto ocorra de forma mais facilitada em relação aos ruídos aéreos, através dos sistemas construtivos que compõem a compartimentação dos ambientes em toda a edificação, resultando em ruídos intensos mesmo em ambientes distantes do local de origem do impacto mecânico em determinado elemento de compartimentação (Figura 3). Ainda, as transmissões indiretas através do sistema estrutural da edificação são mais difíceis de serem estimadas e tratadas (BISTAFA, 2018), tornando o isolamento ao ruído de impacto o critério mais crítico a ser atendido pelos sistemas de piso em termos de isolamento acústico (HEISSLER, 2018).

Figura 3 – Esquema ilustrativo de sons aéreos (a) e de impacto (b)



Fonte: Adaptado pelo autor de Patrício (2018)

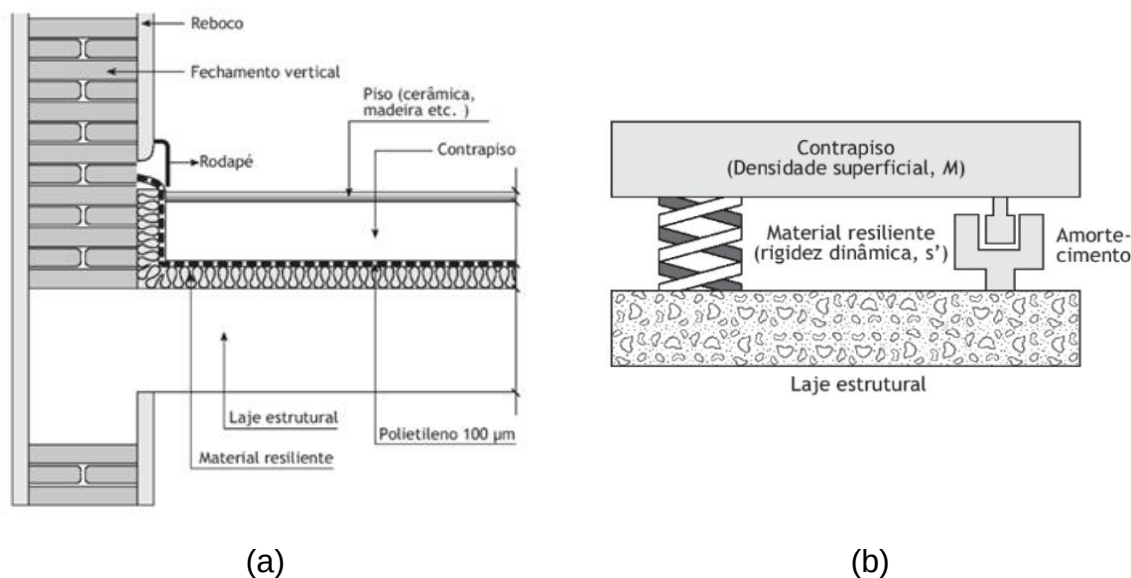
Ainda que, por um lado, quanto maior for a massa do sistema construtivo menor tende a ser sua tendência de vibrar e, por consequência, transmitir ondas sonoras (HOPKINS, 2012), tal efeito exerce maior influência em relação a atenuação de ruídos aéreos, de modo que pequenos aumentos de massa resultem em ganhos consideráveis de isolamento sonoro, não ocorrendo o mesmo quanto ao isolamento de ruídos de impacto, onde a energia de vibração é aplicada diretamente nos elementos construtivos, havendo por consequência menor perda de energia (PARK; YOON; CHO, 2020). Desta forma, a lei da massa não exerce a mesma influência para atenuar sons de impacto (HASSAN, 2009).

Materiais que proporcionem efeito de amortecimento sobre os impactos mecânicos em um sistema de piso se apresentam como soluções eficientes para redução da transmissão sonora (HEISSLER, 2018), o que confere grande relevância às camadas do sistema de piso subsequentes à camada estrutural. Quando composta por materiais flexíveis como carpetes ou pisos laminados, a camada de revestimento aumenta o tempo de impacto, devido às suas características elásticas, fornecendo contribuição relevante para atenuação de ruídos de impacto (PATRÍCIO, 2018; SCHIAVI, 2018).

Outro recurso utilizado para melhorar o desempenho acústico de sistemas de piso é a utilização de contrapiso flutuante (SCHIAVI, 2018), que tem se mostrado a solução técnica mais eficaz para aumentar o isolamento ao ruído de impacto (HEISSLER, 2018). Esta solução técnica consiste em um modelo massa-mola-amortecedor, sendo a massa relativa à densidade da camada de contrapiso, a mola representada pela rigidez dinâmica da manta acústica e o amortecimento

representado pelo atrito interno da manta acústica (BISTAFA, 2018), conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Esquema ilustrativo (a) e modelo físico simplificado (b) de um contrapiso flutuante



Fonte: Adaptado pelo autor de Bistafa (2018)

Através da utilização do contrapiso flutuante evita-se que as camadas subsequentes à estrutural (contrapiso, camada de fixação e camada de acabamento) tenham conexão rígida com a camada estrutural e outros elementos construtivos, como os sistemas de vedação vertical (HEISSLER, 2018).

Ainda, segundo Patrício (2018), além do contrapiso flutuante, para potencializar a atenuação sonora de um sistema de piso pode-se adotar forros suspensos. Mesmo que essa solução técnica não seja tão eficiente em se tratando de atenuação de ruídos de impacto (OLIVEIRA *et al.*, 2021a), essa solução técnica é executada no ambiente receptor do ruído, ou seja, trata-se de um recurso disponível quando não é possível intervir no ambiente emissor (TOMITAKA; NOJIMA; MASUDA, 2016).

2.2.2.3 Estimativa de desempenho acústico em edificações

Na fase de elaboração dos projetos de uma edificação o desempenho acústico pode ser estimado a partir da análise dos materiais e métodos construtivos a serem adotados, estando inserido nesse processo o uso de softwares adequados para este fim (DÜMEN; RASMUSSEN, 2020). Ainda que os modelos de previsão do

desempenho acústico tenham limitações (HEISSLER, 2018), a avaliação do isolamento sonoro ainda na fase de projeto é altamente recomendada também do ponto de vista econômico, haja vista que, após uma edificação estar concluída, intervenções para corrigir o desempenho acústico inadequado dos sistemas construtivos tendem a ser processos caros (WU; CLAYTON, 2013).

A estimativa de desempenho acústico de sistemas construtivos pode ser realizada a partir de diferentes métodos, como o elasto-dinâmico, de análise modal, de análise estatística de energia ou de elementos finitos (PATRÍCIO, 2018). Atualmente, a norma ISO 12354 (ISO, 2017a; ISO, 2017b) é aceita como referência no meio técnico para embasar as diretrizes de estimativas de desempenho acústico. A normativa apresenta dois métodos de cálculo: o método simplificado, para resultado ponderado, e o método detalhado, para resultados por banda de terço de oitava.

Simulações baseadas em modelos BIM podem tornar mais ágeis os processos de previsão do desempenho acústico na fase de projeto das edificações (WU; CLAYTON, 2013). Diversos softwares atualmente oferecem essa possibilidade, sendo muitos deles utilizados em estudos acadêmicos. Carvalho (2015) em estudo com os softwares Insul® e SONarchitect®, observou resultados uniformes entre as simulações, mas com diferenças de até 6 dB em relação às medições em campo, o que o autor atribui às falhas construtivas não modeladas nas simulações. Remígio *et al.* (2019), em via oposta, observou boa precisão entre os resultados de simulações realizadas com o SONarchitect® e testes em campo, com 92,86% das situações estudadas apresentando diferenças de até 2 dB. Pode-se citar ainda os trabalhos de Takahashi (2016), Rezende *et al.* (2019) e Dümen e Rasmussen (2020) e que utilizaram softwares convencionalmente encontrados no mercado, encontrando resultados satisfatórios.

Cabe destacar o trabalho de Oliveira e Patrício (2017), que apresentam em seu estudo simulações por método de elementos finitos, através da modelagem da resposta vibracional de sistemas de piso não homogêneos, em relação ao ruído de impacto. Sistemas construtivos não homogêneos, a exemplo de sistemas de lajes de vigotas e lajotas, conforme destaca Souza *et al.* (2020), merecem atenção especial neste tipo de análise, pois métodos analíticos de mensuração de desempenho têm se mostrado mais eficientes em sistemas homogêneos, como lajes maciças. É fundamental, contudo, que as diretrizes construtivas modeladas sejam replicadas de forma mais fidedigna possível na execução da obra (DÜMEN; RASMUSSEN, 2020;

TAKAHASHI, 2016). No caso dos sistemas de piso, a modelagem da conexão entre os elementos do sistema e a conexão com os demais sistemas construtivos da edificação deve representar de forma mais fidedigna possível a forma como a qual os sistemas construtivos são executados em campo, já que estes parâmetros influenciam diretamente os resultados da estimativa (OLIVEIRA; PATRICIO, 2017).

Sendo assim, o conhecimento dos processos construtivos de uma edificação é fundamental para análise da previsão de desempenho acústico de forma mais aproximada com a realidade.

2.2.2.4 Normalização

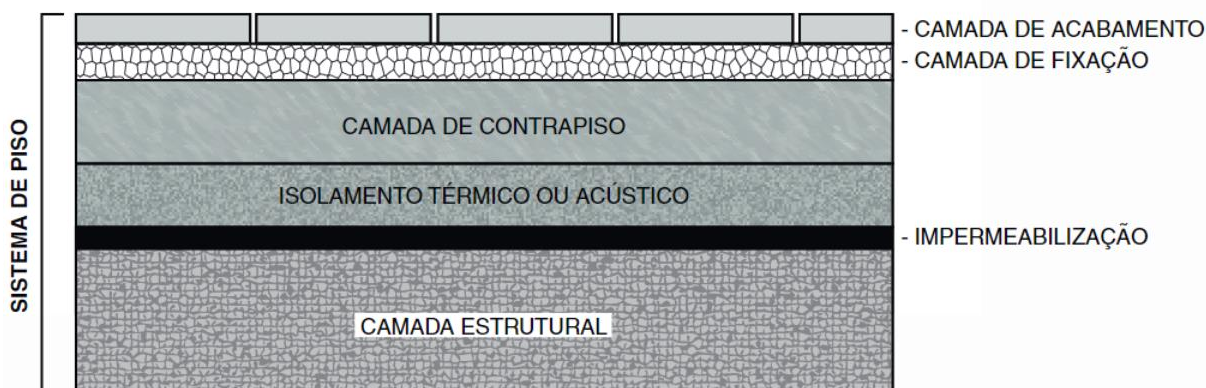
Muitos países ao redor do mundo possuem legislações e normas técnicas que estabelecem diretrizes relacionadas ao isolamento acústico aos sons aéreos e de impacto, o que é necessário, tendo em vista que o isolamento acústico é um requisito fundamental para o conforto e privacidade nas edificações, especialmente as habitacionais (SCHIAVI, 2018).

No Brasil, a introdução de critérios relativos ao desempenho acústico de edificações se deu a partir da entrada em vigor da norma de desempenho de edificações habitacionais, a NBR 15575 (ABNT, 2021a), que contém requisitos aplicáveis aos sistemas de vedação vertical, sistemas de piso, sistemas de cobertura e de instalações (KLIPPEL *et al.*, 2019).

Em uma edificação, as lajes podem compor os sistemas de piso, separando verticalmente os pavimentos, bem como o sistema de cobertura, quando este for constituído por uma laje plana ou inclinada, tanto em edificações de múltiplos andares quando em edificações térreas.

No caso do sistema de piso, definido pela NBR 15575-3 (ABNT, 2021b) como sistema horizontal ou inclinado destinado a atender à função de estrutura, vedação e tráfego, sendo composto por um conjunto de camadas. A Figura 5 apresenta um esquema genérico de sistema de piso, que poderá ser composto pelo conjunto parcial ou total de camadas ilustrado, ou ainda com mais tipos de camadas, como uma camada de revestimento inferior, abaixo da camada estrutural.

Figura 5 – Esquema genérico de um sistema de piso



Fonte: NBR 15575-3 (ABNT, 2021b)

Os requisitos de desempenho pertinentes aos sistemas de piso, que separam unidades residenciais autônomas em diferentes pavimentos, encontram-se na NBR 15575-3 (ABNT, 2021b). Relativamente ao desempenho acústico, os requisitos considerados são o isolamento de ruído aéreo e ruído de impacto entre unidades habitacionais distintas e entre unidades habitacionais e áreas de uso comum e coletivo. A norma de desempenho não estabelece critérios de conforto acústico ou níveis máximos de intensidade sonora admitida dentro de determinado ambiente, nem métodos de quantificar os níveis de ruído no ambiente externo da edificação, temas abordados pela NBR 10152 (ABNT, 2020) e NBR 10151 (ABNT, 2020a), respectivamente

Para avaliação do isolamento ao ruído aéreo, o descritor utilizado pela norma é a diferença padronizada de nível ponderada ($D_{nT,w}$), e para verificação da pressão sonora transmitida por um sistema de piso é o nível de pressão sonora de impacto-padrão ponderado ($L'_{nT,w}$).

A Tabela 1 apresenta os critérios considerados em relação ao ruído aéreo conforme a NBR 15575-3 (ABNT, 2021b).

Tabela 1 – Critérios de diferença padronizada de nível ponderada

Elemento	$D_{nT,w}$ (dB)	Nível de desempenho
Sistema de piso entre unidades habitacionais autônomas, no caso de pelo menos um ambiente ser dormitório	45 a 49	M
	50 a 54	I
	≥ 55	S
Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas de áreas comuns de trânsito eventual, como corredores e escadarias nos pavimentos, bem como em pavimentos distintos Sistema de piso entre unidades habitacionais autônomas, nas situações onde não haja ambiente dormitório	40 a 44	M
	45 a 49	I
	≥ 50	S
Sistema de piso separando unidades habitacionais autônomas de áreas comuns de uso coletivo, para atividades de lazer e esportivas, tais como <i>home theater</i> , salas de ginástica, salão de festas, salão de jogos, banheiros e vestiários coletivos, cozinhas e lavanderias coletivas	45 a 49	M
	50 a 54	I
	≥ 55	S

Fonte: NBR 15575-3 (ABNT, 2021b)

A Tabela 2 contém os critérios relativos ao ruído de impacto.

Tabela 2 – Critérios e nível de pressão sonora de impacto-padrão ponderado

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

Fonte: NBR 15575-3 (ABNT, 2021b)

Em se tratando da aplicação de lajes como integrantes do sistema de cobertura da edificação, a NBR 15575-5 (ABNT, 2021c) atribui ao mesmo o papel de

proporcionar o isolamento de sons aéreos provenientes do meio externo à edificação, bem como o nível de ruído de impacto no caso de coberturas acessíveis de uso coletivo. A seguir, a Tabela 3 apresenta os critérios considerados para o isolamento ao ruído aéreo, que variam de acordo com a localização da edificação, definida de forma subjetiva através do enquadramento em uma das classes de ruído estabelecidas pela norma. Considerando que em áreas residenciais e comerciais os ruídos do meio externo apresentam intensidade na ordem de 55 a 60 dB, a NBR 15575-5 (ABNT, 2021c) estabelece valores relativos ao isolamento acústico dos sistemas construtivos que proporcionem condições adequadas dentro da unidade habitacional. Em áreas próximas a fontes de ruídos específicas, como rodovias e aeroportos, a norma recomenda a realização de estudos específicos relativos às condições locais (CBIC, 2013).

Tabela 3 – Valores mínimos da diferença padronizada de nível ponderada da vedação externa de dormitório

Classe de ruído	Localização da habitação	$D_{2m,n,T,w}$
I	Habitação localizada distante de fontes de ruído intenso de quaisquer naturezas	≥ 20
II	Habitação localizada em áreas sujeitas a situações de ruído não enquadráveis nas classes I e III	≥ 25
III	Habitação sujeita a ruído intenso de meios de transporte e outras naturezas, desde que esteja de acordo com a legislação	≥ 30

Fonte: NBR 15575-5 (ABNT, 2021c)

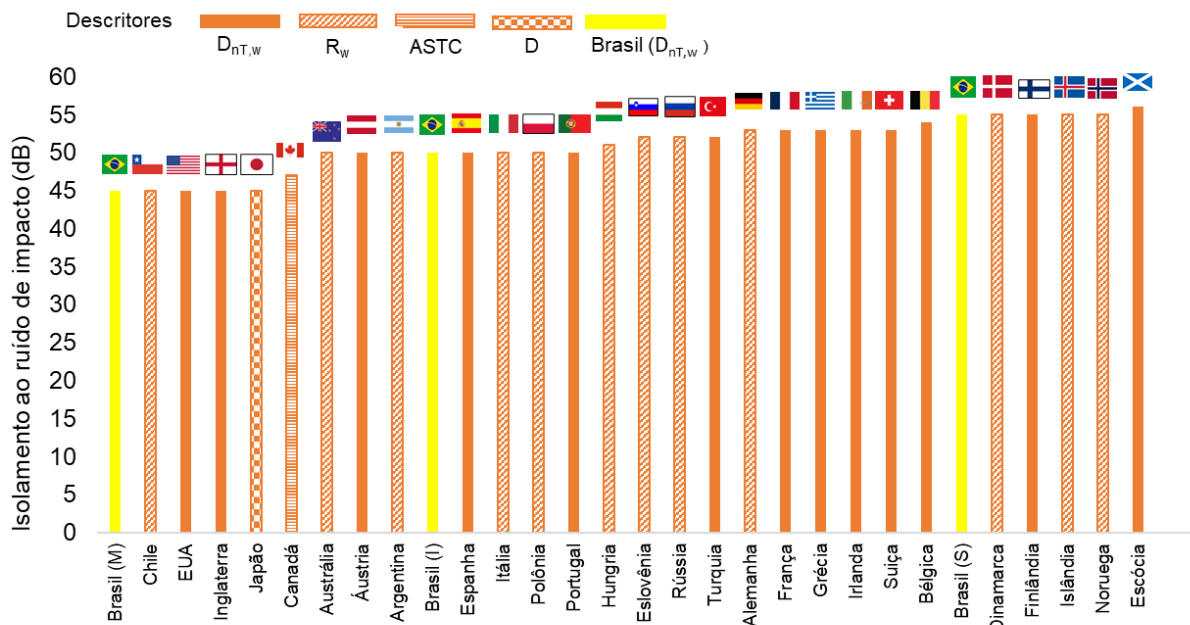
Ainda, sendo a laje parte integrante do sistema de cobertura, esta deve atender à condição relacionada ao nível de pressão sonora de impacto padronizado ponderado apresentada na NBR 15575-5 (ABNT, 2021c), conforme apresenta a Tabela 4

Tabela 5 - Requisitos de isolamento acústico em diferentes países

Requisitos						
País	Ruído aéreo		Ruído de impacto		Norma técnica	
	Crítério	Valor (dB)	Crítério	Valor (dB)		
 Austrália	$R_w + C_{tr}$	> 50	$L_{n,w} + C_I$	≤ 62	NCC/AAAC:2016	
 Áustria	D_{nTw}	$\geq 50/55$	$L_{nT,w}$	≤ 48	OIB 8115-5:2012	
 Alemanha	R_w	≥ 53	$L_{n,w}$	≤ 53	DIN 4109-01:2018	
 Argentina	R_w	≥ 50	$L_{n,w}$	≤ 53	IRAM 4044:2015	
 Bélgica	D_{nTw}	≥ 54	$L_{nT,w}$	≤ 58	NBN S01-400-1:2019	
 Brasil	$D_{nT,w}$	≥ 45	$L'_{nT,w}$	≤ 80	NBR 15575:2021	
 Canadá	ASTC	≥ 47	$FIIC$	≥ 50	NBCC:2015	
 Chile	R_A/R'_A	≥ 45	$L'_{nT,w}$	≤ 75	OGUC: 4-1:2016	
 Dinamarca	R_w	≥ 55	$L'_{n,w}$	≤ 53	DS 490:2018	
 Escócia	$D_{nT,w}$	≥ 56	$L'_{nT,w}$	≤ 56	BSTH-5:2019	
 Espanha	$D_{nT,w}$	≥ 50	$L'_{nT,w}$	≤ 65	CTE DB-HR:2009	
 Eslovênia	R_w	≥ 52	$L_{n,w}$	≤ 58	TSG-1-005:2012	
 EUA	$D_{nT,w}$	≥ 45	$L'_{nT,w}$	≤ 65	ASTM E492-09:2017	
 Finlândia	$D_{nT,w}$	≥ 55	$L_{n,w}$	≤ 53	SFS 5907:2004	
 França	$D_{nT,w}$	≥ 53	$L'_{nT,w}$	≤ 58	CNB nº6:2017	
 Grécia	$D_{nT,w}$	≥ 53	$L'_{nT,w}$	≤ 57	MD 2046/304/89	
 Hungria	$R_w + C$	≥ 51	$L_{n,w}$	≤ 55	MSZ 15601-1:2007	
 Inglaterra	$D_{nT,w} + C_{tr}$	≥ 45	$L_{nT,w}$	≤ 62	Build. Regulat. 2015	
 Irlanda	$D_{nT,w}$	≥ 53	$L'_{nT,w}$	≤ 58	Build. Regulat. 2015	
 Islândia	R_w	≥ 55	$L_{n,w}$	≤ 53	IST 45:2016	
 Itália	R_w	≥ 50	$L_{n,w}$	≤ 63	UNI 11367:2010	
 Japão	D	≥ 45	L	≤ 55	JIS 1418:2019	
 Noruega	R_w	≥ 55	$L_{n,w}$	≤ 53	NS 8175:2019	
 Polônia	$R_w + C$	≥ 50	$L_{n,w}$	≤ 55	PN-B-02151-5:2017	
 Portugal	$D_{nT,w}$	≥ 50	$L'_{nT,w}$	≤ 60	Decreto-Lei 96/2008	
 Rússia	R_w	≥ 52	$L_{n,w}$	≤ 60	SP 51.13330.2011	
 Suíça	$D_{nT,w} + C$	≥ 53	$L'_{nT,w}$	≤ 58	SAI 181:2006	
 Turquia	$D_{nT,w} + C$	≥ 52	$L'_{nT,w}$	≤ 54	Noise Prot. - 2017	

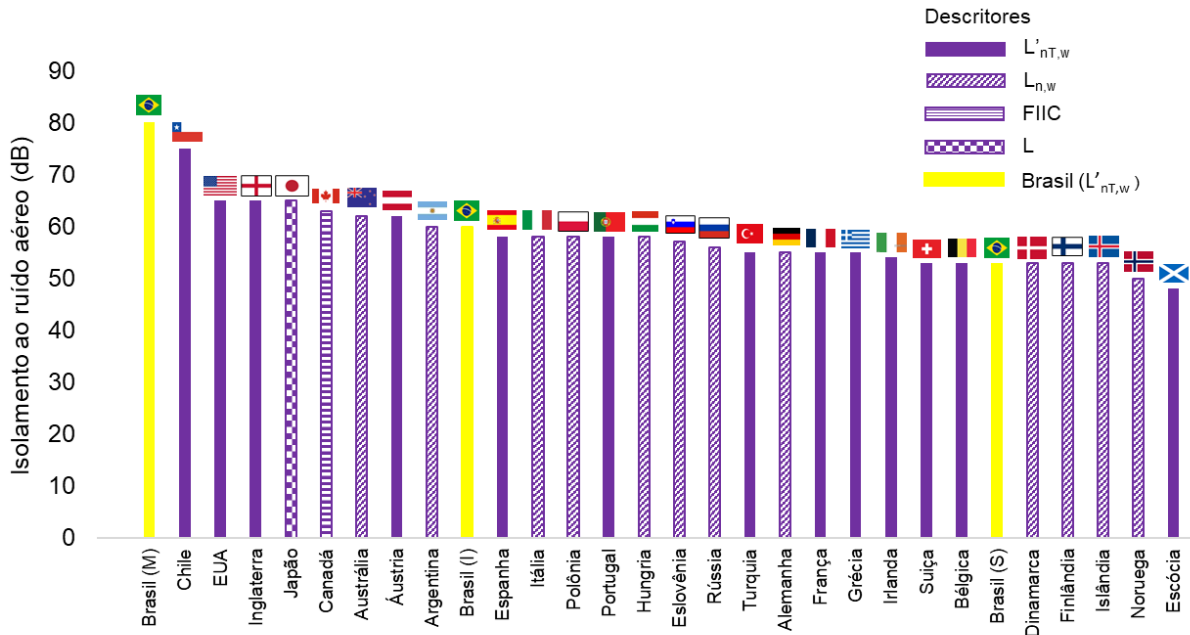
Fonte: Adaptado de Alonso *et al.* (2020), Rasmussen (2019b) e normas citadas na tabela

Figura 7 – Isolamento ao ruído aéreo entre unidades habitacionais exigido em diferentes países



Fonte: Adaptado pelo autor de Alonso *et al.* (2020) e Rasmussen (2019b)

Figura 8 – Níveis de pressão sonora de impacto entre unidades habitacionais exigido em diferentes países



Fonte: Adaptado pelo autor de Alonso *et al.* (2020) e Rasmussen (2019b)

Embora tenham ficado estagnados por várias décadas, as exigências relacionadas ao desempenho acústico das edificações ficaram mais rígidas (ALONSO *et al.*, 2020), principalmente nos países europeus (RASMUSSEN, 2010), ainda que seja perceptível a ausência de padronização entre os requisitos estabelecidos (MACHIMBARRENA; RASMUSSEN, 2016). Rasmussen e Rindel (2010) apontam que muitos países europeus consideram como parâmetro de avaliação o descritor relativo à medição *in loco* ($D_{nT,w}$); outros consideram o índice laboratorial (R_w). Ainda, algumas normas incluem os termos de adaptação de espectro C (ruído rosa) e C_{tr} (ruído de tráfego rodoviário) para que diferentes espectros de ruído sejam considerados (ALONSO *et al.*, 2020). Para Rasmussen e Rindel (2010), os métodos de avaliação de desempenho acústico desenvolvidos nas últimas décadas se tornaram mais diversos para considerar todos os tipos de sistemas construtivos, tanto leves como pesados. Os descritores considerados pela maioria dos regulamentos técnicos provêm das normas ISO 717-1 (ABNT, 2021e), ISO 717-2 (ABNT, 2022), NBR ISO 16283-1 (ABNT, 2018) e NBR ISO 16283-2 (ABNT, 2021d), o que, de forma equivocada para Rasmussen (2019) permite uma grande variedade de descritores, o que é ampliado pelo fato de alguns países considerarem descritores adicionais, ou ainda variações dos descritores considerados nas normas ISO. De forma geral, na Europa, Ásia e América do Sul são consideradas as diretrizes das normas ISO, enquanto que na América do Norte são utilizados os padrões ASTM (HOELLER, 2018).

Na América do Sul é perceptível a ausência de normatização pertinente. Mesmo países com alta densidade populacional, a exemplo de Peru, Colômbia e Bolívia, que concentram 21,5% da população do continente, não têm qualquer legislação relativa ao tema. Outros países possuem normas técnicas, a exemplo da Argentina, onde os requisitos, apesar de existirem, não são obrigatórios; no Brasil e no Chile, ainda que obrigatórios, são considerados brandos quando comparados aos países do hemisfério norte (MACHIMBARRENA; RASMUSSEN, 2016; ALONSO *et al.*, 2020).

Uma das ferramentas de análise do desempenho acústico é a estimativa teórica, e o Anexo L do EN 15037-1 (EN, 2008) fornece diretrizes para a estimar o isolamento acústico dos sistemas de lajes de vigotas e lajotas, quando da ausência de resultados provenientes de ensaios experimentais em laboratório.

Em se tratando de ruídos aéreos, a capacidade de isolamento sonoro do sistema de piso pode se estimada a partir da massa superficial do sistema, através da equação:

$$R_w = 40 \log (M_R) - 56 + \frac{3}{8} \times \left(\frac{M_R}{h_t} \right) \quad (1)$$

Sendo R_w o índice de redução sonora ponderado, em dB; M_R a massa do sistema de piso, em kgf/m²; e h_t a espessura do sistema de piso, em cm, sem levar em consideração as camadas de acabamento e revestimento, bem como de contrapiso flutuantes se houver.

Para estimar o isolamento ao ruído de impacto, a normativa prescreve a aplicação das equações a seguir, que variam de acordo com o tipo de elemento de enchimento (lajota) utilizado.

Para lajotas vazadas (de cerâmica, concreto, EPS ou outros materiais):

$$L_{n,w} = 170 - 40 \log (M_{ep}) \quad (2)$$

Para lajotas maciças de concreto:

$$L_{n,w} = 165 - 40 \log (M_R) \quad (3)$$

Para sistemas de piso com camada de acabamento composta por tipo de piso pesado (como ladrilhos de concreto) ou contrapiso flutuante:

$$L_{n,w} = 170 - 40 \log (M_{ep} + M_s) \quad (4)$$

Para sistemas de piso com contrapiso flutuante a partir de filme plástico:

$$L_{n,w} = 170 - 40 \log (M_{ep} + M_s) \quad (5)$$

Para sistemas de piso com contrapiso flutuante com camada resiliente (manta acústica):

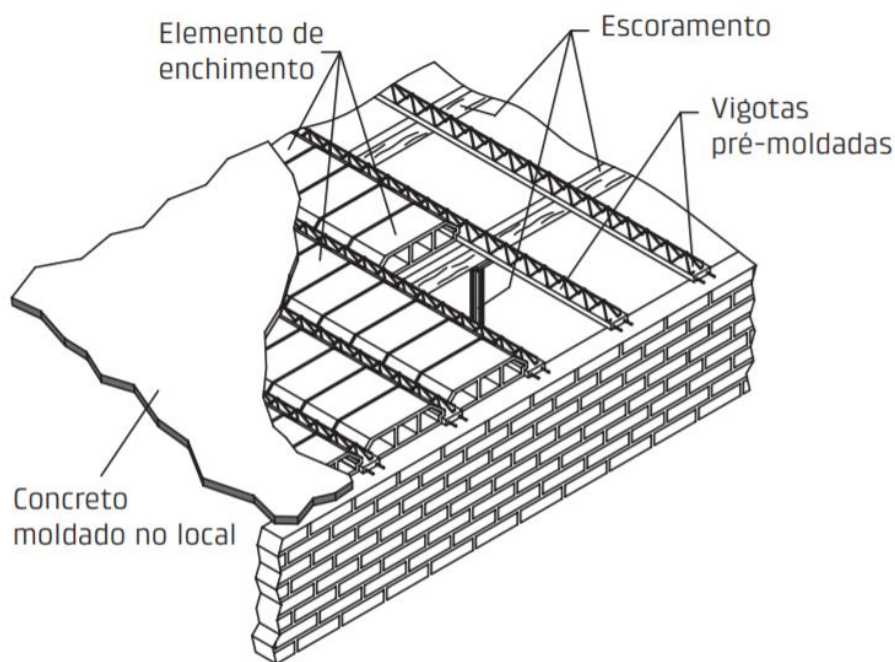
$$L_{n,w} = L_{n,w \text{ floor}} - \Delta L_w \quad (6)$$

Sendo M_{ep} a massa equivalente do sistema de piso, em kgf/m²; M_R a massa do sistema de piso, em kgf/m²; M_s o peso da camada de acabamento do sistema de piso, ou do contrapiso flutuante, em kgf/m²; h a espessura da lajota vazada, em cm; H a espessura total do sistema de piso, em cm; e ΔL_w a redução ponderada do nível de ruído de impacto proporcionada pela camada de contrapiso flutuante, em dB, assumindo o intervalo de $5 \text{ dB} < \Delta L_w \leq 35 \text{ dB}$ proveniente de ensaio experimental ou calculado conforme o procedimento descrito na ISO 12354-2 (ISO, 2017b).

2.2 LAJES NERVURADAS DE VIGOTAS PRÉ-FABRICADAS E ELEMENTOS INERTES DE ENCHIMENTO

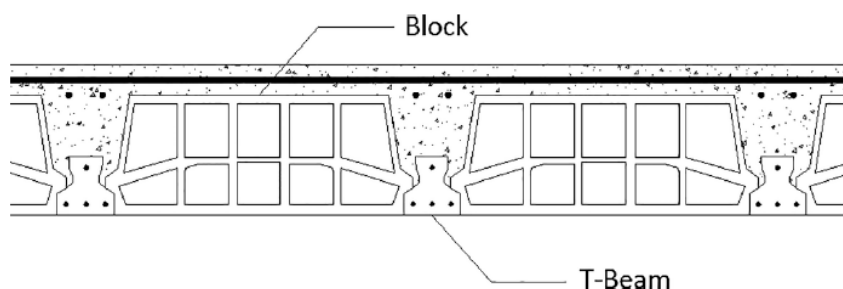
O sistema de lajes pré-fabricadas de vigotas e lajotas consiste em elementos pré-fabricados de concreto dispostos paralelamente na direção longitudinal da laje, sendo separados por elementos de enchimento que podem ser blocos vazados de cerâmica ou outros materiais inertes, e uma capa complementar de concreto moldada no local que é lançada por sobre o conjunto de vigotas e lajotas (DEMERTZI *et al.*, 2020; EL DEBS, 2017), além de armaduras complementares (ABNT, 2014b), conforme ilustrado nas Figuras Figura 9 e Figura 10.

Figura 9 – Esquema construtivo de lajes formadas por vigotas e lajotas



Fonte: (EL DEBS, 2017, pág.327).

Figura 10 – Seção transversal típica de sistema de laje de vigotas e lajotas

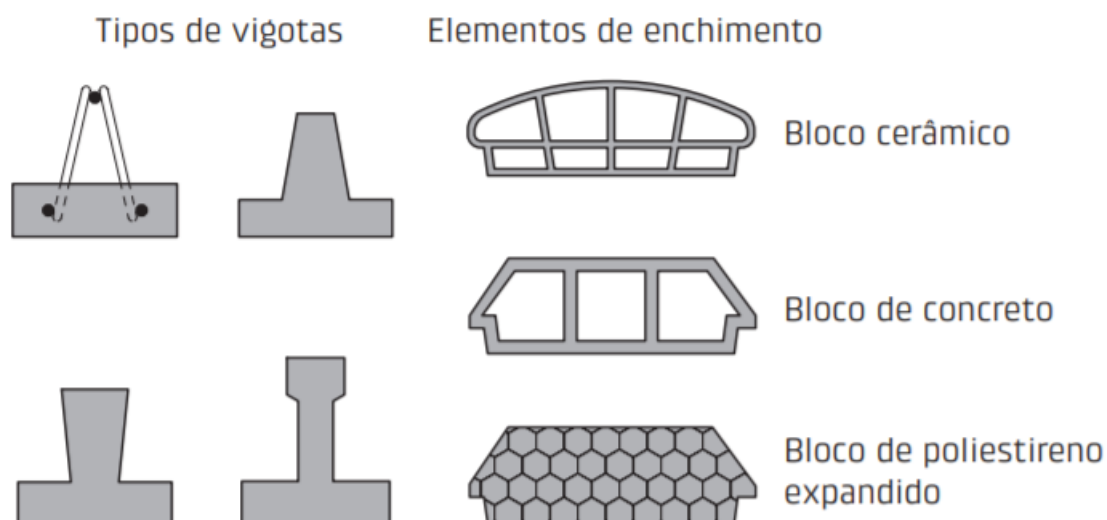


Fonte: (DEMERTZI *et al.*, 2020, pág. 239)

No Brasil, a NBR 14859-1 (ABNT, 2016a) define as lajes pré-fabricadas como sistemas construtivos estruturais compostos por elementos estruturais pré-fabricados, responsáveis por resistir aos esforços aos quais o sistema construtivo é solicitado, elementos inertes de enchimento, armaduras e concreto complementares. Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014b), as lajes nervuradas podem ser totalmente moldadas no local ou constituídas por nervuras pré-moldadas ou pré-fabricadas, que concentrem as zonas tracionadas e podem ser espaçadas por elementos inertes.

Nacionalmente, estes sistemas de lajes pré-fabricadas são compostos, majoritariamente, por vigotas de concreto armado ou protendido e elementos de enchimento vazados de cerâmica ou de EPS, ou ainda de concreto (Figura 11).

Figura 11 – Tipos de vigotas e elementos de enchimento mais utilizados no Brasil



Fonte: (EL DEBS, 2017, pág. 325).

Internacionalmente, a EN 15037-1 (EN, 2008) define as lajes pré-fabricadas de vigotas e lajotas como sistemas de piso constituídos pela combinação de vigotas dispostas paralelamente, separadas entre si por blocos inertes, não resistentes, semi-resistentes ou resistentes, que podem ou não ser complementados com uma capa de concreto moldada in loco, que constitua a camada de compressão do sistema de laje. A normativa europeia prevê a possibilidade de quatro sistemas distintos de lajes de vigotas e lajotas, cuja diferença reside na função resistente de cada um de seus elementos constituintes:

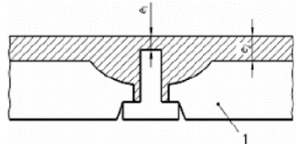
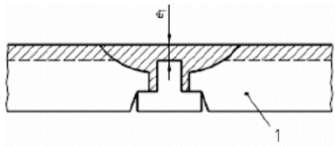
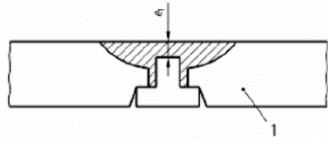
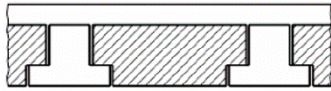
- Sistema de piso com capa (cobertura) complementar de concreto moldada no local, que deve necessariamente constituir a camada de compressão do

sistema. Nesse caso, é possível utilizar lajotas não resistentes ou semi-resistentes (que podem contribuir com a resistência mecânica final do sistema);

- Sistema de piso com camada (cobertura) de compressão composta, formada pelo concreto moldado no local que preenche tanto a nervura existente entre as vigotas e as lajotas como parte do topo das lajotas, sendo necessário, neste caso, utilizar blocos semi-resistentes e preencher com argamassa adequada as juntas entre as lajotas;
- Sistema de piso com cobertura parcial, com a cobertura consistindo no concreto moldado no local que preencha o espaço apenas da nervura formada pelas vigotas e as lajotas, sem aplicação de concreto sobre as lajotas. Neste caso, devem ser utilizadas lajotas do tipo semi-resistente ou resistente;
- Sistema de piso com vigotas autoportantes, onde as vigotas por si só fornecem a resistência ao sistema de piso acabado, sendo necessária a utilização de blocos semi-resistentes ou resistentes.

A Tabela 6 resume as principais características de cada tipo de sistema de laje previsto no EN 15037-1 (EN, 2008).

Tabela 6 – Sistemas de laje de vigotas e lajotas previstos no EN 15037-1 (EN, 2008)

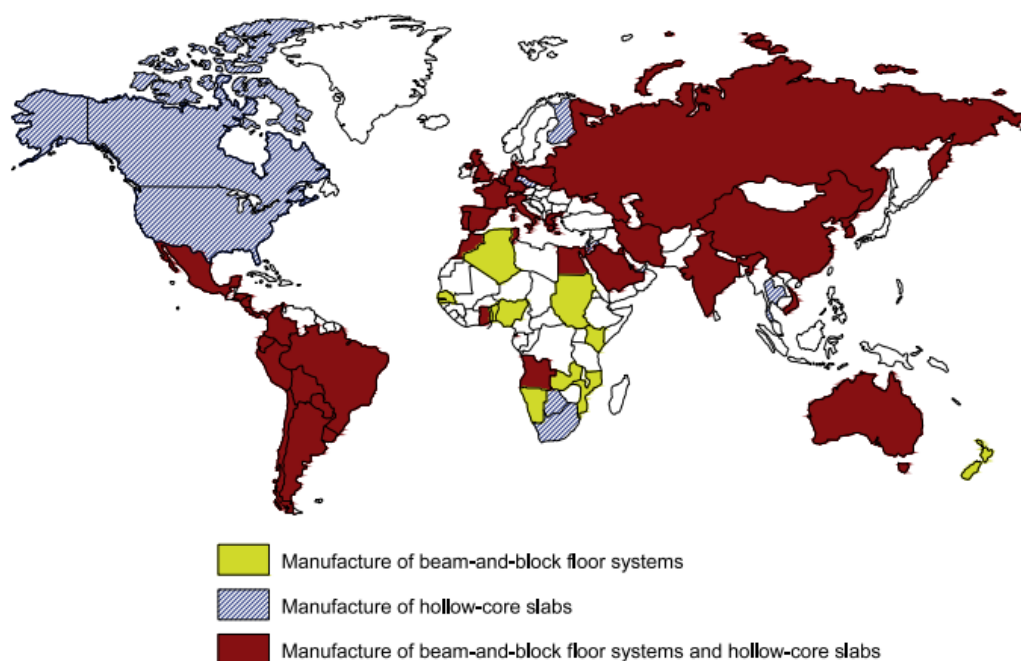
Tipo de sistema	Tipo de lajota permitido	Ilustração
Sistema de piso com cobertura complementar de concreto	• Não resistente • Semi-resistente • Resistente	
Sistema de piso com cobertura de concreto composta	• Semi-resistente • Resistente	
Sistema de piso com cobertura de concreto parcial	• Semi-resistente • Resistente	
Sistema de piso com vigotas autoportantes	• Semi-resistente • Resistente	

Fonte: Adaptado pelo autor de EN 15037-1 (EN, 2008).

Em se tratando especificamente de lajes de vigotas protendidas, as mesmas constituem uma das primeiras aplicações de concreto protendido (RIBAS; CLADERA, 2013). A primeira patente de concreto protendido data de 1928 (SHUSHKEWICH, 2012), e a patente do primeiro sistema de piso compostos por vigotas não protendidas e elementos inertes de 1935 (RUTTEN, 1935). Foi a partir da junção dessas tecnologias que surgiu o sistema de lajes de vigotas protendidas e elementos inertes de enchimento (RIBAS; CLADERA, 2013).

As lajes pré-fabricadas de vigotas protendidas e lajotas apresentam características distintas em relação à outras soluções construtivas, proporcionando uma solução construtiva com rigidez satisfatória, rápida execução e nível razoável de isolamento térmico e acústico (DEMERTZI *et al.*, 2020). Tais vantagens fazem deste sistema uma solução construtiva extensamente utilizada no Brasil (EL DEBS, 2017; HAAS *et al.*, 2022) e em muitos outros países (RIBAS; CLADERA, 2013).

Figura 12 – Países onde o sistema construtivo vigota e lajota cerâmica está presente



Fonte: (RIBAS; CLADERA, 2013, pág. 429).

No Brasil, atualmente a produção média do sistema de lajes com vigotas protendidas é de 900.000 m² mensais (SINAPROCIM, 2021). A título de comparação, a produção habitacional no Brasil através do programa Casa Verde Amarela no 2º trimestre de 2021 foi de 28.723 unidades (CBIC, 2021). Considerando a área mínima

de 39,00 m², estabelecida para unidades habitacionais em empreendimentos verticais através da Portaria nº 959 (BRASIL, 2021), as unidades produzidas no período representariam 925.197 m² de área construída, ou seja, equivalente a pouco mais de um mês de produção de lajes protendidas no Brasil.

O processo de execução deste sistema de laje consiste, resumidamente, na montagem do escoramento (quando necessário), colocação das vigotas e lajotas por sobre a estrutura, montagem das armaduras complementares (armadura de distribuição e armadura negativa, se necessário) e concretagem da capa complementar de concreto, que deve seguir as prescrições da NBR 14931 (ABNT, 2004).

2.2.1 Vigotas pré-fabricadas

Ainda que possam ser moldadas no local, ou pré-moldadas (moldadas fora do local de utilização definitiva na estrutura), as vigotas normalmente são pré-fabricadas, ou seja, produzidas em indústrias sob rigorosos controles de qualidade (RIBAS; CLADERA, 2013). A NBR 14859-1 (ABNT, 2016a) define as vigotas como elementos estruturais de concreto, produzido de acordo com as prescrições da NBR 12655 (ABNT, 2015), sendo o concreto utilizado de classe mínima C20. A NBR 14859-1 (ABNT, 2016a) considera a utilização de três tipos distintos de vigotas pré-fabricadas, conforme demonstra a Tabela 7.

Tabela 7 – Tipos de vigotas segundo a NBR 14859-1 (ABNT, 2016a)

Tipo de vigota	Seção transversal	Ilustração
Comum (VC)	“T” invertido	
Protendida (VP)	“T” invertido	
Trelaçada (VT)	Retangular com armadura trelaçada eletrossoldada	

Fonte: Adaptado pelo autor de NBR 14859-1 (ABNT, 2016a)

É a NBR 14859-1 (ABNT, 2016a) que contém as prescrições gerais relativas às vigotas pré-fabricadas, como tolerâncias dimensionais, especificações relativas à características mínimas a serem atendidas pelo aço utilizado nas lajes pré-fabricadas (Tabela 8) e orientações relativas à inspeção, inclusive por ensaios, indicando o método prescrito pela NBR 15522 (ABNT, 2007) para avaliação do comportamento mecânico destes elementos. Esta norma contém, além das orientações relativas aos procedimentos dos ensaios de momento fletor positivo, negativo e esforço cortante, as recomendações para definição dos carregamentos atuantes durante as etapas de montagem e concretagem, de modo a avaliar seu comportamento durante tais etapas de utilização do material.

Tabela 8 – Aço para utilização em lajes pré-fabricadas

Armadura	Norma técnica relacionada	Ø nominal mínimo (mm)
Barras/fios de aço tipo CA-50 e CA-60	NBR 7480 (ABNT, 2007)	6,3 (CA-50) 4,2 (CA-60)
Tela de aço eletrossoldada	NBR 7481 (ABNT, 1990)	3,4
Fios de aço para protensão	NBR 7482 (ABNT, 2020)	3,0
Armadura treliçada eletrossoldada	NBR 14859-3 (ABNT, 2016)	Banzo superior: 6,0 Banzo inferior: 4,2 Diagonal: 3,4

Fonte: Adaptado pelo autor de NBR 14859-1 (ABNT, 2016a)

Em relação às dimensões, a NBR 14859-1 (ABNT, 2016a) prescreve larguras mínimas para as vigotas, sendo os valores iguais a 80 mm para vigota comum (VC), 100 mm para vigota protendida (VP) e 130 mm para vigota treliçada (VT). A NBR 6118 (ABNT, 2014b), por sua vez, ao tratar de lajes nervuradas, especifica que as nervuras não podem ter largura inferior a 50 mm, salientando também que, nervuras com espessura inferior a 80 mm não podem conter armadura de compressão.

No tocante à durabilidade, a NBR 9062 (ABNT, 2017) estabelece que devem se aplicar as disposições da NBR 6118 (ABNT, 2014b) no que tange aos cobrimentos nominais e características do concreto, deixando em aberto a possibilidade de comprovação da durabilidade dos elementos também por meio de ensaios laboratoriais. Segundo a normativa, na ausência de dados experimentais, é permitida a redução dos cobrimentos nominais previstos na NBR 6118 (ABNT, 2014b) desde que o concreto utilizado proporcione baixa porosidade e permeabilidade, estabelecendo como parâmetros um $f_{ck} \geq 40$ MPa e relação água/cimento menor ou igual a 0,45. Ainda, a normativa aponta para a necessidade de atendimento concomitante às exigências de resistência ao fogo, através das disposições das normas NBR 14432 (ABNT, 2001) e NBR 15200 (ABNT, 2015b).

Normalmente, os sistemas de lajes nervuradas de vigotas e lajotas são projetados como lajes unidirecionais, o que significa que transferem os carregamentos a que são submetidos em apenas uma direção, a direção das vigotas (DEMERTZI *et al.*, 2020). A distância entre as vigotas, que são dispostas paralelamente umas às

outras, é chamada de intereixo pela NBR 14859-1 (ABNT, 2016a), sendo os valores mínimos a serem adotados no projeto e especificação desses sistemas de laje oriundos das dimensões mínimas para as vigotas, através da NBR 14859-1 (ABNT, 2016a), e das lajotas, por meio da NBR 14859-2 (ABNT, 2016b).

Tabela 9 – Inereixos mínimos segundo a NBR 14859-1 (ABNT, 2016a) e NBR 14859-2 (ABNT, 2016b)

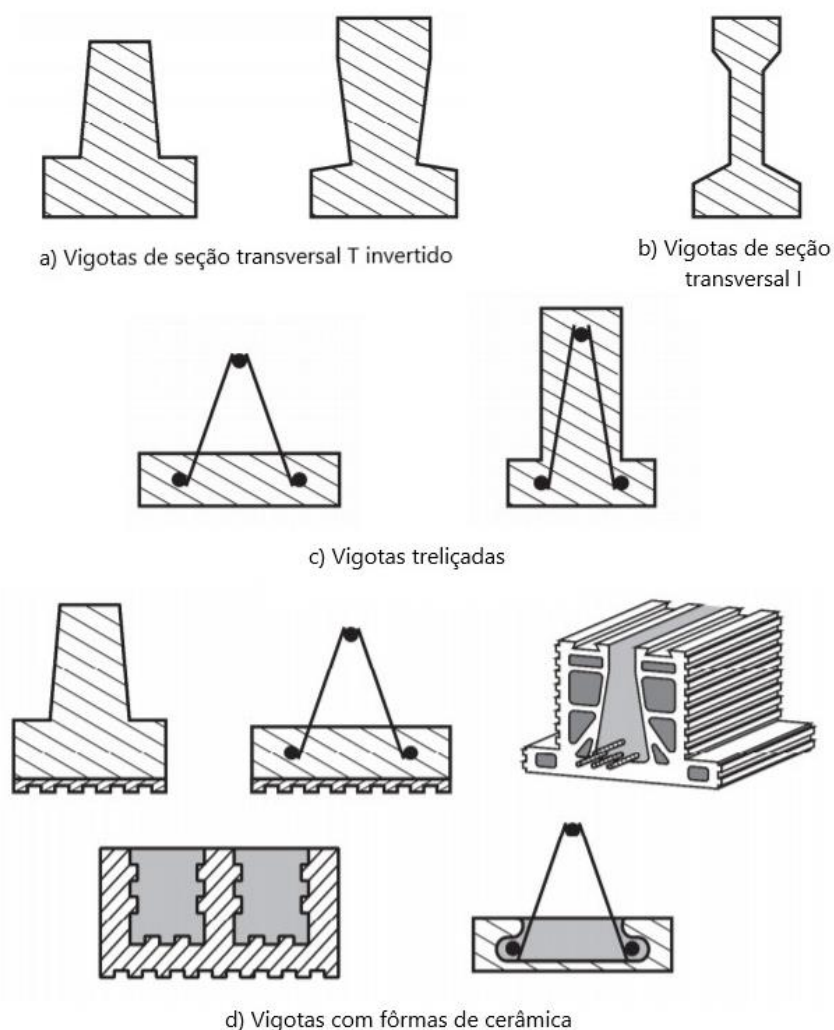
Tipo de vigota	Intereixo mínimo (cm)
Vigota comum (VP)	35,0
Vigota protendida (VP)	37,0
Vigota treliçada (VT)	40,0

Fonte: Adaptado pelo autor de NBR 14859-1 (ABNT, 2016a) e NBR 14859-2 (ABNT, 2016b).

As normativas supracitadas permitem intereixos maiores, variando de acordo com as dimensões prescritas para as lajotas.

Internacionalmente, a norma europeia EN 15037-1 (EN, 2008) trata especificamente das vigotas, a qual define como elementos estruturais lineares, de pequena seção transversal, constituídos de concreto armado ou protendido, que podem ser total ou parcialmente pré-fabricadas. Este documento técnico classifica os elementos em vigotas autoportantes, podendo ser de concreto armado ou protendido e que forneçam a resistência final ao sistema de piso independentemente de qualquer outra parte constituinte do sistema, e vigotas não autoportantes, sendo estas também de concreto armado ou protendido, mas que conferem a resistência final ao sistema apenas quando em conjunto com a capa complementar de concreto moldada in loco. Ainda, a normativa demonstra exemplos de modelos de vigotas de seção I, de seção T invertido, inclusive treliçadas, e vigotas complementadas por fôrmas adicionais, que podem ser de material cerâmico (Figura 13), sendo algumas não descritas pela NBR 14859-1 (ABNT, 2016a).

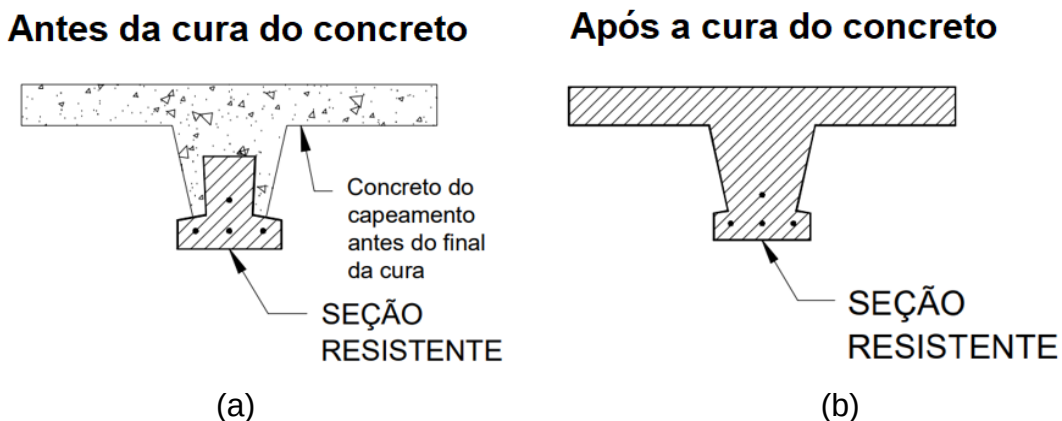
Figura 13 – Tipos de vigotas segundo o EN 15037-1 (EN, 2008)



Fonte: Adaptado pelo autor de EN 15037-1 (EN, 2008).

Durante a etapa de montagem, concretagem e cura, ou seja, até a cura da capa complementar de concreto, as vigotas são os únicos elementos resistentes da laje, suportando todas as cargas inerentes aos materiais (vigotas, elementos de enchimento, armaduras e instalações complementares, concreto da capa complementar) bem como a carga acidental inerente aos trabalhos de lançamento e adensamento do concreto da capa complementar (Figura 14a). Após a cura do concreto da capa complementar, a seção transversal resistente da laje passa a ser composta por nervuras formadas pelas vigotas e capa de concreto (Figura 14b).

Figura 14 – Seção transversal da laje antes (a) e após (b) o período de cura



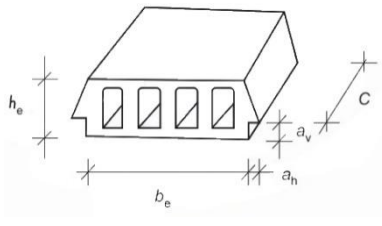
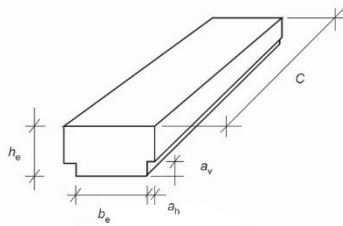
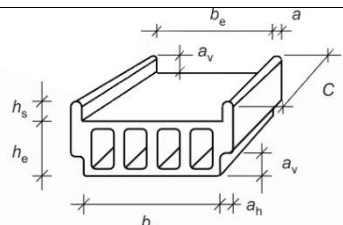
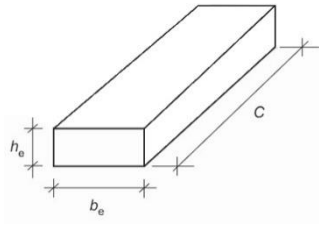
Fonte: Adaptado pelo autor de Tatu Pré-Moldados (2017)

Apesar de serem fabricadas com equipamentos muito similares aos utilizados na produção de lajes protendidas alveolares, estas que possuem inércia e momentos fletores resistentes substancialmente maiores, e a infraestrutura necessária para o transporte e execução do sistema de lajes de vigotas e lajotas é mais simples e demanda menor custo. (RIBAS; CLADERA, 2013).

2.2.2 Elementos inertes de enchimento

A normativa brasileira que trata de elementos de enchimento para lajes pré-fabricadas é a NBR 14859-2 (ABNT, 2016b), que os define como elementos pré-fabricados sem função estrutural, cujo papel está em reduzir o volume de concreto e consequentemente o peso próprio da laje, através da ocupação volumétrica de espaço preenchido por concreto em lajes maciças, por exemplo, além de servir como fôrma para o concreto complementar. A referida norma categoriza os elementos de enchimento em diferentes tipos, conforme exposto na Tabela 10.

Tabela 10 – Elementos segundo a NBR 14859-2 (ABNT, 2016b)

Tipo	Material	Modo de ruptura	Ilustração
Lajota cerâmica (LC)	Cerâmica	Frágil	
Lajota de EPS (LEPS)	Poliestireno expandido (EPS)	Dútil	
Suporte cerâmico (SC)	Cerâmica	Frágil	
Caixão perdido de EPS (CPEPS)	Poliestireno expandido (EPS)	Dútil	
Caixão perdido de concreto celular autoclavado (CPCCA)	Concreto celular autoclavado	Frágil	

Fonte: Adaptado pelo autor de NBR 14859-2 (ABNT, 2016b).

Ainda que ao classificar os elementos de enchimento em tipos a NBR 14859-2 (ABNT, 2016b) correlacione determinado material constituinte para cada tipo, a norma cita, na definição relacionada ao termo elemento de enchimento, que estes podem ser constituídos por materiais inertes diversos, abrindo espaço para utilização de outros materiais, como concreto, concreto celular autoclavado, para citar alguns exemplos, ou até a mistura de materiais inertes distintos.

Os elementos de enchimento são responsáveis por, além de separar as vigotas entre si, servir como fôrma para o concreto da capa complementar de concreto moldada no local, desde o seu lançamento até o final do período de cura (OLIVEIRA *et al.*, 2021a). Eles substituem parte do concreto presentes em sistema de lajes

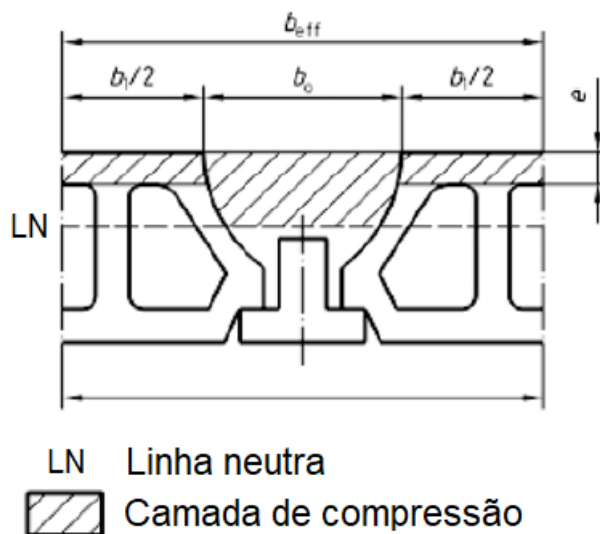
maciças, abaixo da linha neutra, região tracionada da seção transversal (OLIVEIRA *et al.*, 2021a; OLIVEIRA; ZINI; PAGNUSSAT, 2014), o que resulta em diminuição de peso próprio (DEMERTZI *et al.*, 2020; OLIVEIRA *et al.*, 2021a)

Ainda que na NBR 14859-2 (ABNT, 2016b) os elementos inertes de enchimento sejam tratados como componentes que não contribuem para a resistência mecânica final do sistema, independentemente do material constituinte, estes devem resistir à uma carga mínima de ruptura à flexão de 0,7 kN, no caso de componentes de 60 a 80 mm de espessura, e de 1,0 kN, em se tratando de elementos com espessura superior a 80 mm. Seguindo outra via, Schiavi; Tarizzo e Astolfi (2010) consideram que os elementos de enchimento podem contribuir para a distribuição de carregamentos estáticos, desde que estejam acopladas rigidamente às vigotas.

A nível internacional, além da EN 15037-1 (EN, 2008), integram o conjunto de normas relativas ao sistema de laje de vigotas e lajotas o EN 15037-2 (EN, 2011), EN 15037-3 (EN, 2011b), EN 15037-4 (EN, 2013), que se referem aos elementos de enchimento de concreto, de cerâmica, e de EPS, respectivamente. Ainda, o EN 15037-5 (EN, 2013b) trata de elementos leves que exerçam no sistema de laje papel apenas de fôrma permanente para a concretagem da laje, sendo possível que estes materiais sejam constituídos por diversos materiais, como madeira, polímeros diversos, fibra de vidro, entre outros.

Diferentemente da normativa brasileira NBR 14859 (ABNT, 2016a), o EN 15037-1 (EN, 2008) e suas demais partes consideram a possibilidade da lajota contribuir para a resistência mecânica final do sistema de laje, ou seja, não apenas durante as etapas de montagem e concretagem, mas também após a finalização de sua execução. Nesse contexto, a normativa europeia classifica as lajotas segundo seu papel no sistema de laje em termos de desempenho mecânico. Estes elementos podem ser blocos não resistentes, cuja única exigência em termos de resistência mecânica consiste em oferecer suporte para os trabalhos de concretagem da laje, não contribuindo no desempenho mecânico final do sistema; blocos semi-resistentes, que, segundo a normativa, podem contribuir para a resistência final do sistema de laje, não podendo, entretanto, constituir a camada de compressão do sistema finalizado, ou seja, necessitam aplicação de uma camada (capa) complementar de concreto; e blocos resistentes, que em conjunto com vigotas autoportantes, constituem a camada estrutural fina do sistema, sendo necessário que a flange superior da lajota seja capaz de exercer a função de camada de compressão do sistema (Figura 15).

Figura 15 – Sistema de laje com cobertura de concreto composta



Fonte: Adaptado pelo autor de EN 15037-1 (EN, 2008).

No Brasil os elementos de enchimento mais comumente utilizados são de cerâmica e poliestireno expandido (EPS) (OLIVEIRA *et al.*, 2021a).

Figura 16 - Modelos de lajotas cerâmicas



Fonte: Adaptado pelo autor de Construrohr (2021).

2.2.3 Capa complementar de concreto

Conforme exposto anteriormente, além das vigotas e elementos de enchimento, este tipo de sistema de laje pode ter como elemento constituinte uma capa complementar de concreto, moldada no local, que constitui uma camada de compressão na seção transversal da laje, responsável pela distribuição dos esforços que atuam sobre a mesa, contribuindo para sua resistência final à flexão e demais esforços e assegurando o nivelamento da face superior do sistema (BARBARESI; SEMPRINI, 2013). É a capa de concreto que conecta as nervuras entre si, tornando o

conjunto de elementos pré-fabricados um conjunto monolítico (CHIK; KAMIL; YUSOFF, 2018; SEMPRINI *et al.*, 2010).

Em relação às características relativas a capa de concreto nestes sistemas de lajes, há recomendações em normas nacionais e internacionais. Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014b), a espessura da mesa em lajes nervuradas deve ser maior ou igual a $1/15$ da distância entre as faces das nervuras, respeitando um valor mínimo de 40 mm, para os casos em que não existem tubulações embutidas nesta capa de concreto. Cabe destacar que, apesar de ser comum embutir na capa complementar de concreto instalações complementares, como elétricas e hidrossanitárias (SEMPRINI *et al.*, 2010), as disposições do item 6.19.1 da NBR 5626 (ABNT, 2020b) não permitem o confinamento de instalações hidrossanitárias em elementos estruturais, de modo que as instalações sejam submetidas aos esforços provenientes dos mesmos. Ainda segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014b), quando existirem tubulações embutidas de diâmetro de até 10 mm, a espessura mínima da mesa de uma laje nervurada deve ser de 50 mm. Para tubulações com diâmetro maior que 10 mm, a mesa deve ter uma espessura mínima de 40 mm acrescidos do diâmetro da tubulação, ou 40 mm acrescidos de $2x$ o diâmetro das tubulações, no caso de haverem cruzamento dessas tubulações.

Ainda em relação à espessura da camada de compressão nas lajes, a NBR 9062 (ABNT, 2017) prescreve que a espessura da capa complementar de concreto em lajes pré-fabricadas não seja inferior a 30 mm em nenhum ponto isolado, recomendando a adoção de 50 mm como espessura mínima nominal de projeto.

O EN 15037-1 (EN, 2008) estabelece espessuras mínimas para a capa complementar de concreto com base na distância entre eixos das vigotas e no tipo de lajota utilizada (apenas de enchimento ou semi-resistente), conforme demonstrado na Tabela 11.

Tabela 11 – Espessuras mínimas para a capa de concreto segundo o EN 15037-1 (EN, 2008)

Tipo de lajota	Intereixo (mm)	Carga de ruptura a flexão (kN)	Espessura mínima (mm)	
			Acima da vigota	Acima da lajota
Lajota não resistente	≤ 700	-	30	40
	> 700		30	50
Lajota semi-resistente	≤ 700	$\geq 2,0$	30	40
		$\geq 2,5$		30
	> 700	$\geq 2,0$	30	50
		$\geq 2,5$		40

Fonte: Adaptado pelo autor de EN 15037-1 (EN, 2008).

No tocante aos procedimentos de projeto de lajes nervuradas, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014b), a flexão da mesa só necessita ser verificada em caso de espaçamento entre eixos de nervuras acima de 65 cm, sendo, nesse caso, necessário verificar as nervuras em relação ao cisalhamento, tratando-as como vigas. É possível, contudo, verificar as nervuras considerando-as componentes de lajes caso o espaçamento entre eixos das nervuras for de até 90 cm e a largura das nervuras for maior que 12 cm. Para lajes nervuradas com espaçamento entre eixos de nervuras maior que 110 cm, a mesa deve ser projetada como laje maciça.

A capa complementar de concreto é constituída por, além do concreto moldado *in loco*, por armaduras complementares, como armaduras de distribuição e armaduras negativas, cujas características mínimas estão especificadas na NBR 14859-1 (ABNT, 2016a), conforme exposto anteriormente na Tabela 8.

Em se tratando da armadura de distribuição, suas funções são diversas, como solidarizar as nervuras entre si, promovendo um comportamento conjunto mais efetivo entre os elementos constituintes do sistema de laje, minimizar os efeitos da retração diferencial entre as vigotas pré-fabricadas de concreto e o concreto moldado no local, distribuir, no sentido transversal, cargas concentradas, mobilizando as nervuras próximas ao ponto de aplicação da carga concentrada e contribuir para um comportamento de diafragma rígido mais efetivo (EL DEBS, 2017). Ainda, essa armadura contribui para evitar a fissuração decorrente da retração do concreto da

capa complementar, moldado no local, e para absorver deformações térmicas (CUNHA, 2012; EL DEBS, 2017).

Conforme destacado por Cunha (2012), a versão de 2002 da atual NBR 14859-1 (ABNT, 2016a) continha prescrições relativas à seção de aço mínima para a armadura de distribuição e dimensões mínimas para a capa complementar de concreto. Contudo, a versão atual da referida norma não contém recomendações relacionadas à espessura do capeamento complementar de concreto, e apenas prevê o diâmetro nominal mínimo a ser adotado para a armadura de distribuição, sem especificar, no entanto, o espaçamento e consequentemente a seção transversal por área.

O EN 15037-1 (EN, 2008), por sua vez, prescreve uma armadura de distribuição em duas direções, composta por malha eletrossoldada, com seção de aço de $0,5 \text{ cm}^2/\text{m}$, para os casos em que o carregamento distribuído total seja de $2,5 \text{ kN/m}^2$ e a distância entre eixos das vigotas seja de até 70 cm. Em caso de uma das condições não ser atendida, a especificação da armadura de distribuição deve ser determinada com base nos esforços de flexão e punção atuantes na laje. Ainda, se o carregamento distribuído total for de até $2,5 \text{ kN/m}^2$ e o vão livre longitudinal (na direção das vigotas) for de até 6,00 m, a malha de distribuição pode ser substituída pela incorporação de fibras, inclusive poliméricas. A NBR 14859-1 (ABNT, 2016a), por sua vez, se limita a indicar a possibilidade de utilização de fibras para controle de fissuração e diminuição da retração, não podendo, contudo, substituir a armadura principal do elemento pré-fabricado.

Schiavi, Tarizzo e Astolfi (2010) consideram que esse tipo de sistema de laje pode ser considerado como uma placa rígida, sendo as vigotas rigidamente acopladas aos elementos de enchimento, que contribuem na distribuição das cargas estáticas. Enquanto as normas nacionais não contém considerações a respeito do efeito de diafragma rígido em uma estrutura onde estejam presentes lajes nervuradas de vigotas e lajotas, EN 15037-1 (EN, 2008) considera que o sistema de piso de vigotas e lajotas complementadas com capa de concreto moldada in loco pode atuar como diafragma rígido, desde que atendidos os requisitos prescritos para o sistema nessa mesma normativa, dentre eles a espessura da capa complementar de concreto. Ainda, a normativa prescreve para obras situadas em zonas de pequena e média atividade sísmica que a armadura de distribuição inserida na capa complementar de concreto deve estar completamente ancorada nos apoios da laje, e possuir seção transversal

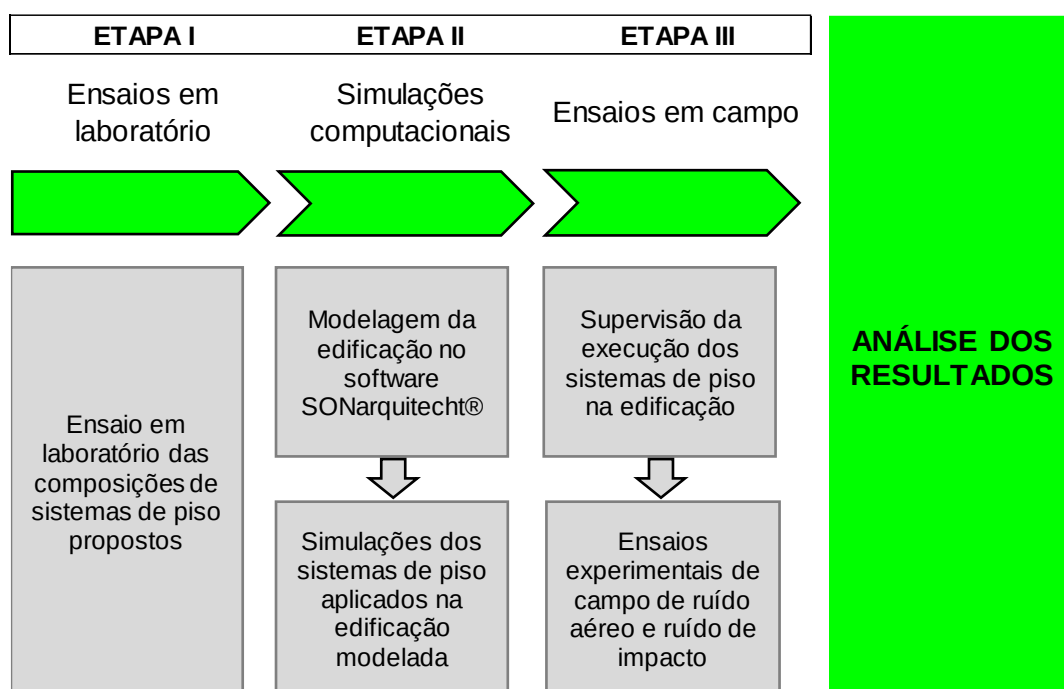
de aço igual a $1,0 \text{ cm}^2/\text{m}$, para as barras posicionadas na direção transversal às vigotas, e $0,5 \text{ cm}^2/\text{m}$ para as barras paralelas ao vão longitudinal das vigotas. Para regiões de grande atividade sísmica, essas seções de aço devem ser majoradas em 40%.

No tocante a durabilidade, além de atender as orientações da NBR 6118 (ABNT, 2014b), NBR 14432 (ABNT, 2001) e NBR 15200 (ABNT, 2015b), a NBR 9062 (ABNT, 2017) estabelece que os cobrimentos mínimos previstos na normativa se aplicam à qualquer barra de armadura que venha a compor o sistema de laje, incluindo a armadura de distribuição.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os métodos utilizados para atingir os objetivos gerais e específicos foram separados em etapas (Figura 17), que iniciam ao buscar na literatura por estudos já realizados com este tipo de sistema construtivo, passam pela realização de ensaios experimentais em laboratório, em campo e por simulações computacionais até a análise crítica dos resultados.

Figura 17 – Etapas da execução da metodologia

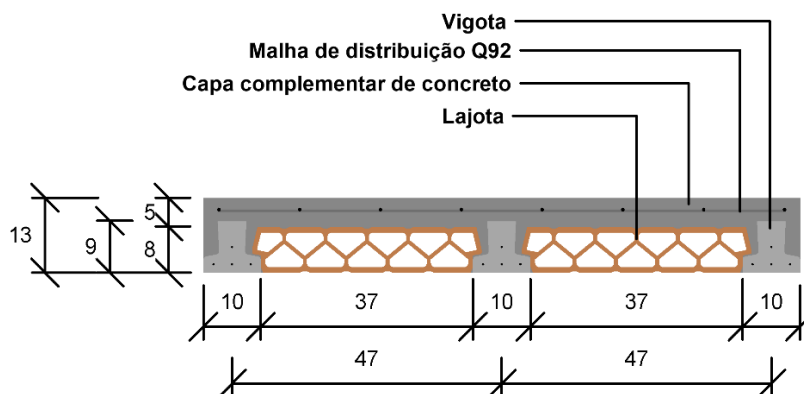


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 MATERIAIS

Os sistemas de piso utilizados neste estudo consistem em lajes pré-fabricadas nervuradas unidirecionais, compostas por camada estrutural de vigotas protendidas e lajotas cerâmicas complementadas com capa de concreto moldado no local. Os sistemas podem ser classificados em três tipos, de acordo com a camada estrutural, cujas características são apresentadas nas Figuras Figura 18 - Seção transversal e características da laje LP13, Figura 19 - Seção transversal e características da laje LP17 e Figura 20 - Seção transversal e características da laje LP21.

Figura 18 - Seção transversal e características da laje LP13

**Laje:**

- Espessura: 13 cm
- Intereixo: 47 cm
- Peso próprio: 202 kgf/m²
- M_{Rd} : 6,88 kN.m (laje)

Vigota:

- Vigota tipo VP (b_v : 8/ h_v : 9/ a_p : 1,5/ h_b : 2,8 cm);
- Concreto f_{ck} 40 MPa;
- Fios de aço tipo CP 175 RBE com $\varnothing$ 4,0 mm; seção de aço de 0,52 cm² (4 fios)
- M_{Rd} : 2,5 kN.m (vigota)

Elemento de enchimento (lajota):

- Hc 08/37/20 cm
- Cerâmico

Armadura de distribuição:

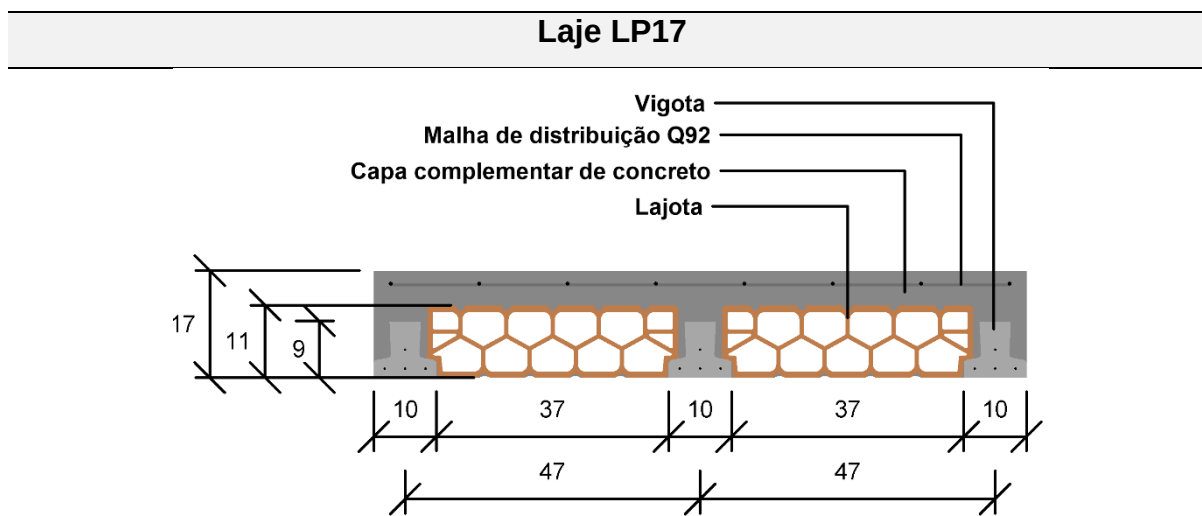
- Tela soldada nervurada série Q92, $\varnothing$ 4,2 mm

Capa complementar de concreto:

- Concreto f_{ck} 25 MPa, classe de consistência S100

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 19 - Seção transversal e características da laje LP17

**Laje:**

- Espessura: 17 cm
- Intereixo: 47 cm
- Peso próprio: 246 kgf/m²
- M_{Rd} : 9,59 kN.m (laje)

Vigota:

- Vigota tipo VP (b_v : 8/ h_v : 9/ a_p : 1,5/ h_b : 2,8 cm);
- Concreto f_{ck} 40 MPa;
- Fios de aço tipo CP 175 RBE com $\varnothing$ 4,0 mm; seção de aço de 0,52 cm² (4 fios)
- M_{Rd} : 2,5 kN.m (vigota)

Elemento de enchimento (lajota):

- Hc 12/37/20 cm
- Cerâmico

Armadura de distribuição:

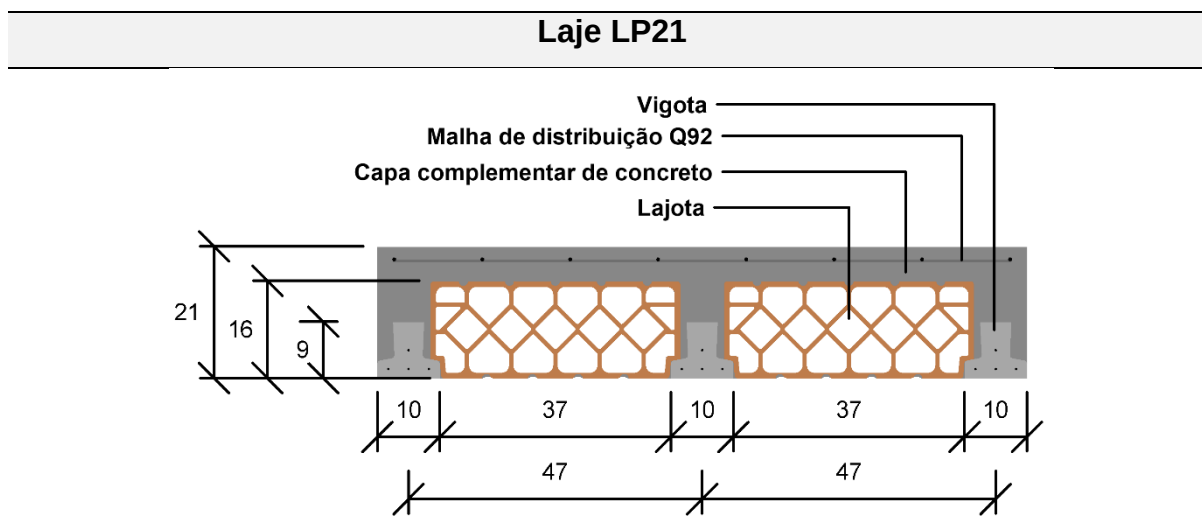
- Tela soldada nervurada série Q92, $\varnothing$ 4,2 mm

Capa complementar de concreto:

- Concreto f_{ck} 25 MPa, classe de consistência S100

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 20 - Seção transversal e características da laje LP21

**Laje:**

- Espessura: 21 cm
- Intereixo: 47 cm
- Peso próprio: 264 kgf/m²
- M_{Rd} : 12,3 kN.m

Vigota:

- Vigota tipo VP ($b_v: 8/h_v: 9/a_p: 1,5/h_b: 2,8$ cm);
- Concreto f_{ck} 40 MPa;
- Fios de aço tipo CP 175 RBE com Ø 4,0 mm; seção de aço de 0,52 cm² (4 fios)
- M_{Rd} : 2,5 kN.m

Elemento de enchimento (lajota):

- Hc 16/37/20 cm
- Cerâmico

Armadura de distribuição:

- Tela soldada nervurada série Q92, Ø 4,2 mm

Capa complementar de concreto:

- Concreto f_{ck} 25 MPa, classe de consistência S100

Fonte: Elaborada pelo autor

As lajes descritas acima foram acrescidas de camadas complementares, a saber, de contrapiso, fixação, acabamento e forro, que constituem os sistemas de piso apresentados na Figura 21. Previamente, a Tabela 12 descreve as características dos materiais constituintes das camadas empregadas nos sistemas.

Tabela 12 – Características dos materiais das camadas complementares à estrutural

Concreto (capa complementar)	
Característica	Classificação – NBR 8953 (ABNT, 2015)
f_{ck} : 25 MPa	Classe de resistência C25
Abatimento: $100 \leq a \leq 160$ mm	Classe de consistência S100
Forro suspenso de gesso acartonado	
Característica	Classificação – NBR 16382 (ABNT, 2015)
Dimensões: $600,0 \pm 3$ mm	60
Massa: $\leq 4,70$ kg	Leve
Espessura: 12,5 mm	60
Tipo de encaixe	Sobreposto
Argamassa de contrapiso	
Característica	Classificação – NBR 13281 (ABNT, 2023)
Tipo	Não se aplica
Retenção de água	U2
Densidade de massa no estado fresco	DF3
Resistência de aderência à tração	RA2
Densidade de massa endurecida	DE3
Resistência à tração na flexão	R4
Camada de acabamento – Piso cerâmico	
Característica	Classificação: NBR 16928 (ABNT, 2021)
Dimensões: 540x540 mm	-
Espessura: 8,0 mm	-
Absorção d'água: $\leq 0,5\%$	BII _a
Carga de ruptura: ≥ 1000 N	BII _a
Camada de acabamento – Piso laminado	
Característica	Classificação – NBR 14833 (ABNT, 2014)
Espessura (lâmina / manta)	7,0 mm / 2,0 mm
Resistência à abrasão	AC3
Classe de tráfego	23
Resistência à impacto	IC1
Argamassa de revestimento – Face inferior	
Característica	Classificação – NBR 13281 (ABNT, 2023)
Tipo	ARV-I
Retenção de água	U5
Densidade de massa no estado fresco	DF2
Resistência de aderência à tração	RS1
Densidade de massa endurecida	DE4
Resistência à tração na flexão	R3

Fonte: Elaborada pelo autor com base nas informações dos fabricantes

Figura 21 - Características das amostras ensaiadas em laboratório

LP13 – Composição AVigota: VP (b_v : 8/ h_v : 9/ a_p : 1,5/ h_b : 2,8 cm)

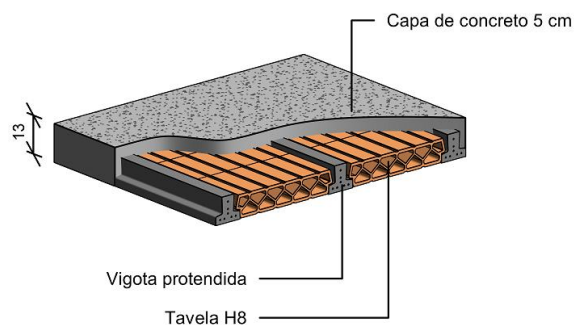
Enchimento: Hc 08/37/20 cm

Capa de concreto: 5 cm

Contrapiso: -

Camada de acabamento: -

Revestimento inferior: -

**LP13 – Composição B**Vigota: VP (b_v : 8/ h_v : 9/ a_p : 1,5/ h_b : 2,8 cm)

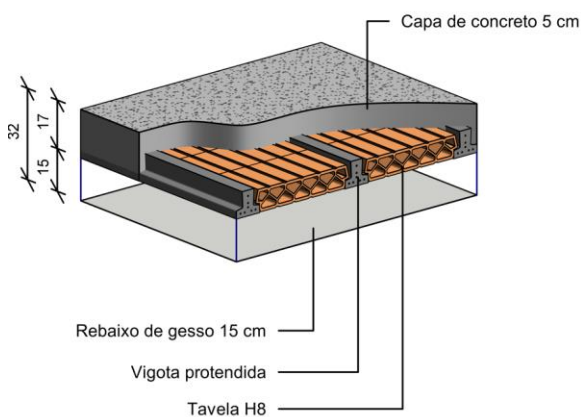
Enchimento: Hc 08/37/20 cm

Capa de concreto: 5 cm

Contrapiso: -

Camada de acabamento: -

Revestimento inferior: rebaixo em gesso

**LP13 – Composição C**Vigota: VP (b_v : 8/ h_v : 9/ a_p : 1,5/ h_b : 2,8 cm)

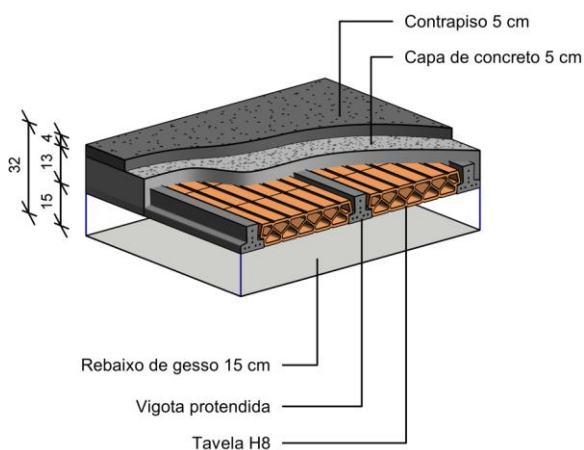
Enchimento: Hc 08/37/20 cm

Capa de concreto: 5 cm

Contrapiso: 4 cm

Camada de acabamento: -

Revestimento inferior: rebaixo em gesso



(continua)

LP13 – Composição D

Vigota: VP (b_v : 8/ h_v : 9/ a_p : 1,5/ h_b : 2,8 cm)

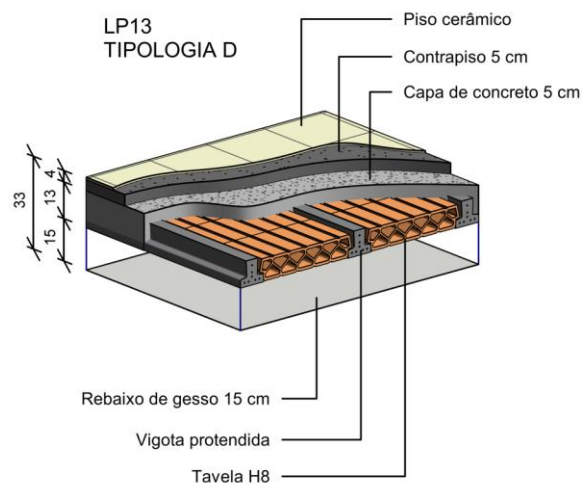
Enchimento: Hc 08/37/20 cm

Capa de concreto: 5 cm

Contrapiso: 4 cm

Camada de acabamento: piso cerâmico

Revestimento inferior: rebaixo em gesso



LP13 – Composição E

Vigota: VP (b_v : 8/ h_v : 9/ a_p : 1,5/ h_b : 2,8 cm)

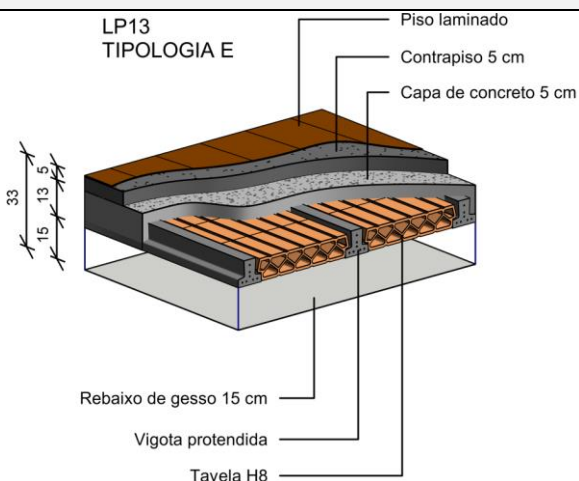
Enchimento: Hc 08/37/20 cm

Capa de concreto: 5 cm

Contrapiso: 5 cm

Camada de acabamento: piso laminado

Revestimento inferior: rebaixo em gesso



LP13 – Composição F

Vigota: VP (b_v : 8/ h_v : 9/ a_p : 1,5/ h_b : 2,8 cm)

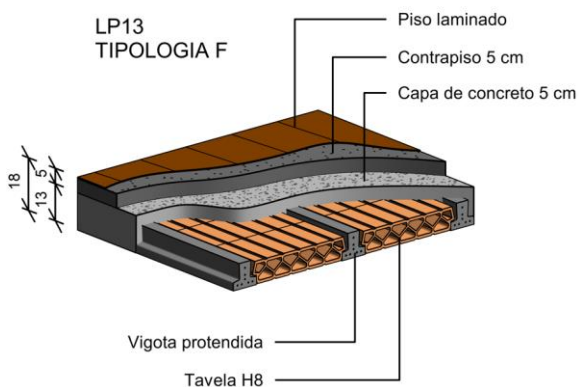
Enchimento: Hc 08/37/20 cm

Capa de concreto: 5 cm

Contrapiso: 5 cm

Camada de acabamento: piso laminado

Revestimento inferior: -



(continua)

LP13 – Composição G

Vigota: VP (b_v : 8/ h_v : 9/ a_p : 1,5/ h_b : 2,8 cm)

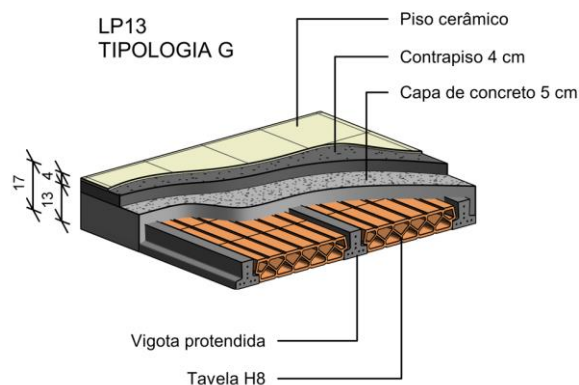
Enchimento: Hc 08/37/20 cm

Capa de concreto: 5 cm

Contrapiso: 4 cm

Camada de acabamento: piso cerâmico

Revestimento inferior: -



LP13 – Composição H

Vigota: VP (b_v : 8/ h_v : 9/ a_p : 1,5/ h_b : 2,8 cm)

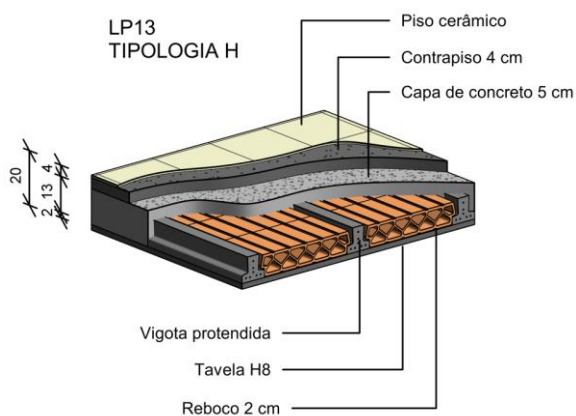
Enchimento: Hc 08/37/20 cm

Capa de concreto: 5 cm

Contrapiso: 4 cm

Camada de acabamento: piso cerâmico

Revestimento inferior: argamassa (2cm)



LP17 – Composição A

Vigota: VP (b_v : 8/ h_v : 9/ a_p : 1,5/ h_b : 2,8 cm)

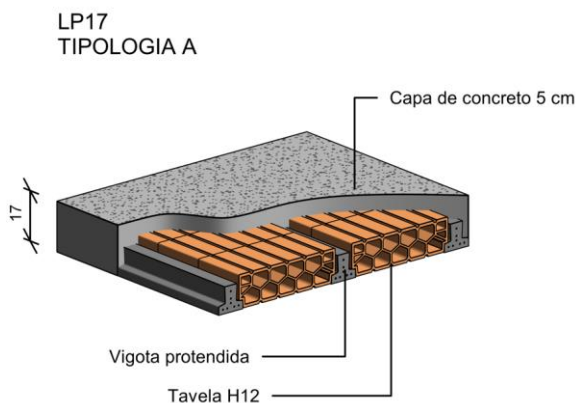
Enchimento: Hc 12/37/20 cm

Capa de concreto: 5 cm

Contrapiso: -

Camada de acabamento: -

Revestimento inferior: -



(continua)

LP17 – Composição B

Vigota: VP (b_v : 8/ h_v : 9/ a_p : 1,5/ h_b : 2,8 cm)

Enchimento: Hc 12/37/20 cm

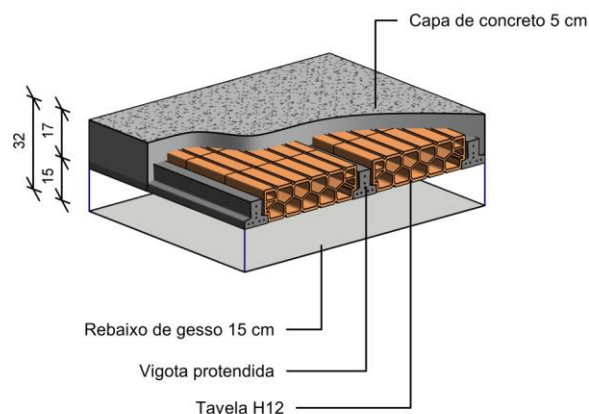
Capa de concreto: 5 cm

Contrapiso: -

Camada de acabamento: -

Revestimento inferior: rebaixo em gesso

LP17
TIPOLOGIA B



LP17 – Composição D

Vigota: VP (b_v : 8/ h_v : 9/ a_p : 1,5/ h_b : 2,8 cm)

Enchimento: Hc 12/37/20 cm

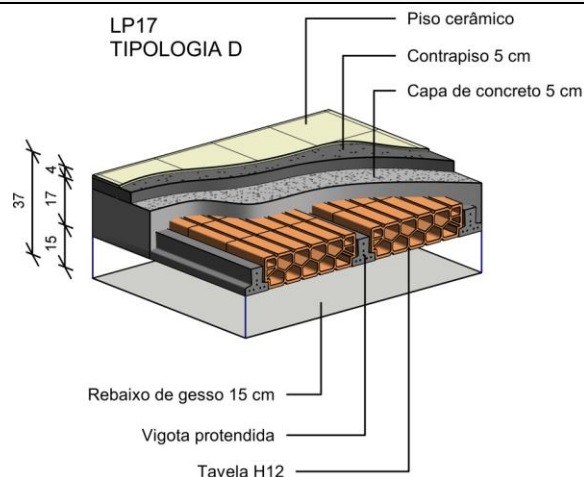
Capa de concreto: 5 cm

Contrapiso: 4 cm

Camada de acabamento: piso cerâmico

Revestimento inferior: rebaixo em gesso

LP17
TIPOLOGIA D



LP17 – Composição E

Vigota: VP (b_v : 8/ h_v : 9/ a_p : 1,5/ h_b : 2,8 cm)

Enchimento: Hc 12/37/20 cm

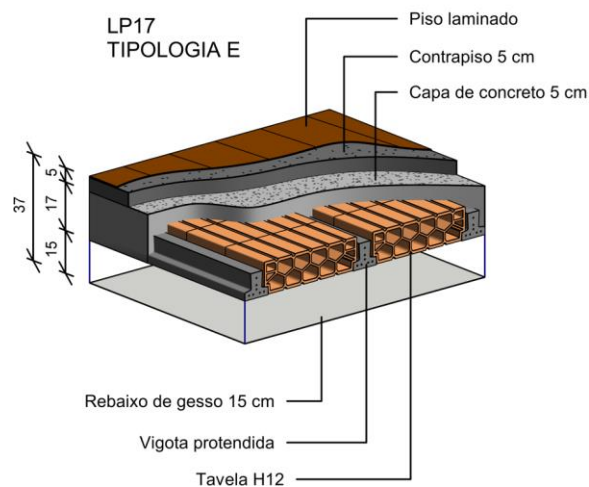
Capa de concreto: 5 cm

Contrapiso: 5 cm

Camada de acabamento: piso laminado

Revestimento inferior: rebaixo em gesso

LP17
TIPOLOGIA E



(continua)

LP17 – Composição F

Vigota: VP (b_v : 8/ h_v : 9/ a_p : 1,5/ h_b : 2,8 cm)

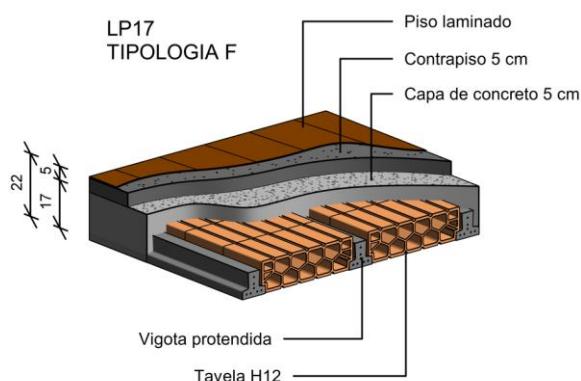
Enchimento: Hc 12/37/20 cm

Capa de concreto: 5 cm

Contrapiso: 5 cm

Camada de acabamento: piso laminado

Revestimento inferior: -



LP17 – Composição G

Vigota: VP (b_v : 8/ h_v : 9/ a_p : 1,5/ h_b : 2,8 cm)

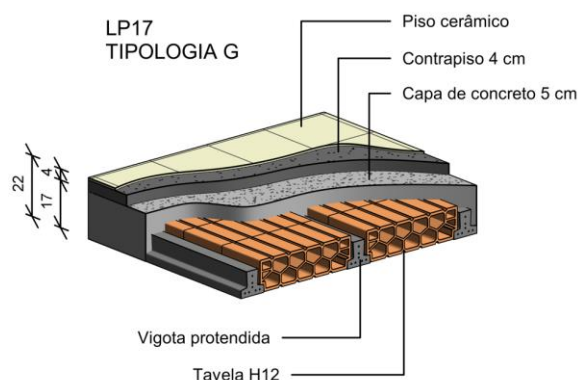
Enchimento: Hc 12/37/20 cm

Capa de concreto: 5 cm

Contrapiso: 4 cm

Camada de acabamento: piso cerâmico

Revestimento inferior: -



LP21 – Composição A

Vigota: VP (b_v : 8/ h_v : 9/ a_p : 1,5/ h_b : 2,8 cm)

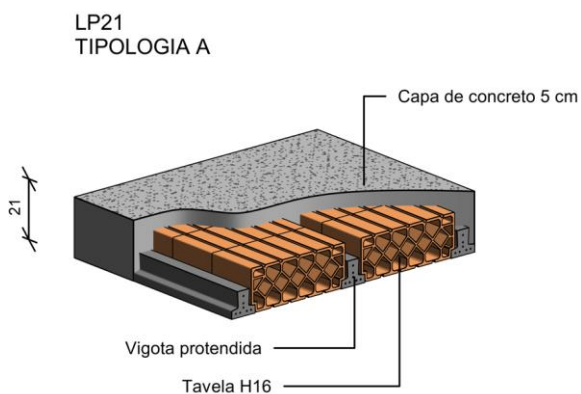
Enchimento: Hc 16/37/20 cm

Capa de concreto: 5 cm

Contrapiso: -

Camada de acabamento: -

Revestimento inferior: -



(continua)

LP21 – Composição B

Vigota: VP (b_v : 8/ h_v : 9/ a_p : 1,5/ h_b : 2,8 cm)

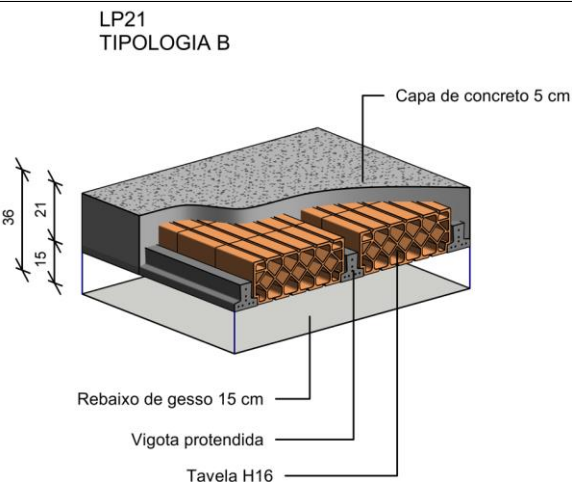
Enchimento: Hc 16/37/20 cm

Capa de concreto: 5 cm

Contrapiso: -

Camada de acabamento: -

Revestimento inferior: rebaixo em gesso



LP21 – Composição C

Vigota: VP (b_v : 8/ h_v : 9/ a_p : 1,5/ h_b : 2,8 cm)

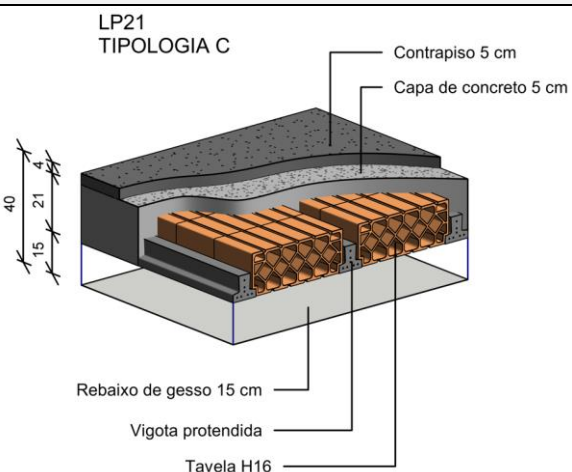
Enchimento: Hc 08/37/20 cm

Capa de concreto: 5 cm

Contrapiso: 4 cm

Camada de acabamento: -

Revestimento inferior: rebaixo em gesso



LP21 – Composição D

Vigota: VP (b_v : 8/ h_v : 9/ a_p : 1,5/ h_b : 2,8 cm)

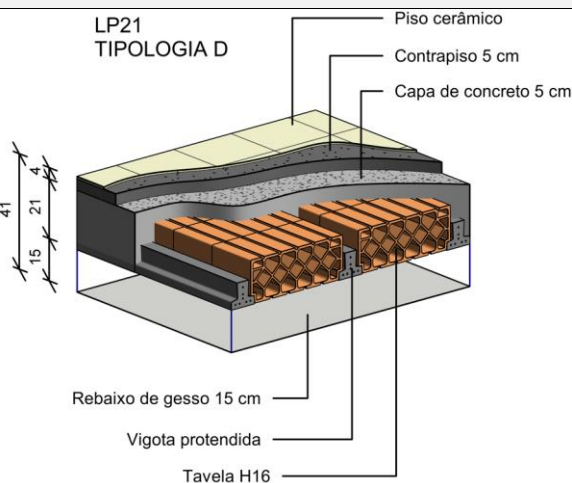
Enchimento: Hc 16/37/20 cm

Capa de concreto: 5 cm

Contrapiso: 4 cm

Camada de acabamento: piso cerâmico

Revestimento inferior: rebaixo em gesso



(continua)

LP21 – Composição E

Vigota: VP (b_v : 8/ h_v : 9/ a_p : 1,5/ h_b : 2,8 cm)

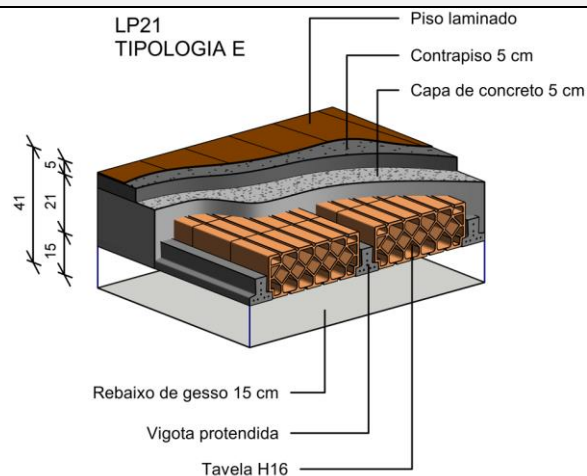
Enchimento: Hc 16/37/20 cm

Capa de concreto: 5 cm

Contrapiso: 5 cm

Camada de acabamento: piso laminado

Revestimento inferior: rebaixo em gesso



LP 21 – Composição F

Vigota: VP (b_v : 8/ h_v : 9/ a_p : 1,5/ h_b : 2,8 cm)

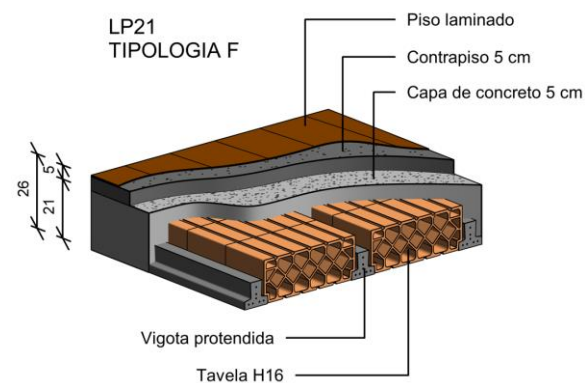
Enchimento: Hc 16/37/20 cm

Capa de concreto: 5 cm

Contrapiso: 5 cm

Camada de acabamento: piso laminado

Revestimento inferior: -



LP 21 – Composição G

Vigota: VP (b_v : 8/ h_v : 9/ a_p : 1,5/ h_b : 2,8 cm)

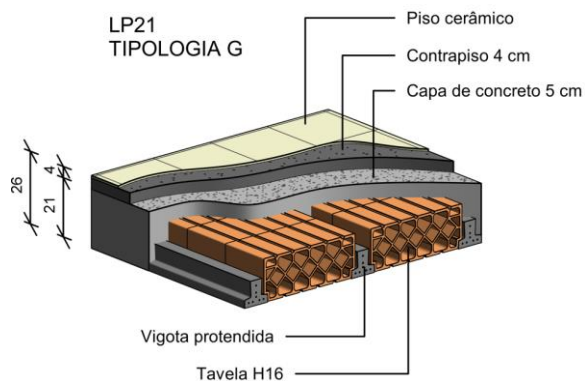
Enchimento: Hc 16/37/20 cm

Capa de concreto: 5 cm

Contrapiso: 4 cm

Camada de acabamento: cerâmico

Revestimento inferior: -



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2 EDIFICAÇÃO AMOSTRADA

Para efeitos da análise do comportamento dos sistemas de piso considerados neste trabalho quando aplicados em obra (em campo), o presente estudo se utilizou de uma edificação residencial multifamiliar.

A edificação amostrada consiste em um empreendimento de 5 pavimentos, composto por estrutura de concreto armado moldada no local, lajes pré-fabricadas nervuradas e sistema de vedação vertical interno e externo de blocos cerâmicos de vedação. A seguir, a Figura 22 apresenta a planta baixa do pavimento tipo da edificação amostrada, enquanto a Figura 23 expõe os cortes longitudinal e transversal da edificação.

Figura 22 – Planta baixa da edificação amostrada – pavimento tipo

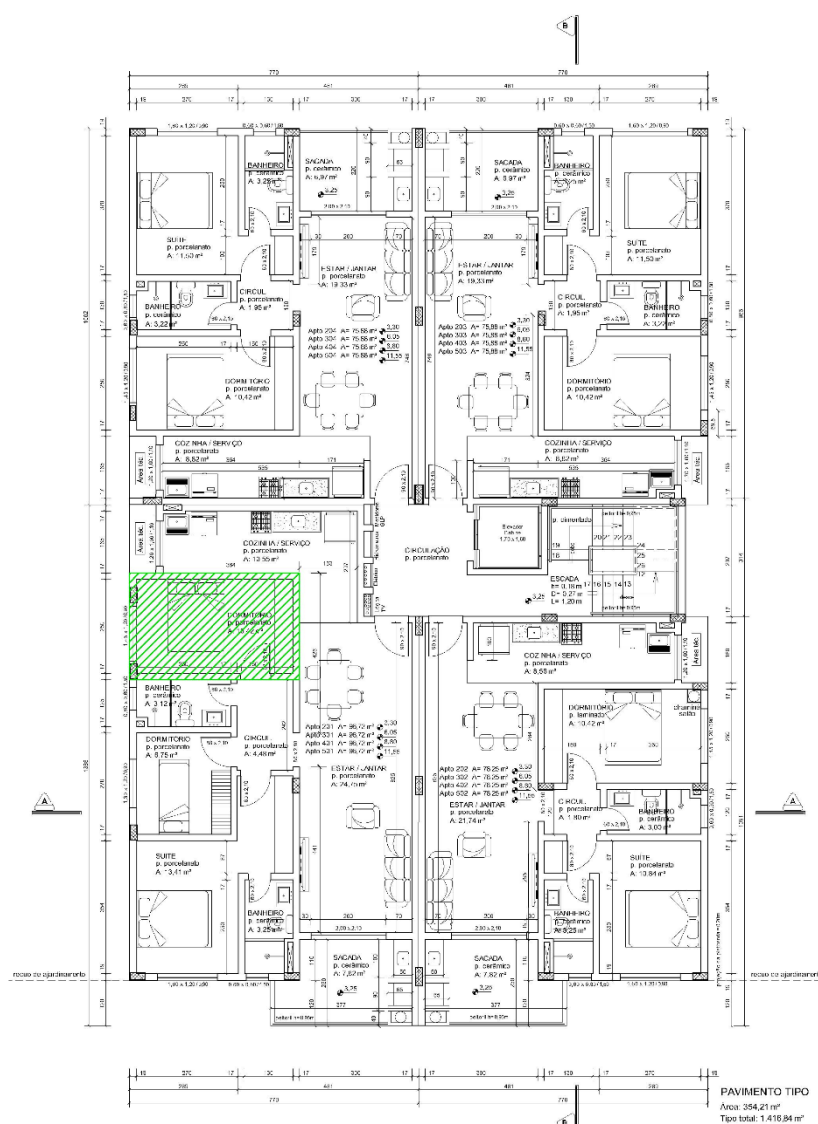
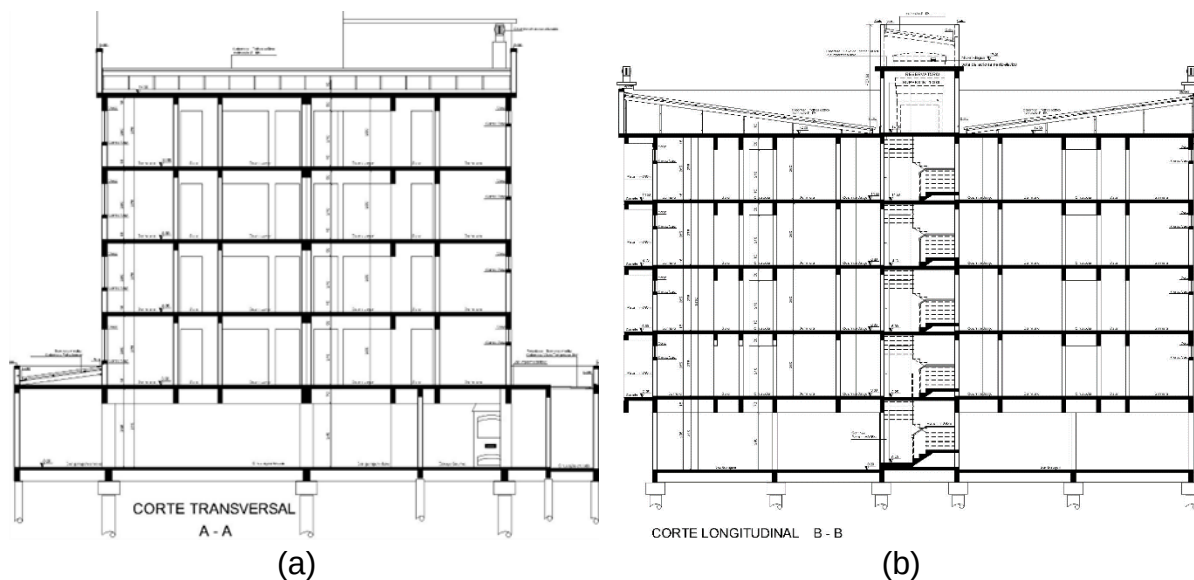
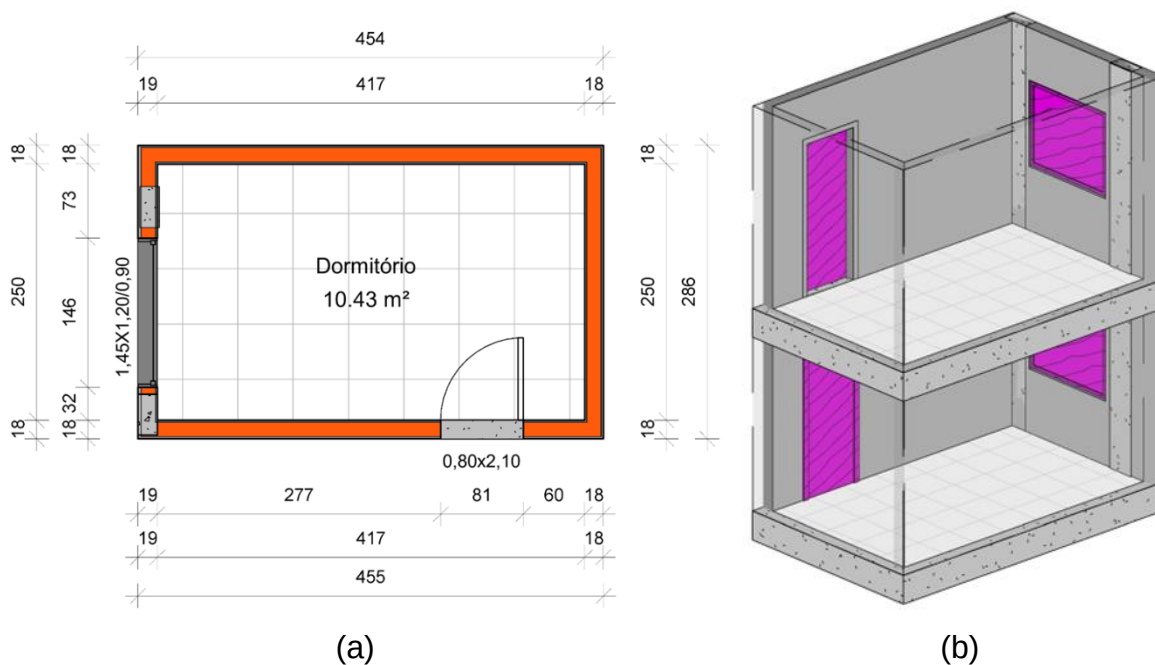


Figura 23 – Corte transversal (a) e longitudinal (b) da edificação



Para execução das análises relativas ao comportamento em campo (estimativa e ensaio) foi selecionado um ambiente dormitório de uma das unidades autônomas que compõe o pavimento tipo, sendo estas localizadas no 2º e 3º pavimentos. Abaixo, o ambiente amostrado é apresentado em planta baixa (Figura 24) e cortes (Figura 25)

Figura 24 – Planta baixa (a) e vista isométrica (b) dos ambientes amostrados



Fonte: Elaborada pelo autor

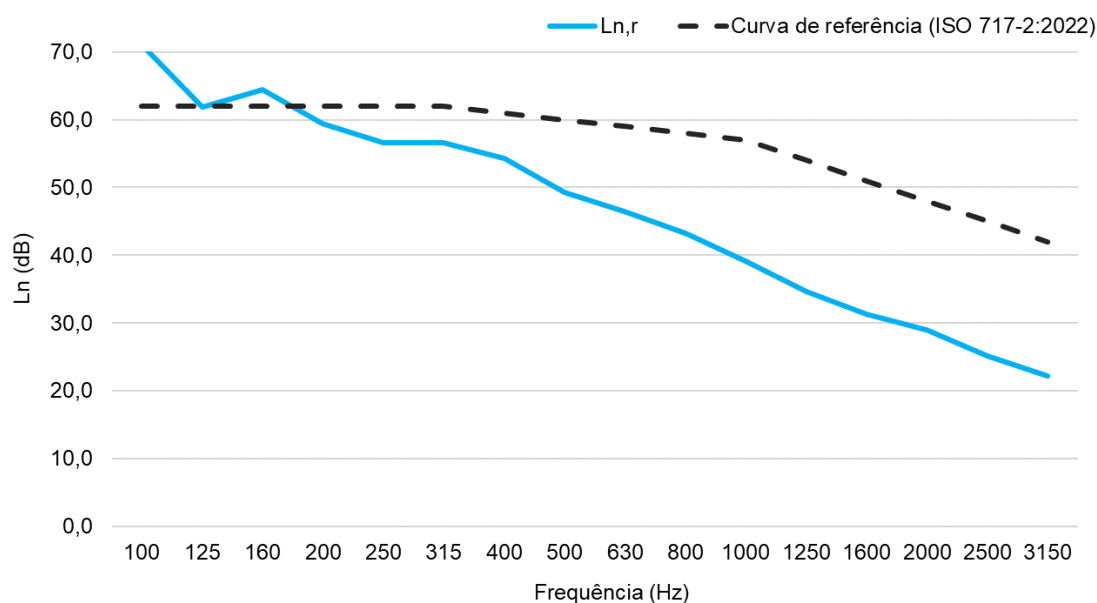
Figura 25 – Cortes transversal (a) e longitudinal (b) do ambiente amostrado (LP13G)



Fonte: Elaborada pelo autor

Os sistemas de piso adotados no empreendimento reproduzem as composições LP13G e LP13D (ver Figura 21), sendo a LP13G com rebaixo em gesso, ensaiadas em laboratório. Em ambas foi acrescentado material resiliente (manta acústica) de polietileno expandido, na espessura de 5,0 mm. As características técnicas do material resiliente são apresentadas a seguir na Figura 26.

Figura 26 – Informações técnicas do material resiliente empregado na edificação

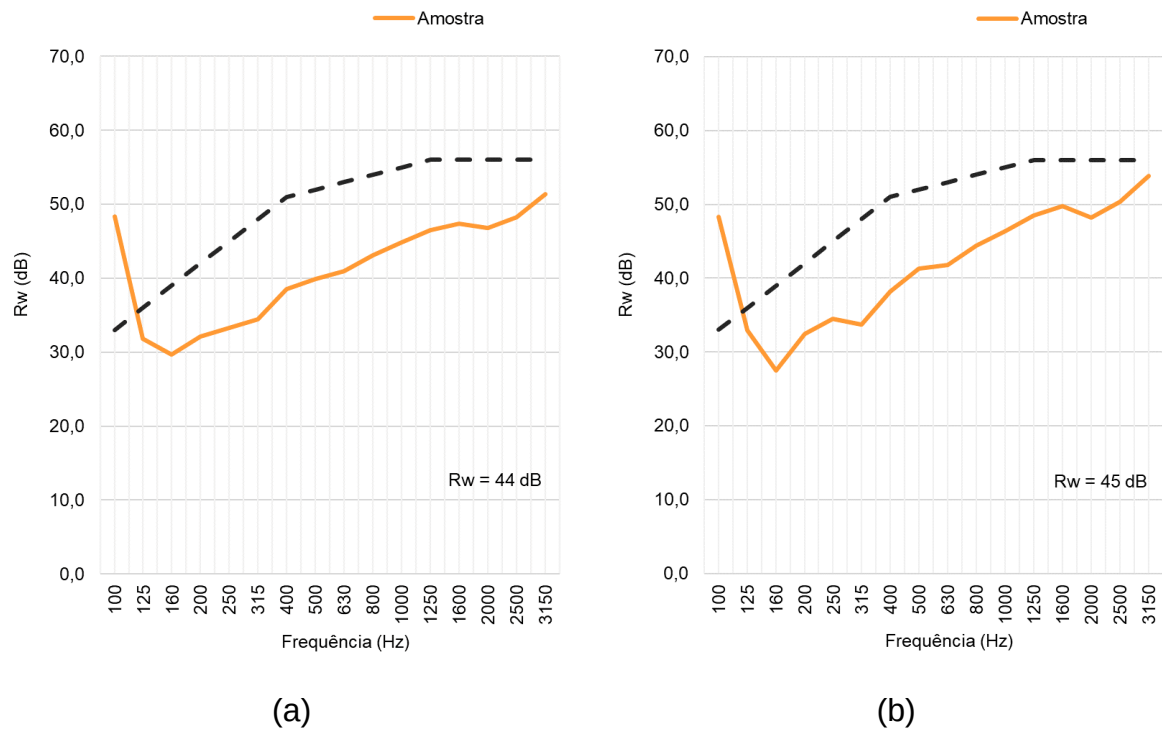


Material resiliente:	Manta acústica de polietileno expandido
Nome comercial:	Manta Multimpact
Densidade:	20 kgf/m ³
Espessura:	5,0 mm
ΔL_w	20 dB

Fonte: Fonte: Elaborada pelo autor com base em Unisinos (2021)

As alvenarias que constituem os sistemas de vedação vertical interno e externo (SVVI e SVVE) são compostos por blocos cerâmicos de vedação classe VED15, com dimensões de 14x19x29 cm, assentados sob argamassa cimentícia (juntas horizontais e verticais de 1 cm de espessura, com preenchimento total das juntas). Nos SVVI, as alvenarias são revestidas com revestimento argamassado com espessura de 2,0 cm em ambas as faces; já os revestimentos dos SVVE possuem 2,0 cm de espessura na face interna e 3,0 cm de espessura na face externa. A seguir, a Figura 27 exhibe as características acústicas dos referidos sistemas, cujos índices de redução sonora ponderado (R_w) são iguais a 44 dB (SVVI) e 45 dB (SVVE).

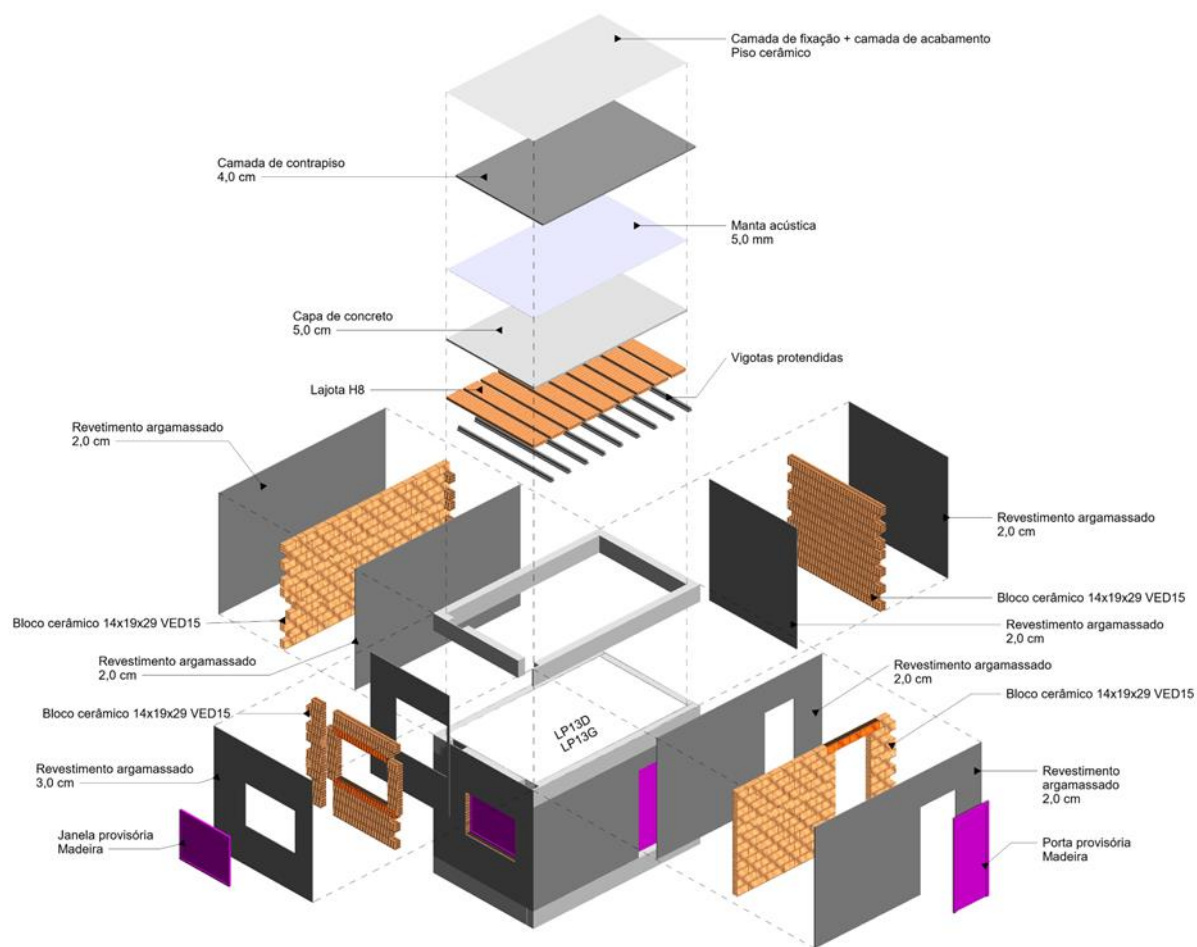
Figura 27 – Caracterização acústica dos SSVI (a) e SVVE (b)



Fonte: Elaborada pelo autor com base em Unisinos (2016a; 2016b)

Abaixo, a Figura 28 sintetiza a composição construtiva dos ambientes amostrados.

Figura 28 – Sistemas construtivos dos ambientes amostrados

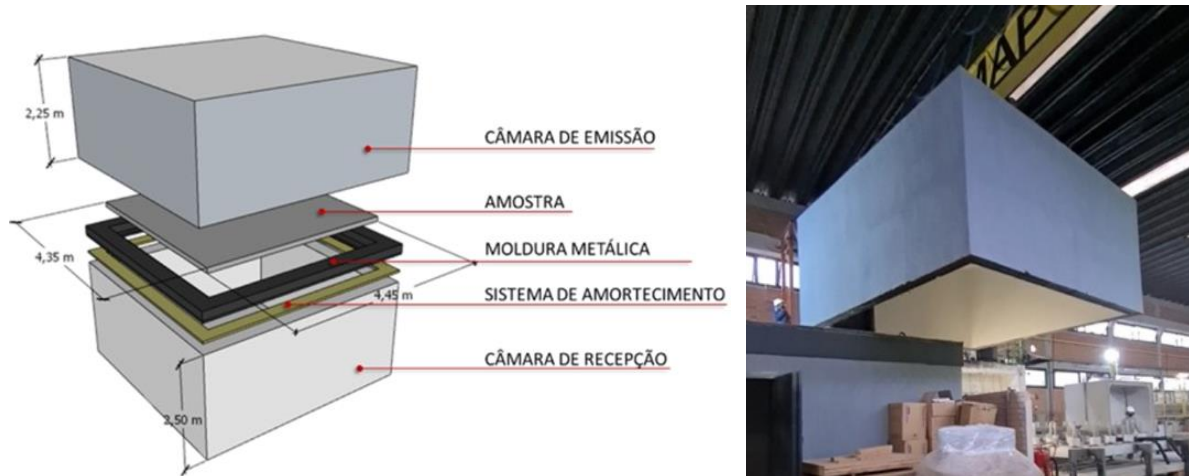


Fonte: Elaborada pelo autor

3.3 ENSAIOS EM LABORATÓRIO

Para caracterização do isolamento ao ruído aéreo e de impacto dos sistemas de piso propostos foram produzidas amostras com dimensões iguais a 4,00 x 4,10 metros, que posteriormente foram posicionadas sobre a câmara de ensaio (Figura 29).

Figura 29 – Câmaras utilizadas nos ensaios



Fonte: O autor

A aplicação das camadas de revestimento propostas nas amostras, a partir das camadas estruturais (Figuras Figura 18 - Seção transversal e características da laje LP13, Figura 19 - Seção transversal e características da laje LP17 e Figura 20 - Seção transversal e características da laje LP21), ocorreu sem que houvesse movimentação entre as composições, mantendo desta forma as condições de separação e ausência de vínculo em todos os ensaios de cada amostra.

O isolamento ao ruído aéreo foi determinado através dos procedimentos descritos nas normas ISO 10140-2 (ISO, 2021a) e ISO 10140-4 (ISO, 2021c), sendo expresso pelo índice de redução sonora (R) e pelo índice de redução sonora ponderado (R_w) obtido conforme a ISO 717-1 (ABNT, 2021e).

O isolamento ao ruído de impacto foi determinado segundo os procedimentos das normas ISO 10140-3 (ISO, 2021b) e ISO 10140-4 (ISO, 2021c) e expressos por meio dos níveis de pressão sonora de impacto normalizado (L_n) e ponderado ($L_{n,w}$), segundo os procedimentos da ISO 717-2 (ABNT, 2022).

Os equipamentos utilizados na execução dos ensaios em laboratório são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Equipamentos utilizados nos ensaios

Descrição	Fabricante / modelo	Capacidade técnica
Fonte sonora dodecaédrica	Brüel&Kjaer / 4292-L	Máximo NPS de 122 dB
Amplificador de potência	Brüel&Kjaer / TYPE 2734-A	20 Hz a 20 kHz, resolução de 1 dB, 500 W
Calibrador acústico	Brüel&Kjaer / TYPE 4231	94 dB em 1 kHz, resolução de 0,1 dB
Microfone	GRAS / 40AO	Mín. 50 Hz; 21 dB; Máx 20.000 Hz; 138 dB; resolução 0,1 dB
Pré-amplificador	ACOEM 01dB / FUSION	Mín. 50 Hz; 21 dB; Máx 20.000 Hz; 138 dB; resolução 0,1 dB
Analizador sonoro	ACOEM 01dB / FUSION	Mín. 50 Hz; 21 dB; Máx 20.000 Hz; 138 dB; resolução 0,1 dB
Máquina de impactos	ACOEM 01dB / TM-01	-
Trena	Vonder	8,00 m, resolução de 0,001 m
Termohigrômetro	Novus / LOGOBOX-RHT-LCD	-40 a 70°C, 0 a 100% RH; resolução de 0,1°C e 0,1% RH

Fonte: Elaborada pelo autor

Os ensaios foram realizados nas câmaras acústicas do itt Performance da Unisinos, sendo esses ensaios acreditados pela CGCRE do Inmetro.

3.4 ESTIMATIVA DE DESEMPENHO: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

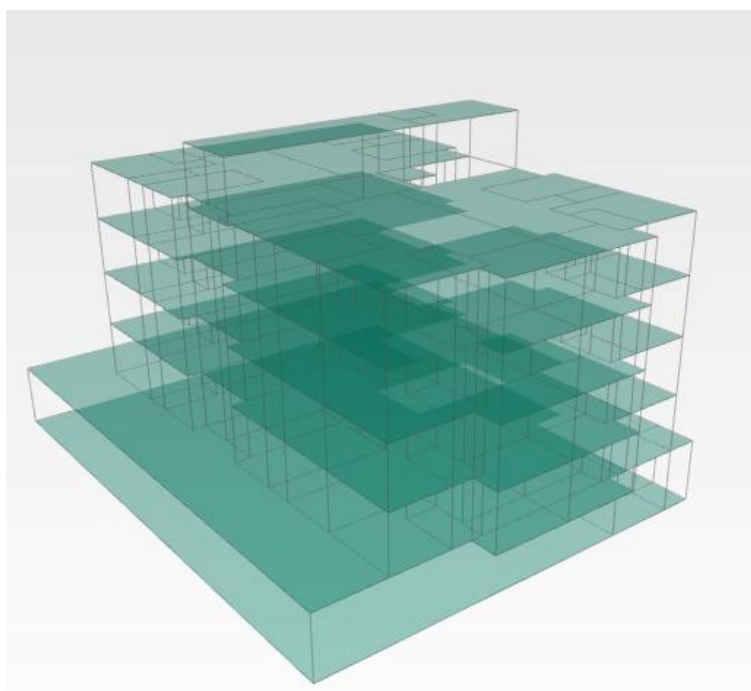
Com auxílio da ferramenta computacional, procedeu-se com a estimativa de desempenho de cada composição ensaiada em laboratório, aplicada no modelo computacional da edificação amostrada, além da simulação da composição adotada na execução da obra, representativa da composição LP13D com acréscimo de manta acústica e rebaixo em gesso descrita no item 3.2.

A ferramenta utilizada é o software SONarchitect®, que utiliza o conjunto de normas ISO 12354 (ISO, 2017a) para predição do isolamento acústico de sistemas construtivos em edificações, em se tratando de ruídos aéreos, de impacto, ruído externo, emissão de ruído e tempo de reverberação, em cálculos através de cada elemento de compartimentação (sistema de piso, de vedação vertical ou de cobertura)

e por vias indiretas (flancos), considerando todas as transmissões entre os ambientes emissor e receptor. A ferramenta SONarchitect® consiste em um software bastante difundido na elaboração de projetos e no meio acadêmico, a exemplo dos trabalhos de Silva e Takahashi (2016), Remígio et al. (2019), Rezende et al. (2019), Dümen e Rasmussen (2020) e Oliveira e Heissler (2021).

Abaixo, Figura 30 apresenta o modelo 3D da edificação amostrada no software.

Figura 30 – Modelo 3D da edificação amostrada para estimativa de desempenho

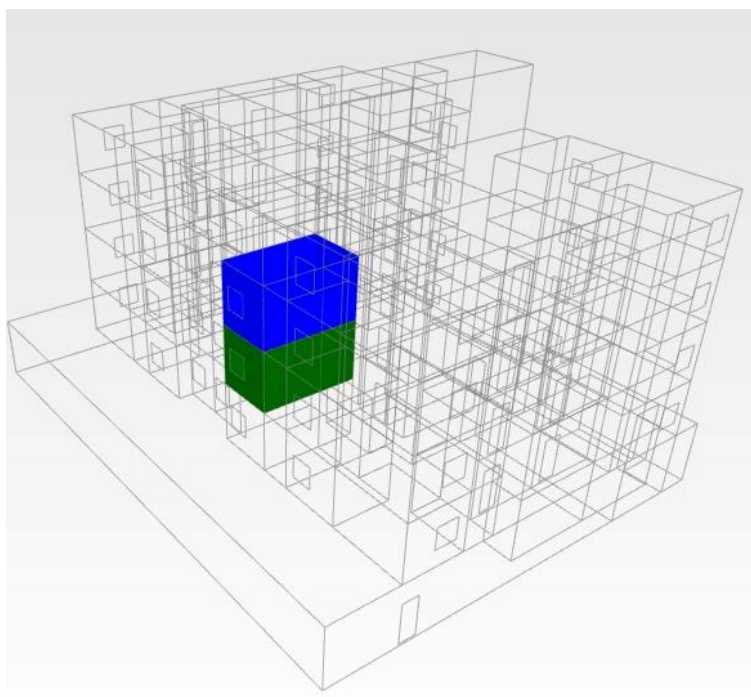


Fonte: Elaborada pelo autor

Os dados de entrada para elementos homogêneos consistem em valores estimados de acordo com o conjunto de normas ISO 12354 (ISO, 2017a), e para sistemas construtivos não homogêneos valores estimados pelo método de matriz de transferência, que podem ser processados diretamente pelo software (OLIVEIRA et al., 2021a) ou informados pelo usuário. Neste trabalho, os dados de entrada foram cadastrados e inseridos no software, com base nos ensaios deste estudo realizados em laboratório, no caso dos sistemas de piso, e ensaios realizados em laboratório fornecidos pelos fabricantes dos componentes e sistemas construtivos, no caso das mantas acústicas e blocos cerâmicos (sistemas de vedação vertical internos e externos).

As análises foram realizadas nos dormitórios das unidades autônomas denominadas 201 (2º pavimento) e 301 (3º pavimento), que possuem volume de 30,78 m³. A seguir, a Figura 31 indica a localização dos ambientes no modelo 3D considerados nas simulações computacionais.

Figura 31 – Localização dos ambientes amostrados na edificação



Fonte: Elaborada pelo autor

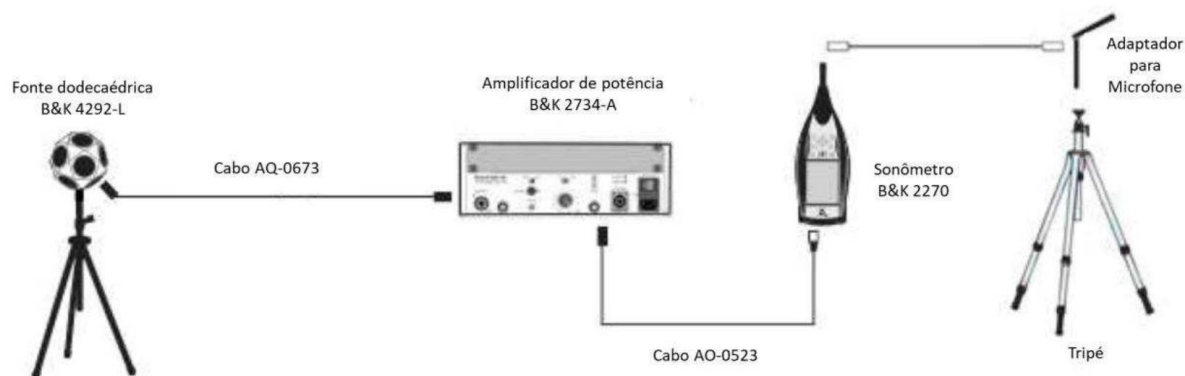
A frequência crítica adotada para as lajes foi de 125 Hz, valor dentro da faixa sugerida por Hopkins (2004).

3.5 ENSAIOS EM CAMPO

Para determinação do isolamento acústico em campo foi empregado o método de engenharia, indicado na NBR 15575 (ABNT, 2021a), seguindo os procedimentos descritos nas normas NBR ISO 16283-1 (ABNT, 2018) e ISO 717-1 (ABNT, 2021e), para isolamento ao ruído aéreo, e NBR ISO 16283-2 (ABNT, 2021d) e ISO 717-2 (ABNT, 2022) para determinação do nível de pressão sonora de impacto padrão ponderado, relativo ao ruído de impacto. Para ambos os ensaios foi adotado como ambiente emissor o recinto localizado no 3º pavimento, e como ambiente receptor o recinto localizado abaixo, no segundo pavimento. Os equipamentos utilizados estão

indicados na Tabela 13, apresentada anteriormente. A Figura 32 esquematiza a montagem dos referidos equipamentos, para o ensaio de campo.

Figura 32 – Esquemático de montagem dos equipamentos



Fonte: Brüel & Kjær (2015)

Para os dois métodos os valores são expressos em bandas de terço de oitavas, nas faixas de frequência de 100 a 3150 Hz.

Os ensaios foram realizados pelo itt Performance sendo esses ensaios acreditados pela CGCRE do Inmetro.

4. RESULTADOS

A apresentação dos resultados no presente capítulo é segmentada em três partes, a saber: ensaios realizados em laboratório, estimativa de desempenho via simulação computacional e ensaios em campo. Posteriormente, os valores são confrontados.

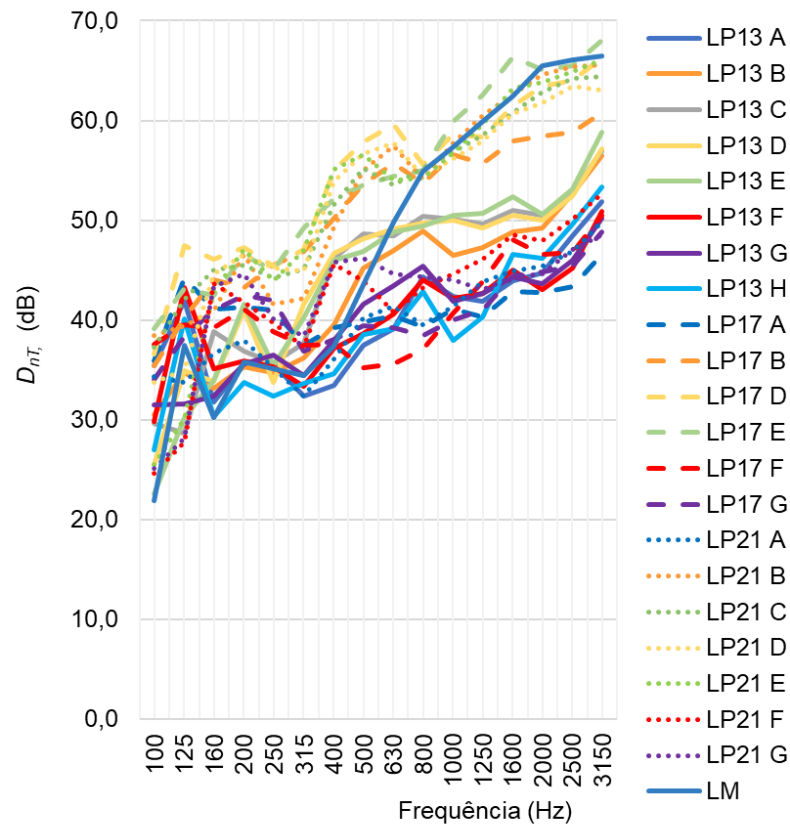
Os valores para isolamento ao ruído aéreo e níveis de pressão sonora de impacto padrão ponderado são apresentados por bandas de terço de oitava.

4.1 ENSAIOS EM LABORATÓRIO

4.1.1 Ruído aéreo

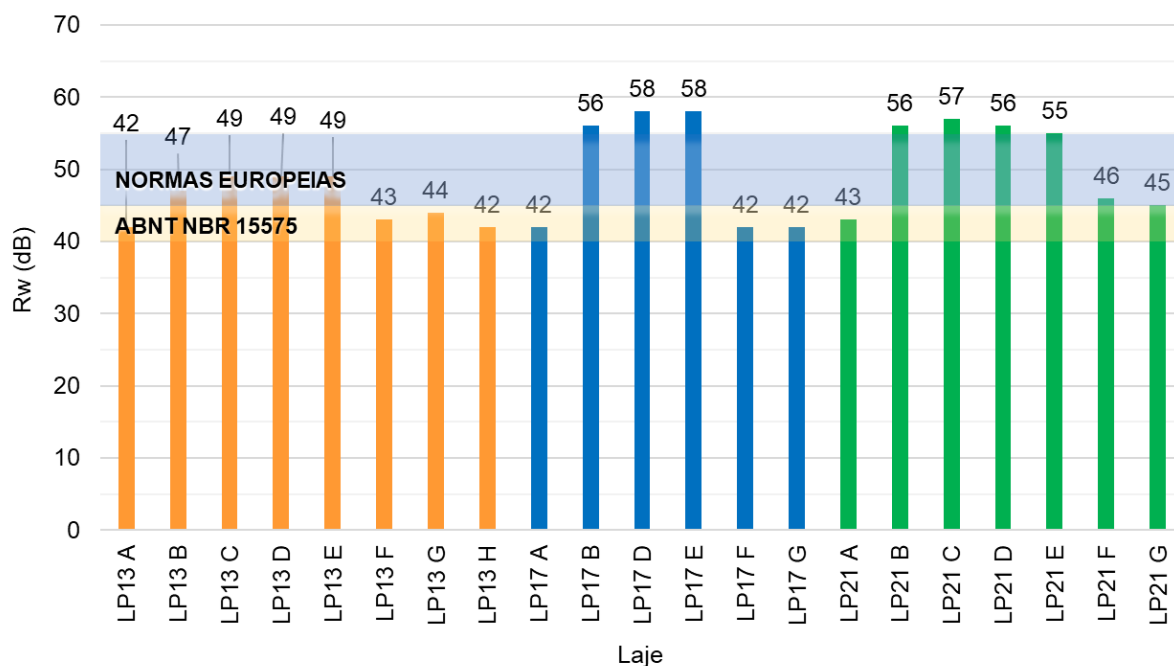
A seguir, é apresentada a perda de transmissão sonora das amostras nos ensaios de laboratório, graficamente por bandas de terço de oitava (Figura 33) e resultados ponderados (Figura 34). Em seguida, os valores apresentados estão transcritos na Tabela 14. Para efeitos comparativos, a Tabela 14 contém ainda valores inerentes a uma laje maciça de concreto, com espessura de 12 cm, ensaiada em laboratório por Oliveira *et al.*, (2021a).

Figura 33 – Isolamento ao ruído aéreo por bandas de frequência em laboratório



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 34 - Resultados ponderados de isolamento ao ruído aéreo em laboratório



Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 14 – Valores de isolamento ao ruído aéreo por bandas de frequência

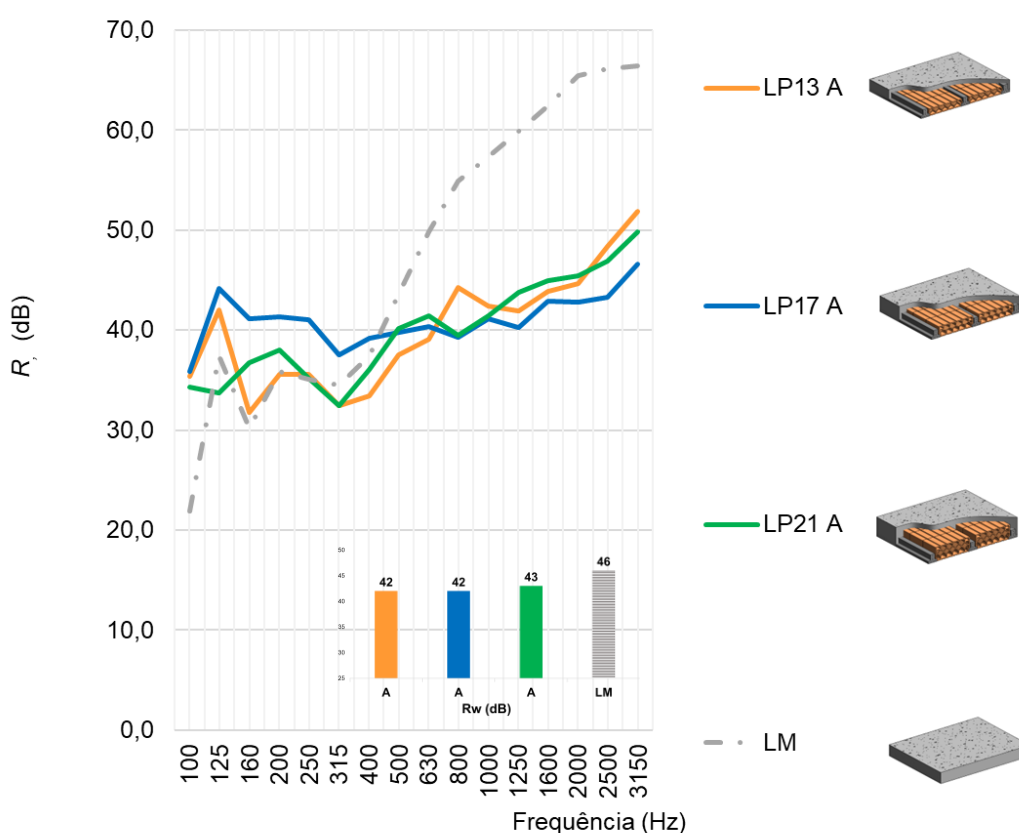
Laje	Frequência (Hz)																R _w (dB)
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	
LP13 A	35,4	42,0	31,8	35,6	35,6	32,4	33,4	37,5	39,1	44,3	42,4	41,9	43,9	44,7	48,4	51,9	42
LP13 B	30,5	34,7	33,2	35,3	34,7	36,2	39,5	45,2	47,0	48,9	46,5	47,3	48,8	49,2	52,7	56,5	47
LP13 C	29,6	28,6	38,8	36,9	35,7	37,7	46,2	48,6	48,4	50,4	50,1	49,6	51,0	50,5	52,8	57,0	49
LP13 D	25,5	34,9	33,8	41,0	33,7	41,6	46,7	48,1	49,1	49,7	50,0	49,2	50,5	50,0	52,5	57,2	49
LP13 E	22,6	30,2	33,9	41,6	35,4	40,2	46,0	46,9	48,8	49,4	50,5	50,7	52,4	50,6	53,1	58,8	49
LP13 F	29,8	43,2	35,1	35,9	35,3	33,3	37,2	38,6	40,6	44,0	42,2	42,7	45,0	43,0	45,2	50,9	43
LP13 G	31,5	31,6	32,4	35,6	36,5	34,4	38,0	41,6	43,4	45,4	41,9	42,7	44,3	43,6	46,0	50,2	44
LP13 H	27,0	40,1	30,3	33,7	32,4	33,6	34,6	38,5	39,1	42,9	38,0	40,3	46,6	46,2	49,6	53,3	42
LP17 A	35,9	44,2	41,1	41,3	41,0	37,5	39,2	39,8	40,4	39,3	41,1	40,3	42,9	42,8	43,3	46,6	42
LP17 B	35,4	40,2	44,0	43,2	45,5	46,9	50,2	53,6	55,7	53,7	56,6	55,7	57,9	58,4	58,8	60,8	56
LP17 D	36,6	47,5	46,1	47,3	45,4	47,1	55,0	57,8	59,6	55,6	58,6	58,3	61,5	63,4	64,0	66,3	58
LP17 E	39,1	43,1	42,5	46,5	45,0	49,2	52,2	53,5	54,4	55,0	59,9	62,5	66,4	65,1	65,5	68,0	58
LP17 F	37,6	39,5	39,2	41,1	38,8	37,5	37,6	35,2	35,6	37,1	40,7	43,8	48,0	46,6	46,8	50,5	42
LP17 G	34,0	38,3	41,0	42,5	42,0	36,9	38,1	39,4	39,2	38,4	40,0	41,0	44,4	44,8	45,4	48,8	42
LP21 A	34,3	33,7	36,7	38,0	35,2	32,4	36,1	40,2	41,4	39,5	41,4	43,8	44,9	45,4	46,9	49,8	43
LP21 B	38,4	39,4	40,9	46,6	41,6	42,2	49,3	55,0	57,5	54,1	57,7	60,5	62,6	64,6	65,4	65,6	56
LP21 C	37,3	42,1	45,0	45,5	44,2	45,1	51,6	55,2	53,5	55,2	56,9	58,5	60,8	62,8	64,2	64,4	57
LP21 D	33,7	35,0	44,6	46,6	45,2	44,9	53,9	56,7	57,7	54,4	56,2	57,9	60,7	61,8	63,4	63,0	56
LP21 E	25,5	30,1	42,9	47,1	43,9	47,0	55,1	56,6	54,0	54,2	56,8	59,6	63,2	63,8	64,9	66,1	55
LP21 F	24,6	27,8	43,6	41,8	39,7	37,3	45,6	43,9	40,8	43,2	44,6	46,1	48,5	47,9	50,1	52,7	46
LP21 G	25,1	28,2	43,3	44,6	40,1	38,3	45,8	46,2	44,6	44,3	44,0	43,0	44,3	44,6	47,1	48,5	45
LM	21,9	37,5	30,2	35,8	35,1	34,5	37,4	43,6	49,8	54,9	57,3	59,9	62,5	65,5	66,1	66,4	46

Fonte: Elaborada pelo autor

Ao confrontar os resultados das amostras constituídas apenas por suas camadas estruturais, sem camadas de revestimentos (LP13A, LP17A, LP21A), porém

com lajotas diferentes (espessura de 8, 12 e 16 cm, respectivamente), percebe-se um comportamento oscilante entre as amostras de 13 cm e 17 cm de espessura, sem ordenação definida, até a frequência de 1000 Hz, ponto a partir do qual o perfil gráfico das três amostras, inclusa a de 21 cm de espessura, convergem em comportamento similar. A Figura 35 ilustra a atenuação sonora ao som aéreo por bandas de frequência para as composições referidas, que apenas variam entre si em função da espessura da lajota cerâmica.

Figura 35 – Comportamento das composições A (sem revestimentos) em laboratório



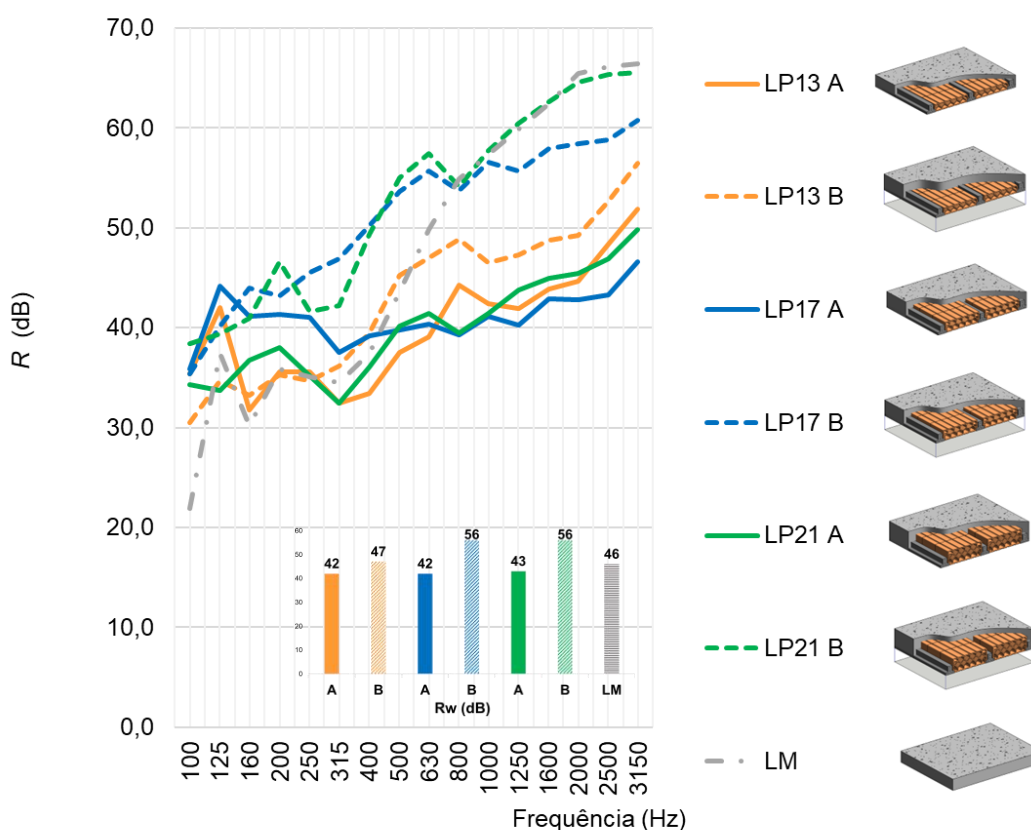
Fonte: Elaborada pelo autor

Fruto da utilização de diferentes modelos de lajotas, as composições A apresentam diferente massa total: 202 kgf/m² (LP13A), 246 kgf/m² (LP17A) e 264 kgf/m² (LP21A). Contudo, ainda que resultem em maior massa e rigidez superiores, através do aumento de espessura proporcionado às nervuras, o emprego de lajotas de maior espessura não significou melhora na capacidade de isolamento acústico aos ruídos aéreos. Os valores ponderados mostram-se muito próximos, com acréscimo de 1 dB apenas para a amostra LP21A (21 cm de espessura).

Em comparação com a laje maciça, todas as três amostras ensaiadas apresentam menor eficiência nas altas frequências. As defasagens iniciam a partir da banda de 400 Hz, chegando a 21 dB para a LP13A, 23 dB para a LP17A e 20 dB para a LP21A, na banda de 2000 Hz, o que acaba resultando em valores ponderados inferiores em 4 dB (LP13A e LP17A) e 3 dB (LP21A).

O acréscimo de camadas complementares aos sistemas de piso pode elevar a capacidade de isolamento sonoro ao ruído aéreo, conforme observado por Oliveira *et al.*, (2021a). Comparando as amostras das composições A e B deste estudo, percebe-se que a adição de revestimento na face inferior das amostras na forma de forro suspenso de gesso acartonado proporcionou ganhos consideráveis de isolamento aos sons aéreos (Figura 36).

Figura 36 – Isolamento sonoro por bandas de frequência para as composições A e B



Fonte: Elaborada pelo autor

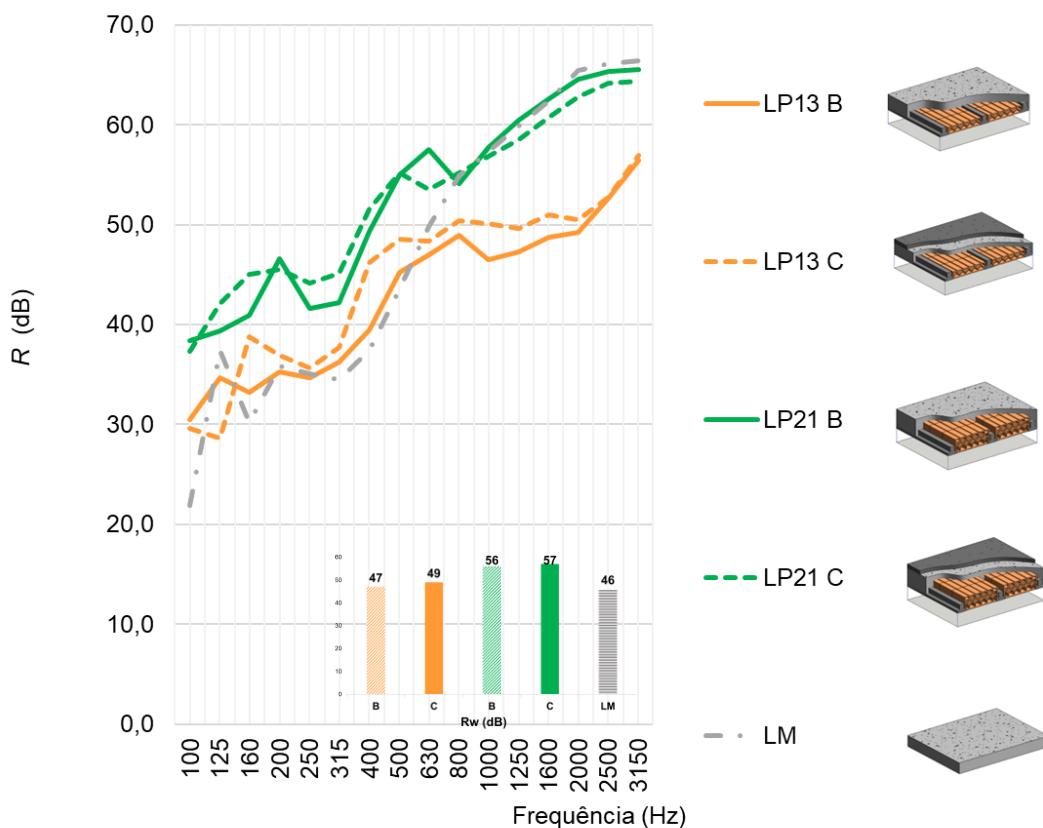
Para o sistema de piso de menor espessura (LP13), se observa um aumento do isolamento acústico a partir da banda de 250 Hz, atingindo um pico de 7,9 dB na banda de 630 Hz, que posteriormente mantêm-se estável com diferença na ordem de

4,6 dB, resultando em um ganho (valor ponderado) de 5 dB de atenuação sonora. Já nos sistemas de maior espessura (LP17 e LP21), o aumento mais expressivo de atenuação sonora é observado a partir da banda de 315 Hz (LP17B) e 400 Hz (LP21B), com ganhos consideráveis de isolamento acústico, na ordem de 14 dB e 13 dB, em valores ponderados, para LP17B e LP21B, respectivamente.

Conforme já destacado anteriormente, considerando que a adição de determinadas camadas aumenta em escala relevante a massa do sistema, presume-se que estes acréscimos impactem o seu comportamento acústico, tendo em conta princípios como a Lei da Massa e o do sistema massa-mola-massa (OLIVEIRA *et al.*, 2021a), principalmente no tocante aos ruídos aéreos (BIES; HANSEN, 2017), ainda que, em sistemas de piso não homogêneos, como no caso das lajes nervuradas de vigotas e lajotas, a transmissão de ruídos seja mais complexa que a observada em sistemas de piso homogêneos, o que controverte a aplicação de modelos teóricos. (HASSAN, 2009).

Neste estudo, no que tange às implicações do acréscimo de massa advindo da adição de camadas complementares ao sistema de piso, pode-se comparar a composição B com o comportamento da composição C (acrescida com contrapiso, em relação à composição B), tendo em ambas a presença do forro suspenso. Abaixo, a Figura 37 expressa os dados dos ensaios de laboratório das composições citadas acima.

Figura 37 - Contraste de isolamento sonoro relativo à adição de contrapiso

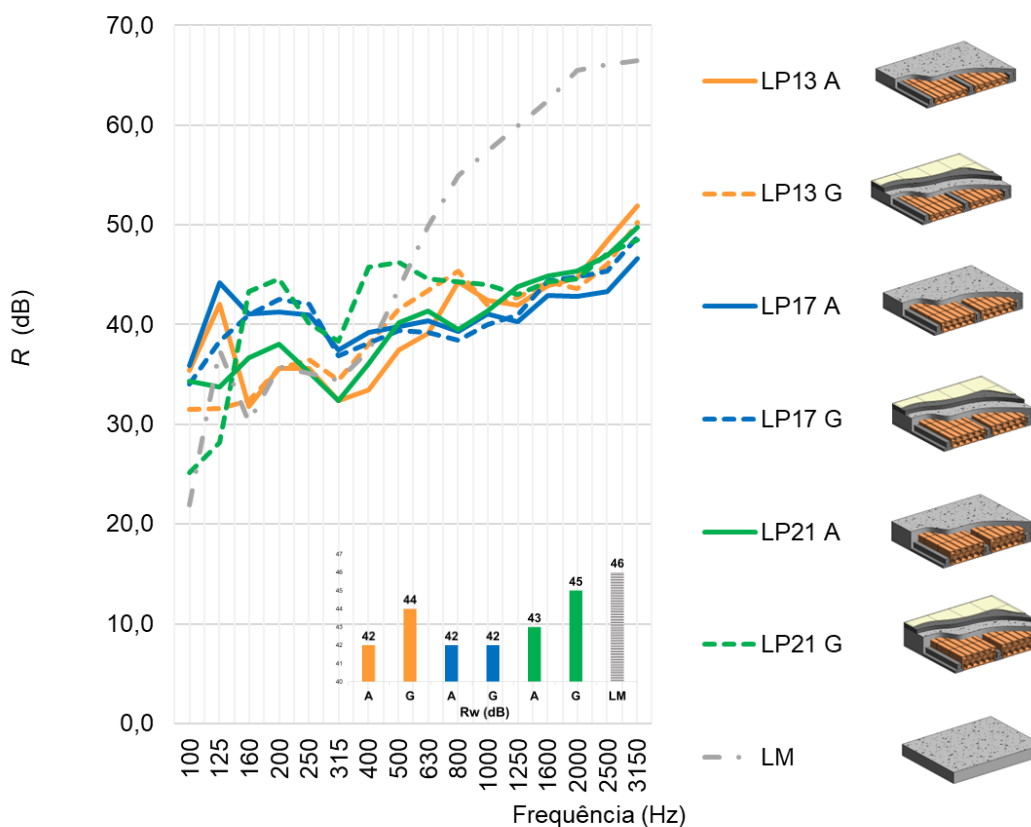


Fonte: Elaborada pelo autor

Conforme evidenciado na Figura 37, a camada de contrapiso aumentou a capacidade de isolamento sonoro aéreo em 2 dB na LP13C e 1 dB na LP21C.

Prosseguindo sob a ótica do aumento de massa do sistema, pode-se avaliar o comportamento da composição G, esta composta por contrapiso e piso cerâmico, porém sem a presença de forro suspenso, em contraponto à composição A, formada apenas pela camada estrutural. A Figura 38 contrasta estes resultados.

Figura 38 – Contraste de isolamento sonoro relativo à adição de contrapiso e piso cerâmico



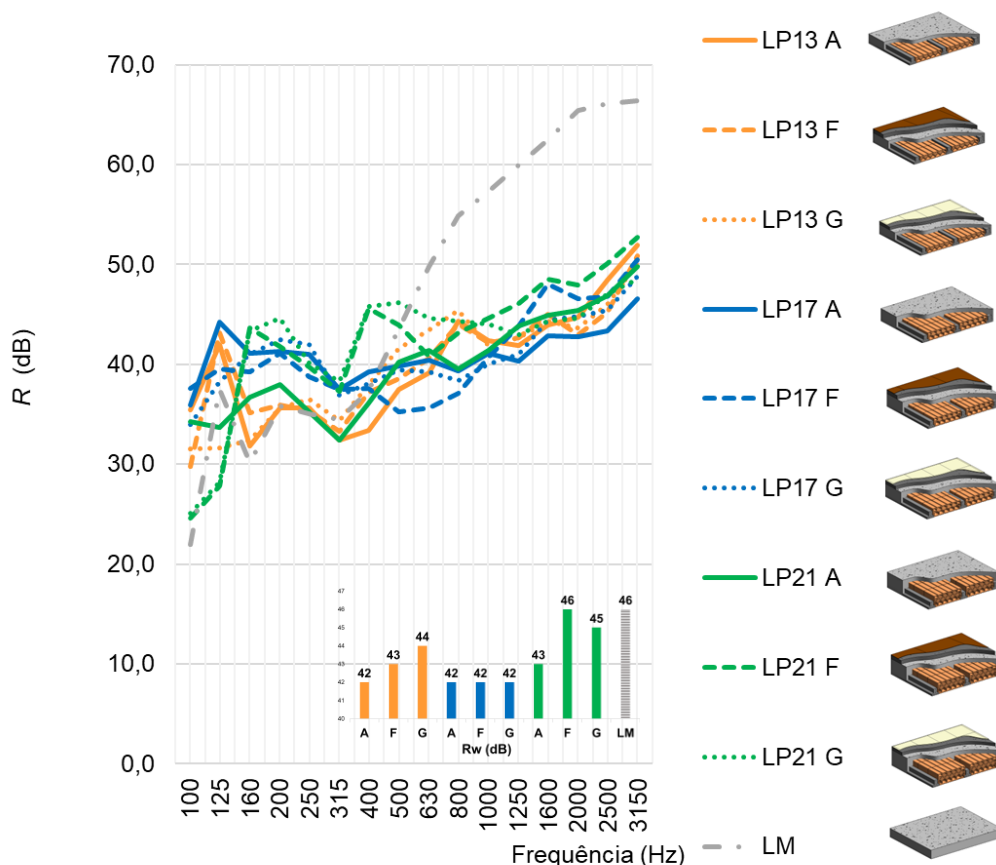
Fonte: Elaborada pelo autor

Nas amostras da composição G, acrescidas com contrapiso e piso cerâmico, porém sem forro de gesso, foi observado ganho de isolamento ao ruído aéreo de 2 dB para a LP13G e LP21G, quando comparadas com suas respectivas composições A. Na LP17, o resultado ponderado se mostrou igual para ambas as composições (A e G).

Em se tratando de camadas de acabamento em piso cerâmico e laminado, não foram observadas diferenças significativas de isolamento aos sons aéreos. Conforme evidenciado na Figura 39, o comportamento das amostras ao longo das bandas de frequência se mostra oscilante, sem uma hierarquia clara. Nas amostras tipo LP13, os resultados ponderados apontam 1 dB de diferença, com maior valor observado na amostra G (com piso cerâmico). Nas amostras LP17 os resultados se mostraram iguais para ambas as composições de camada de acabamento, e nas amostras LP21 houve diferença de 1 dB, porém com resultado superior na amostra com piso laminado

em relação à amostra com piso cerâmico, o que pode ser explicado pelo contrapiso 1 cm mais espesso nas amostras de piso laminado.

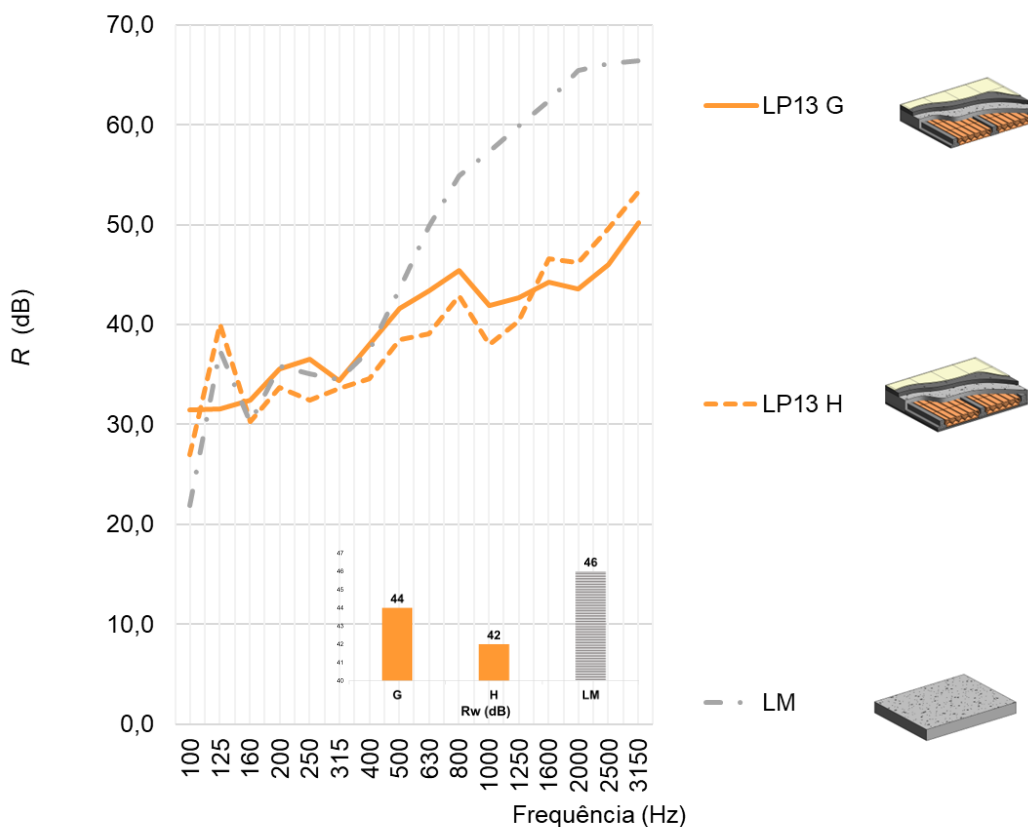
Figura 39 – Comparação das amostras com camada de acabamento em piso cerâmico e laminado



Fonte: Elaborada pelo autor

Ainda sobre a repercussão no isolamento sonoro a partir do acréscimo de massa no sistema, a Figura 40 apresenta os dados dos ensaios das amostras LP13G e LP13H, sendo a primeira com contrapiso e piso cerâmico, e a segunda com acréscimo de camada de revestimento inferior argamassado com espessura de 20 mm.

Figura 40 - Comportamento de amostra sem (LP13G) e com (LP13H) revestimento argamassado na face inferior



Fonte: Elaborada pelo autor

Ainda que a massa superficial da composição LP13G (286 kgf/m²) se aproxime, e da composição LP13H (322 kgf/m²) até ultrapasse a o valor correspondente à laje maciça (300 kgf/m²), ambas apresentam isolamento sonoro inferior à laje maciça. Assim como nas amostras de sistemas de piso sem revestimento (composições A), o perfil gráfico permite identificar perda considerável de capacidade de atenuação a partir da banda de 400 Hz.

O acréscimo de massa aos sistemas de lajes não resultou em tendência evidente de aumento do índice de redução de transmissão sonora. Quando advindo da utilização de lajotas de maior espessura, a diferença observada foi de apenas um 1 dB, (considerando as composições A, formadas apenas pela camada estrutural) com maior valor observado na amostra de maior massa (LP21A). Quando oriundo da adição de camada de contrapiso, refletiu aumento de 2 dB na LP13 e 1 dB na LP21 (composição C comparada com a composição B). O acréscimo de piso cerâmico não

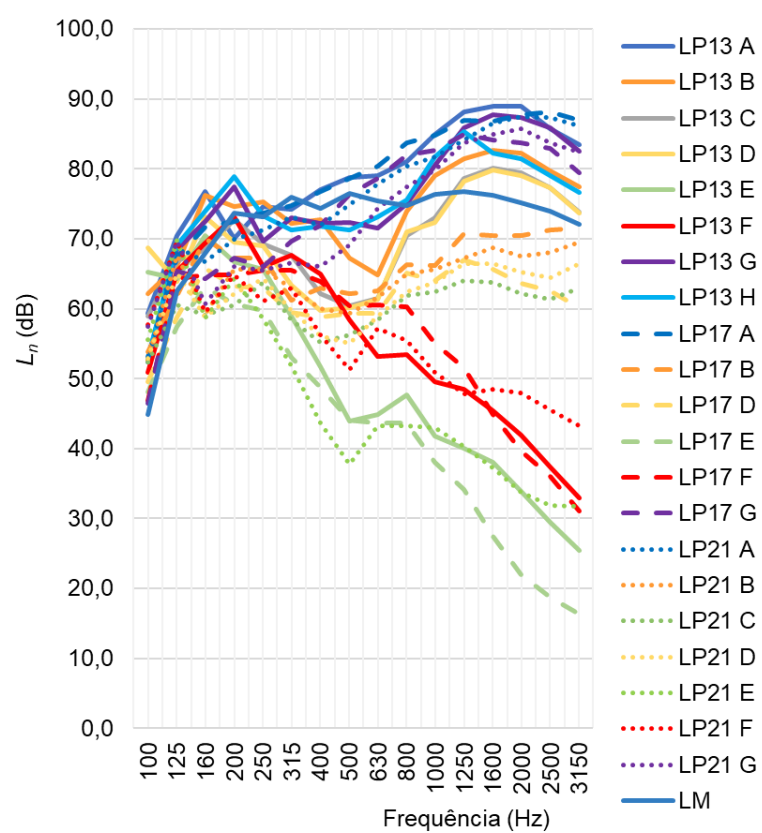
representou ganhos. Tal comportamento pode ser justificado pelo efeito de ressonância ocorrido no interior dos alvéolos das lajotas, já relatado em estudo computacional de Oliveira e Patrício (2017) e experimental de Souza et al. (2020) e Oliveira et al., (2021a), que difere o perfil gráfico por bandas de frequência em comparação a laje maciça. Considerada esta hipótese, nota-se pouca influência da geometria (ver Figura 18) e volume dos alvéolos das lajotas (3.554,48 cm³ para lajota H8, 4.727,8 para lajota H12 e 8.251,00 para lajota H16), diferentes em cada composição, uma vez que as curvas das amostras a partir do momento em que tal comportamento é observado (400 Hz) não assumem grandes distinções entre si.

A adição de revestimento argamassado na face inferior da LP13 resultou menor capacidade de isolamento aéreo (LP13H comparada com a LP13G). Acredita-se que este resultado pode ter relação com imprecisão de ensaio.

4.1.2 Ruído de impacto

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de nível de pressão sonora de impacto ponderado realizados em laboratório. A Figura 41 e a Tabela 15 sintetizam os resultados. Em seguida, a Figura 42 apresenta os resultados ponderados para cada composição (amostra) ensaiada. Assim como considerado para ruídos aéreos, consta de forma auxiliar nos resultados a caracterização em laboratório de uma laje maciça de 12 constante no trabalho de Oliveira *et al.*, (2021a).

Figura 41 – Níveis de pressão sonora de impacto em laboratório (perfil gráfico)



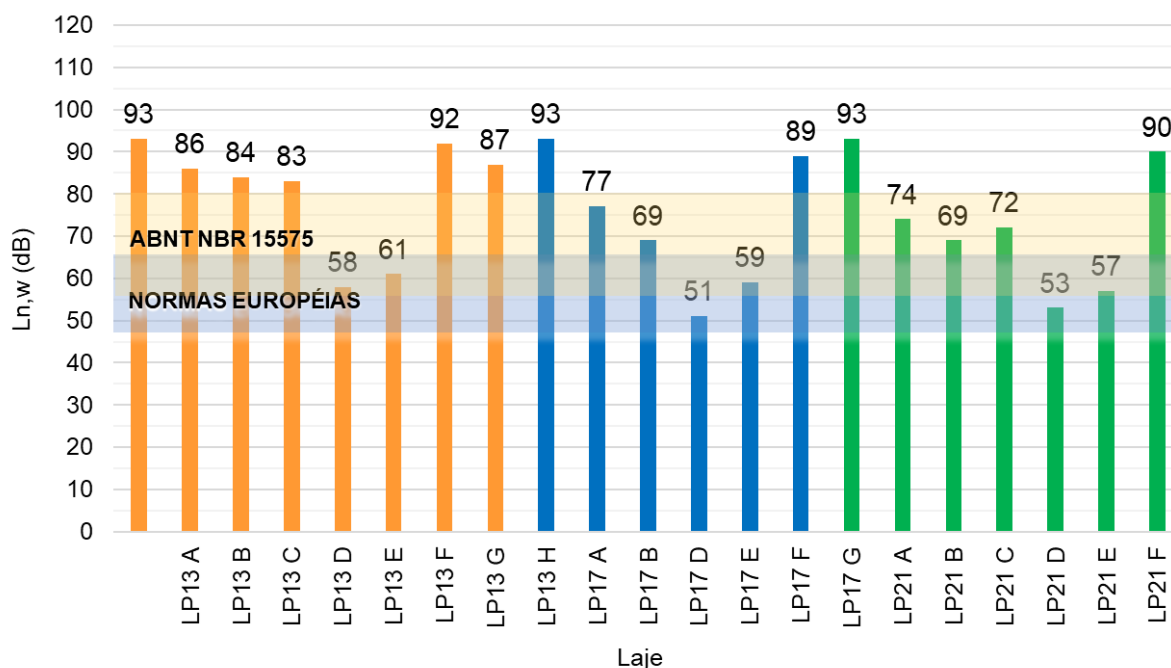
Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 15 - Nível de pressão sonora de impacto em laboratório (valores tabelados)

Laje	Frequência (Hz)																$L_{n,w}$ (dB)
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	
LP13 A	59,4	70,5	76,7	70,0	74,6	74,2	77,1	78,8	79,0	81,1	85,0	88,1	88,9	88,9	85,8	83,5	93
LP13 B	62,2	66,2	76,2	74,6	75,3	72,2	72,8	67,3	64,9	73,9	79,0	81,4	82,7	82,2	79,7	77,5	86
LP13 C	59,0	66,8	68,4	72,8	69,2	67,7	62,1	60,4	61,5	70,5	73,0	78,6	80,1	79,5	77,3	73,8	84
LP13 D	68,7	63,9	73,1	69,5	69,0	63,3	59,8	60,1	61,4	71,0	72,3	78,2	79,8	79,0	77,3	73,7	83
LP13 E	65,3	64,3	70,5	66,7	65,6	58,9	51,7	43,9	44,8	47,7	41,8	40,1	38,0	33,9	29,4	25,4	58
LP13 F	50,9	65,4	69,4	73,1	66,1	67,7	65,0	58,4	53,2	53,5	49,6	48,5	45,4	41,9	37,3	33,0	61
LP13 G	52,9	68,4	72,5	77,4	69,6	73,0	72,2	72,3	71,5	75,0	80,5	85,9	87,7	87,3	85,9	82,5	92
LP13 H	52,9	69,1	74,0	78,9	73,3	71,3	71,8	71,3	73,1	75,6	81,7	85,4	82,3	81,5	79,1	76,6	87
LP17 A	53,0	67,4	71,7	72,5	73,7	74,7	76,8	78,6	80,4	83,8	84,8	86,9	86,8	87,8	88,2	87,0	93
LP17 B	53,9	61,9	70,0	67,2	67,3	61,2	63,0	62,2	62,5	66,3	66,2	70,7	70,5	70,5	71,3	71,6	77
LP17 D	49,5	58,8	65,8	63,2	62,9	59,5	58,8	59,4	59,4	65,1	64,0	67,0	65,6	63,6	62,5	60,1	69
LP17 E	48,1	57,5	63,1	60,7	59,8	53,0	48,7	44,1	43,7	43,7	38,0	34,1	27,5	22,0	18,7	16,3	51
LP17 F	46,9	64,3	64,8	64,9	65,5	65,5	63,9	60,4	60,5	60,3	55,1	51,6	44,9	39,7	36,0	31,1	59
LP17 G	46,5	65,4	64,3	67,2	66,0	69,6	71,9	76,4	78,7	82,0	82,6	85,0	84,1	83,7	82,9	79,4	89
LP21 A	52,4	68,8	66,7	69,9	71,3	73,2	71,9	74,9	77,8	80,4	81,7	84,2	86,6	87,5	87,4	86,2	93
LP21 B	52,6	67,7	59,2	65,7	65,6	63,0	60,0	59,3	61,6	65,0	65,6	67,3	68,7	67,5	68,0	69,5	74
LP21 C	52,4	60,5	59,1	60,5	63,7	58,4	55,2	56,3	58,4	61,9	62,4	64,0	63,7	62,1	61,4	63,0	69
LP21 D	52,9	65,1	58,8	62,2	64,3	59,8	56,1	55,1	59,0	62,4	63,7	66,4	66,4	65,3	64,4	66,5	72
LP21 E	55,6	69,8	58,7	64,3	58,5	51,9	43,6	37,7	43,2	43,3	43,0	40,3	37,2	33,7	31,8	31,7	53
LP21 F	57,7	69,6	59,5	64,9	61,1	62,9	56,3	51,3	57,2	55,5	50,9	47,8	48,5	48,0	45,5	43,2	57
LP21 G	57,4	69,7	60,7	66,1	65,5	66,6	66,0	69,1	74,3	77,4	79,8	83,8	84,9	85,7	83,8	82,4	90
LM	44,8	62,5	67,9	73,7	73,2	75,9	74,3	76,5	75,4	74,7	76,3	76,8	76,2	75,1	73,9	72,1	80

Fonte: Elaborada pelo autor

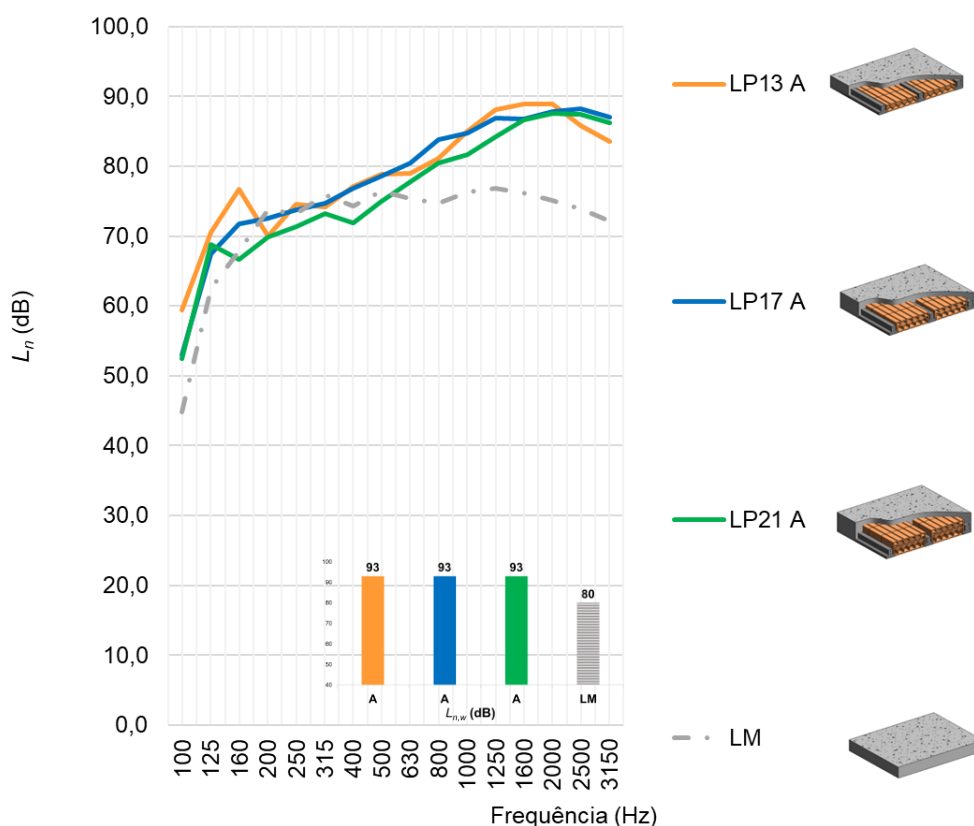
Figura 42 - Níveis de pressão sonora de impacto em laboratório (resultados ponderados)



Fonte: Elaborada pelo autor

As lajes pertinentes a composição A, sem quaisquer camadas de revestimento, apresentaram crescimento progressivo dos níveis sonoros até a banda de 2000 Hz, perfil típico de sistemas rígidos, que apresentam maiores níveis de pressão sonora de impacto nas altas frequências e, por consequência, menor desempenho nestas bandas. A Figura 43 contém a distribuição gráfica dos níveis de pressão sonora por bandas de frequência.

Figura 43 - Nível de pressão sonora de impacto em laboratório: composição A



Fonte: Elaborada pelo autor

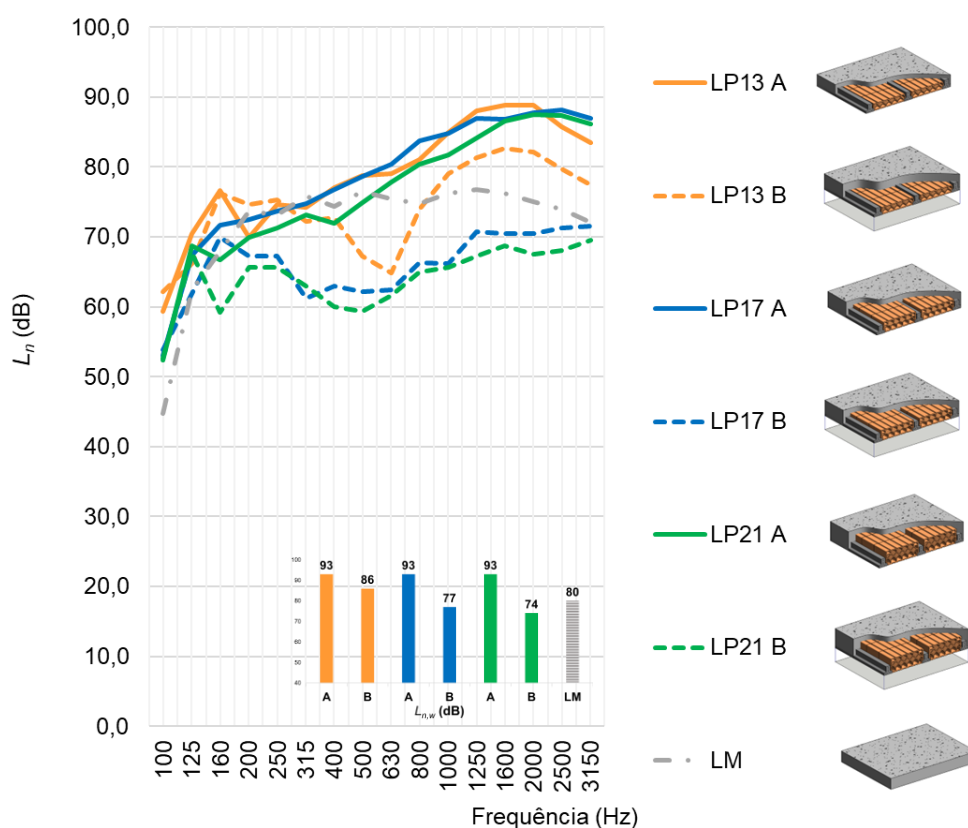
Ainda que a laje de 21 cm de espessura (LP21A) tenha apresentado níveis sonoros ligeiramente menores que as demais lajes (LP13A e LP17A) em grande parte das bandas de frequência, as três amostras sem revestimentos resultaram em mesmo desempenho ($L_{n,w}$ de 93 dB), ou seja, não se observam diminuições nos valores ponderados decorrentes do aumento de espessura, contrapondo Hassan (2009), que indica, ainda que com mesmo comportamento gráfico, redução dos níveis sonoros com o aumento da espessura do sistema de piso, sem ser alteradas as características elásticas da superfície do sistema. Logo, o aumento de rigidez proveniente do

aumento da espessura das nervuras parece não impactar o desempenho das lajes, quando estas não são complementadas com outras camadas.

Quando comparadas à laje maciça amostrada, percebe-se que os sistemas de piso tipo A apresentam maiores níveis sonoros a partir da banda de 630 Hz, deficiência que toma maior proporção gradativamente nas demais bandas de altas frequências, o que pode ser decorrente do fenômeno de ressonância no interior das lajotas (OLIVEIRA; PATRÍCIO, 2017; SOUZA *et al.*, 2020; OLIVEIRA *et al.*, 2021a).

Partindo das composições A, a adição sucessiva de camadas aos sistemas de piso resultou em menores valores de pressão sonora de impacto. Abaixo, a Figura 44 contrasta o comportamento das composições A e B, que evidenciam a influência nos resultados de laboratório subsequentes a instalação de forro suspenso.

Figura 44 - Nível de pressão sonora de impacto em laboratório: influência da presença de forro suspenso (composição B)



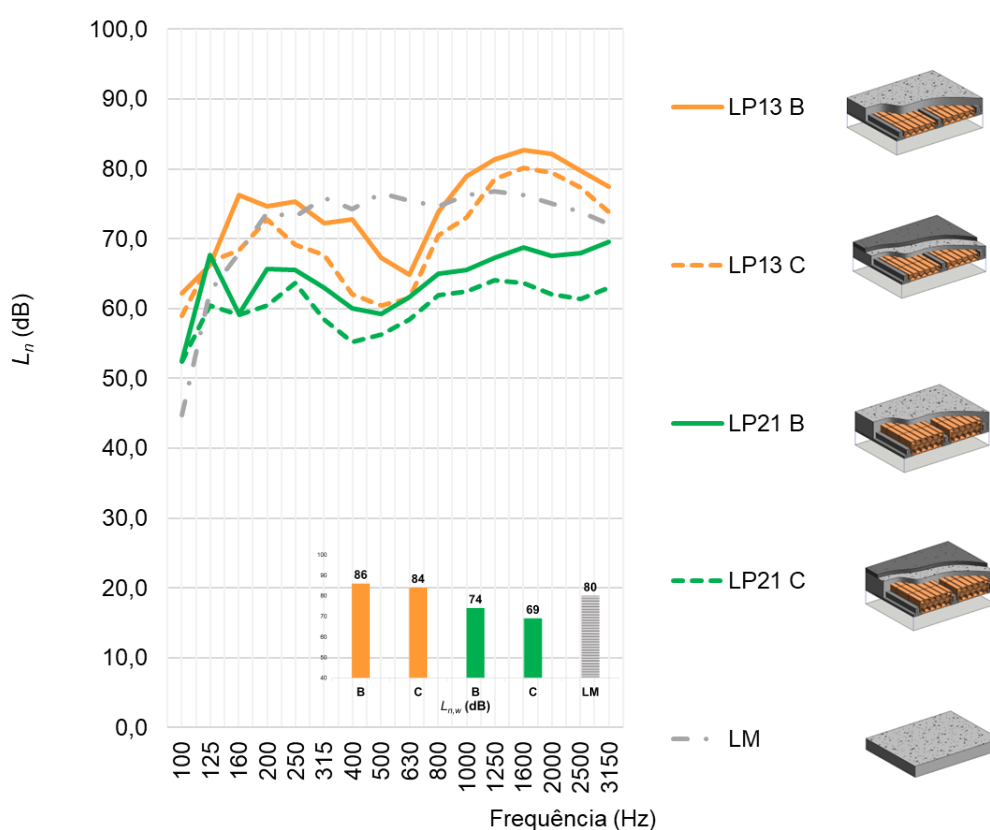
Fonte: Elaborada pelo autor

A presença de forro suspenso proporcionou redução na transmissão de sons de percussão aos três tipos de laje, com diminuições consideráveis nas lajes de maior

espessura. Foram observadas diminuições de 6 dB para a LP13, 14 dB para LP17 e 19 dB para a LP21. A influência do forro suspenso verificada neste estudo para lajes nervuradas unidirecionais de vigotas e lajotas cerâmicas é superior à observada por Tomitaka, Nojima e Masuda (2016) para laje maciça e Bet *et al.* (2019) para lajes nervuradas bidirecionais sem elementos de enchimento (lajes com cubetas plásticas provisórias).

A adição de camada de contrapiso melhorou o desempenho do sistema frente aos sons de impacto. A seguir, a Figura 45 expõe o comportamento das composições B e C, apontando a influência da adição de contrapiso (composição C) ao sistema B.

Figura 45 - Nível de pressão sonora de impacto em laboratório: influência da adição de contrapiso



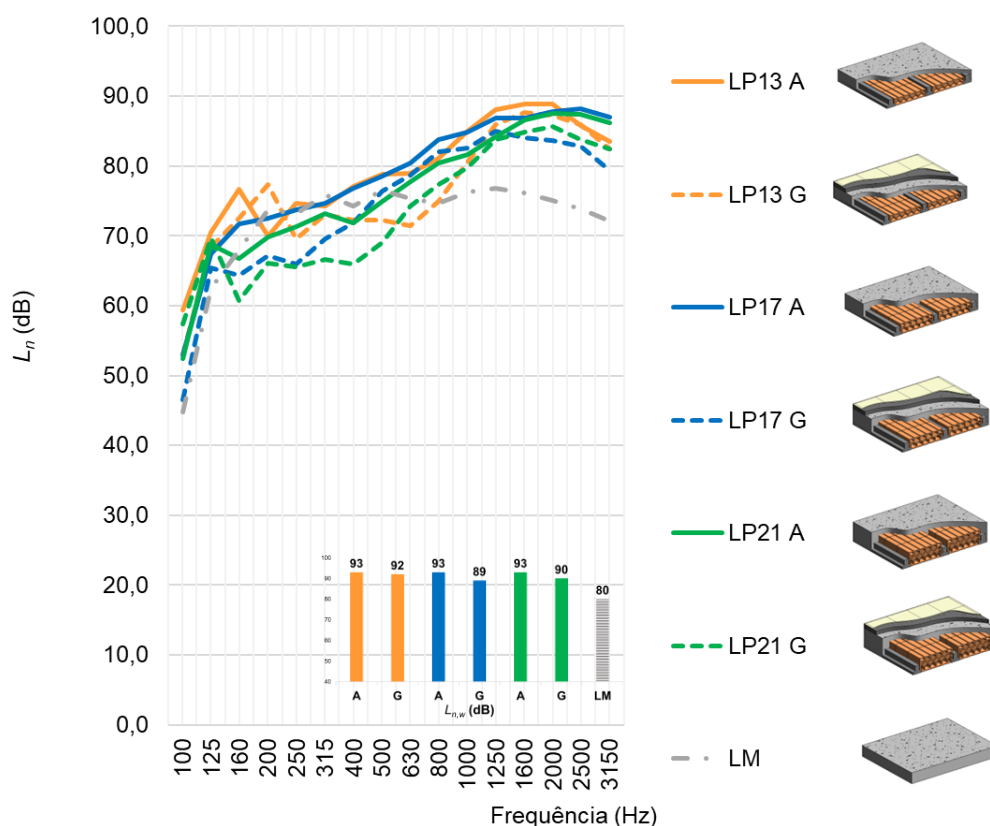
Fonte: Elaborada pelo autor

Conforme mostra a Figura 45, foram observadas reduções dos níveis sonoros em 3 dB na LP13. Souza *et al.* (2020) relatam 8 dB; Haas *et al.* (2022) 7 dB. Na LP21 foi observada melhora de 5 dB. Cabe destacar que no presente estudo a influência da

adição de contrapiso está sendo avaliada entre amostras contendo forro suspenso (composições B e C), diferentemente do ocorrido nos trabalhos dos autores citados.

A soma de camada de acabamento em piso cerâmico foi capaz de reduzir os níveis de pressão sonora nos três tipos de lajes (LP13, LP17 e LP21), ainda que os sistemas tenham mantido perfil gráfico (Figura 46) característico de sistema de piso rígido, com aumento dos níveis sonoros até a banda de 2000 Hz.

Figura 46 - Nível de pressão sonora de impacto em laboratório: composição G



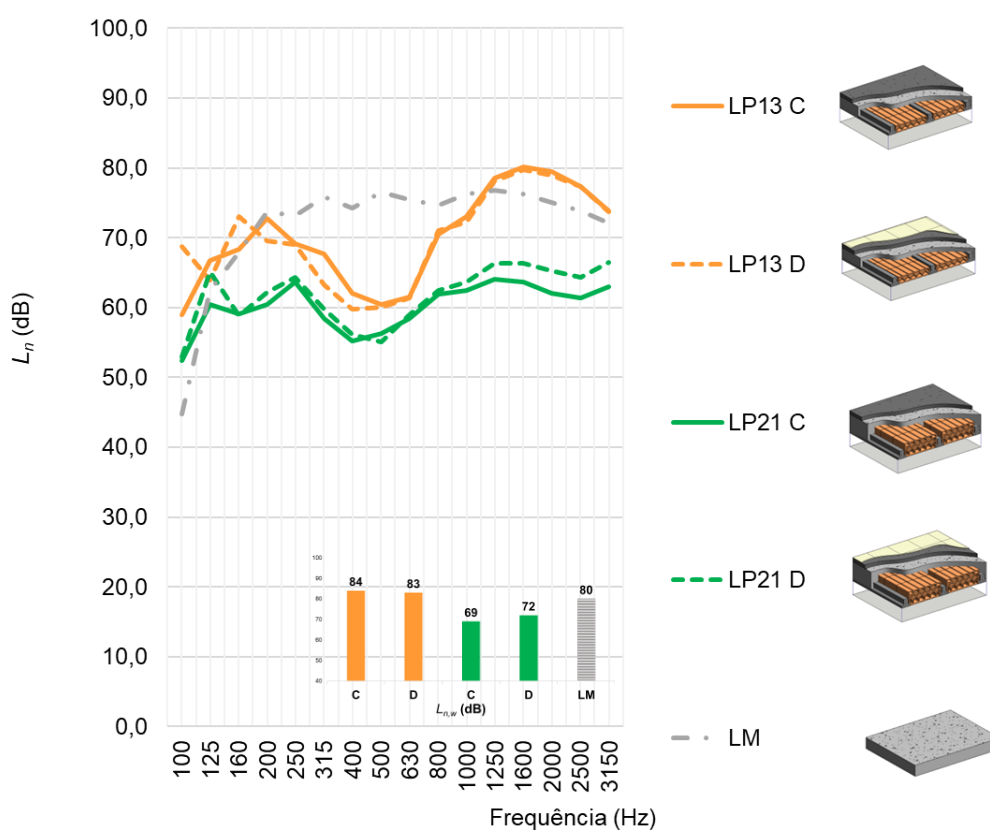
Fonte: Elaborada pelo autor

Conforme se observa na Figura 46, a laje LP13G demonstra redução dos níveis sonoros a partir da banda de 315 Hz, com pico de 7,5 dB na banda de 630 Hz. Já as lajes LP17G e LP21G apresentam menor transmissão sonora ao longo de praticamente todas as bandas de frequência, com melhor eficiência em 160 Hz (LP17) e 315 Hz (LP21). Diferentemente das composições tipo A, as amostras tipo G corroboram Hassan (2009): o aumento de espessura do sistema ofereceu maior eficiência frente aos níveis sonoros de impacto. Os resultados ponderados se mostram inferiores em 3 dB na LP21, 4 dB na LP17 e 1 dB na LP13, este último igual

ao observado por Haas *et al.* (2022). É possível que o aumento da espessura seja mais efetivo quando oferecido pelas camadas complementares executadas acima das nervuras, distribuídas homogeneamente sobre a laje, quando comparada ao ganho de espessura decorrente do aumento das nervuras. Este comportamento é relatado também por Souza *et al.* (2020).

Todavia, o ganho de eficiência parece estar atrelado ao conjunto contrapiso e camada de acabamento com piso cerâmico, uma vez que, não foi possível observar ganho de desempenho relativo somente à adição de piso cerâmico (Figura 47).

Figura 47 - Nível de pressão sonora de impacto em laboratório: influência da adição de camada de acabamento em piso cerâmico



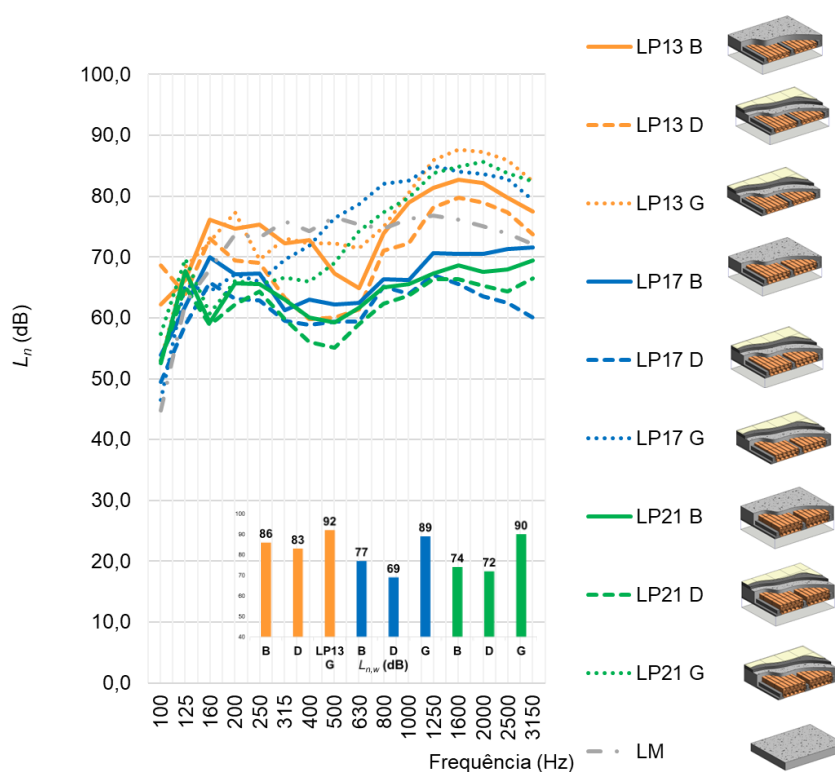
Fonte: Elaborada pelo autor

Conforme exposto acima, quando avaliadas as composições C e D, que diferem entre si pela presença do piso cerâmico, a LP13 mostrou redução de níveis sonoros igual a 1 dB. Para a LP21, por outro lado, foi observado aumento de 3 dB, o que não permite estabelecer uma relação de melhora na eficiência do sistema em

relação aos ruídos de impacto através da instalação da camada de acabamento em piso cerâmico.

Ainda considerando a composição G, pode-se avaliar novamente a influência da presença do forro suspenso, adicionalmente à análise feita anteriormente entre as composições A e B. Quando comparadas, as composições D e G (Figura 48), distintas entre si pela presença do forro suspenso (composição D), se torna perceptível que a laje LP13D responde de forma distinta às lajes LP17D e LP21D, sendo que primeira mostra elevação dos níveis sonoros mais intensa a partir de 630 Hz.

Figura 48 - Nível de pressão sonora de impacto em laboratório: influência da presença de forro suspenso (composição D)



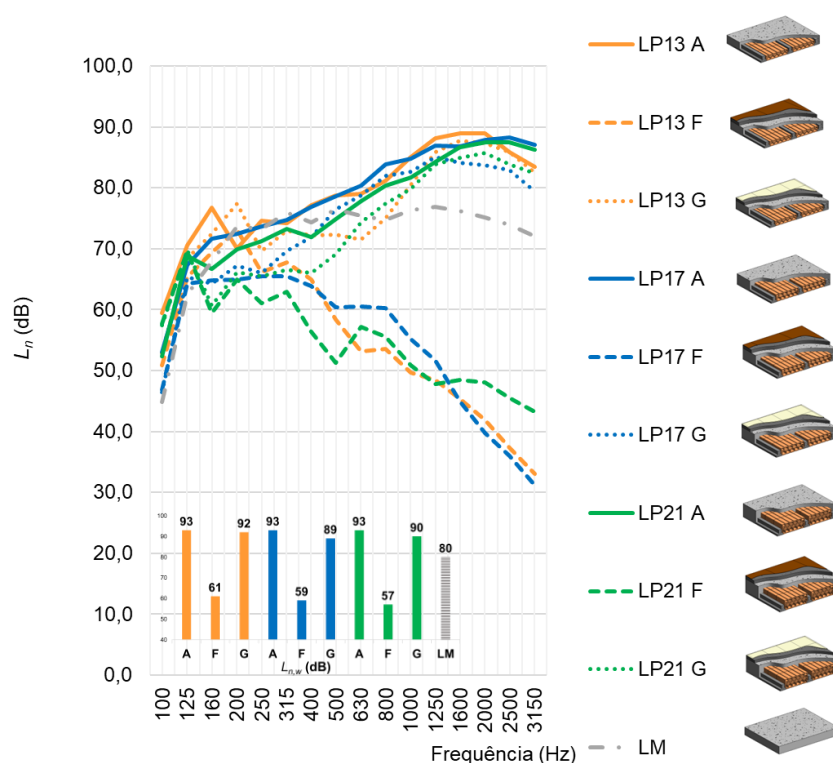
Fonte: Elaborada pelo autor

Estudando lajes de 13 de espessura, Souza *et al.* (2020) observaram melhor desempenho em altas frequências para a laje sem forro suspenso. Os autores consideram a hipótese da ocorrência de ressonância no vão existente entre o forro suspenso e a face inferior da laje. No presente estudo, diferentemente dos relatos dos autores supracitados, as amostras com forro suspenso mantiveram maior eficiência frente aos ruídos de impacto em todos os sistemas avaliados (LP13, LP17 e LP21), com maior prevalência para os dois últimos, de maior espessura. Ainda conforme visto

na Figura 48, os ganhos em termos de resultados ponderados em decurso da instalação do forro suspenso se apresentam na ordem de 3 dB (LP13), 8 dB (LP17) e 2 dB (LP21). Na presença de camada de acabamento em piso laminado em detrimento do piso cerâmico (Figuras Figura 49 e Figura 50) também é confirmada a diminuição nos níveis de transmissão sonora de impacto, de forma bastante similar ao observado nos sistemas com piso cerâmico: 3 dB (LP13), 8 dB (LP17) e 4 dB (LP21).

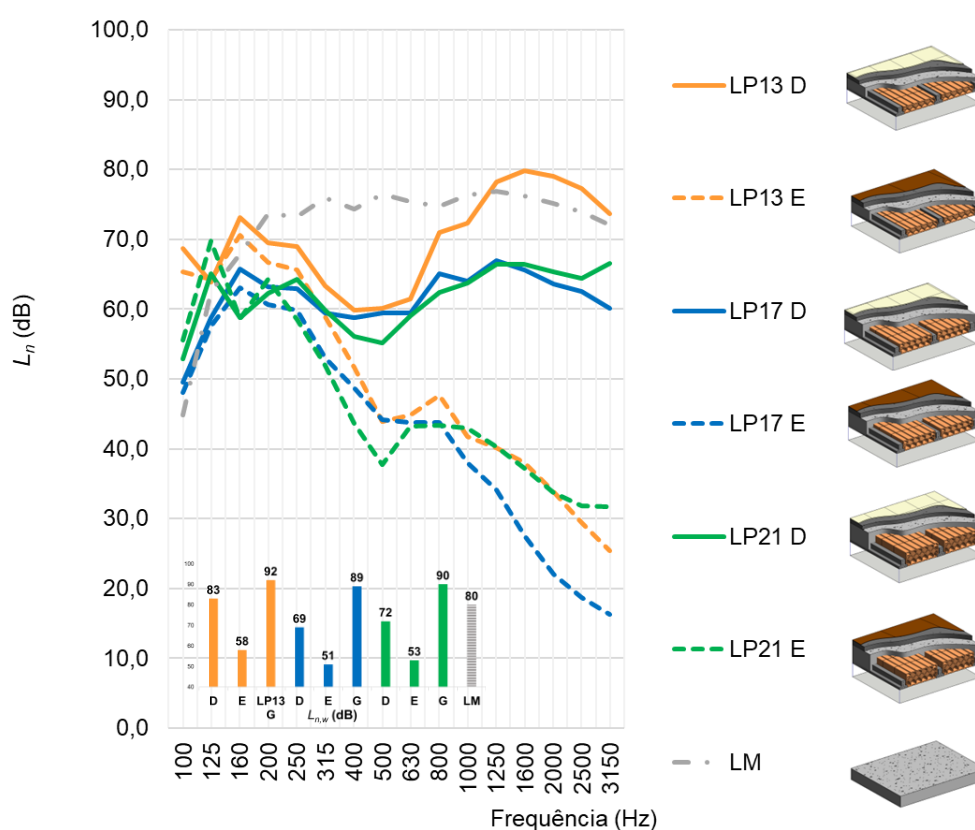
Quando comparadas as camadas de acabamento em piso cerâmico e laminado, o emprego do piso laminado proporcionou melhor desempenho tanto nas lajes sem forro suspenso (Figura 49) quanto nas amostras com forro suspenso (Figura 50).

Figura 49 - Nível de pressão sonora de impacto em laboratório: composições F e G



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 50 - Nível de pressão sonora de impacto em laboratório: composições D e E

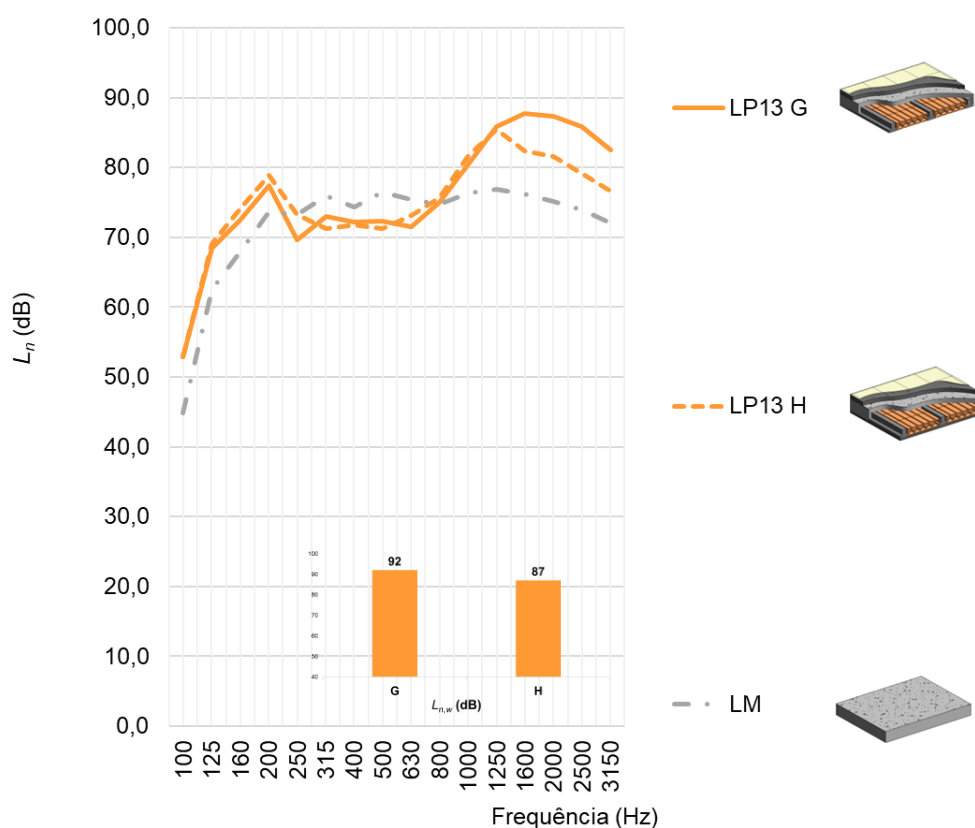


Fonte: Elaborada pelo autor

Nos sistemas com camada de acabamento em piso laminado (E, F) o perfil gráfico assumiu comportamento distinto de todos os demais sistemas, com redução contínua dos níveis sonoros a partir da banda de 800 Hz, que prosseguiu após a frequência de 2000 Hz, comportamento característico de sistemas de piso com amortecimento eficiente frente aos sons de percussão (LEE; KIM; LIM, 2014; CALLERI *et al.*, 2019; PARK; YOO; CHO, 2020). Dentre as amostras, o melhor desempenho corresponde à composição E, que contém forro suspenso.

Quando aplicado revestimento argamassado na face inferior da laje LP13 (composição LP13H), houve melhora no desempenho em 5 dB (comparada a amostra LP13G). O resultado da comparação está exposto na Figura 51.

Figura 51 - Nível de pressão sonora de impacto em laboratório: composições G e H



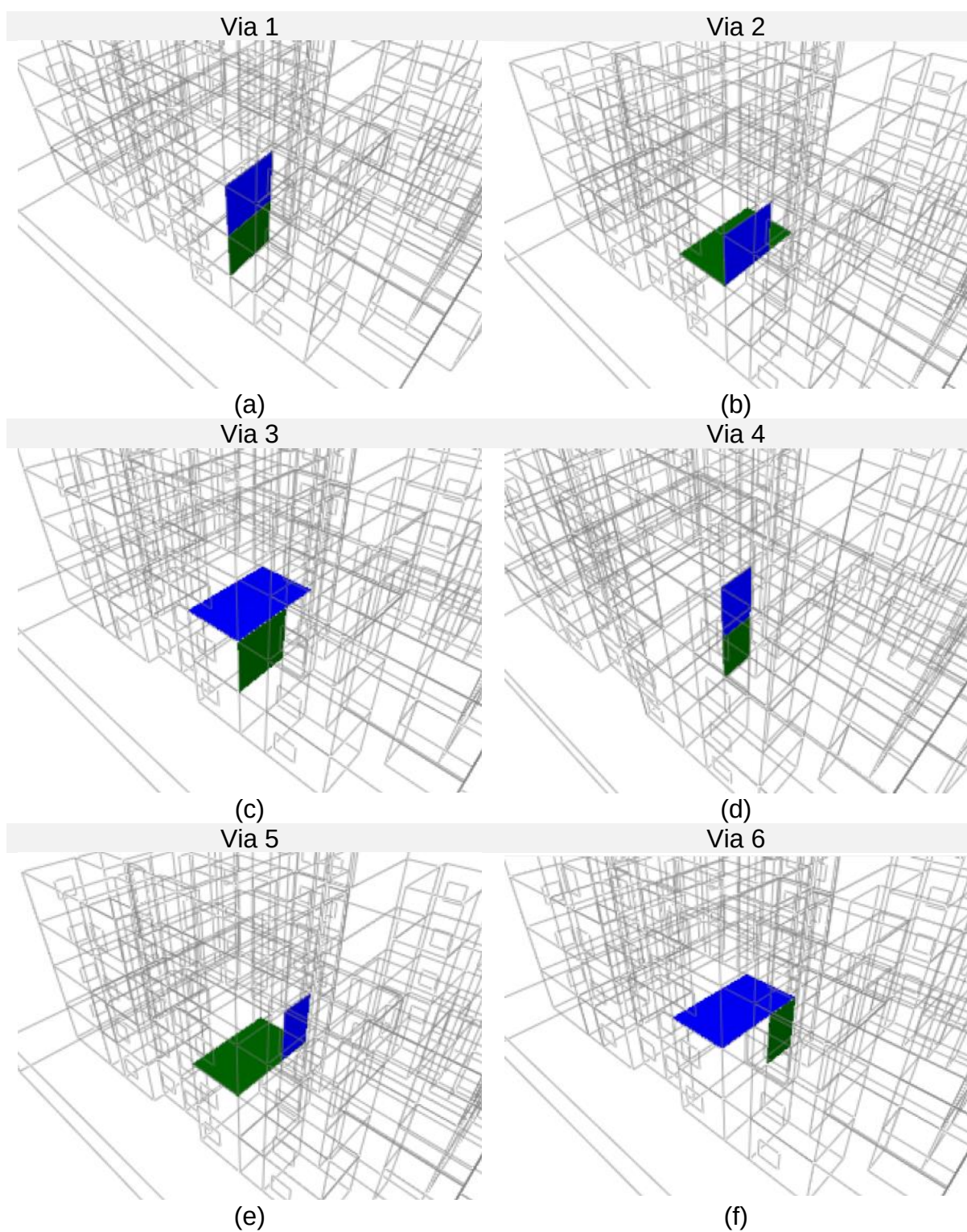
Fonte: Elaborada pelo autor

4.2 ESTIMATIVA DE DESEMPENHO – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Conforme referido anteriormente, a edificação amostrada foi modelada na ferramenta SONarchitect® com o intuito de estimar o comportamento em campo das composições de laje propostas, sendo na presente seção apresentados os resultados obtidos para o cômodo amostrado (descrito anteriormente no item 3.2). A edificação também foi simulada com laje maciça, com dados oriundos do trabalho de Oliveira *et al.*, (2021a), para efeitos comparativos.

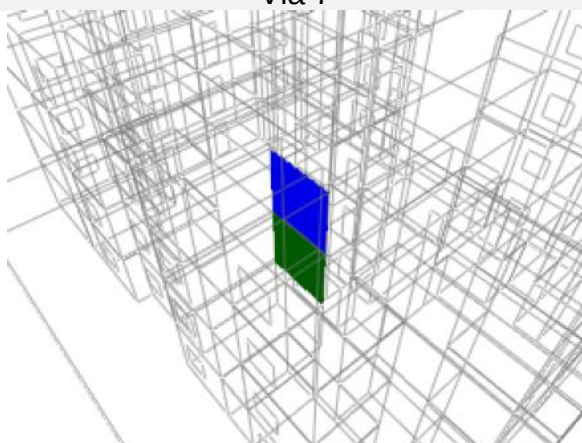
A seguir, estão indicadas as vias de transmissões marginais para sons aéreos (Figura 52) e de impacto (Figura 53), que serão referenciadas posteriormente na apresentação dos resultados das simulações computacionais.

Figura 52 – Vias de transmissões marginais para sons aéreos



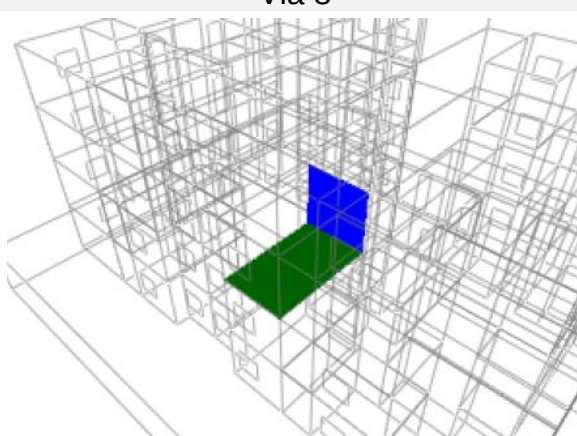
(continua)

Via 7



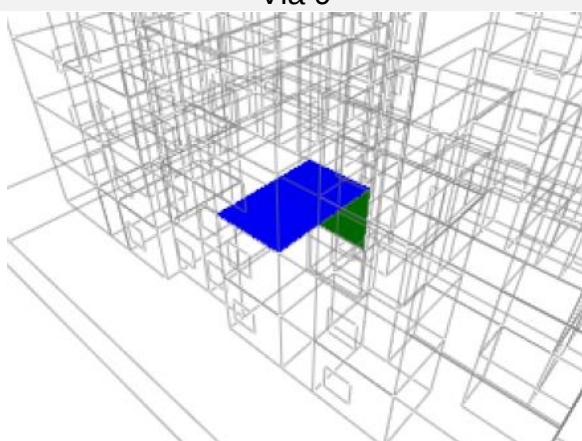
(g)

Via 8



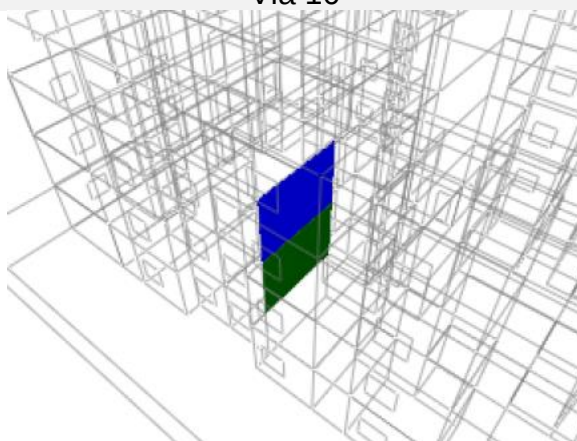
(h)

Via 9



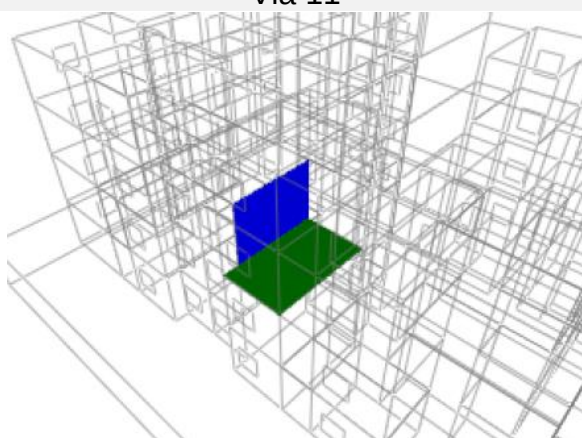
(i)

Via 10



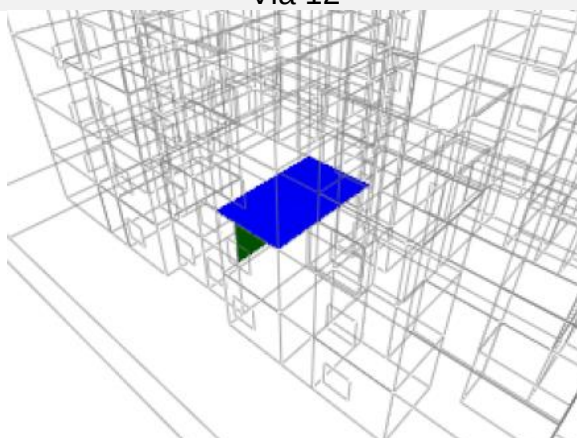
(j)

Via 11



(k)

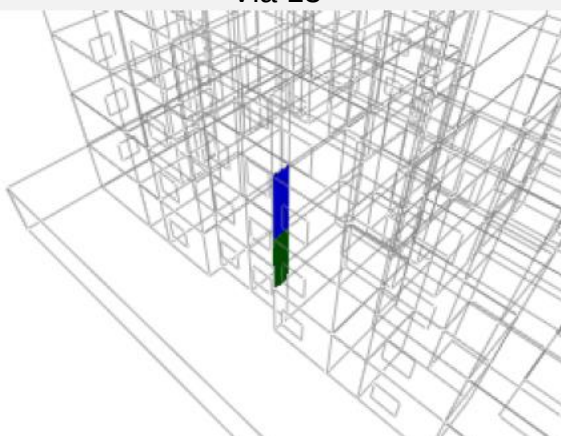
Via 12



(l)

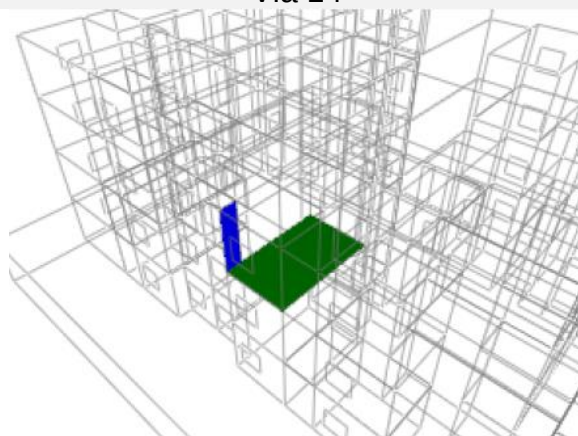
(continua)

Via 13



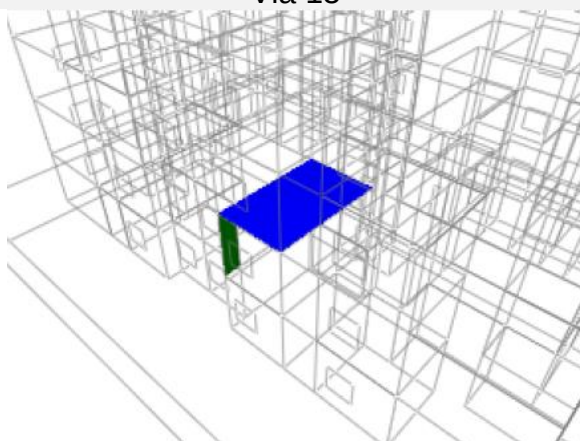
(m)

Via 14



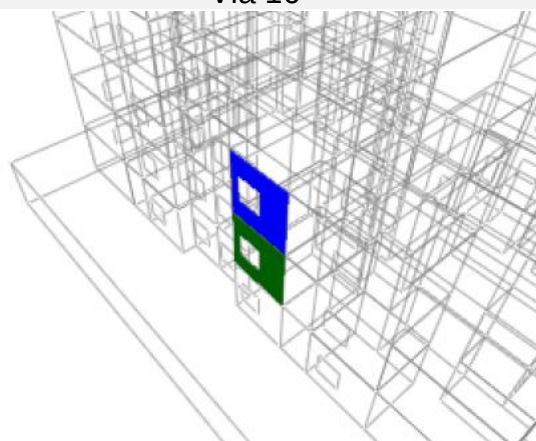
(n)

Via 15



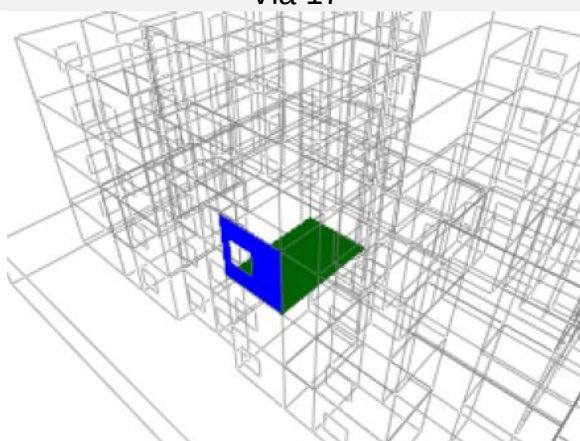
(o)

Via 16



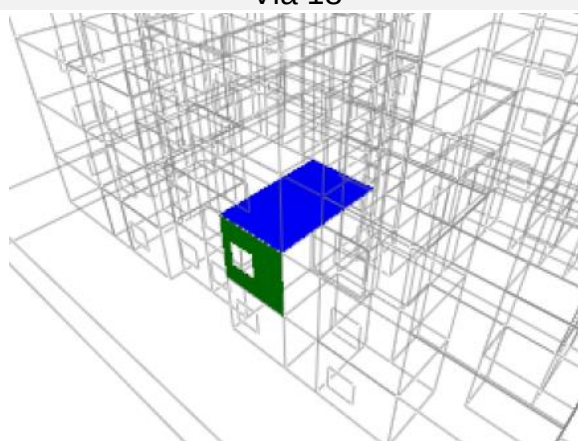
(p)

Via 17



(q)

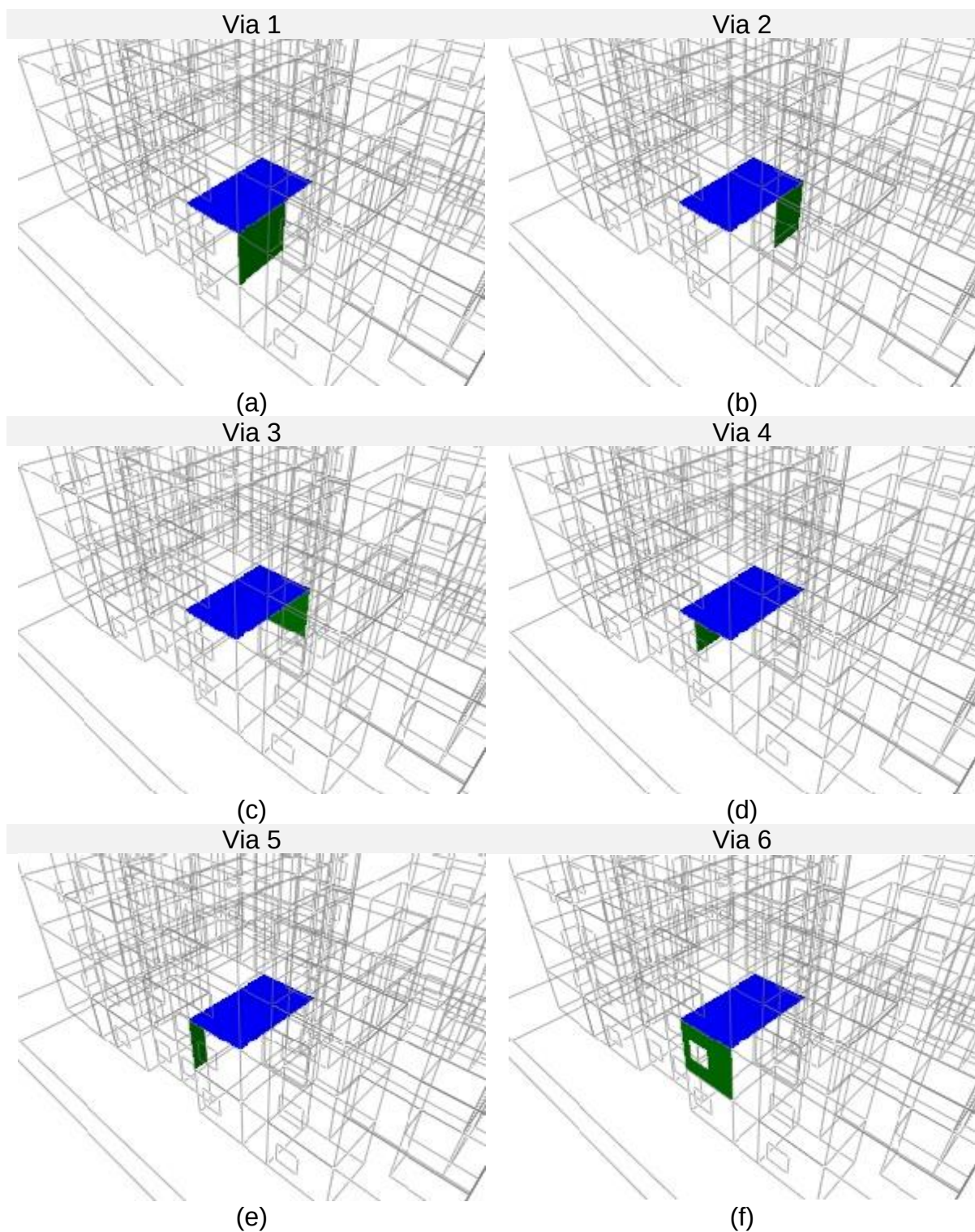
Via 18



(r)

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 53 - Vias de transmissões marginais para sons de impacto



Fonte: Elaborada pelo autor

4.2.1 Ruído aéreo

A seguir são apresentados os resultados das estimativas de desempenho relativas ao isolamento de ruídos aéreos. A Tabela 16 e a Figura 54 contêm os valores

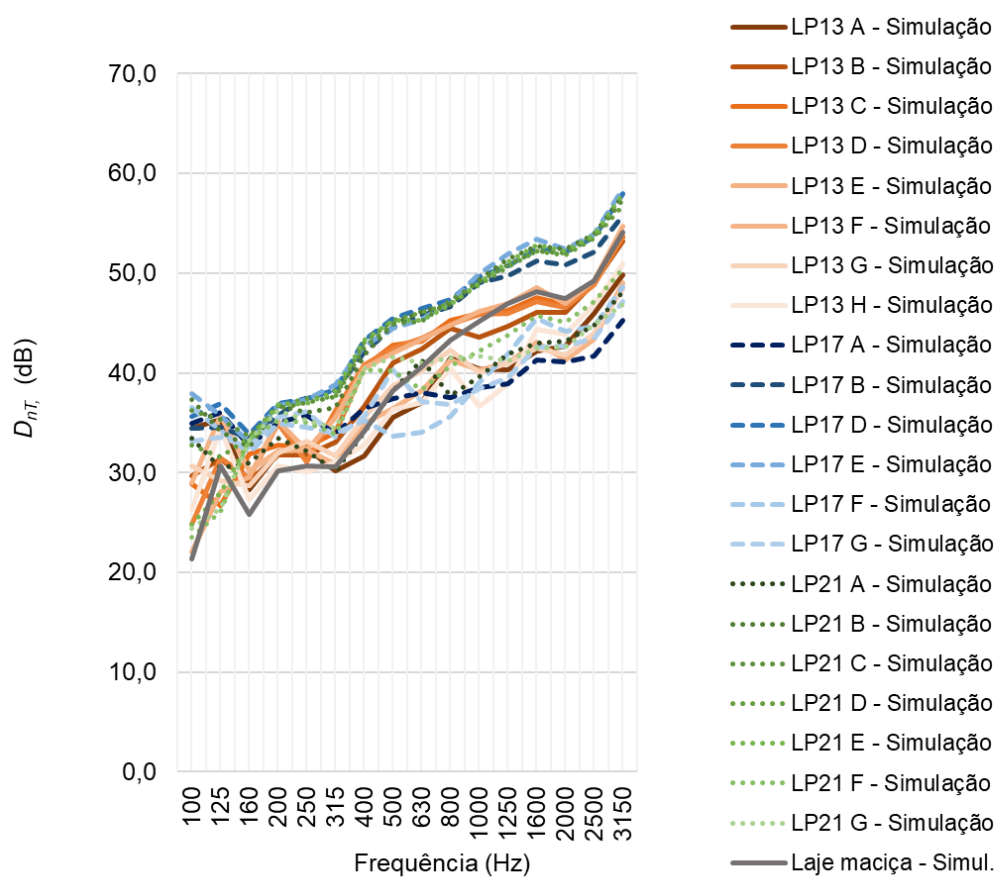
por banda de frequência, numérica e graficamente, enquanto a Figura 55 indica os valores ponderados.

Tabela 16 – Valores de isolamento ao ruído aéreo estimados via software para a edificação

Laje	Frequência (Hz)																$D_{nT,w}$ (dB)
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	
LP13 A	34,4	35,3	28,3	32,0	32,5	30,2	31,7	35,5	37,0	41,5	40,4	40,3	42,2	42,7	46,0	49,8	40
LP13 B	29,7	31,4	29,2	31,8	31,8	33,0	36,6	41,0	42,4	44,5	43,6	44,7	46,1	46,1	49,0	53,2	43
LP13 C	28,9	26,7	31,9	32,8	32,6	34,0	40,6	42,8	43,2	45,3	46,0	46,3	47,6	46,9	49,0	53,6	44
LP13 D	24,8	31,5	29,5	34,9	31,1	36,2	40,8	42,5	43,5	44,9	45,9	46,0	47,2	46,6	48,8	53,7	44
LP13 E	22,0	28,1	29,6	35,1	32,3	35,5	40,5	42,0	43,4	44,8	46,2	47,0	48,5	47,0	49,2	54,7	44
LP13 F	29,0	35,7	30,2	32,2	32,3	30,9	34,9	36,4	38,2	41,3	40,3	41,0	43,1	41,3	43,4	49,0	40
LP13 G	30,7	29,2	28,7	32,0	33,1	31,7	35,5	38,7	40,2	42,3	40,0	41,0	42,5	41,8	44,0	48,4	41
LP13 H	26,3	34,4	27,3	30,7	30,1	31,1	32,8	36,3	37,0	40,5	36,6	38,9	44,4	43,9	46,9	50,9	39
LP17 A	34,9	36,0	32,7	35,0	35,7	33,9	36,4	37,4	38,0	37,5	38,5	38,9	41,3	41,1	41,7	45,3	39
LP17 B	34,4	34,5	33,4	35,7	37,5	38,2	42,1	44,6	45,8	46,7	49,0	49,7	51,2	50,8	52,1	55,8	47
LP17 D	35,6	36,9	33,8	36,9	37,4	38,3	43,3	45,5	46,5	47,4	49,6	50,7	52,4	52,1	53,6	58,0	48
LP17 E	37,9	35,7	33,0	36,7	37,3	38,8	42,7	44,5	45,4	47,2	49,9	51,9	53,4	52,4	53,9	58,5	48
LP17 F	36,5	34,2	32,0	34,9	34,5	33,9	35,2	33,6	34,0	35,6	39,0	41,9	45,5	44,2	44,7	48,6	40
LP17 G	33,1	33,5	32,6	35,5	36,1	33,5	35,6	40,3	37,1	36,8	38,4	39,5	42,6	42,7	43,5	47,2	40
LP21 A	33,4	30,5	31,0	33,4	32,2	30,2	34,0	38,2	41,3	37,7	39,6	41,9	43,0	43,2	44,8	48,1	40
LP21 B	37,3	34,1	32,6	36,7	36,0	36,5	41,8	44,9	46,2	46,9	49,3	51,4	52,7	52,4	53,9	57,8	47
LP21 C	36,2	35,3	33,6	36,4	37,0	37,6	42,6	45,0	45,2	47,3	49,1	50,8	52,2	52,0	53,7	57,4	48
LP21 D	32,8	31,6	33,5	36,7	37,4	37,6	43,1	45,3	46,1	47,0	48,8	50,6	52,2	51,8	53,5	56,8	48
LP21 E	24,8	28,0	33,1	36,8	36,9	38,2	43,3	45,3	45,3	46,9	49,0	51,1	52,8	52,2	53,8	58,0	47
LP21 F	23,5	26,1	33,3	35,2	35,0	33,8	40,3	40,2	38,3	40,7	42,2	43,8	45,8	45,1	47,2	50,4	42
LP21 G	24,4	26,4	33,2	36,2	35,2	34,4	40,4	41,6	41,0	41,5	41,7	41,2	42,5	42,6	44,9	46,9	42
LM	21,3	30,7	25,8	30,2	30,7	30,6	34,1	38,2	40,6	43,3	45,2	47,0	48,1	47,5	49,2	54,1	41

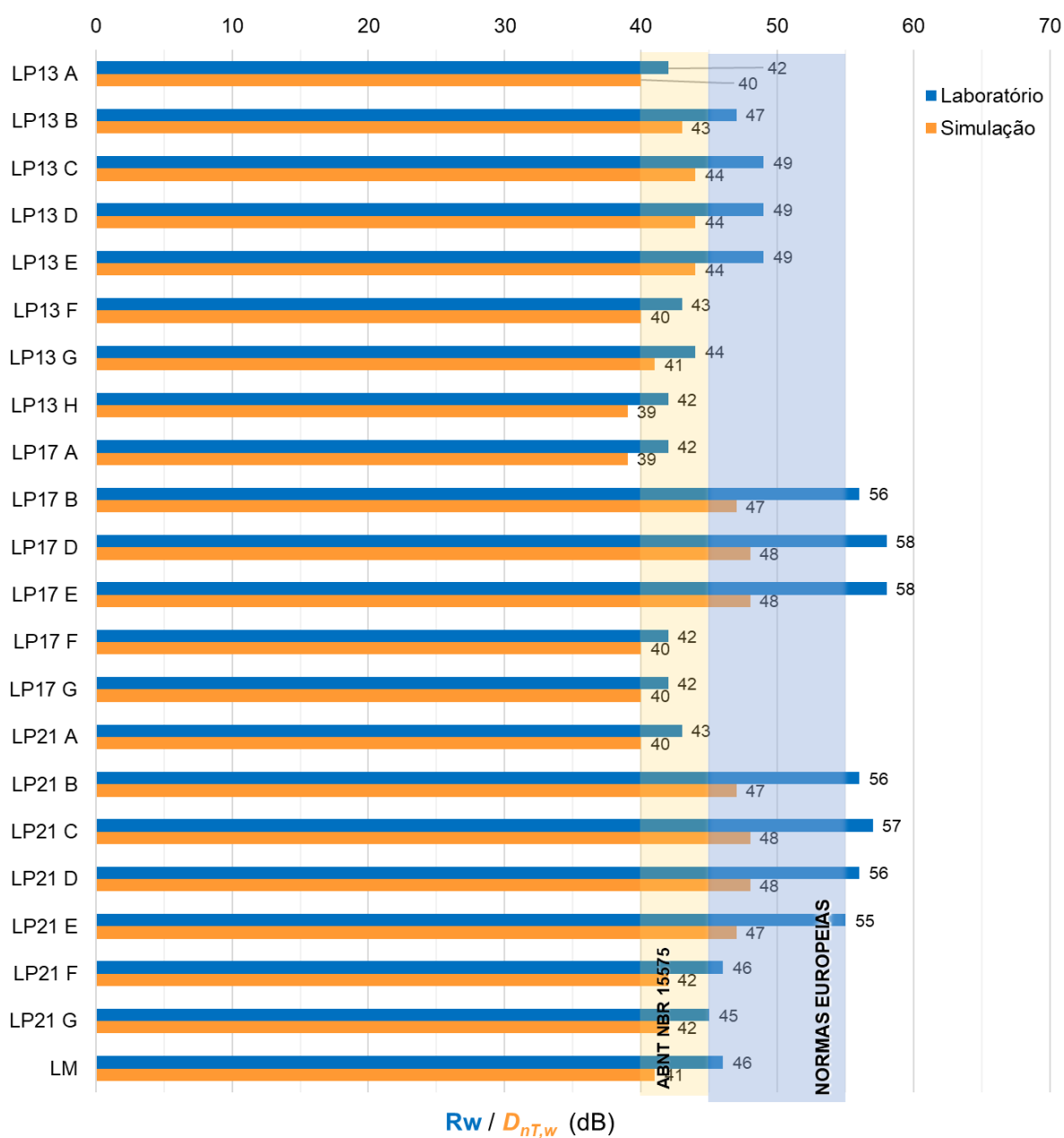
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 54 – Estimativa de isolamento ao ruído aéreo estimado via software por bandas de frequência



Fonte: Elaborada pelo autor

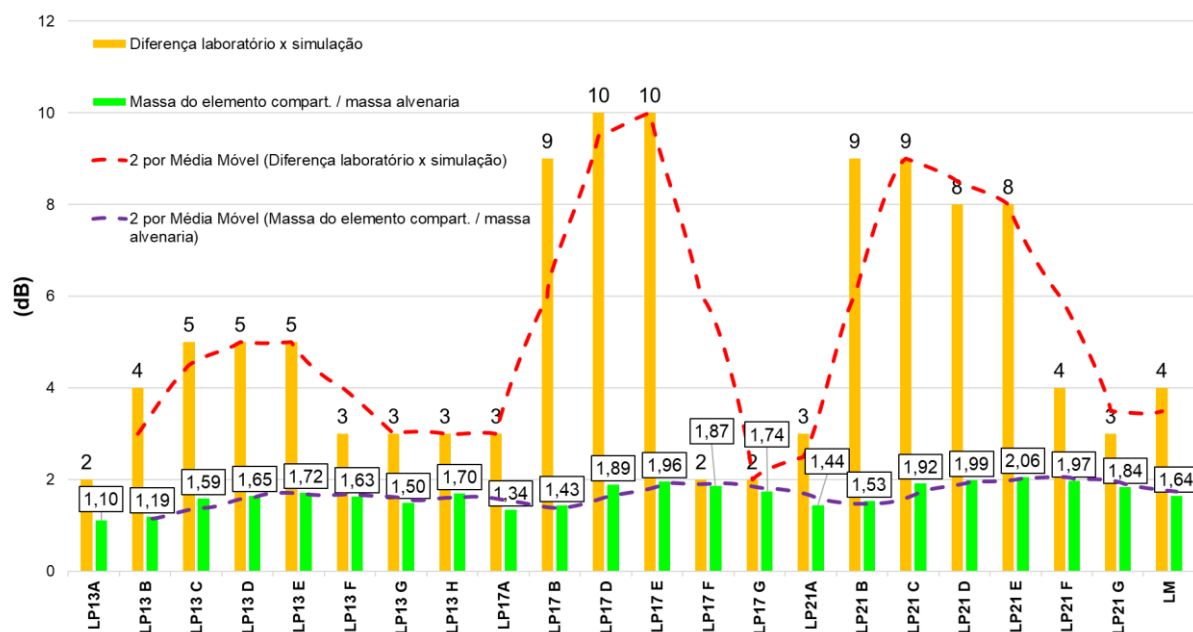
Figura 55 - Resultados ponderados da estimativa de desempenho acústico (ruído aéreo)



Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 56 pode-se observar as diferenças entre a atenuação sonora aérea aferida em laboratório e estimada via simulação computacional, quantificadas em dB. Ainda, são apresentadas as relações entre a massa do sistema de piso (elemento de compartimentação) e os SVVI (elementos adjacentes).

Figura 56 - Redução do isolamento aéreo nas simulações



Fonte: Elaborada pelo autor

Observa-se uma divisão clara nas diferenças observadas nas composições A, B, F e G em relação às verificadas nas B, C, D e E, sendo as últimas que apresentam as maiores diferenças entre laboratório e simulação.

É importante sublinhar que o desempenho acústico medido ou mesmo estimado para campo depende de diversas variáveis, dentre elas a transmissão por flancos, esta dependente das características dos elementos estruturais e comprimento da interface de contato do elemento de compartimentação com os elementos estruturais e com os elementos marginais (paredes, em se tratando de sistemas de piso). Logo, a estimativa via processos computacionais procura mensurar as transmissões marginais, o que, no caso processos baseados no método da ISO 12354-1 (ISO, 2017a), passa pela consideração dos fatores de redução de transmissão de vibrações (K_{ij}) gerados na transmissão de energia sonora entre os compartimentos em análise. Estes fatores são função da relação entre as massas superficiais dos elementos construtivos de compartimentação e adjacentes, por onde ocorrem as transmissões marginais.

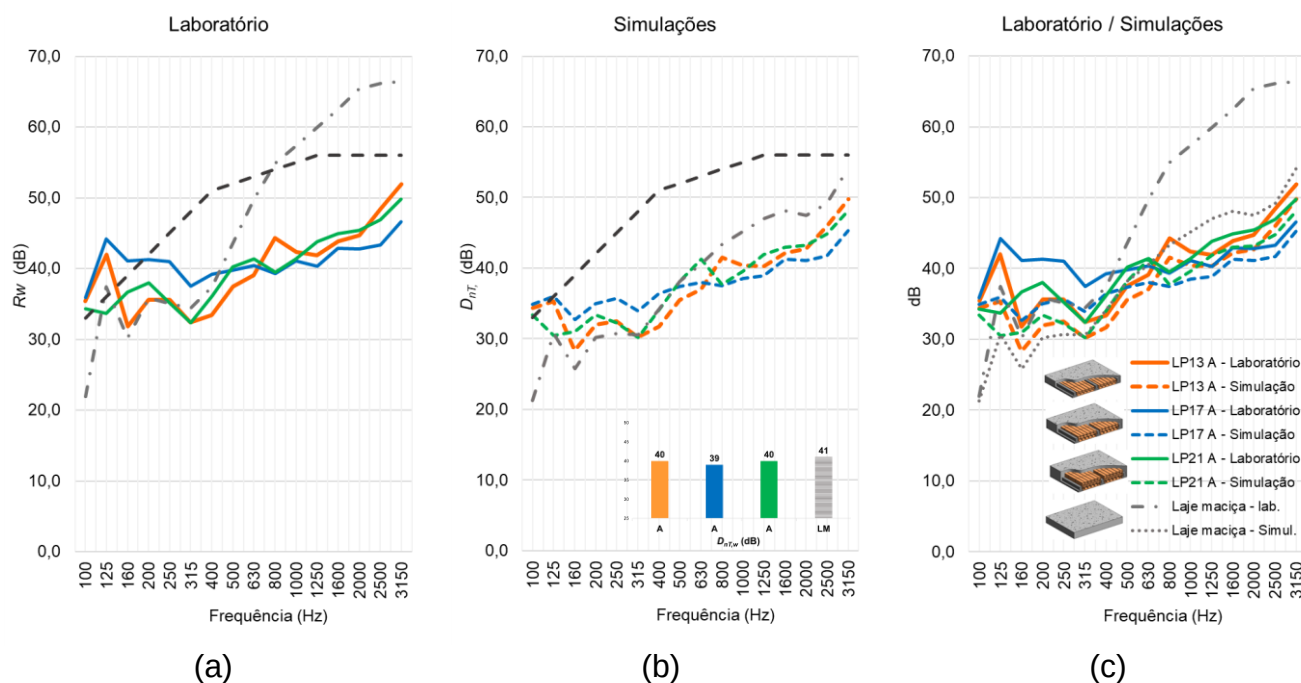
A análise da Figura 56 permite perceber que parte das maiores diferenças são observadas nos sistemas que possuem forro suspenso (B, C, D e E). Essas composições possuem, para LP13, LP17 e LP21, R_w superiores a 45 dB, situação em

que as transmissões marginais assumem grande relevância e afetam significativamente a redução do índice de isolamento aéreo (HOPKINS, 2012).

Ainda, nota-se que a relação entre massa do sistema de piso e dos elementos marginais se correlaciona com as diferenças observadas entre os valores aferidos em laboratório e estimados via software. Também se nota que sistemas de maior massa superficial (E, D nesta ordem os dois primeiros) estão entre os que apresentam as maiores diferenças. Contudo, para os três tipos de laje, a composição F, terceira na hierarquia em massa superficial (em média 16 kgf de massa inferior em relação à composição E) já apresenta diferenças consideravelmente mais próximas. Considerando Hopkins (2012), espera-se que quando a massa superficial do elemento de compartimentação é próxima a do elemento adjacente, a diminuição do isolamento sonoro aéreo seja na ordem de 3 dB em relação ao medido em laboratório, o que não se refletiu como tendência geral nestes resultados.

Defrontando as composições designadas neste estudo como tipo A (LP13A, LP17A e LP21A), formadas apenas por suas camadas estruturais e distintas entre si pelo modelo de lajota (8, 12 e 16 cm de altura, respectivamente), enxerga-se comportamento irresoluto entre as composições (Figura 57). Neste contexto, a seguir as Figuras Figura 58, Figura 59 e Figura 60 apresentam o isolamento ao ruído aéreo por bandas de frequência das composições LP13A, LP17A e LP21A, respectivamente, discriminando as vias de transmissão sonora.

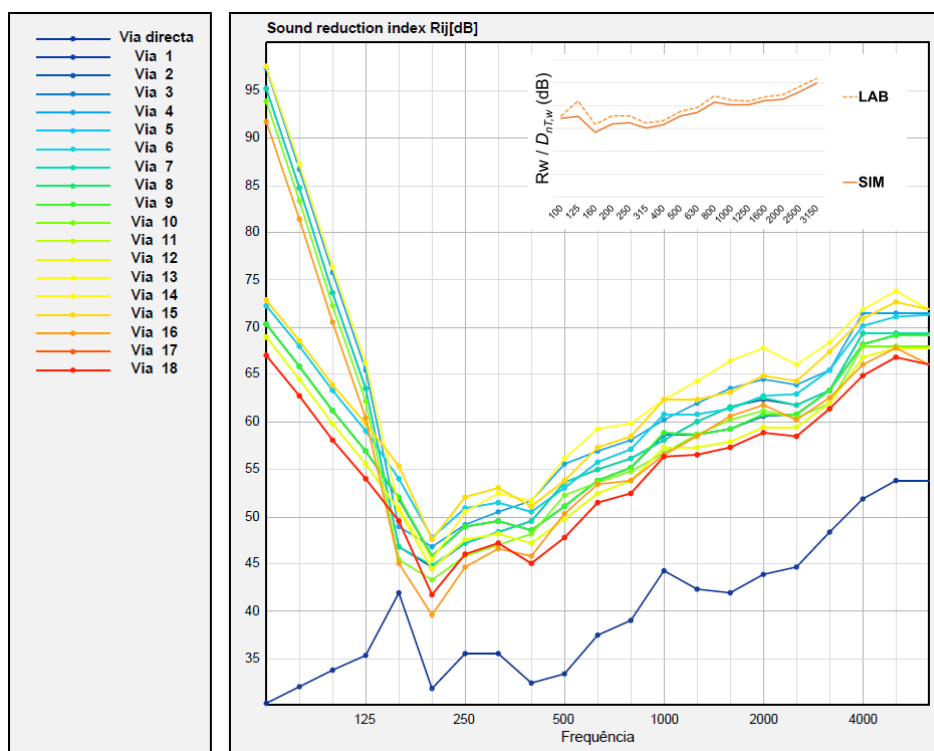
Figura 57 - Comportamento da composição A (sem revestimentos) nas simulações



Fonte: Elaborada pelo autor

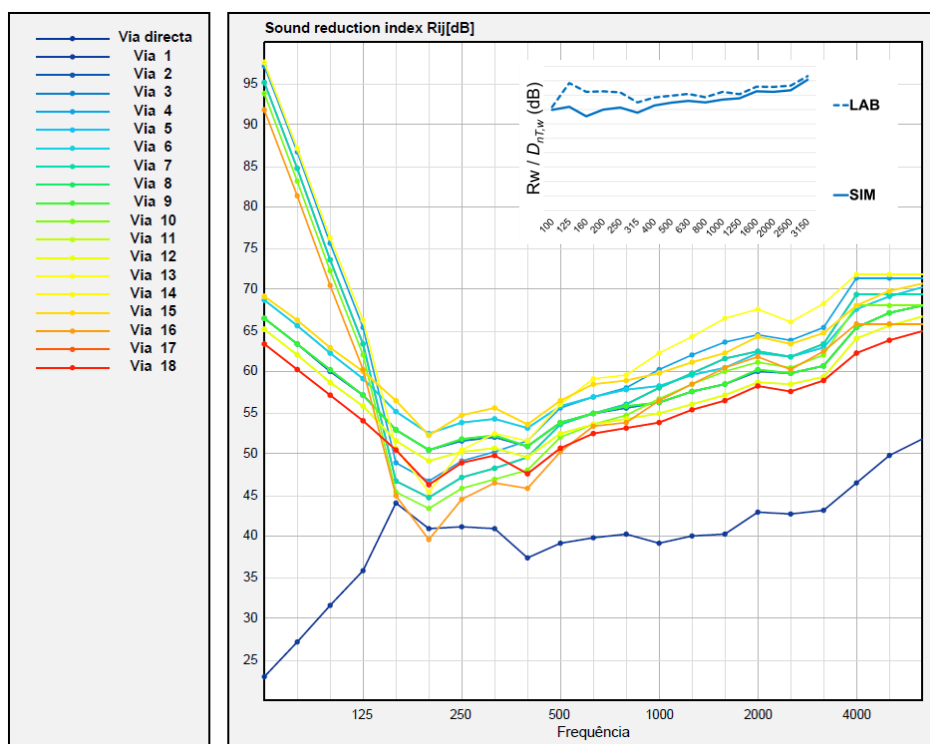
Em relação à laje maciça, ainda que se observe menor eficiência na redução da transmissão sonora das lajes nervuradas, esta inicia a partir da banda de 630 Hz, posterior ao observado no ensaio de laboratório (400 Hz), bem como as diferenças são reduzidas consideravelmente: superiores a 20 dB na banda de 2000 Hz (em laboratório), nas simulações assumem valor máximo de 6,4 dB (LP17A).

Figura 58 – Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP13A



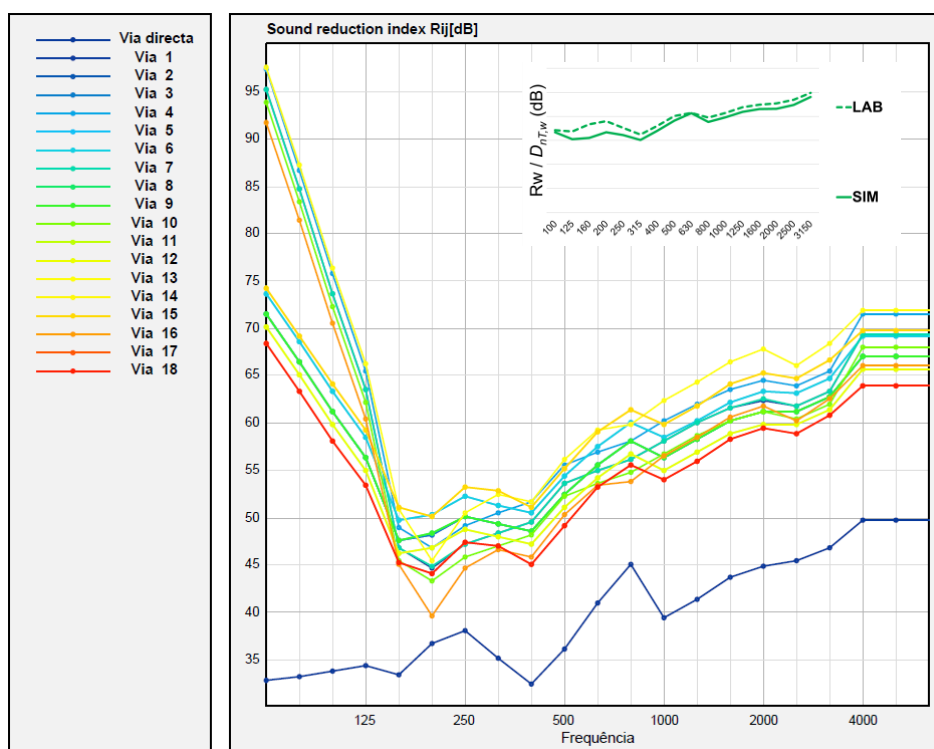
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 59 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP17A



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 60 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP21A



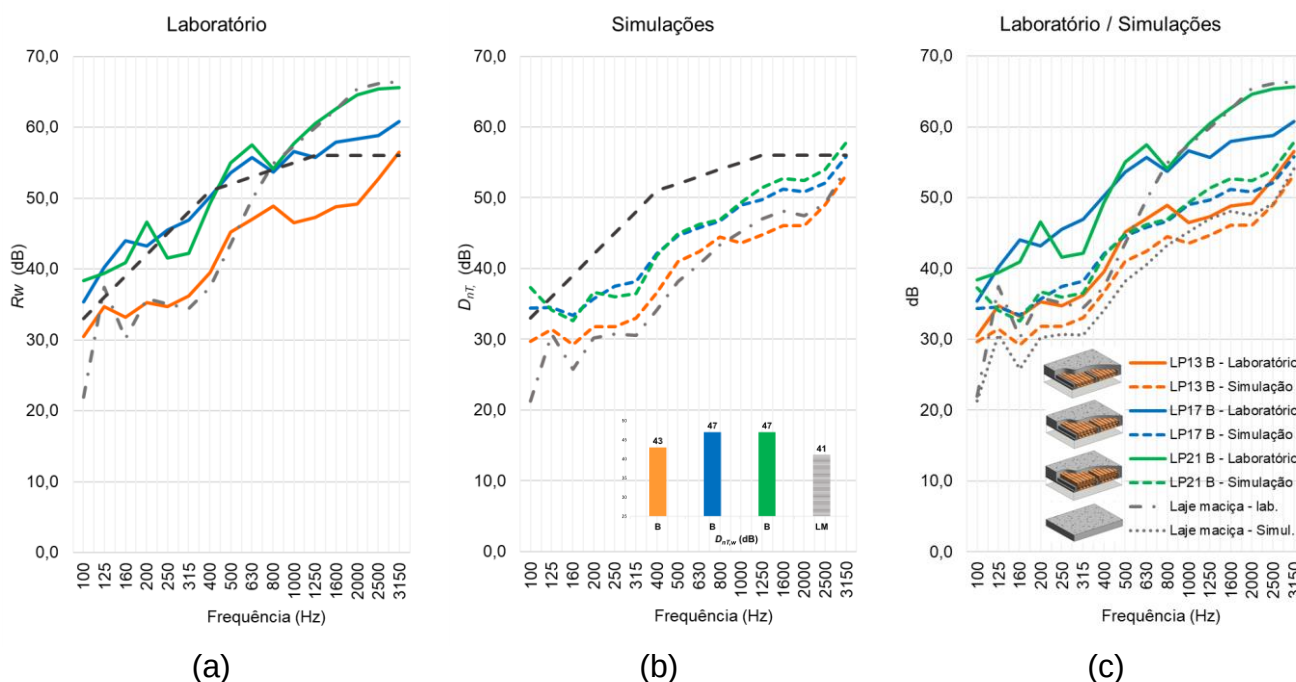
Fonte: Elaborada pelo autor

O perfil gráfico das transmissões marginais para as três composições é altamente similar, com poucas diferenças. Percebe-se que a composição LP17A assume feição ligeiramente distinta das composições LP13A e LP21A, em especial na via de transmissão nº 18, que ostenta menor índice de redução de transmissão de vibrações. A via nº 18 corresponde ao caminho formado pelo sistema de piso em conjunto com o SVVE (parede de fachada), que, apesar de possuir massa superficial unitária superior às demais paredes (SVVIs), possui uma esquadria de 1,70 m², o que diminui sua massa total.

A similaridade nas representações gráficas é confirmada nos resultados ponderados, que diferem entre si em 1 dB. Os resultados ponderados indicam para a edificação $D_{nT,w}$ de 40, 39 e 40 dB pra LP13A, LP17A e LP21A, respectivamente, retratando redução do isolamento acústico observado em laboratório em 2 dB (LP17A) e 3 dB (LP13A e LP21A). Estes valores corroboram Patrício (2018), que indica que as transmissões por flancos reduzem em 3 dB a atenuação aos ruídos aéreos para elementos construtivos com R_w entre 35 e 45 dB. A laje maciça apresentou redução superior, de 5 dB.

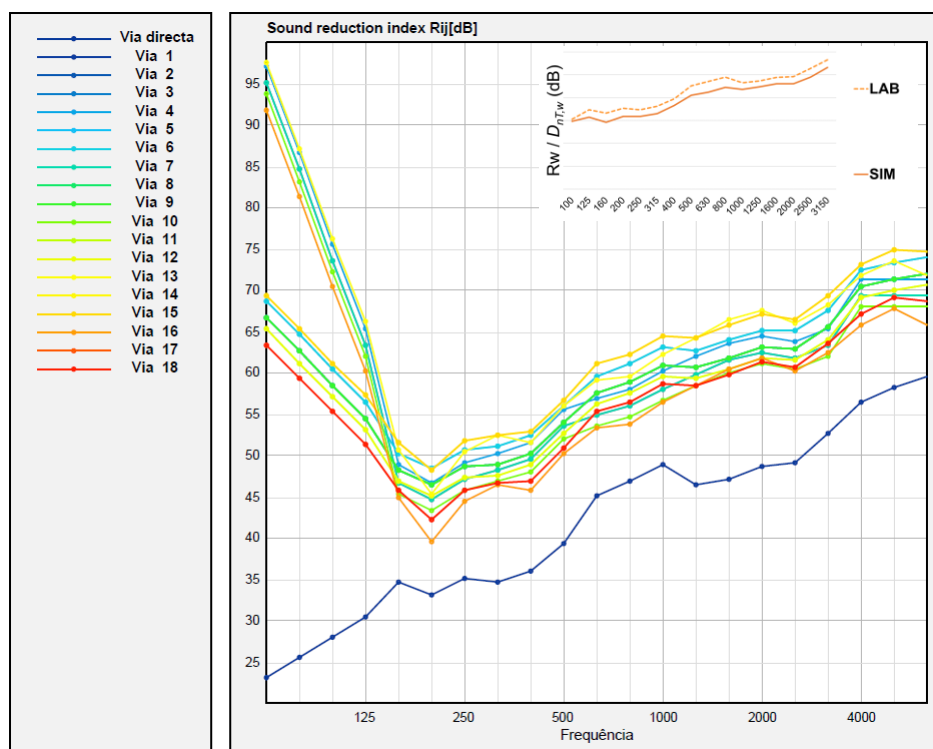
A seguir são apresentados os resultados pertinentes às composições tipo B.

Figura 61 - Comportamento da composição B (com forro suspenso) nas simulações



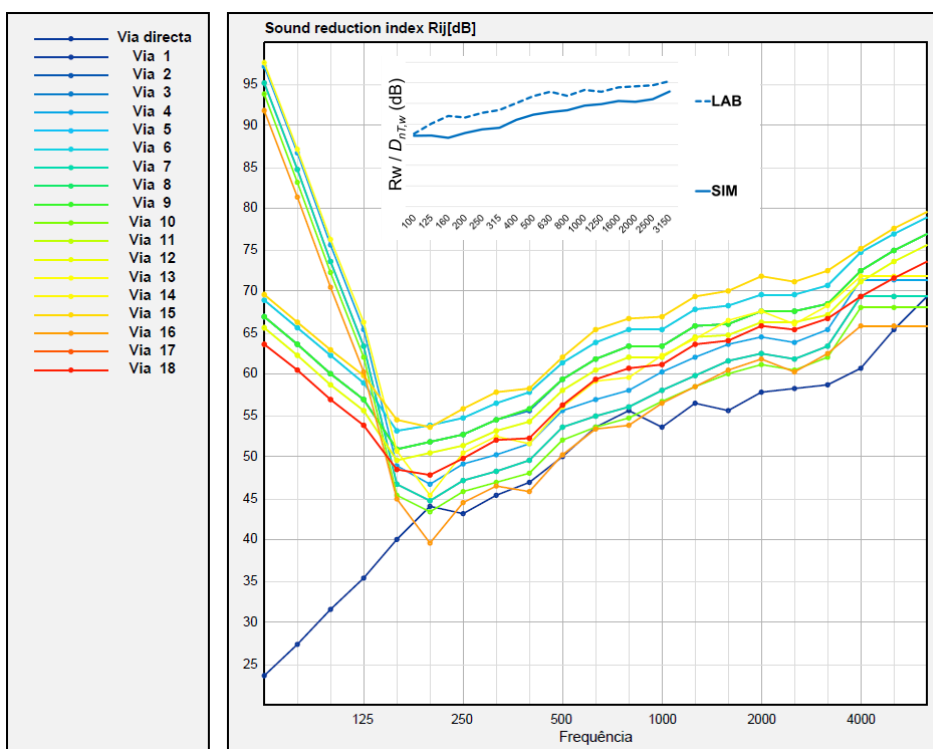
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 62 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP13B



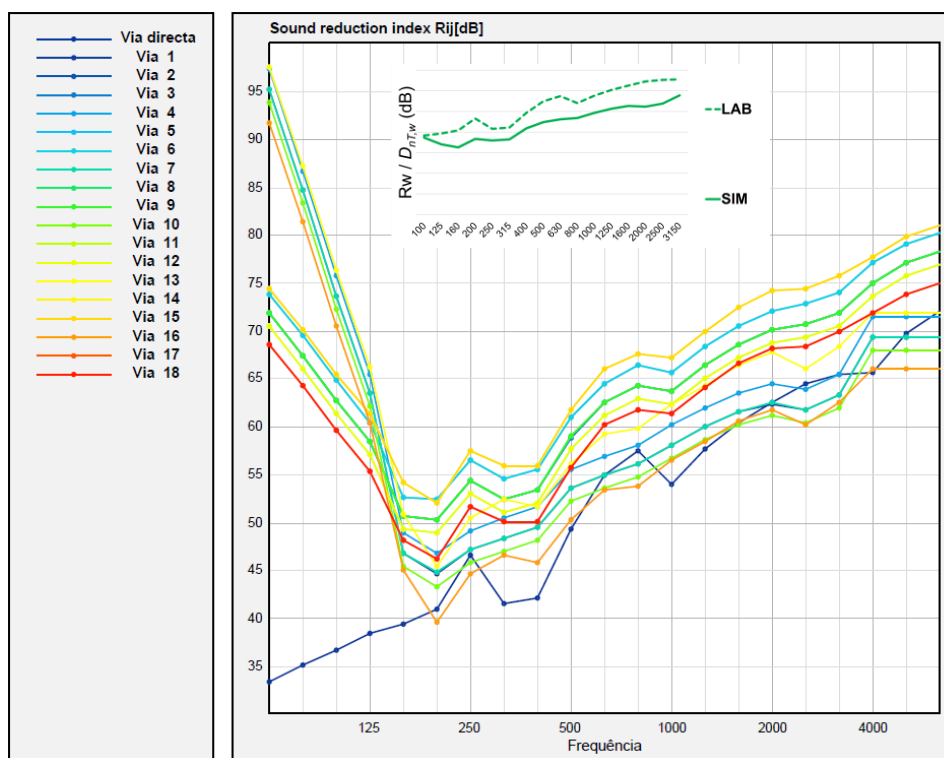
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 63 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP17B



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 64 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP21B

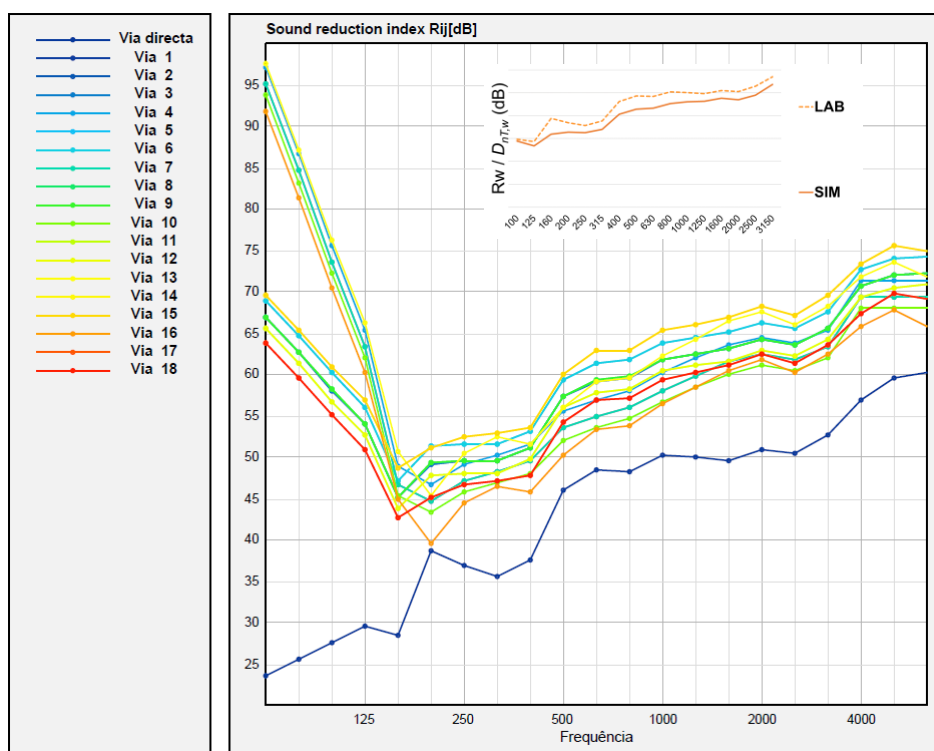


Fonte: Elaborada pelo autor

Embora o perfil gráfico das transmissões marginais não tenha tomado delineamento distinto, (Figuras 61, 62, 63 e 64) a inclusão do forro suspenso na composição B e subsequentes impactou os fatores redução de transmissão de vibrações (K_{ij}), ao passo que os resultados estimados se distanciaram mais dos resultados medidos em laboratório.

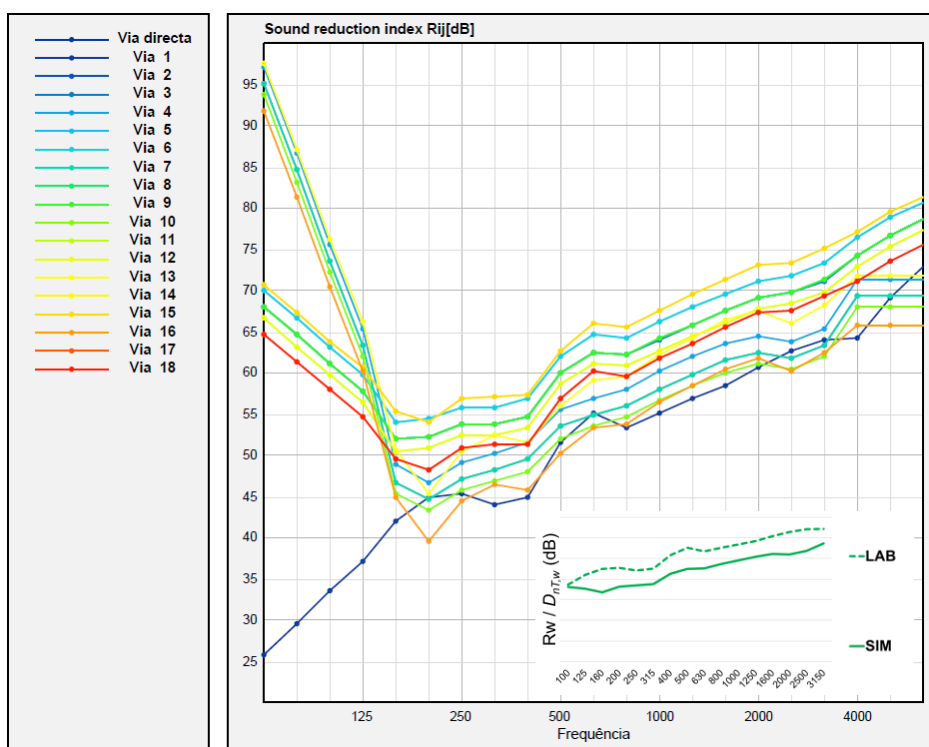
A adição de camada de contrapiso alterou, ainda que sutilmente, o perfil gráfico das vias de transmissão indireta (Figura 65 e Figura 66), o que é percebido de forma mais notória na via 18, cujo valor mínimo foi observado em banda de frequência inferior à observada na composição sem forro suspenso.

Figura 65 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP13C



Fonte: Elaborada pelo autor

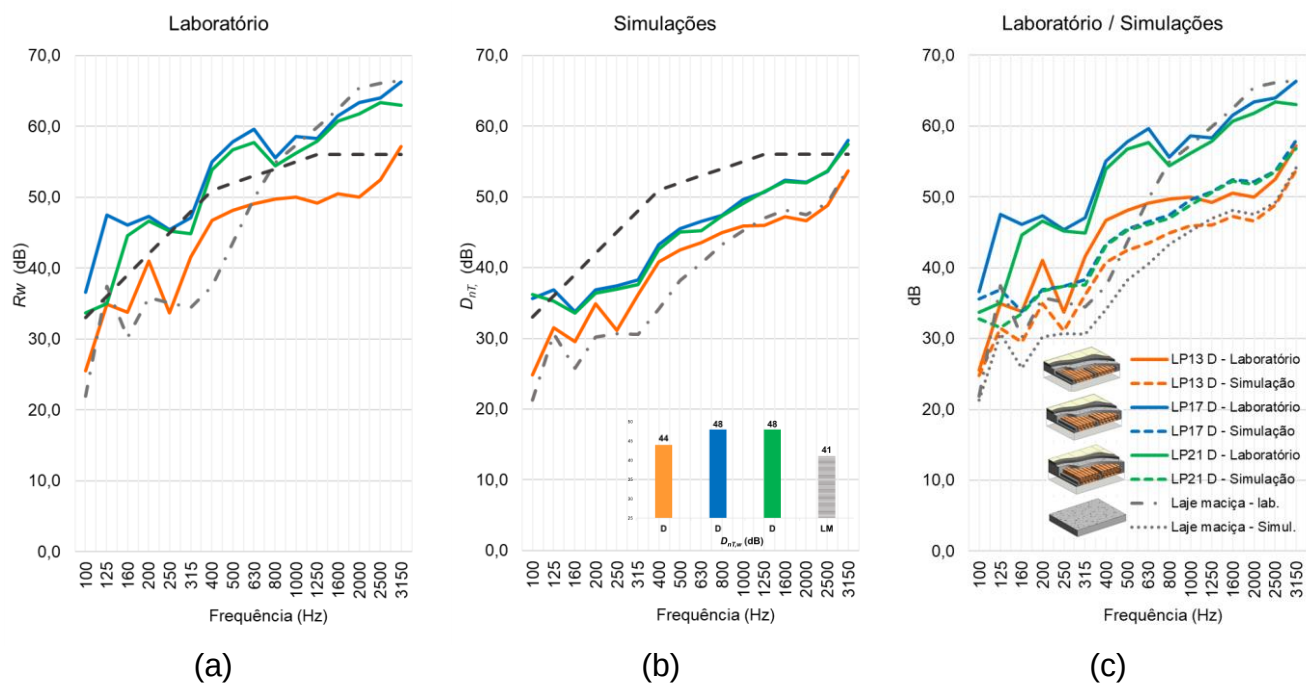
Figura 66 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP21C



Fonte: Elaborada pelo autor

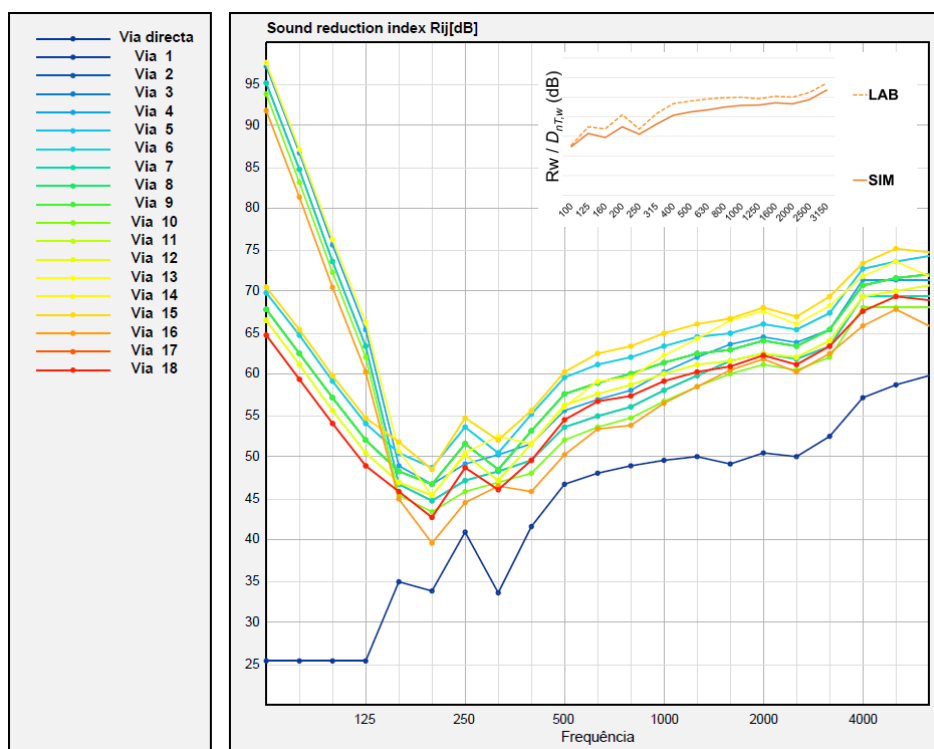
Conforme demonstram a Figura 67, Figura 68, Figura 69 e Figura 70, as composições com camadas de acabamento não alteraram significativamente as transmissões por flancos.

Figura 67 - Comportamento da composição D nas simulações



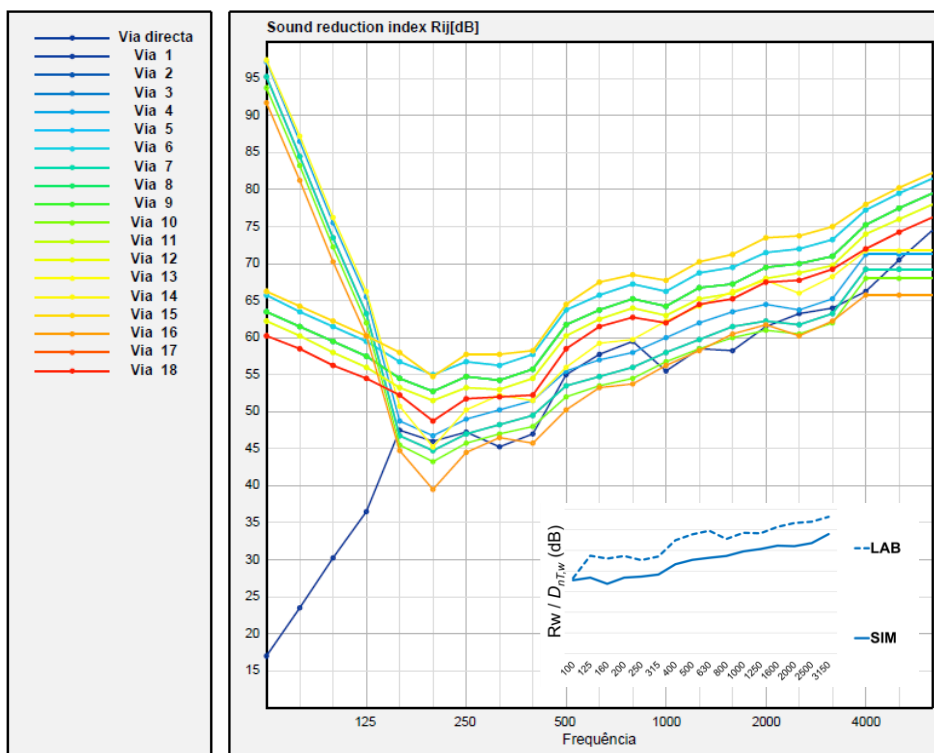
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 68 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP13D



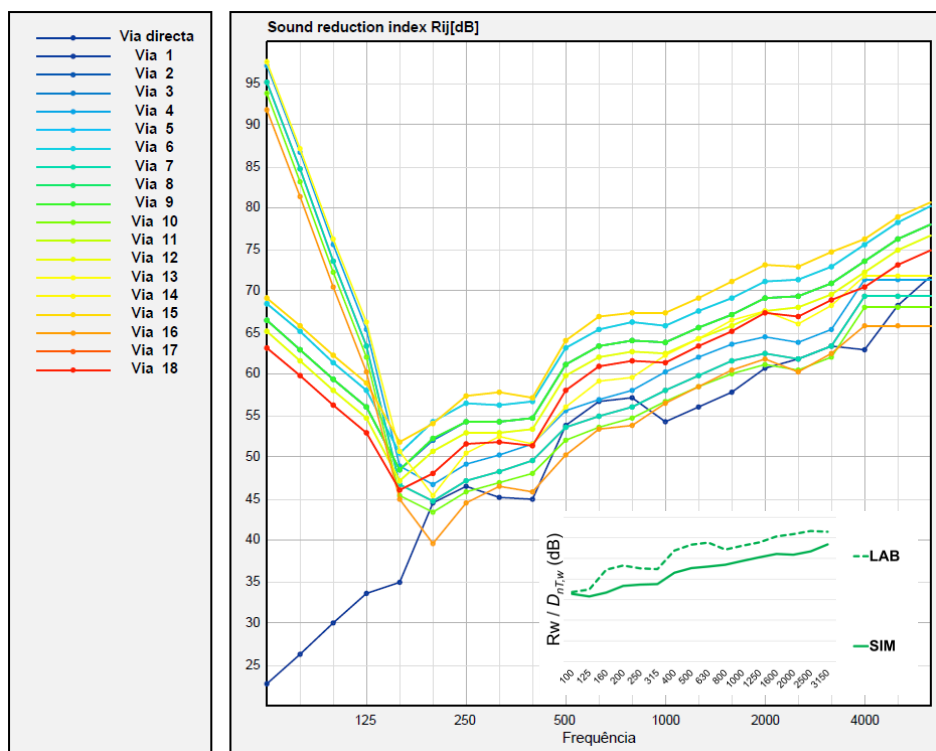
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 69 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP17D



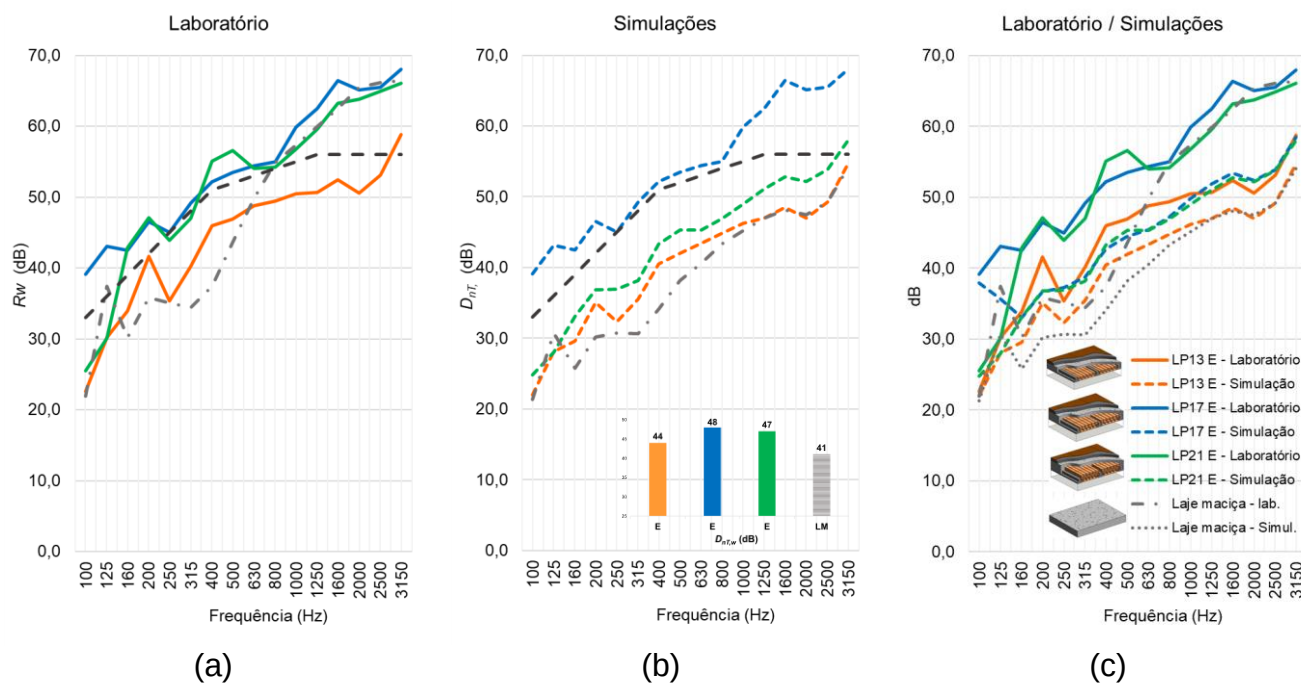
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 70 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP21D



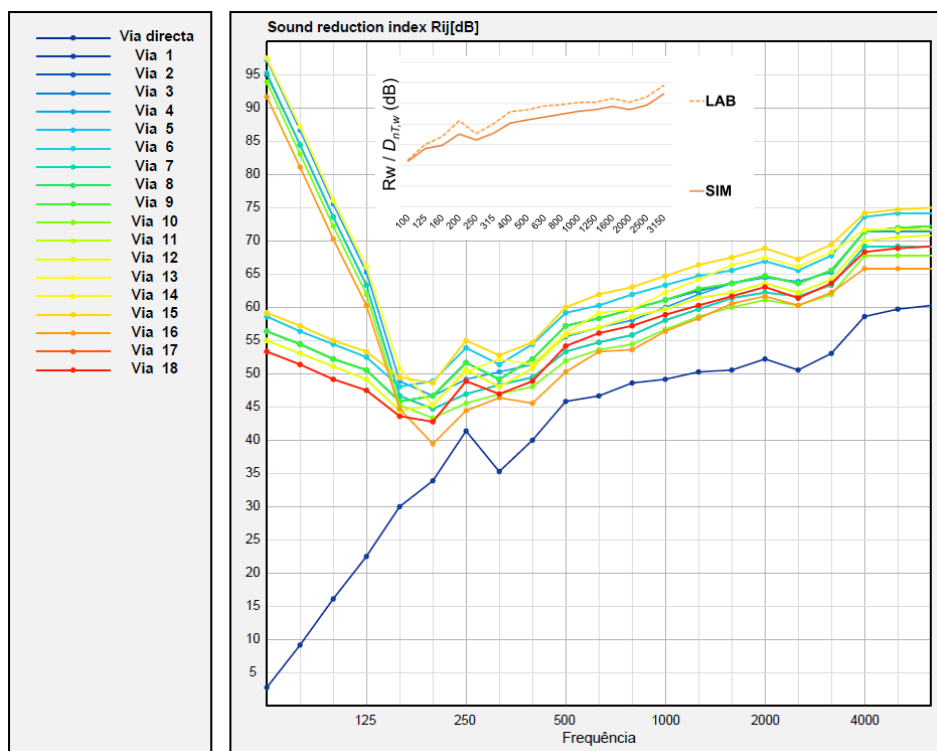
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 71 - Comportamento da composição E nas simulações



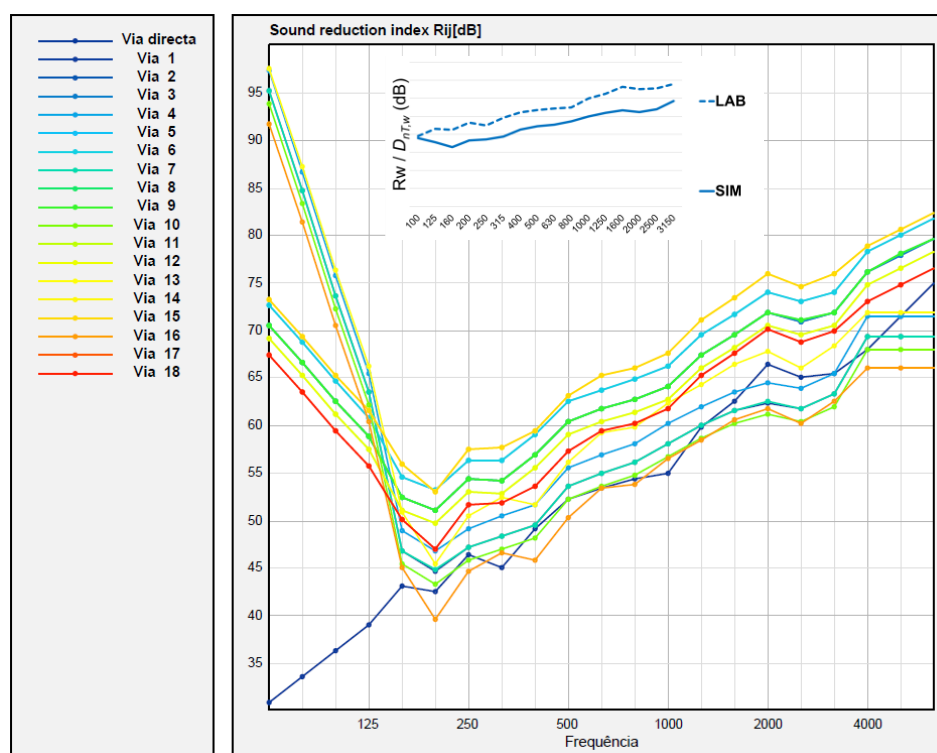
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 72 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP13E



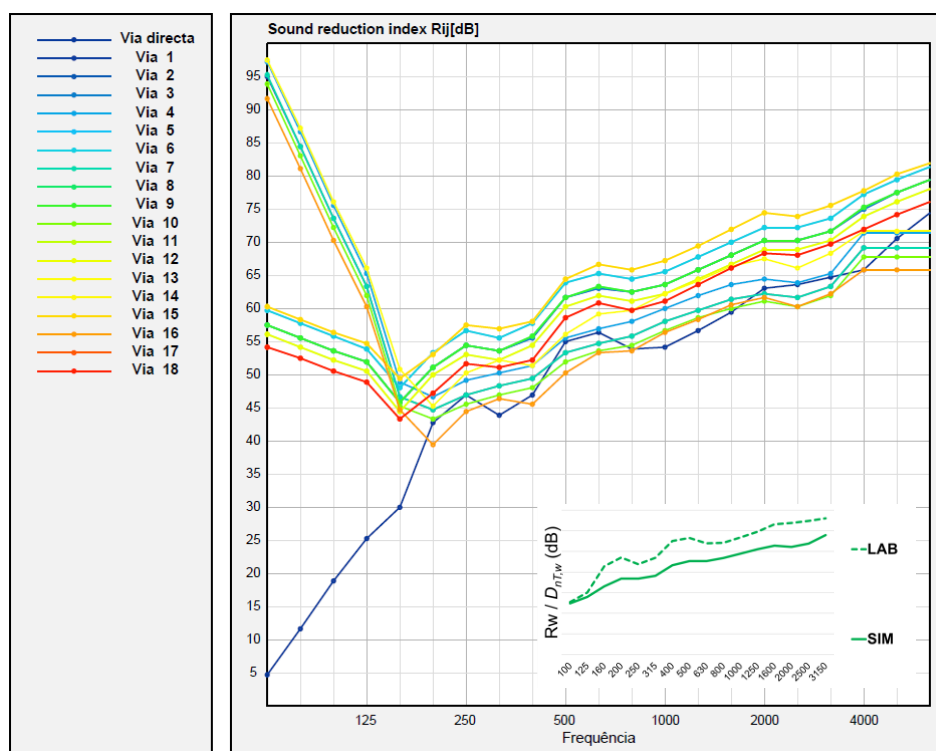
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 73 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP17E



Fonte: Elaborada pelo autor

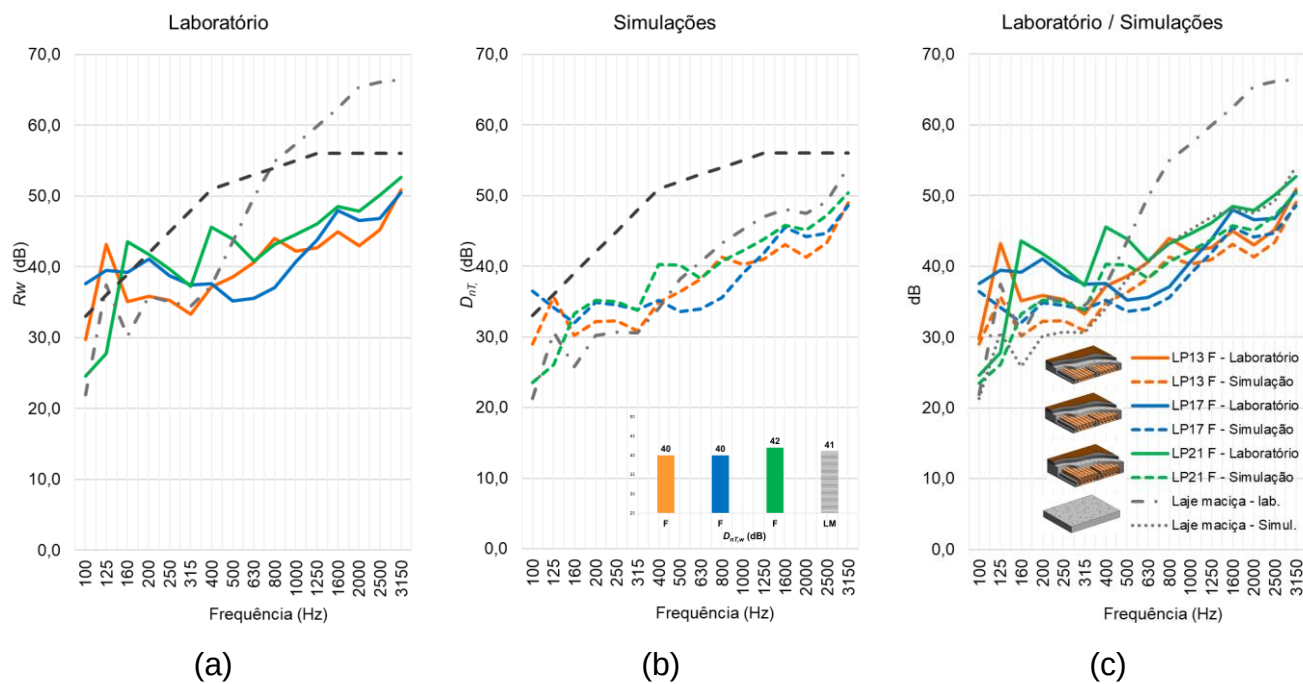
Figura 74 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP21E



Fonte: Elaborada pelo autor

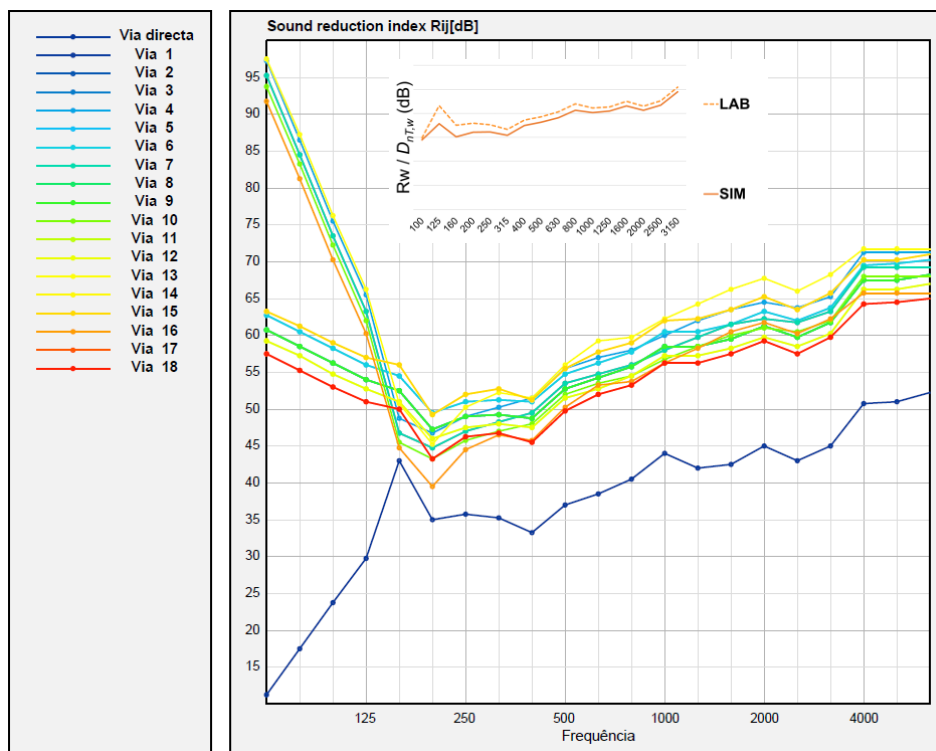
Quando contendo camadas de contrapiso e acabamento, porém sem forro suspenso (composições F e G), o delineamento gráfico das transmissões marginais manteve-se muito similar às demais composições, porém com redução do índice de isolamento sonoro aéreo na ordem de 2, 3 e 4 dB. Nestes sistemas houve maior contribuição das transmissões marginais nas baixas frequências, com aproximação das curvas gráficas nas frequências subsequentes.

Figura 75 - Comportamento da composição F nas simulações



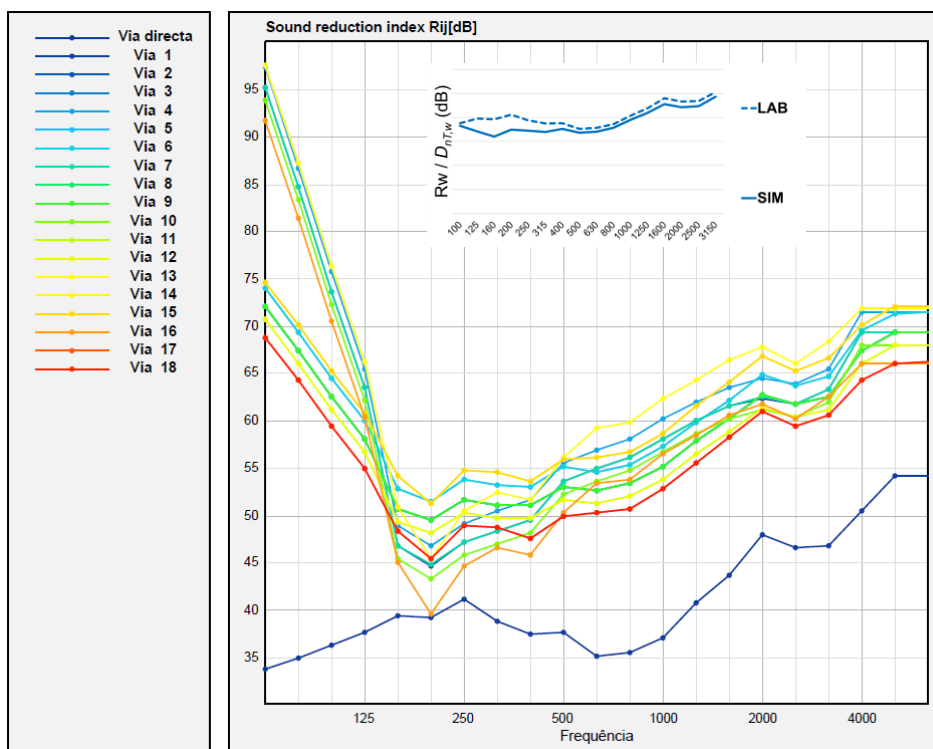
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 76 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP13F



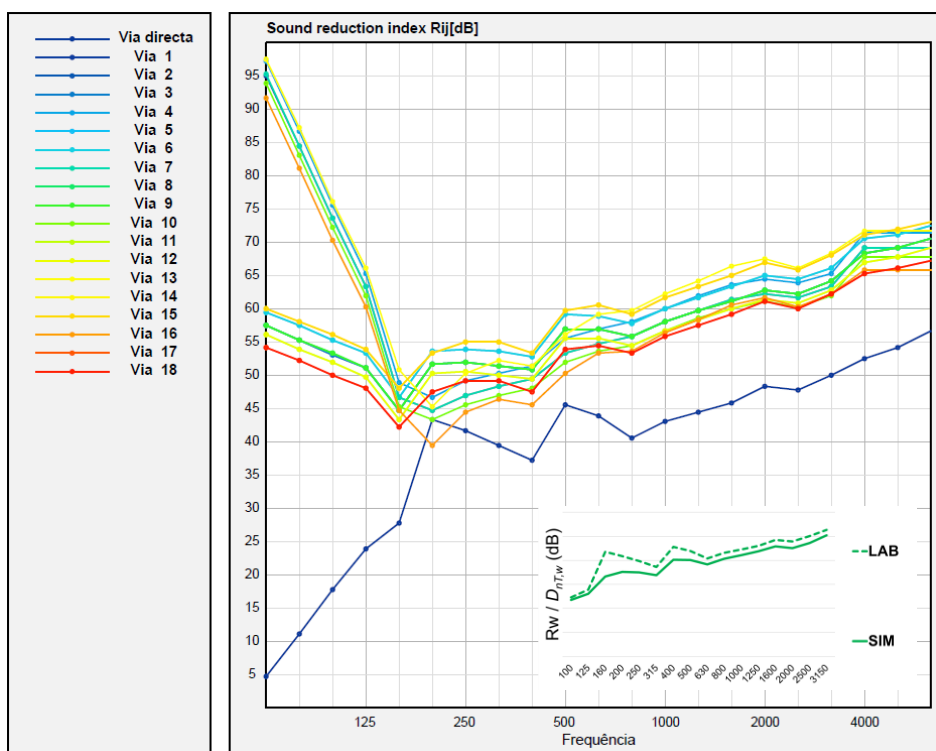
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 77 Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP17F



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 78 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP21F



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 79 - Comportamento da composição G nas simulações

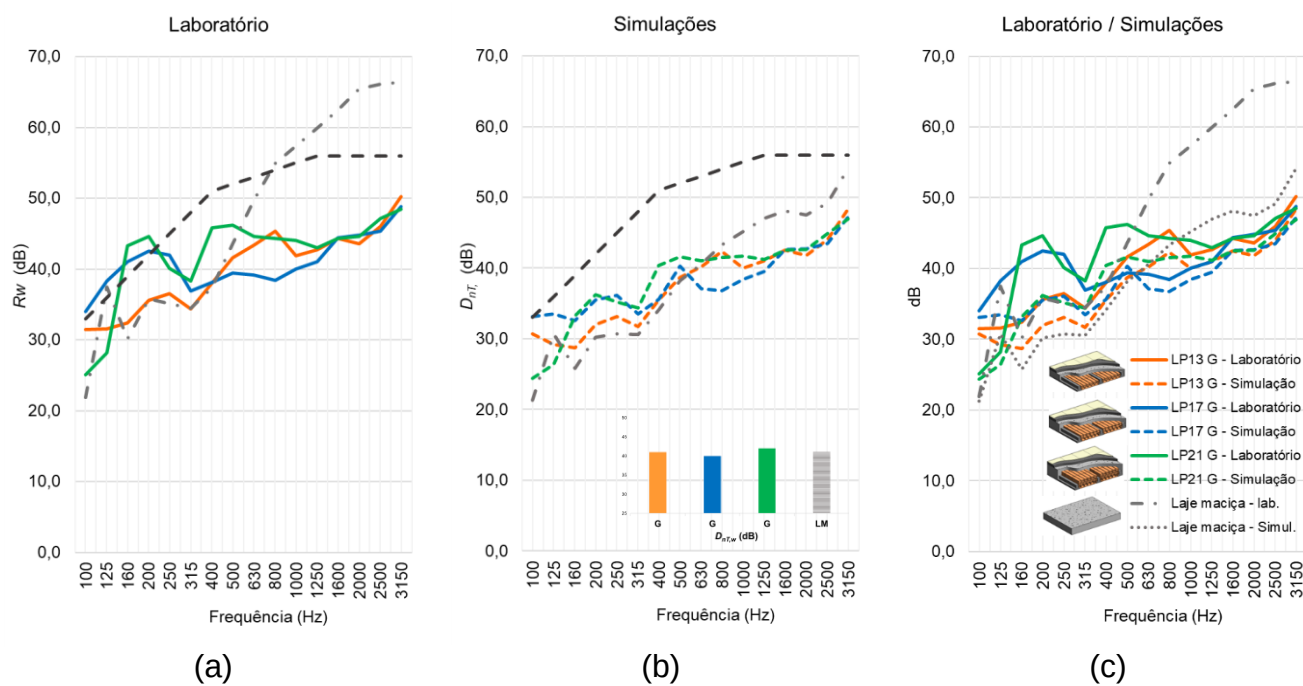


Figura 80 – Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP13G

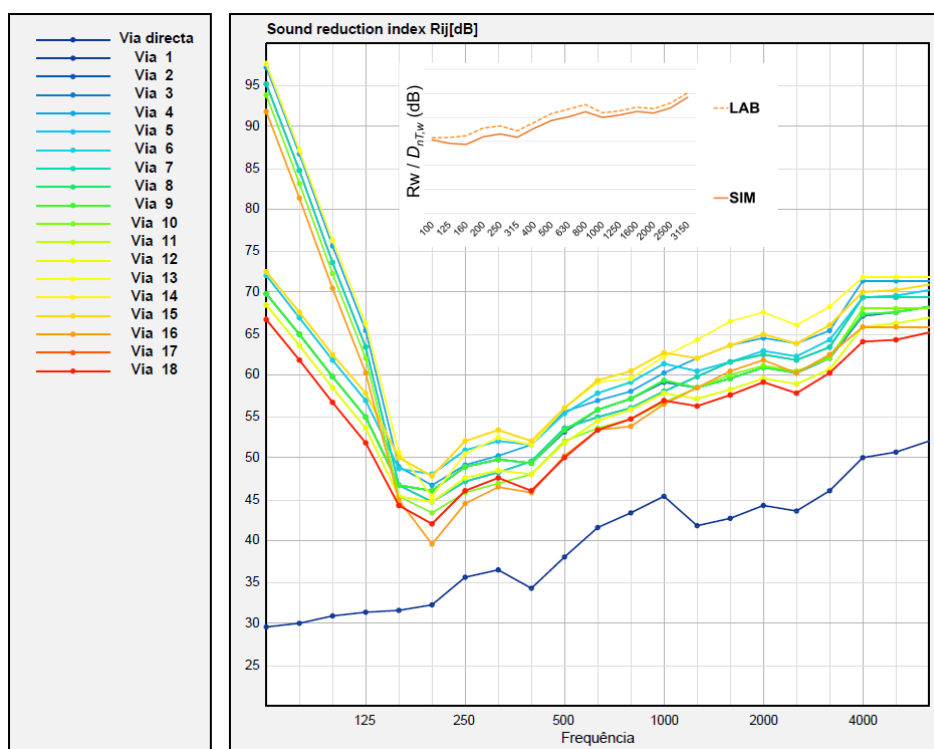
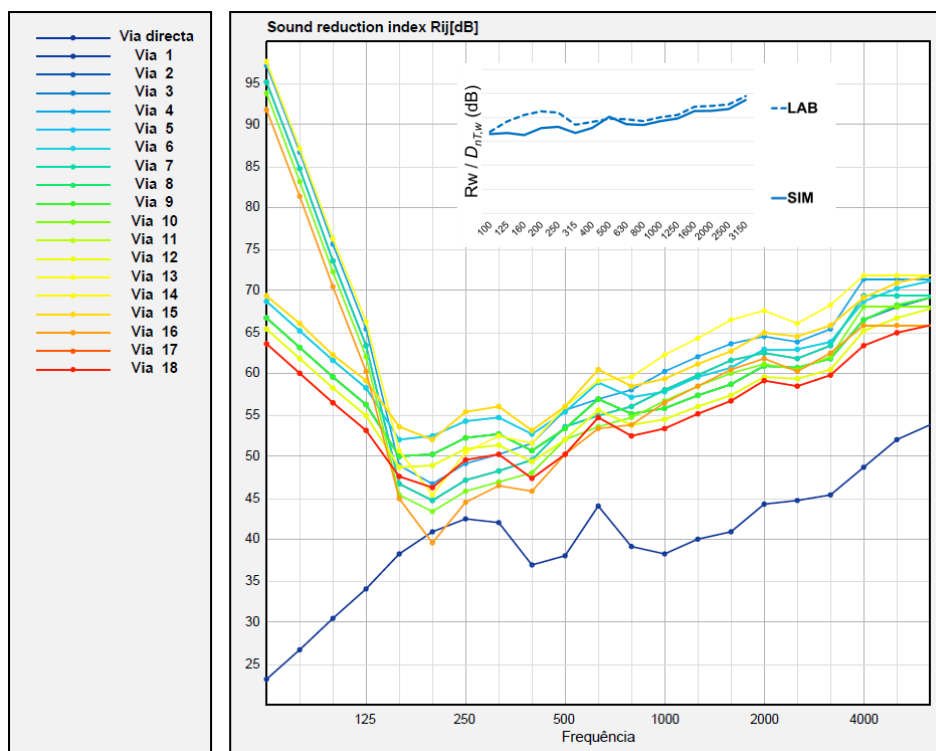
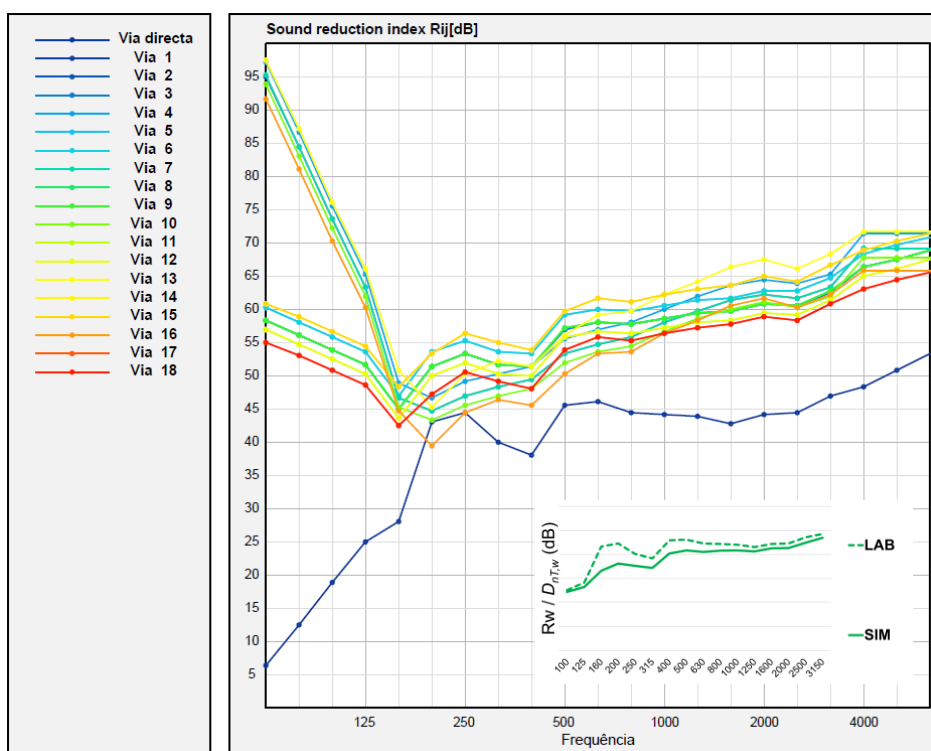


Figura 81 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP17G



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 82 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP21G



Fonte: Elaborada pelo autor

4.2.2 Ruído de impacto

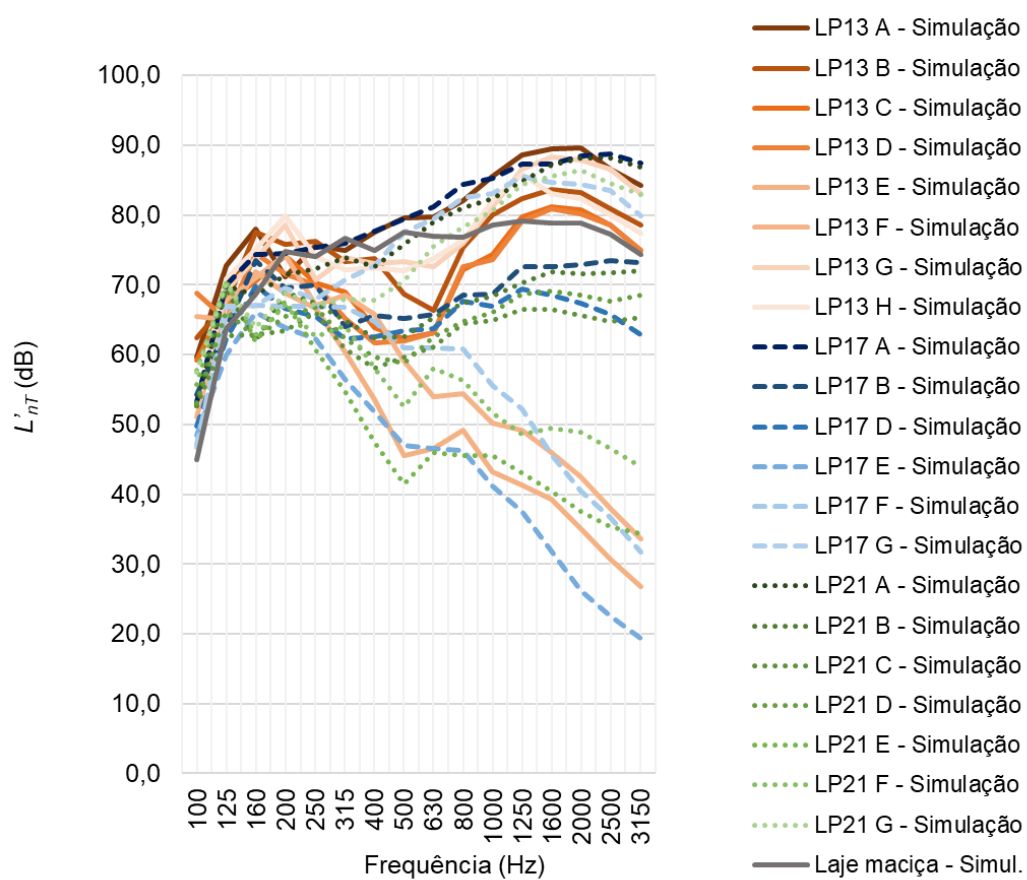
Nesta seção são apresentados os resultados estimados para os níveis de pressão sonora de impacto. Abaixo, a Tabela 17 discrimina os valores por bandas de terço de oitava e em seguida são expostos os resultados na forma gráfica (Figura 83) e em valores ponderados (Figura 84).

Tabela 17 – Estimativa de nível de pressão sonora de impacto (valores tabelados)

Laje	Frequência (Hz)																$L_{n,w}$ (dB)
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	
LP13 A	59,7	72,7	77,9	71,2	75,6	74,9	77,6	79,5	79,7	82,0	85,6	88,6	89,5	89,6	86,6	84,2	94
LP13 B	62,4	67,3	77,5	75,8	76,2	73,3	73,8	68,7	66,4	75,3	80,0	82,3	83,6	83,2	80,9	78,6	88
LP13 C	59,2	67,4	70,6	74,2	70,2	68,9	63,9	62,3	63,2	72,2	74,4	79,7	81,2	80,7	78,5	74,9	85
LP13 D	68,8	65,0	74,5	71,5	69,9	65,1	61,7	61,9	63,2	72,6	73,6	79,2	80,9	80,1	78,5	74,9	85
LP13 E	65,4	65,0	71,9	68,8	66,6	60,4	53,5	45,5	46,6	49,2	43,2	41,3	39,3	35,1	30,7	26,8	60
LP13 F	51,1	67,8	71,0	74,3	67,1	68,5	65,8	59,1	54,0	54,4	50,2	49,1	46,0	42,5	37,9	33,6	62
LP13 G	52,6	69,2	73,7	78,6	70,7	73,9	73,0	73,3	72,6	76,0	81,1	86,5	88,3	87,9	86,5	83,1	93
LP13 H	53,0	70,9	75,0	79,9	74,1	72,1	72,4	72,0	73,8	76,4	82,1	85,8	83,0	82,3	80,0	77,4	88
LP17 A	53,3	70,0	74,4	74,5	75,4	75,9	77,7	79,4	81,2	84,4	85,3	87,3	87,3	88,4	88,7	87,4	94
LP17 B	54,2	63,7	73,4	69,6	69,9	64,0	65,6	65,1	65,7	68,5	68,6	72,6	72,6	72,9	73,5	73,2	79
LP17 D	49,8	62,2	69,8	66,6	65,5	62,3	62,6	63,4	63,7	67,7	66,9	69,4	68,5	67,3	65,8	62,8	73
LP17 E	48,5	59,9	66,1	63,9	62,3	56,4	51,8	47,0	46,6	46,2	41,2	37,5	31,8	26,2	22,5	19,4	54
LP17 F	47,2	66,0	67,1	66,9	66,9	66,7	64,7	60,9	61,0	60,8	55,6	52,2	45,7	40,5	36,7	31,7	61
LP17 G	46,7	66,9	67,0	69,5	67,9	70,7	72,7	77,6	79,4	82,5	83,1	85,5	84,7	84,4	83,5	79,9	90
LP21 A	52,6	69,8	68,5	71,4	72,3	73,9	72,6	75,8	79,0	81,0	82,3	84,8	87,2	88,2	88,1	86,8	94
LP21 B	52,9	69,4	61,9	68,9	67,4	64,9	62,4	62,6	65,3	67,3	68,3	70,2	71,9	71,5	71,7	72,0	78
LP21 C	52,7	62,7	62,8	63,4	66,0	60,8	58,1	59,6	61,1	64,4	64,9	66,5	66,5	65,6	64,8	65,3	72
LP21 D	53,1	66,2	62,4	65,4	66,8	62,2	59,6	58,8	62,6	64,8	66,1	68,7	69,1	68,5	67,6	68,5	75
LP21 E	55,7	70,5	61,8	67,6	60,7	54,7	47,4	41,4	46,0	45,6	45,5	43,0	40,5	37,5	35,4	34,3	56
LP21 F	57,8	70,2	62,8	67,0	62,6	64,1	58,0	52,5	58,0	56,3	51,7	48,6	49,4	48,9	46,5	44,0	59
LP21 G	57,5	70,3	63,9	68,8	67,1	67,9	67,8	70,6	75,5	78,3	80,6	84,4	85,5	86,4	84,5	82,9	91
LM	44,9	63,7	68,7	74,7	74,0	76,6	74,9	77,5	77,0	76,8	78,5	79,1	78,9	78,8	77,3	74,3	84

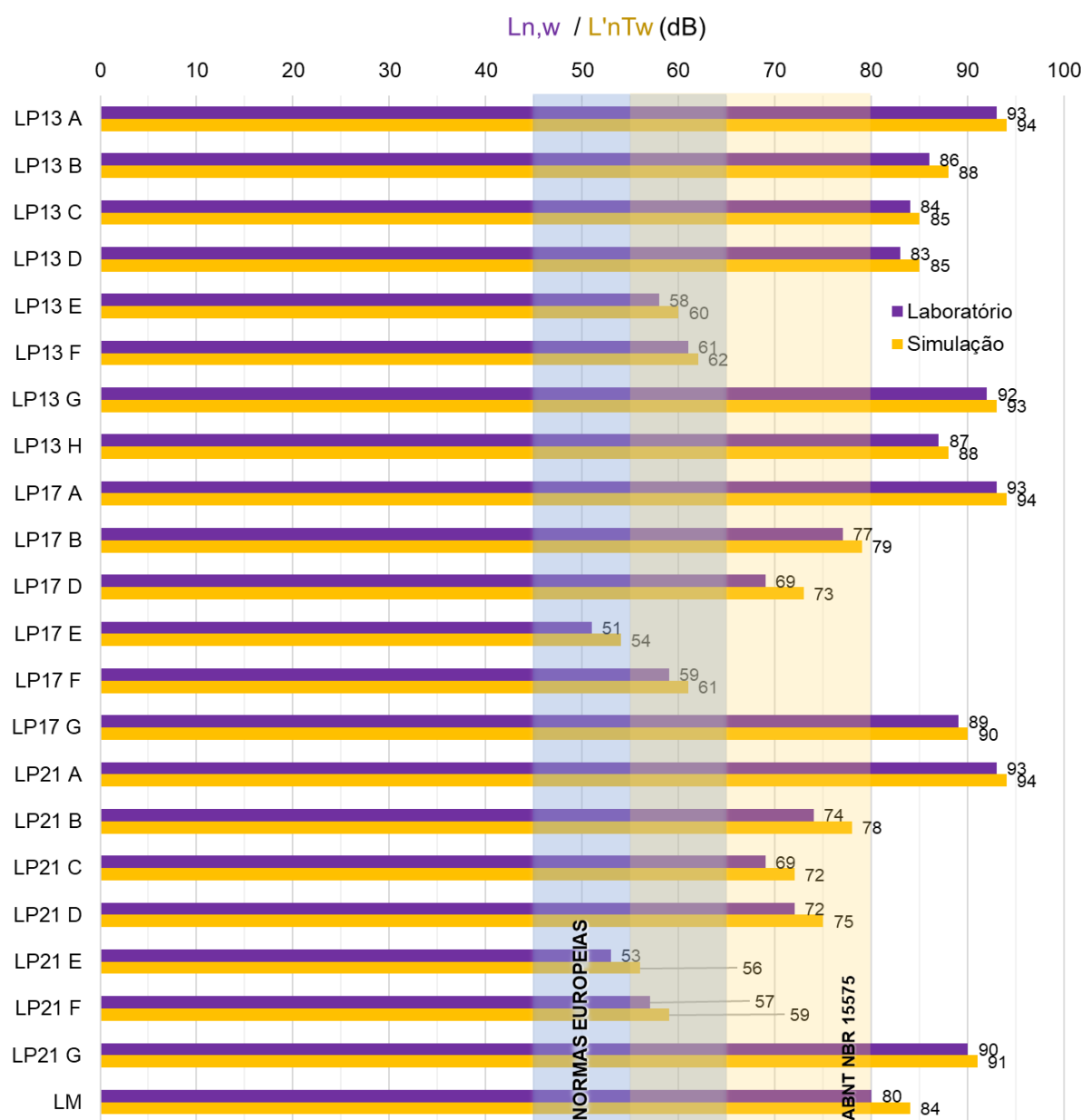
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 83 - Estimativa de isolamento ao ruído de impacto estimado via software por bandas de frequência



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 84 - Resultados ponderados da estimativa de desempenho acústico (ruído de impacto)

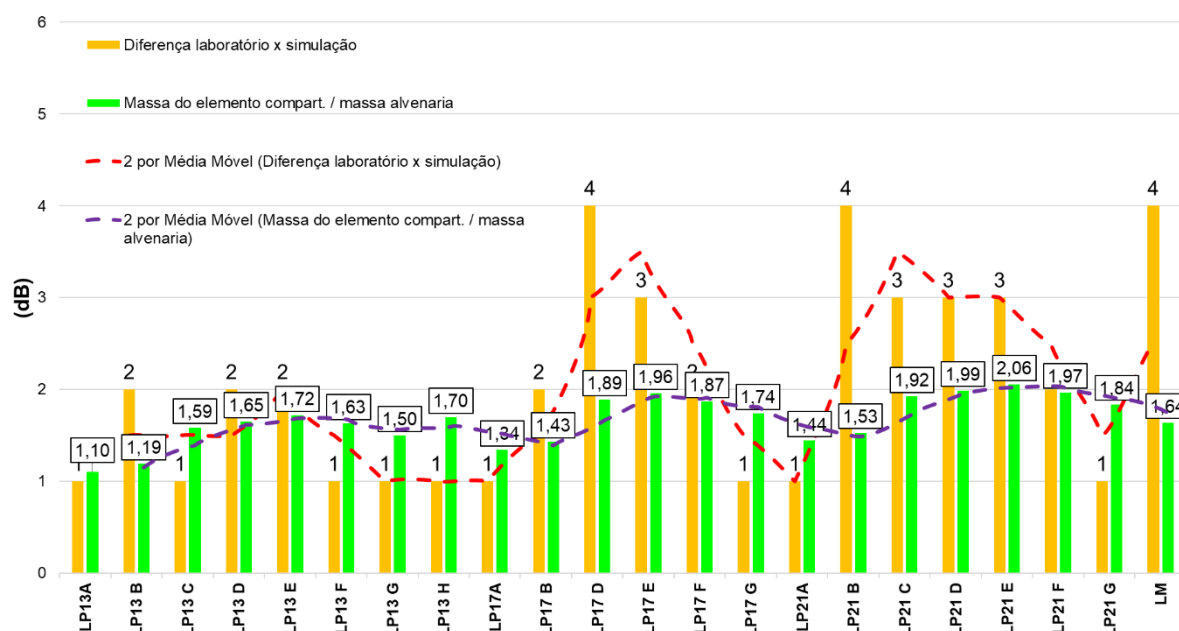


Fonte: Elaborada pelo autor

A estimativa do isolamento sonoro de impacto em campo consiste na identificação e quantificação da propagação sonora via direta (através do sistema de piso) e indireta, por meio dos elementos construtivos adjacentes (HOPKINS, 2012). A determinação da transmissão de ruídos de impacto por vias marginais pode ser mensurada em laboratório ou estimada matematicamente, através das prescrições da

ISO 12354-2 (ISO, 2017b). Os resultados apresentados a seguir seguem o caminho indicado por Hopkins (2012), em que há maior proximidade entre os resultados estimados para ruídos de impacto em comparação com as diferenças observadas nas estimativas para ruídos aéreos.

Figura 85 - Redução do isolamento aéreo nas simulações



Fonte: Elaborada pelo autor

Abaixo são apresentados em sequência os resultados estimados em comparação com os aferidos em laboratório, com a discriminação da transmissão estimada por vias direta e indireta.

As composições A, diferentes entre si por meio do modelo de lajota cerâmica, apresentam resultados estimados muito próximo dos resultados de laboratório. Pequenas diferenças, decorrentes das transmissões marginais, são notadas nas baixas frequências (Figura 86, Figura 87, Figura 88 e Figura 89).

Figura 86 - Comportamento da composição A (sem revestimentos) nas simulações

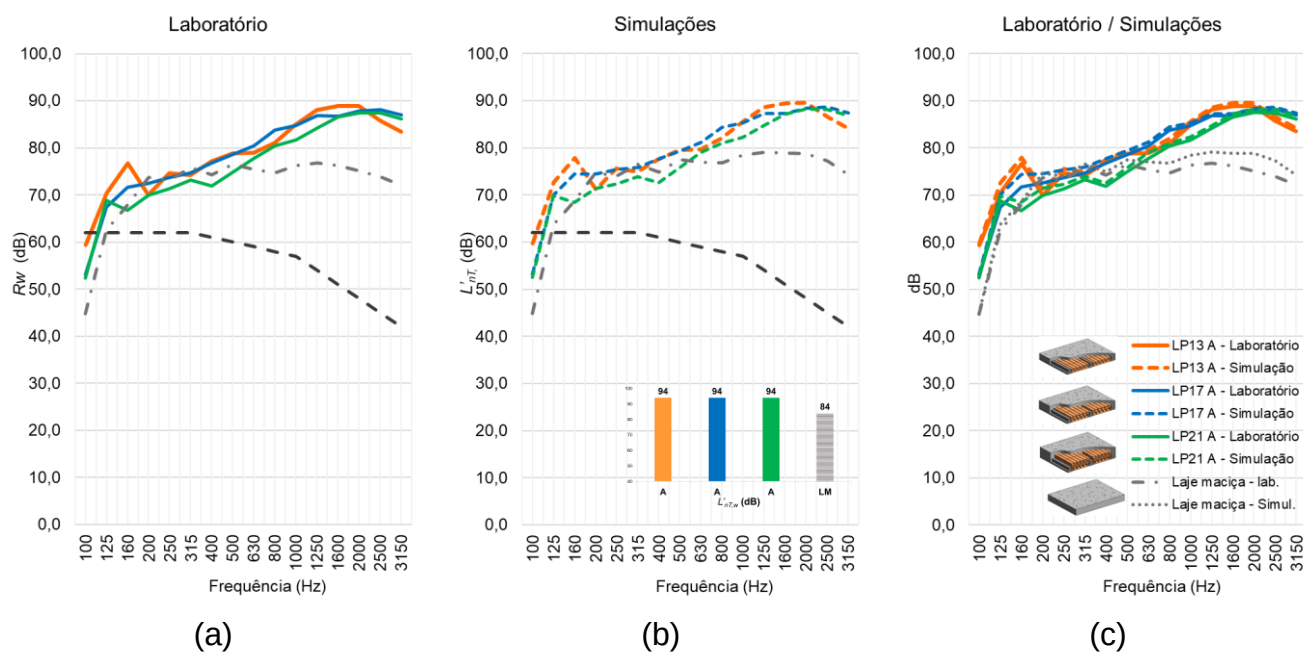


Figura 87 – Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão – LP13A

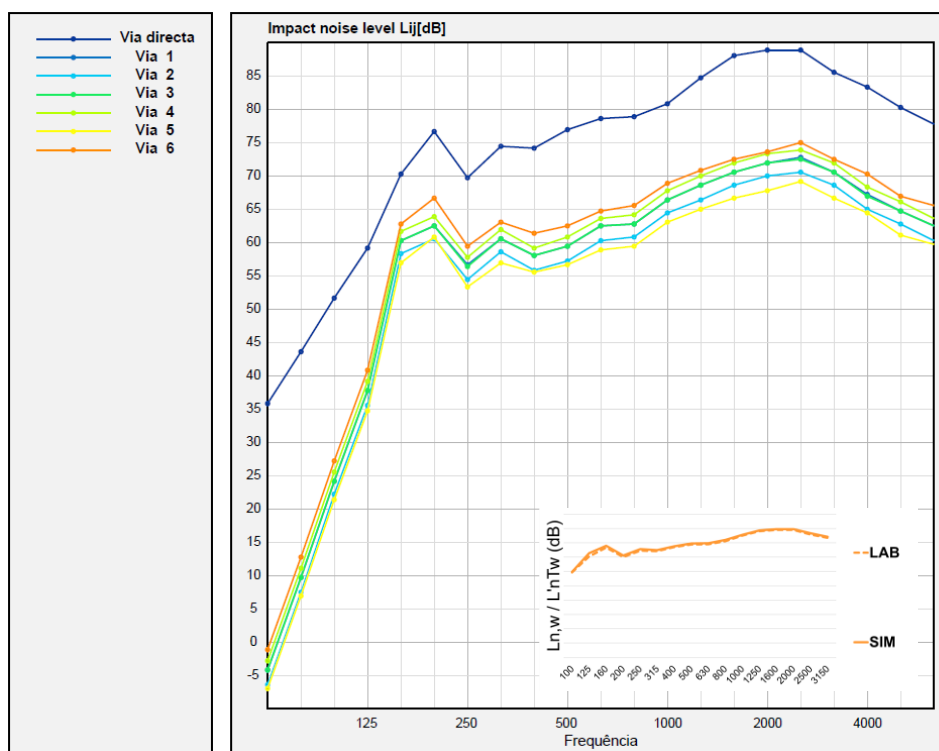
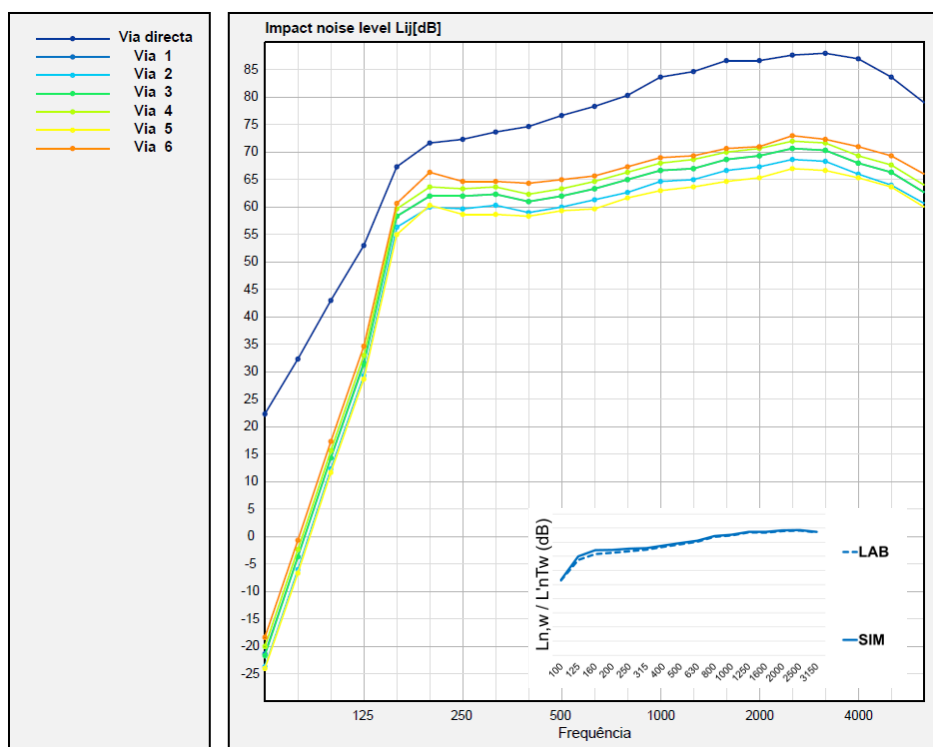
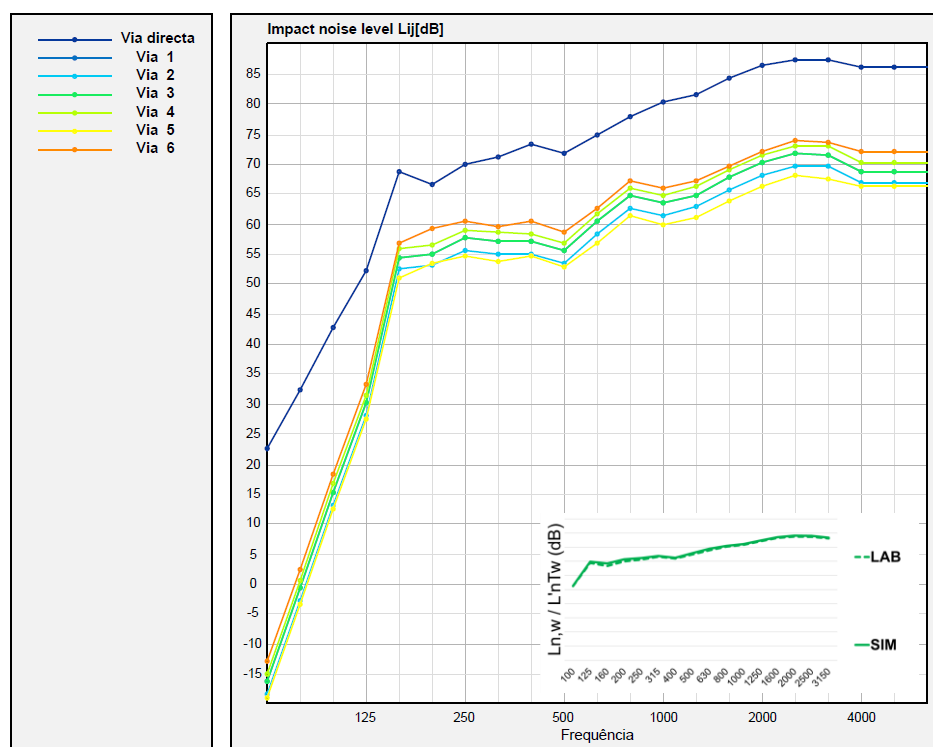


Figura 88 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP17A



Fonte: Elaborada pelo autor

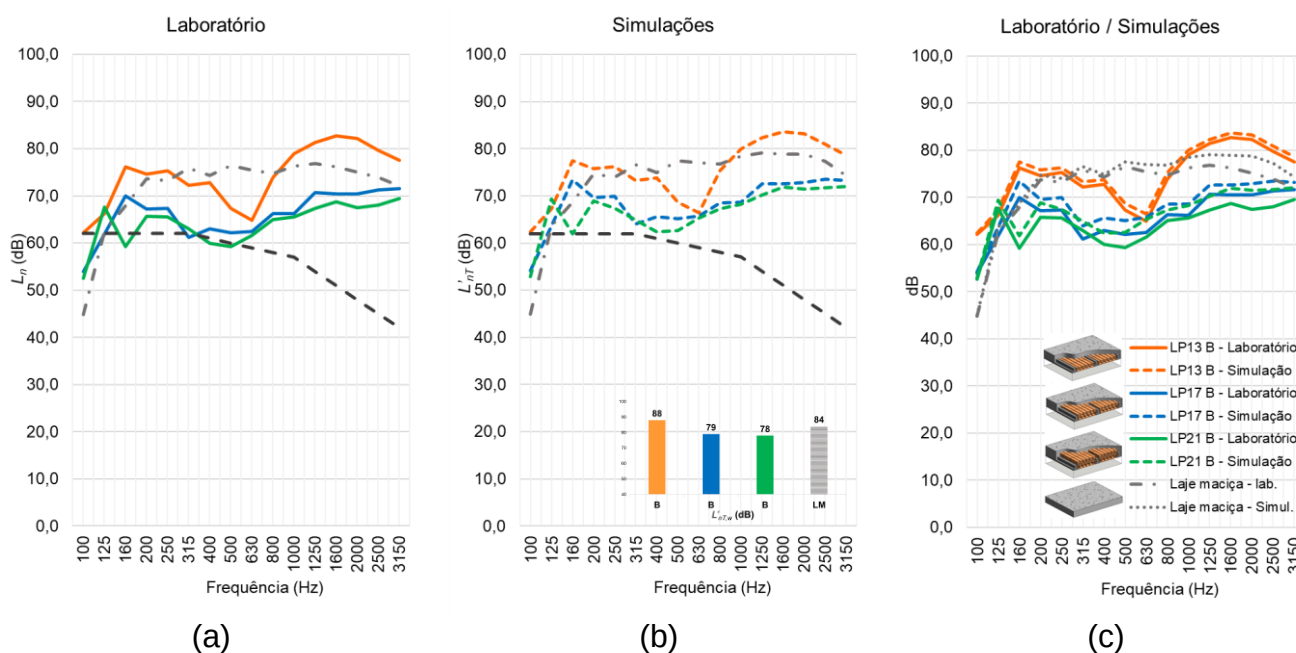
Figura 89 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP21A



Fonte: Elaborada pelo autor

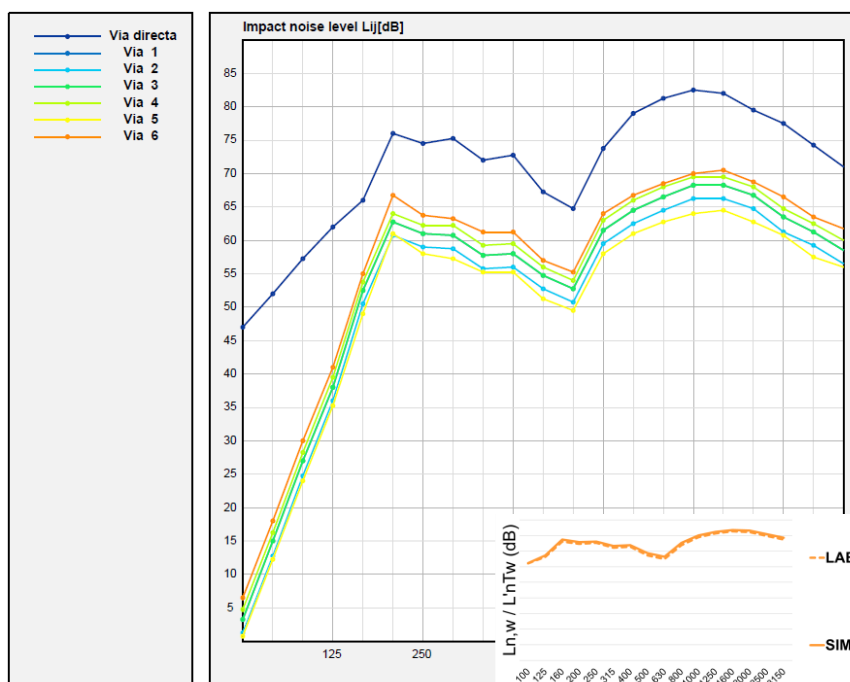
Quando analisadas as amostras tipo B, com presença do forro suspenso, os perfis gráficos (Figuras Figura 90, Figura 91, Figura 92 e Figura 93) contêm diferenças mais visíveis em relação ao observado nas composições A, em especial nas lajes LP17B e LP21B.

Figura 90 - Comportamento da composição B (com forro suspenso) nas simulações



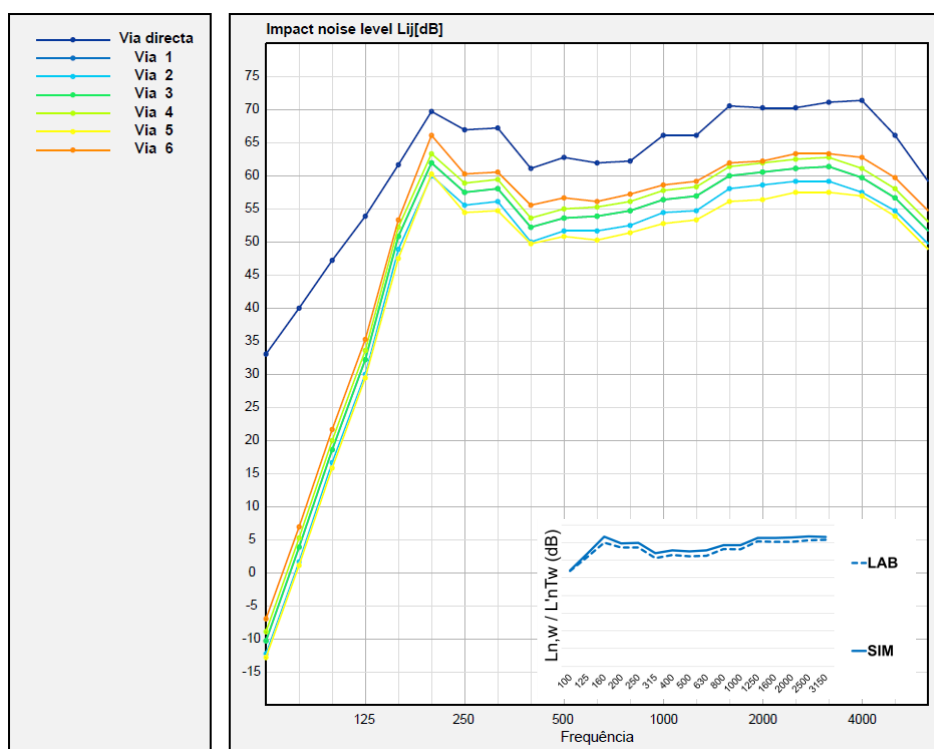
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 91 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP13B



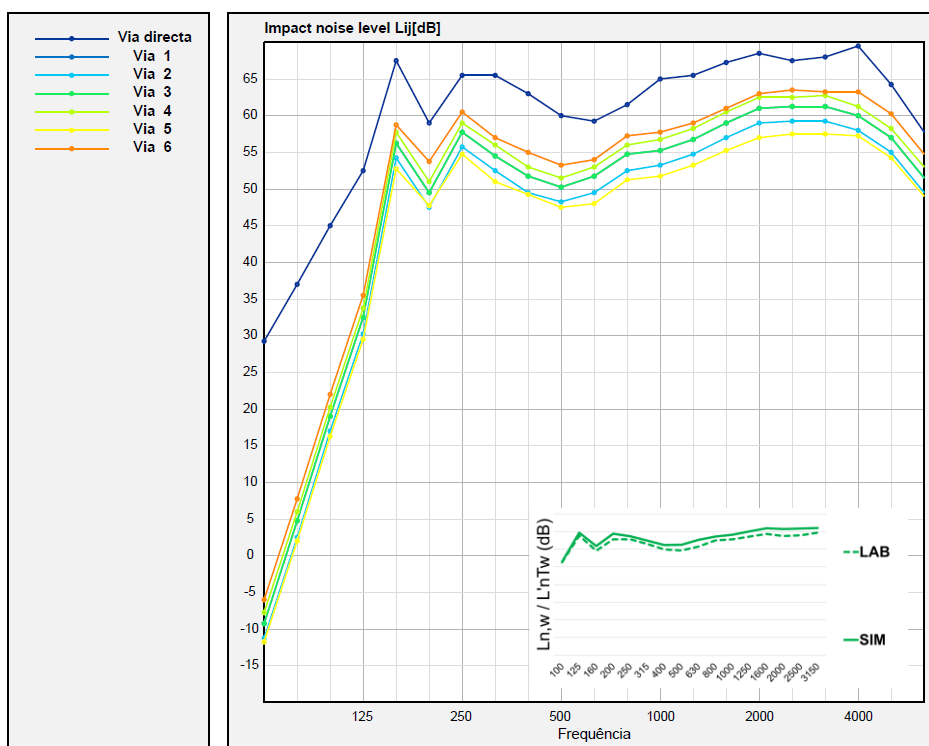
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 92 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP17B



Fonte: Elaborada pelo autor

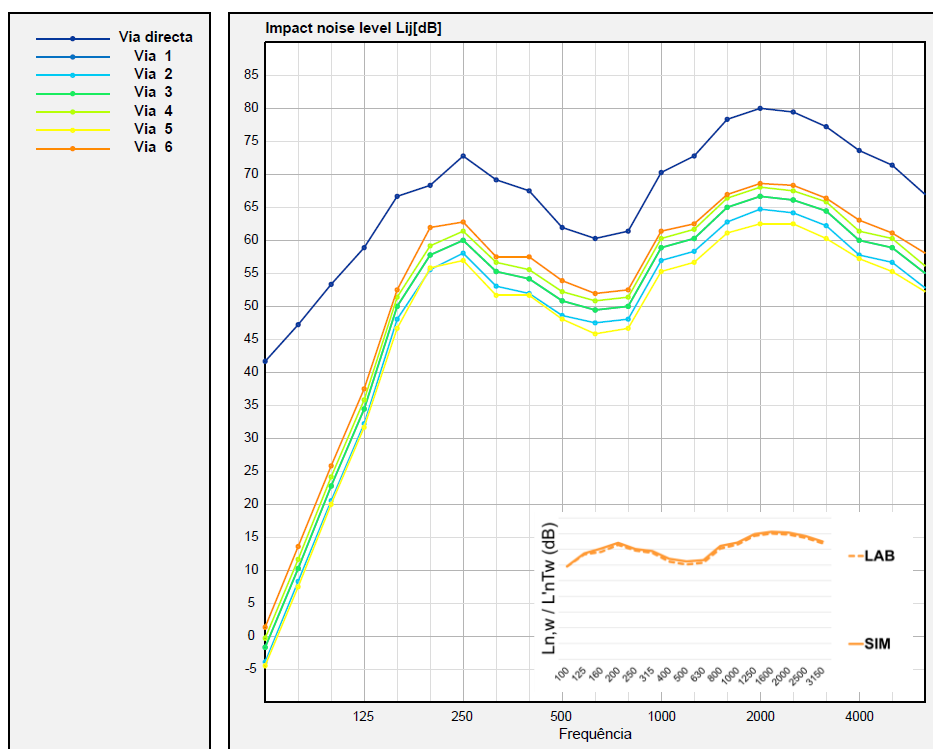
Figura 93 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP21B



Fonte: Elaborada pelo autor

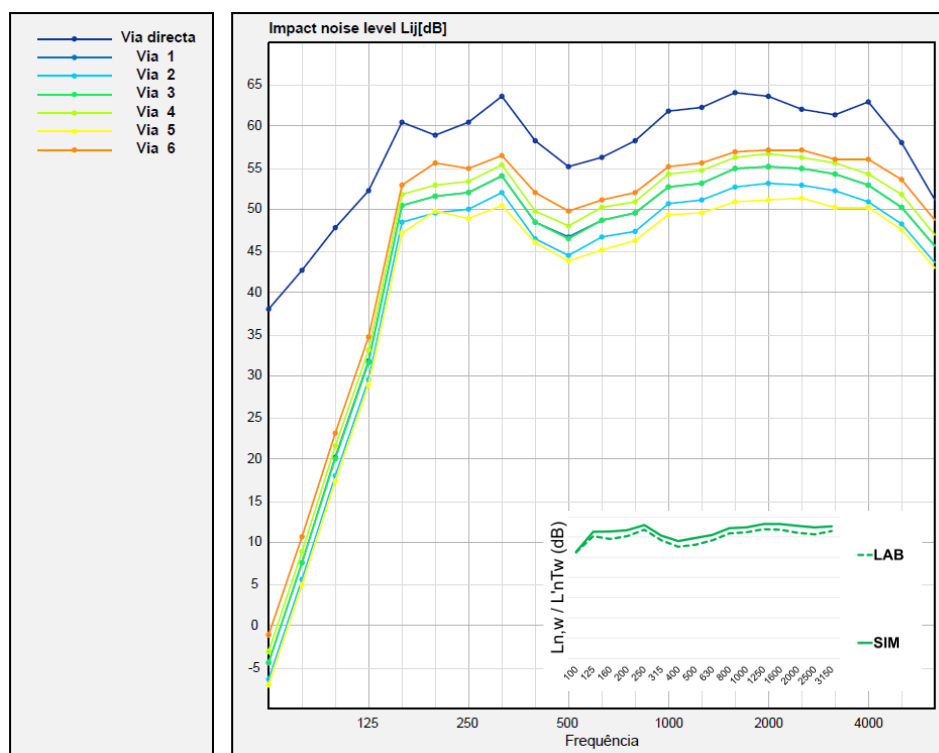
Nas amostras tipo C, as transmissões marginais se mostram mais expressivas na amostra de maior espessura (LP21C) em relação a amostra de menor espessura (LP13C).

Figura 94 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP13C



Fonte: Elaborada pelo autor

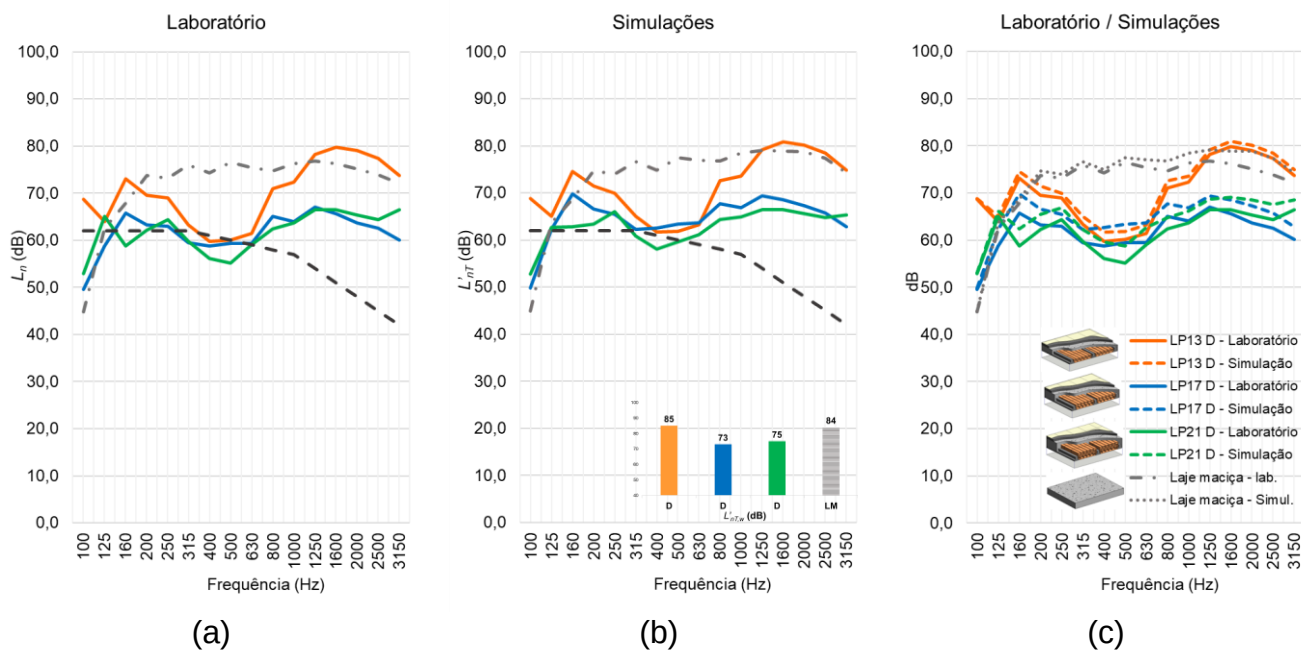
Figura 95 – Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP21C



Fonte: Elaborada pelo autor

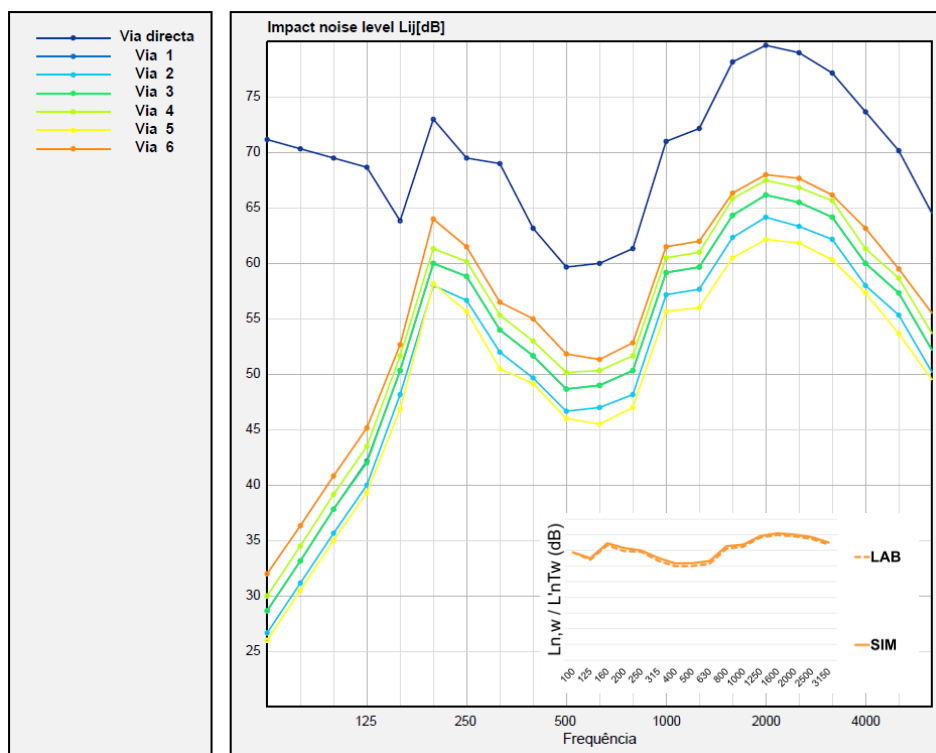
As composições tipo D também apresentam maiores contribuições de transmissão marginal nas lajes de maior espessura, LP17D e LP21D, em comparação com a LP13D. As diferenças nos valores ponderados são de 2 dB (LP13D), 4 dB (LP17D) e 3 dB (LP21D).

Figura 96 – Comportamento da composição D nas simulações



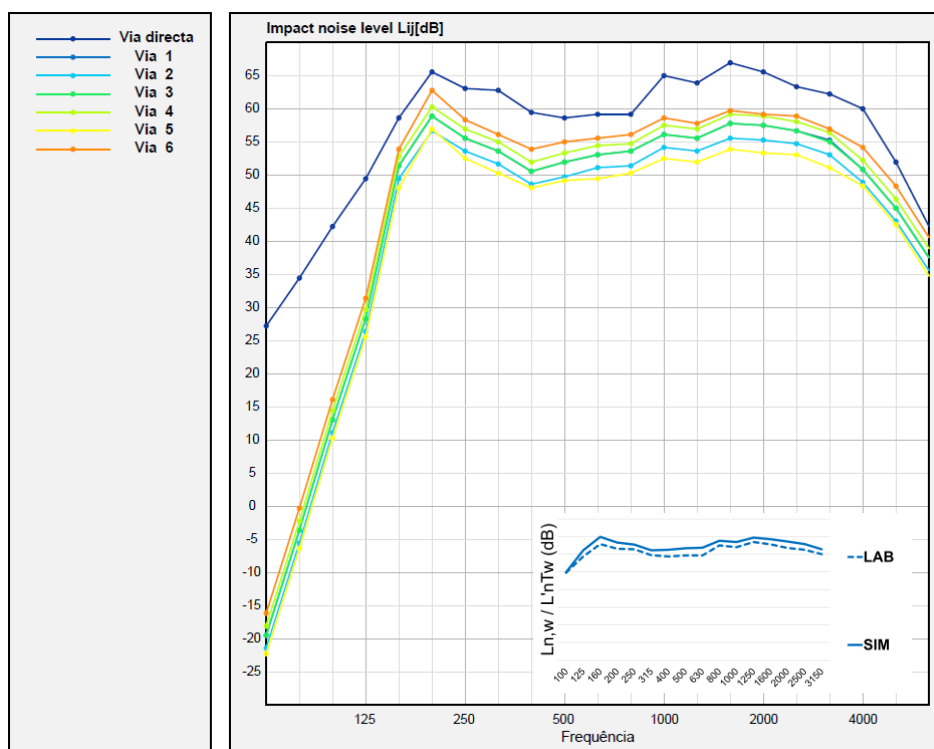
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 97 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP13D



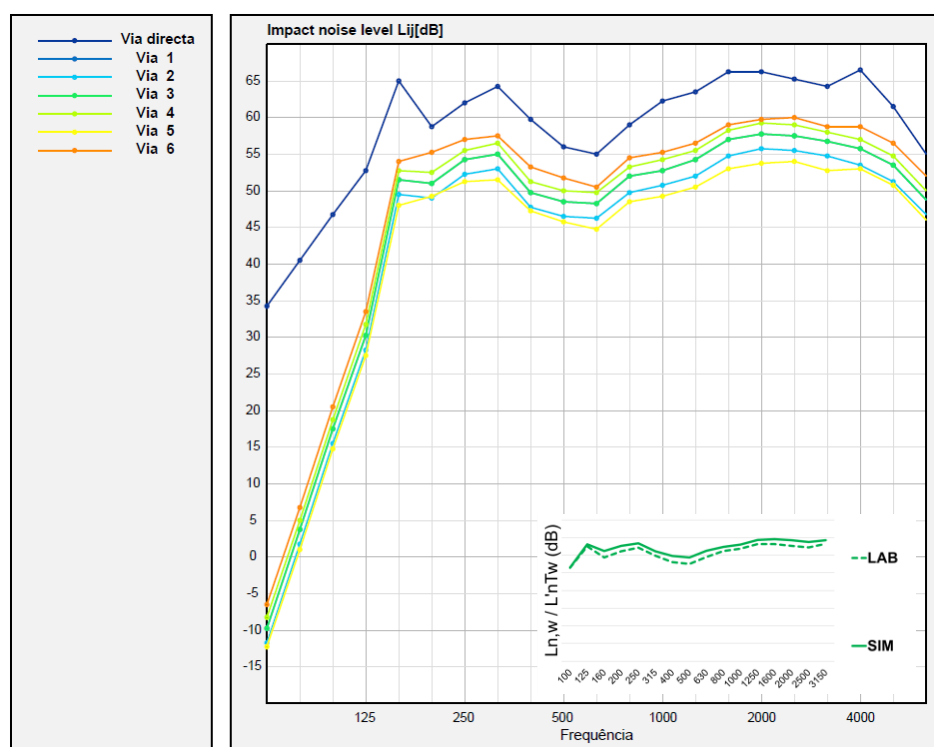
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 98 – Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP17D



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 99 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP21D



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 100 - Comportamento da composição E nas simulações

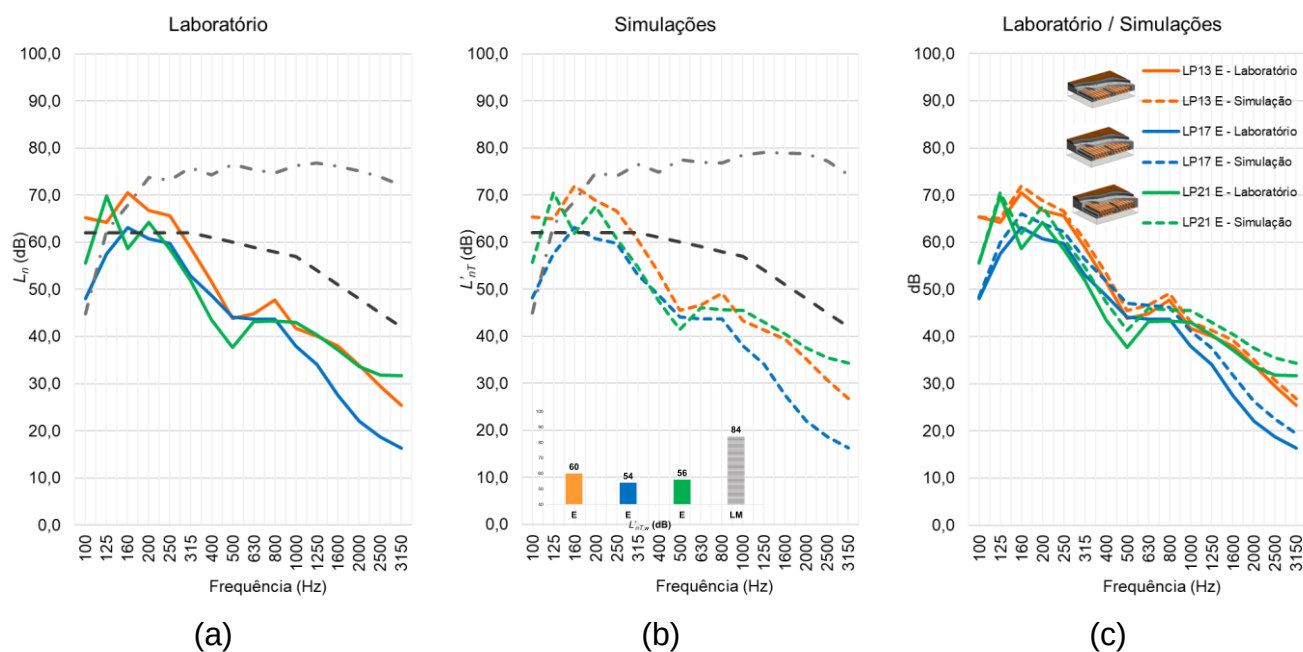


Figura 101 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP13E

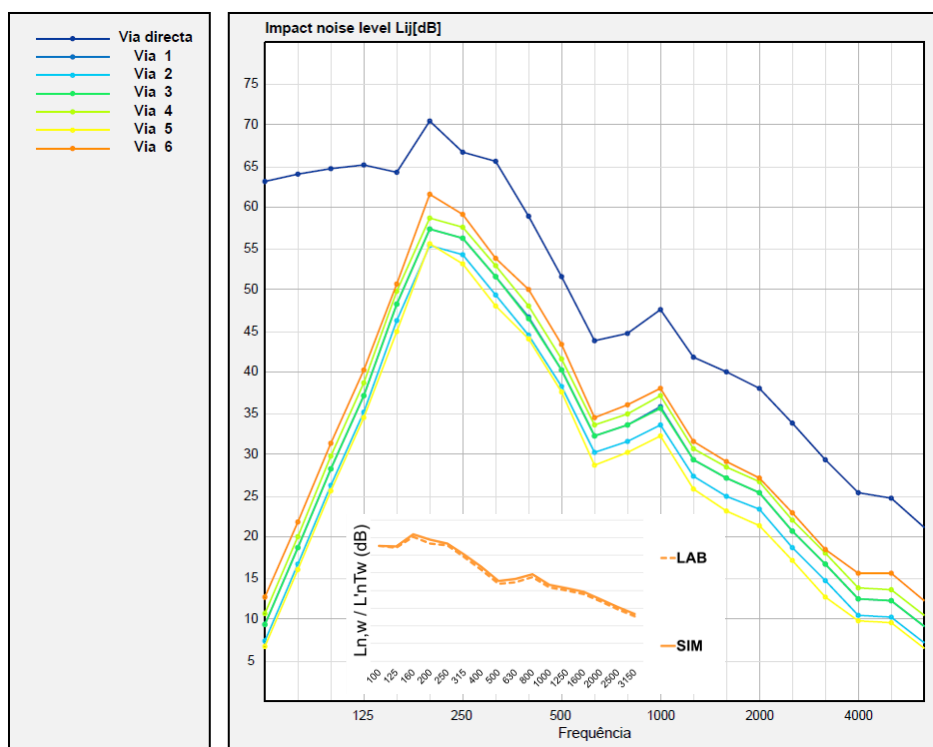
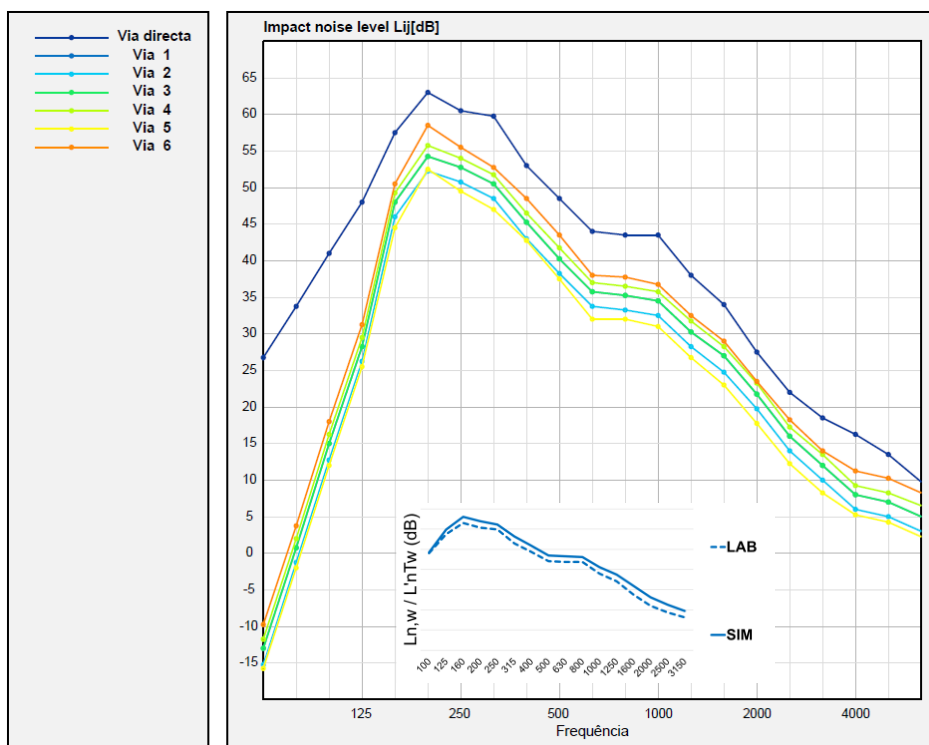
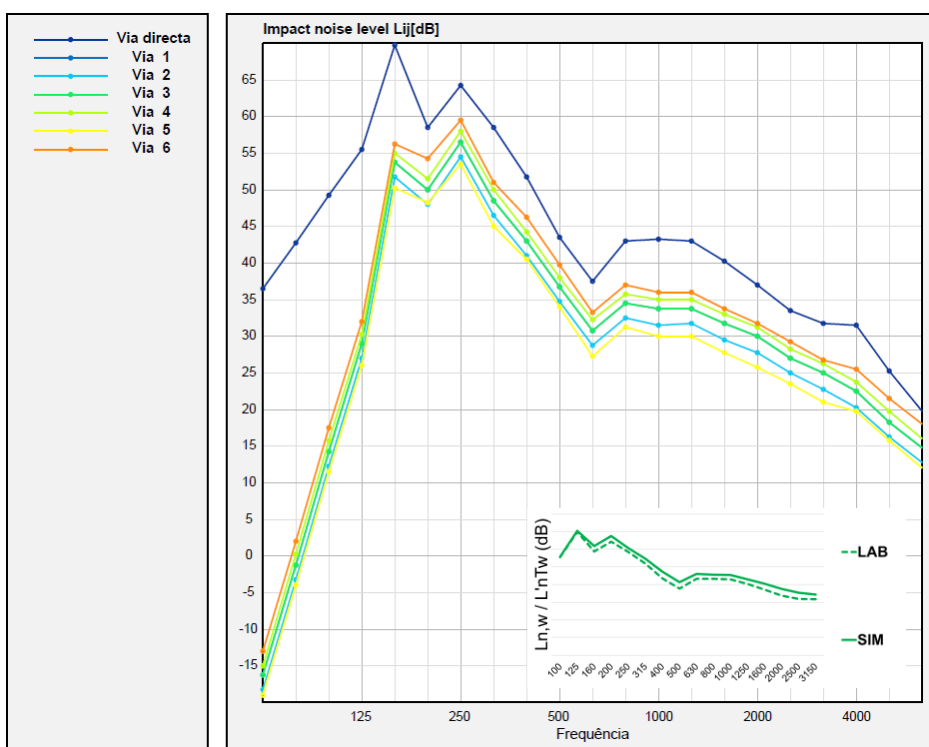


Figura 102 – Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP17E



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 103 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP21E



Fonte: Elaborada pelo autor

As composições F (Figura 104, Figura 105, Figura 106 e Figura 107) e G (Figura 108, Figura 109, Figura 110 e Figura 111), que não contam com forro suspenso, apresentam curvas de laboratório e estimadas para campo mais próximas que as composições D e E, apresentadas acima.

Figura 104 – Comportamento da composição F nas simulações

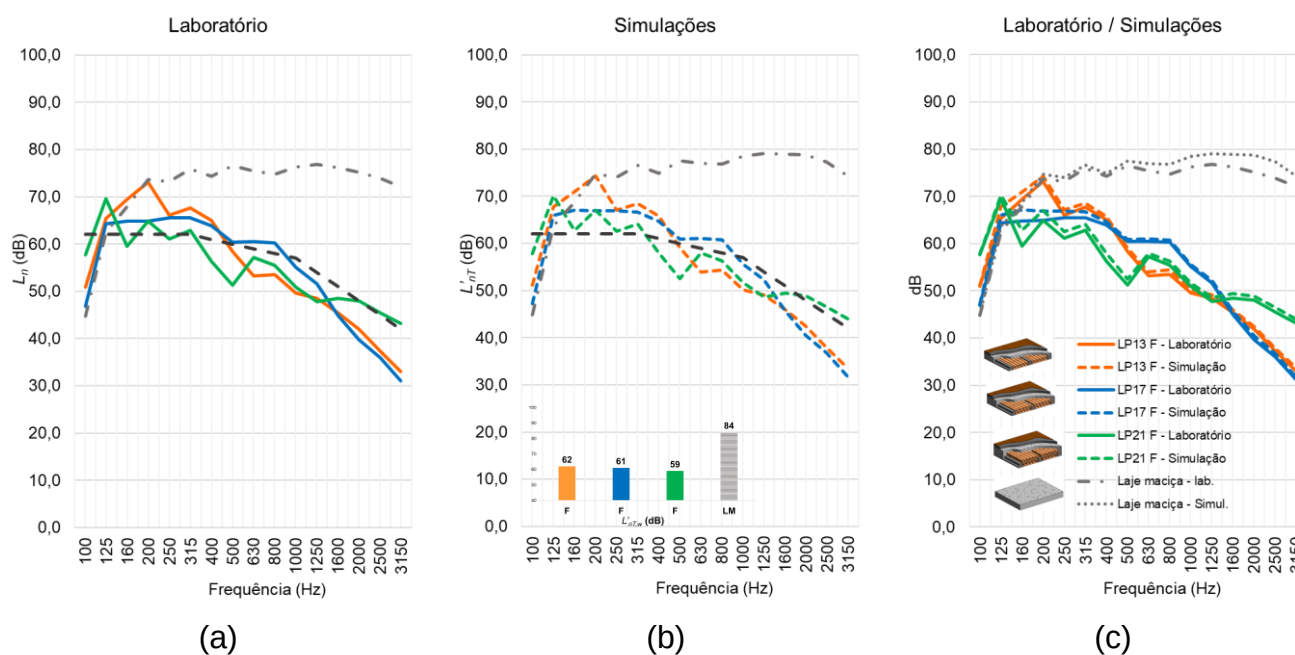
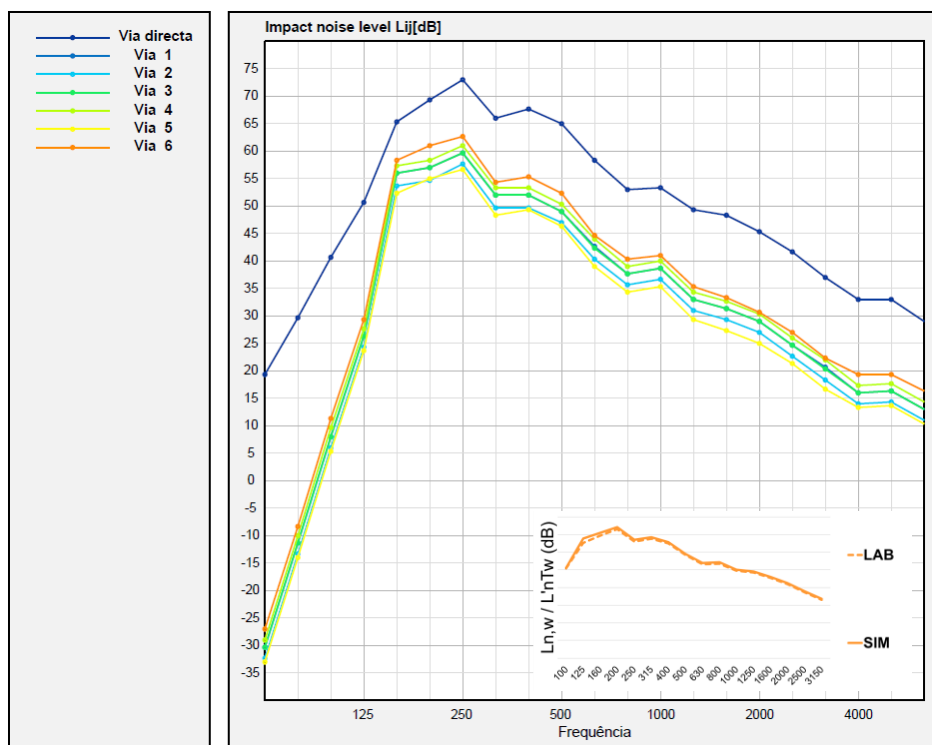
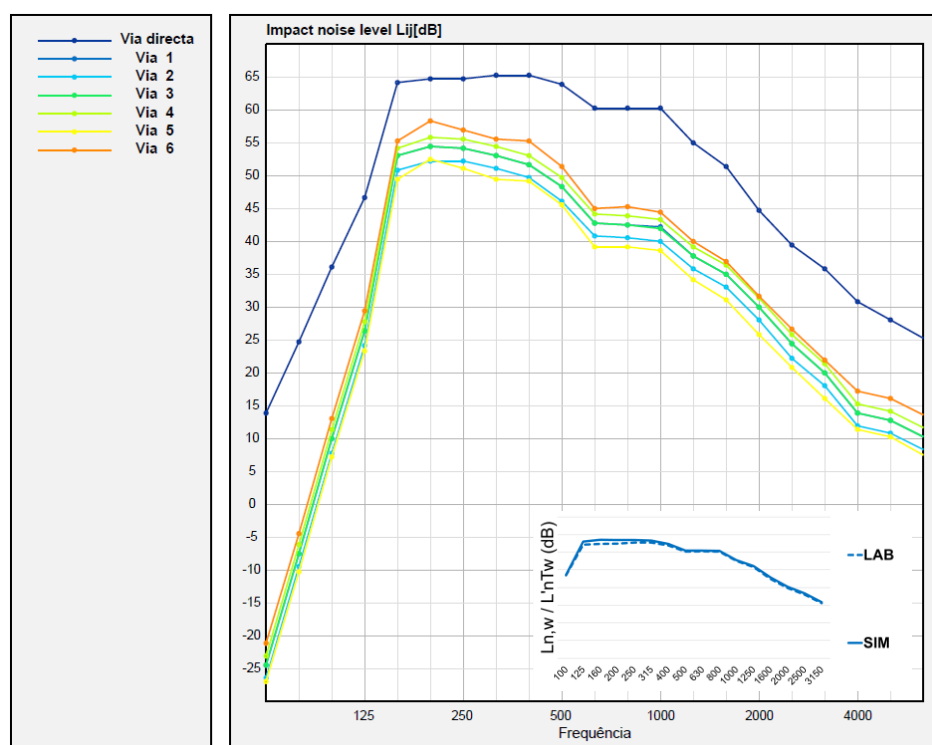


Figura 105 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP13F



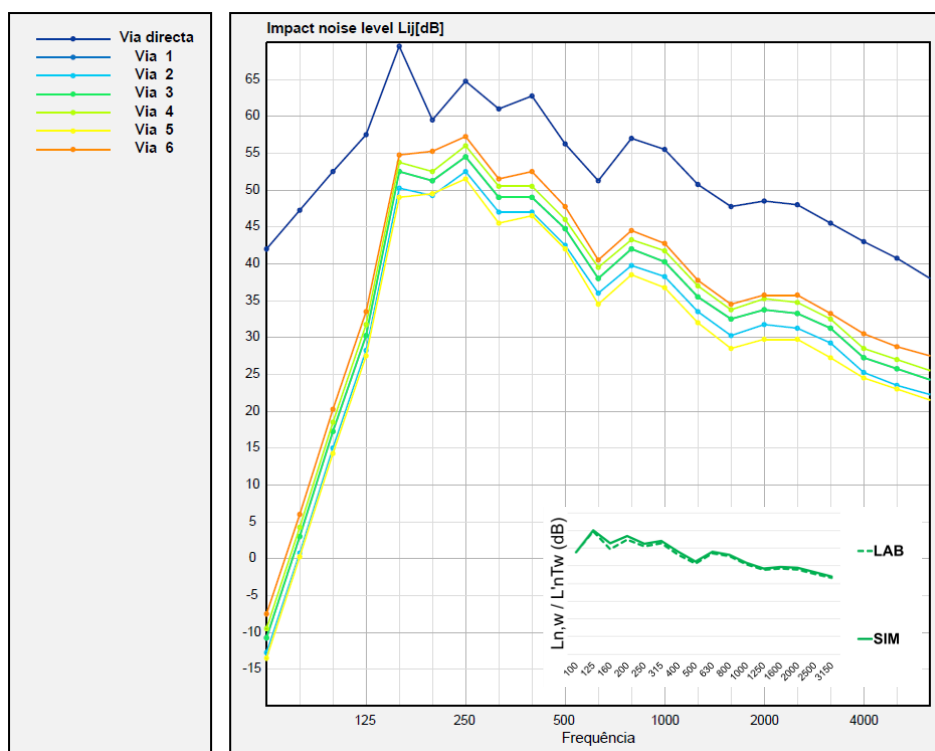
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 106 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP17F



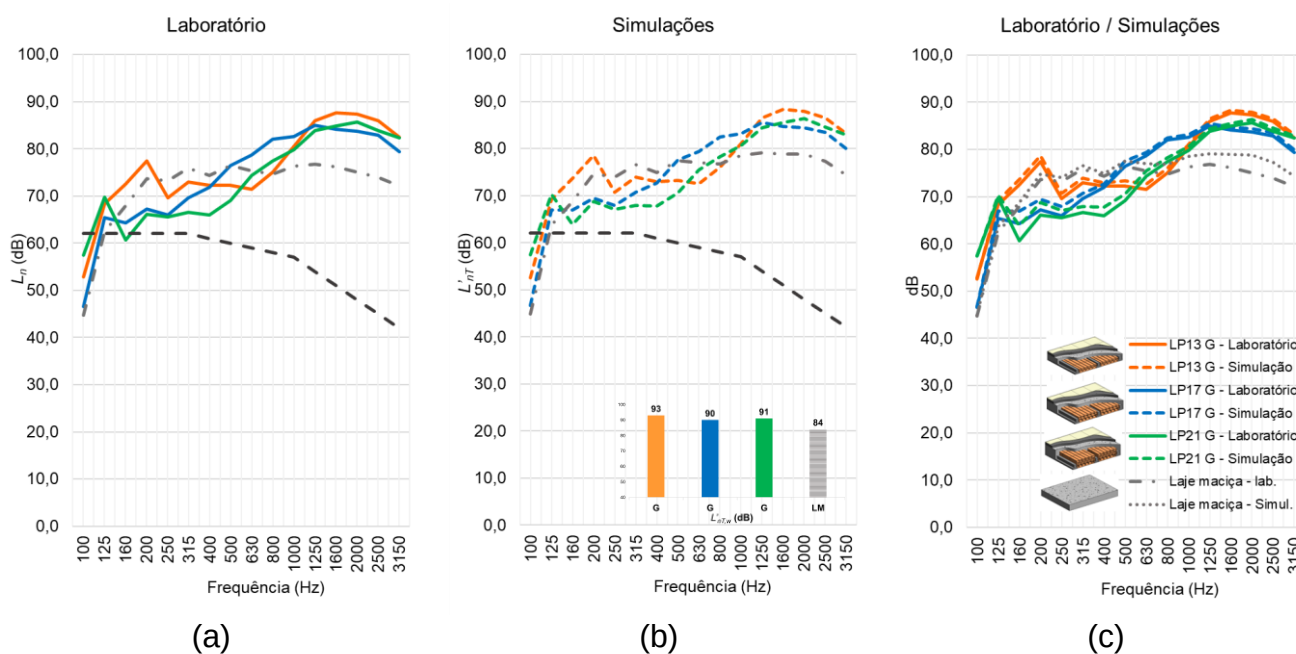
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 107 – Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP21F



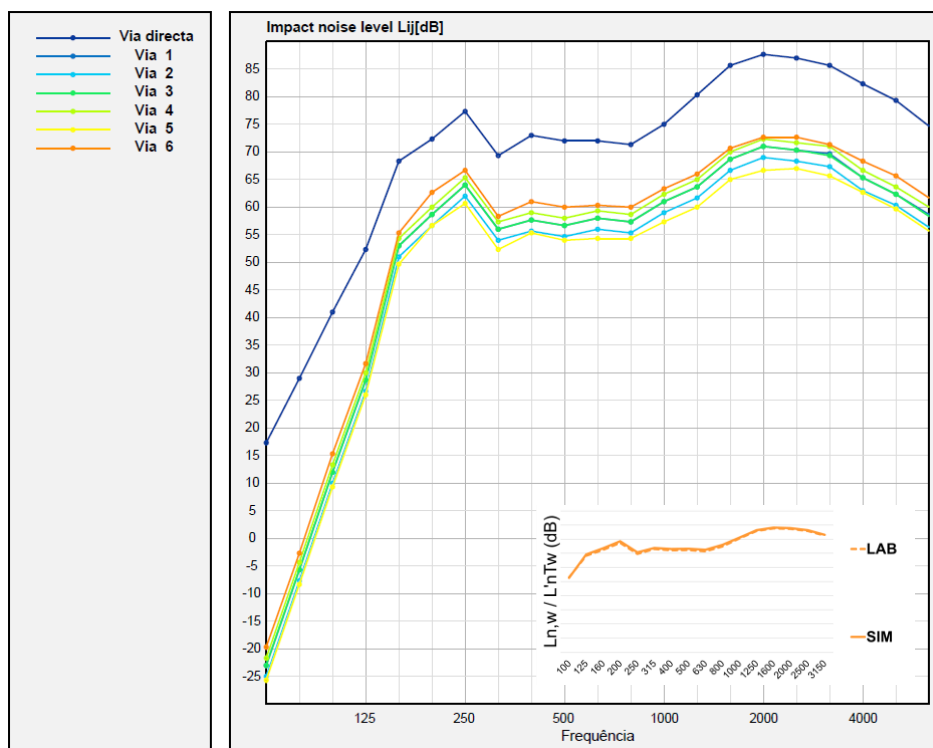
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 108 – Comportamento da composição G nas simulações



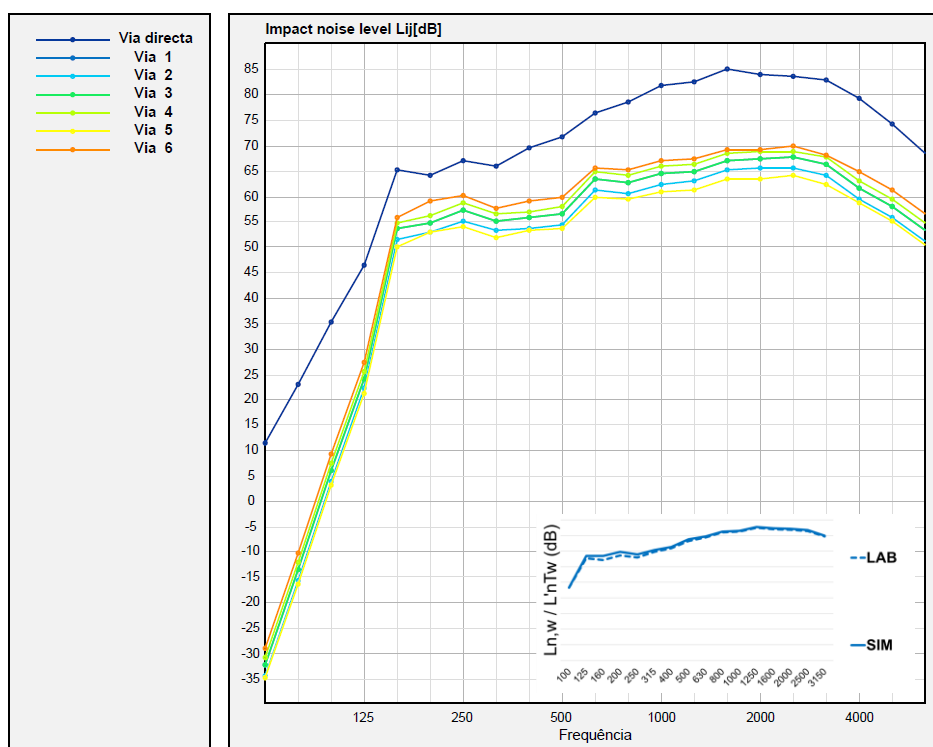
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 109 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP13G



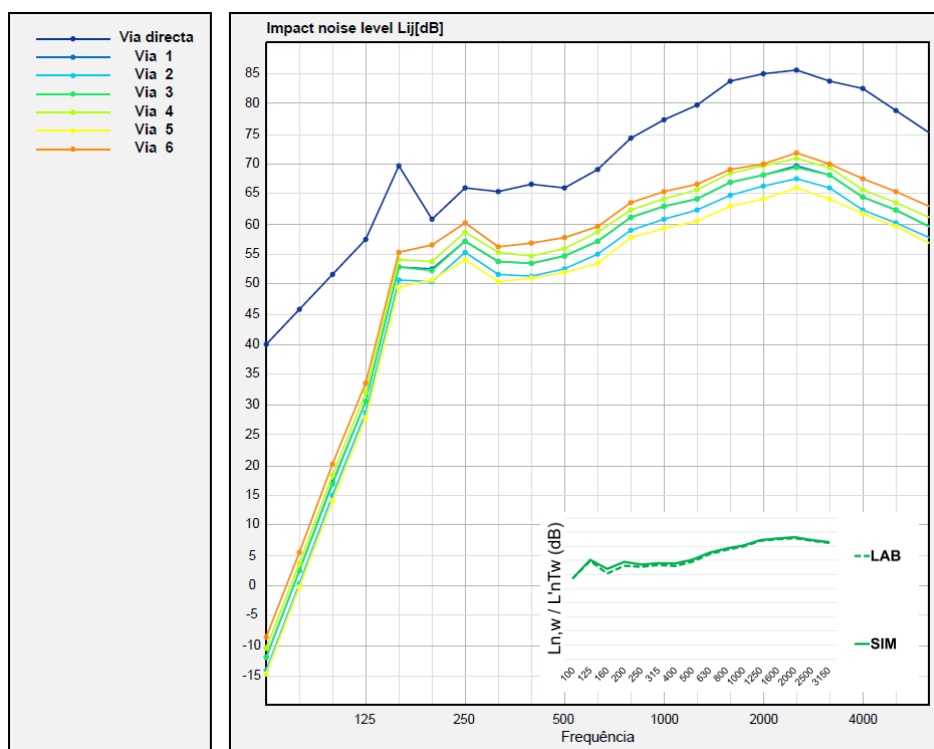
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 110 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP17G



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 111 - Isolamento ao ruído aéreo – Vias de transmissão - LP21G



Fonte: Elaborada pelo autor

Cabe destacar que em campo a transmissão por flancos do ruído de impacto é fortemente influenciada por diversas variáveis, além da massa e dimensões das alvenarias adjacentes, pelas características da interface de contato entre elemento de compartimentação, elementos estruturais e de vedação. Estudo experimental de Barbaresi e Semprini (2013) indica valores de transmissão marginal inferiores aos previstos na ISO 12354 (ISO, 2017a; ISO, 2017b), especialmente nas baixas e médias frequências. Ainda, a existência de aberturas pode alterar de forma relevante a resposta vibracional de um elemento construtivo, como uma parede, que vem a ser uma via de transmissão marginal de ruídos de impacto, a depender das condições de contorno da abertura (HOPKINS, 2012). Nunes *et al.* (2018) verificaram menor desempenho considerando o aumento do tamanho das aberturas nos ambientes.

Os resultados apresentados na seção a seguir (ensaios de campo) permitem a comparação entre o comportamento em campo com os resultados aferidos em laboratório e estimados, para as composições LP13D e LP13G.

4.3 ENSAIOS EM CAMPO

Foram efetuados dois ensaios de campo na edificação amostrada (detalhada anteriormente), em dois dias distintos, sendo que cada ensaio compreende uma composição de sistema de piso, a saber: LP13D e LP13G.

Quando da realização dos ensaios, a edificação encontrava-se em fase de execução. A Figura 112 apresenta a fase construtiva da edificação no momento dos ensaios.

Figura 112 – Estágio executivo dos ambientes na fase de ensaios em campo da pesquisa



Fonte: Registrada pelo autor

Conforme exposto acima, para a realização dos ensaios foram instaladas esquadrias provisórias, medida adotada em outros trabalhos a exemplo do realizado por Di Bella *et al.* (2011), constituídas de chapas de compensado revestidas com filme fenólico (compensado resinado), de 9 mm de espessura (Figura 113a). Para aproximar a condição de vedação das frestas existentes entre as esquadrias provisórias e os elementos construtivos adjacentes da condição final de obra, com as esquadrias definitivas instaladas, optou-se por preencher as referidas frestas com lã de vidro (Figura 113b).

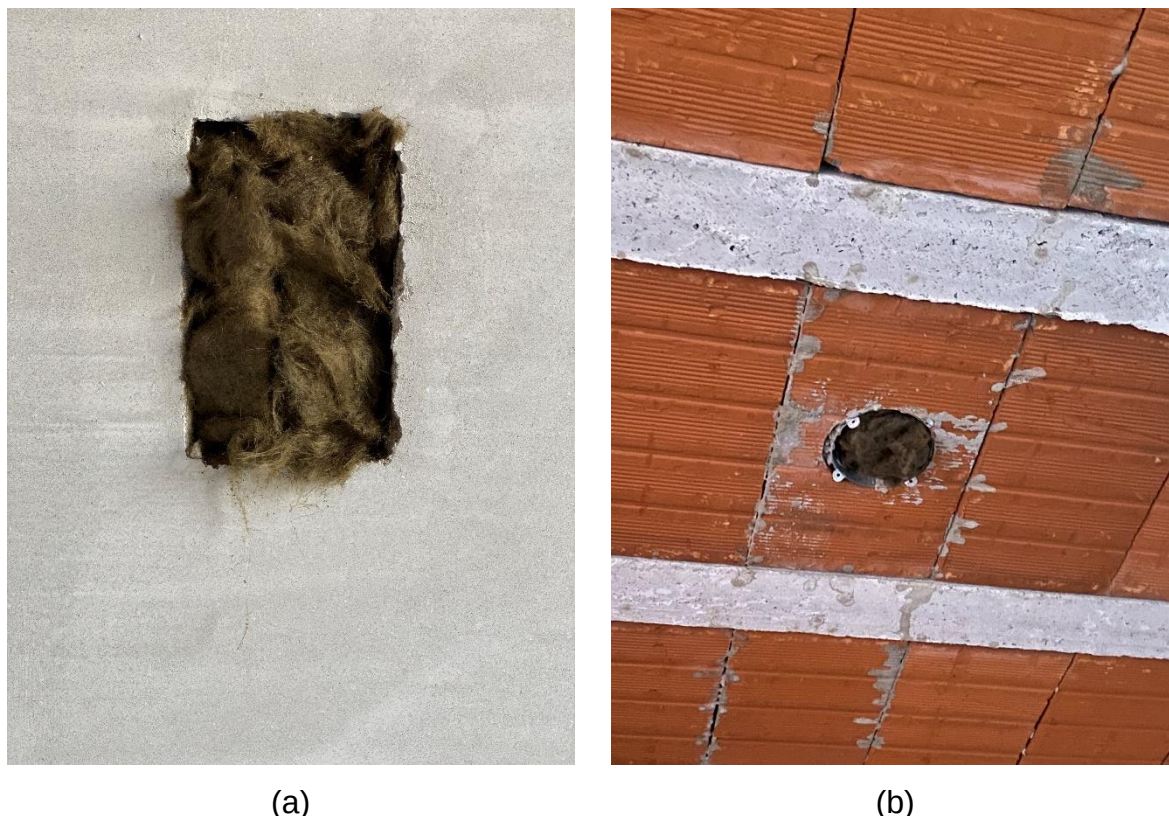
Figura 113 – Portas (a) e janelas (b) provisórias instaladas para os ensaios em campo



Fonte: Registrada pelo autor

O método de estimativa de desempenho previsto na ISO 12354 (ISO, 2017a; ISO, 2017b) não considera pontos de fragilidade inerentes a interação dos sistemas de piso e de vedação vertical com instalações elétricas e hidrossanitárias. Entretanto, é sabido que estes pontos acabam por repercutir no isolamento sonoro dos sistemas construtivos. Labres et al. (2018), a título de exemplo, verificaram perdas de até 3 dB de atenuação aos sons aéreos decorrentes das instalações elétricas. Para mitigar possíveis interferências decorrentes da ausência da montagem completa dos referidos pontos elétricos, eles foram preenchidos com lã de vidro, conforme apresenta abaixo a Figura 114.

Figura 114 - Tratamento nos pontos elétricos nos SSVI (a) e sistemas de piso (b)



(a)

(b)

Fonte: Registrada pelo autor

4.3.1 Ruído aéreo

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios realizados em campo. A Tabela 18 expõe os valores, em dB, por bandas de frequência, indicando também os valores estimados via simulação computacional, estes considerando a condição executiva da edificação, ou seja, com a inserção de material resiliente (manta acústica) cujas características foram inseridas no software de acordo com os dados de laboratório, indicados na Figura 26. Também as esquadrias foram modeladas no software de forma a se aproximar da condição construtiva indicada na Figura 28, com esquadrias provisórias. Para tal, o comportamento destas foi estimado pelo método da matriz de transferência, a partir dos dados inseridos no software de simulação.

Tabela 18 – Isolamento ao ruído aéreo estimado e medido em campo

Laje	Frequência (Hz)																$D_{nT,w}$ (dB)
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	
LP13 G Simulação	30,9	30,2	30,4	33,4	34,3	32,7	36,3	39,4	41,0	42,9	40,3	41,2	42,7	41,9	44,1	48,4	41
LP13 G Ensaio	33,7	34,1	39,6	44,1	42,6	43,2	44,5	46,0	47,1	48,9	49,8	49,0	46,5	46,8	49,7	53,6	49
LP13 D Simulação	24,9	33,0	31,4	37,1	32,0	38,0	42,5	43,8	44,7	45,9	46,7	46,5	47,6	47,0	49,1	54,0	44
LP13 D Ensaio	39,1	34,5	38,3	42,8	40,3	41,7	44,5	47,1	47,4	49,5	50,4	51,8	51,1	52,6	55,9	58,5	50

Fonte: Elaborada pelo autor

Quando analisados os resultados ponderados, percebe-se que a estimativa de desempenho retornou valores inferiores aos resultados de campo. Considerando o sistema LP13G, o resultado de campo foi 8 dB superior ao estimado; já para o sistema LP13D, a diferença foi de 6 dB, também em favor do ensaio de campo.

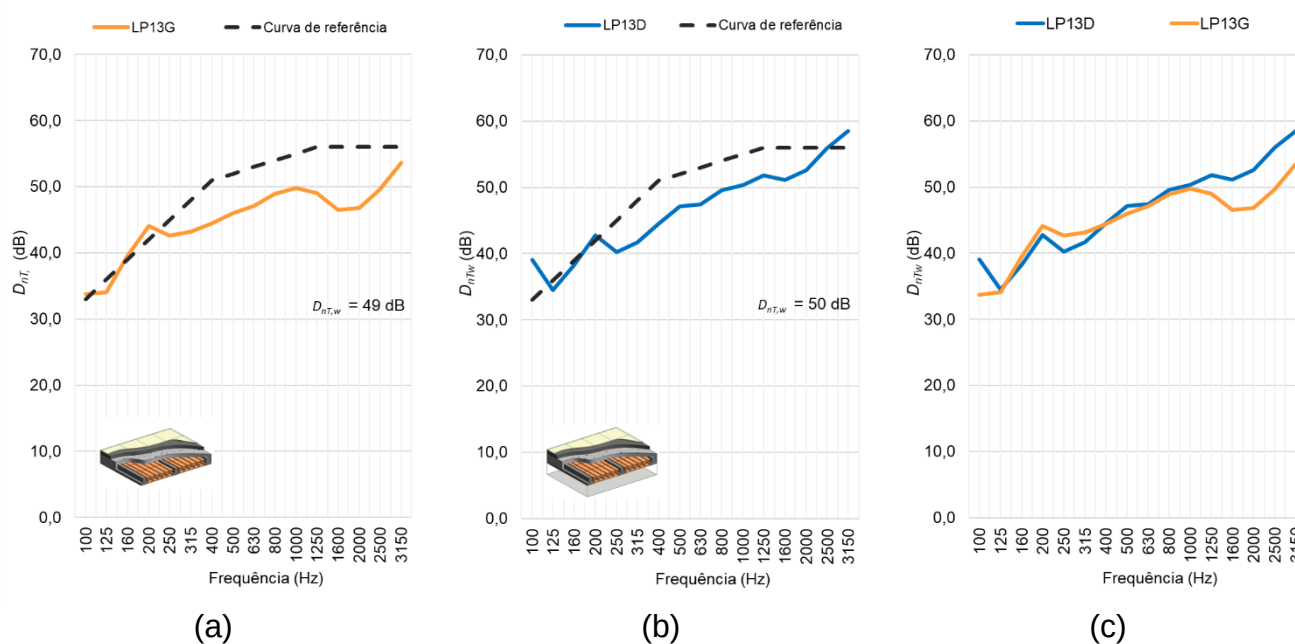
Este comportamento pode indicar certo grau de conservadorismo do método de estimativa empregado. Ainda que avaliando sistemas de piso homogêneos, ao compararem resultados estimados com resultados de campo, Oliveira e Heissler (2021) também observaram valores de atenuação sonora superiores em campo em relação aos estimados, tendo sido encontradas diferenças entre 1 e 9 dB. De Toni (2020) por outro lado, em sistemas não homogêneos, quando observou diferenças, notou-as quantificadas em 1 dB. Pode-se citar ainda o trabalho de Barbaresi e Semprini (2013), que indica através de dados experimentais valores de transmissões por flancos inferiores aos estimados através do método da ISO 12354 (ISO, 2017a; ISO, 2017b).

Quando verificado o índice de redução sonora ponderado, relativo ao ensaio de laboratório, percebe-se que ambos os sistemas apresentam resultado inferiores aos valores de diferença padronizada de nível ponderada, relativa aos ensaios de campo. Ainda que a comparação direta entre resultados de laboratório e de campo não seja tecnicamente tangível, pode-se sublinhar que em tese, espera-se o comportamento inverso, uma vez que em laboratório não existem transmissões marginais, o que ocorre em campo. Neste sentido convém apontar uma diferença entre as amostras de laboratório e de campo, além das já mencionadas: a relação entre vão e espessura. Conforme mencionado anteriormente, em laboratório, a adição de camadas nas lajes de menor relação vão/espessura apresentou maior efetividade quando comparada a laje de maior relação. Considerando que o sistema de laje

ensaiado em campo possui relação vão/espessura inferior ao exemplar de campo (30,77 e 19,23, respectivamente, é compreensível questionar se a rigidez do sistema pode ter conexão com a tendência inversa observada (resultados de campo superiores aos de laboratório).

Para melhor compreensão e análise dos resultados, abaixo são exibidos graficamente os resultados, por bandas de frequência (Figura 115).

Figura 115 - Isolamento ao ruído aéreo verificado em campo



Fonte: Elaborada pelo autor

Ao analisar o perfil gráfico dos ensaios de campo, nota-se o efeito da ressonância no interior dos alvéolos das lajotas para ambas as composições, a partir da banda de 250 Hz. Ou seja, a adição do forro suspenso não mitigou este fenômeno; a estimativa de desempenho (Figura 116, apresentada posteriormente) já supunha este comportamento.

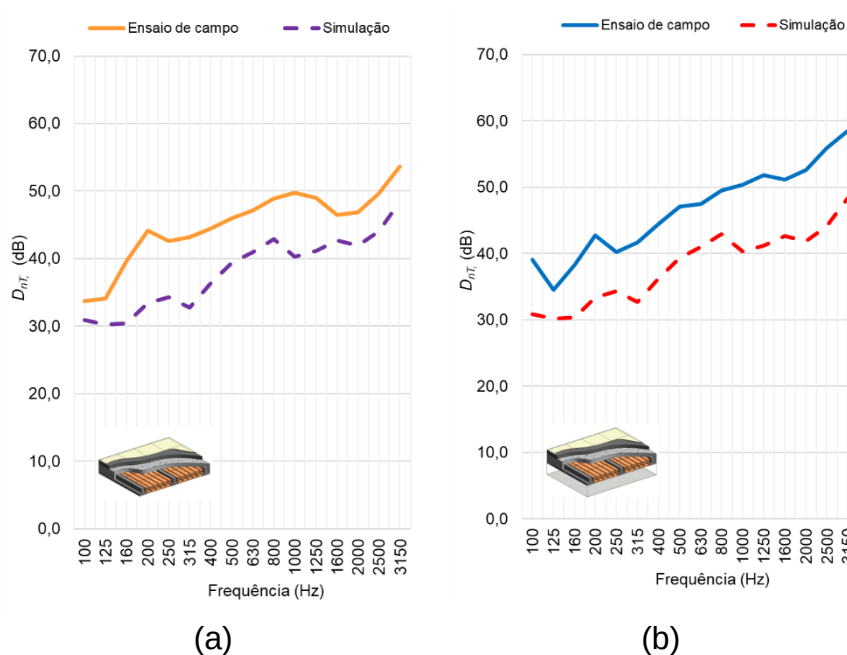
Percebe-se também que o perfil das curvas de ambas as composições se apresenta com certa similaridade até a banda de 1250 Hz, altura em que a laje LP13G, sem forro suspenso (Figura 108a) manifesta uma queda na atenuação sonora, não observada na composição LP13D. Esta diminuição nos valores de atenuação sonora pode ter ocorrido em função do fenômeno de coincidência, ou seja, com igualdade de comprimento de onda de flexão do sistema de piso e o comprimento de onda que se propaga pelo ar. Aparentemente, conforme indica o gráfico da composição LP13D (Figura 108b), o forro suspenso foi capaz de abater este efeito, ao passo que este

sistema apresenta apenas um pequeno desvio nesta zona de frequências, na ordem de 0,7 dB.

Ainda, pode-se supor que a referida queda na capacidade de atenuação sonora observada nas altas frequências para a amostra LP13G tenha conexão com possíveis frestas existentes entre as lajotas, que, mesmo que não permeiem toda a seção transversal do sistema de piso, podem impactar negativamente o isolamento ao ruído aéreo do sistema. Conforme destaca Hopkins (2004), os trechos longitudinais de lajotas não devem ser considerados contínuos em função de, ainda que pequenos, possuírem espaços entre si. Neste contexto, a instalação do forro suspenso pode ter suprido tal deficiência, ao passo que, a camada de forro interrompe as referidas frestas.

Abaixo é confrontado o desempenho estimado e observado em campo para ambas as composições.

Figura 116 - Comparativo: isolamento ao ruído aéreo estimado e medido em campo

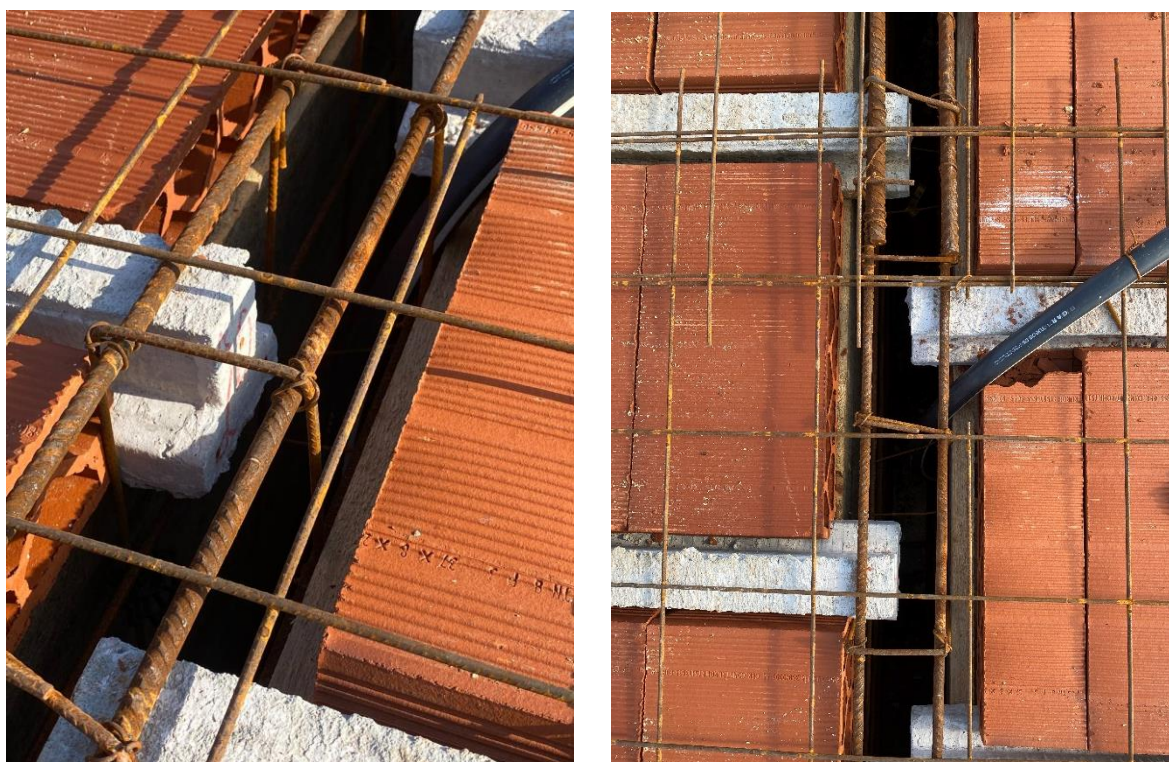


Fonte: Elaborada pelo autor

Observando os dados por bandas de frequência, nota-se que as discrepâncias entre as curvas se estendem ao longo de todas as bandas de frequência, com maior escala nas baixas frequências para o sistema LP13G (Figura 116), zona em que a incerteza de medição tende a apresentar-se mais elevada (OLIVEIRA; HEISSLER, 2021). Para o sistema LP13D, este com forro suspenso, em contraponto, a maior diferença encontra-se nas altas frequências.

Dentre as possibilidades críveis de serem ponderadas no tocante às diferenças entre o comportamento estimado e medido em campo, além dos já mencionados (conservadorismo do método de estimativa; esbeltez do sistema em campo diferente do sistema em laboratório, fonte dos dados que alimentam o software) pode-se elencar, ainda considerando uma possível influência da rigidez superior da amostra de campo, a possível influência das vinculações da laje em campo, parâmetro não modelado em detalhes na ferramenta de estimativa computacional. Diferentemente da condição de laboratório (que gera os dados para inserção das características do sistema em questão no software), em que a amostra não possui vinculação rígida com os elementos de apoio, a amostra de campo apresenta condição oposta, conforme demonstra a Figura 117.

Figura 117 – Vinculação das lajes na edificação amostrada



Fonte: Registrada pelo autor

Conforme exposto, as lajes encontram-se inseridas nas vigas da estrutura, tendo ocorrido a concretagem simultânea dos elementos (estrutura de concreto armado e capa complementar de concreto das lajes), o que, somado ao efeito de engastamento entre lajes adjacentes inerente a existência de armadura contínua entre elas, proporciona uma conexão total ou parcialmente rígida, através da ligação

monolítica gerada. Esta vinculação confere rigidez superior à laje de campo, o que pode influenciar o comportamento do sistema em relação às transmissões sonoras, quando menos, em relação a ruídos aéreos. Em se tratando de ruídos de impacto, há estudos que indicam que maior rigidez não necessariamente confere redução na irradiação de vibrações relativas a sons de percussão, a exemplo do trabalho de Oliveira e Patrício (2017).

Ainda, destacam Oliveira e Heissler (2021), que diferenças observadas entre valores estimados e medidos em campo podem ser explicadas em parte pelo ainda pequeno conhecimento do comportamento que os sistemas construtivos empregados no contexto brasileiro apresentam em relação às transmissões marginais.

4.3.2 Ruído de impacto

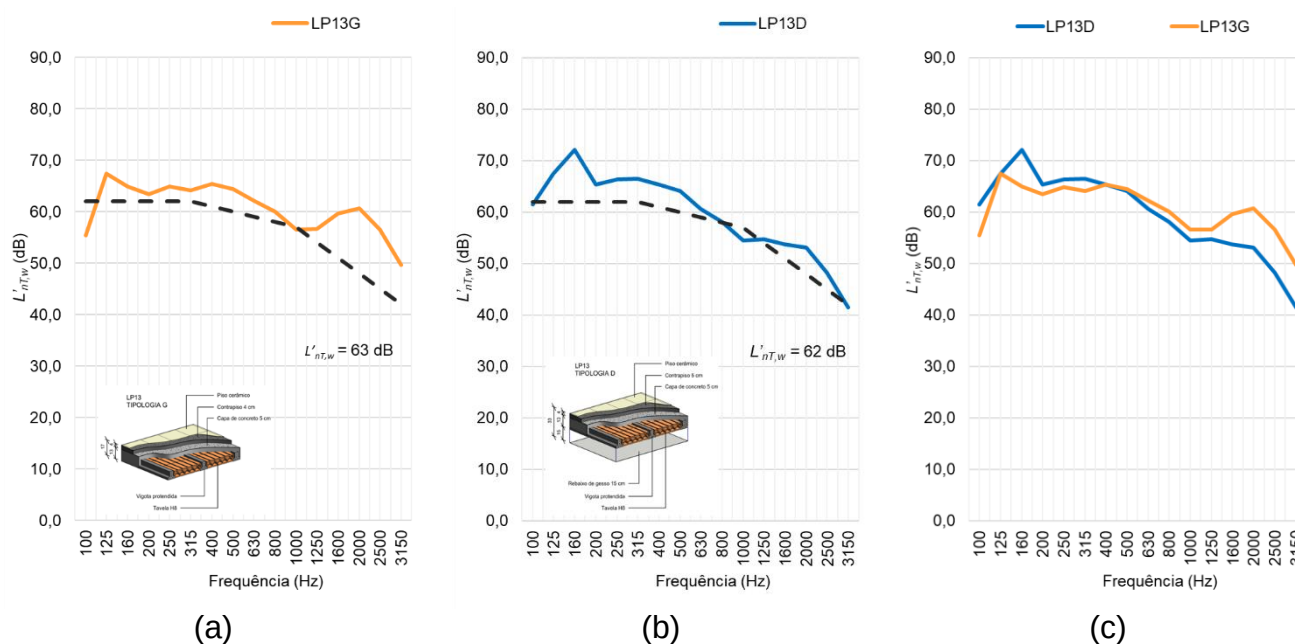
A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de campo relativos ao nível de pressão sonora de impacto padrão. A Tabela 19 sintetiza os resultados estimados e medidos em campo, bem como os valores ponderados. Em seguida, a Figura 118 exibe o perfil gráfico observado nos ensaios.

Tabela 19 – Transmissão de ruído de impacto estimada e medida em campo

Laje	Frequência (Hz)																$L'_{nT,w}$ (dB)
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	
LP13 G Simulação	57,1	70,9	71,2	66,5	63,8	56,7	52,1	51,7	49,5	48,9	48,6	48,3	45,9	42,6	35,5	28,0	57
LP13 G Ensaio	55,5	67,4	64,9	63,5	64,9	64,1	65,4	64,5	62,2	60,0	56,6	56,6	59,7	60,7	56,6	49,7	63
LP13 D Simulação	73,4	66,6	71,9	59,0	63,1	47,5	40,4	40,1	40,0	45,4	41,0	41,0	38,5	34,8	27,6	19,7	57
LP13 D Ensaio	61,5	67,4	72,1	65,3	66,4	66,5	65,3	64,1	60,7	58,2	54,5	54,7	53,7	53,1	48,2	41,5	62

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 118 – Transmissão de ruído de impacto verificada em campo



Fonte: Elaborada pelo autor

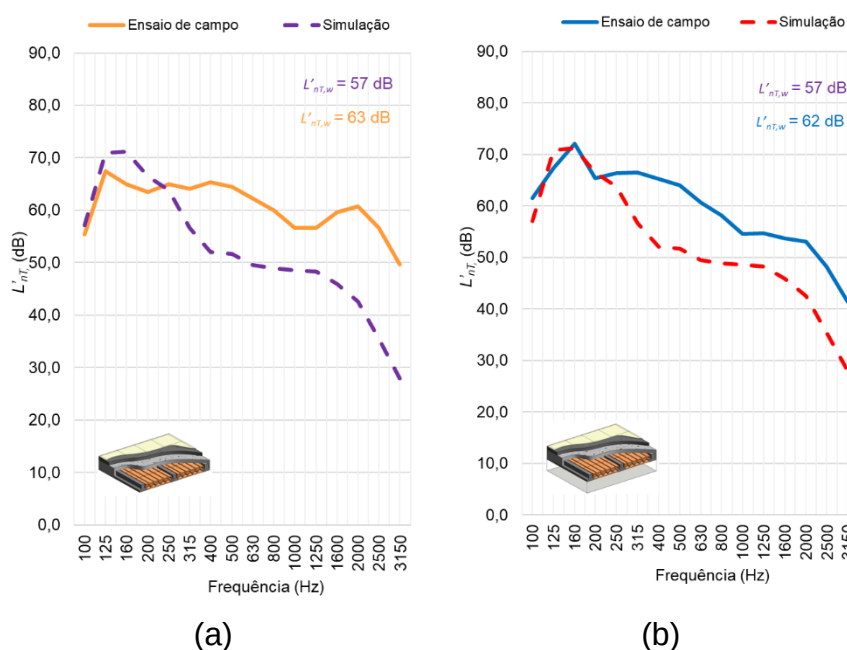
Ao comparar os resultados ponderados, verifica-se que a adição de forro suspenso diminuiu em 1 dB o nível de pressão sonora de impacto padrão. Anteriormente, em laboratório, havia sido verificado que a instalação do forro suspenso proporcionara ganhos significativos nos sistemas sem contrapiso ou revestimento resiliente, e ganhos mais comedidos nos sistemas com revestimento resiliente. Considerando que o sistema ensaiado em campo contém camada resiliente (descrita anteriormente na Figura 26), pode-se afirmar que o ganho de apenas 1 dB decorrente da aplicação do forro suspenso converge com o comportamento visto em laboratório.

Conforme nota-se na Figura 118, em ambos os ensaios houve decréscimo dos níveis sonoros a partir da banda de 400 Hz, comportamento esperado para sistemas de piso com pisos flutuantes. Entretanto, para ambos os ensaios se verifica um pico de transmissão sonora na banda de 2000 Hz, o que denota alguma falha de amortecimento, que pode ter ocorrido em toda a área do sistema de piso ou em ponto localizado. Esta falha pode estar atrelada à execução da manta resiliente, promovendo ponte acústica entre o contrapiso e a camada estrutural ou os elementos marginais, ou à execução da camada de acabamento (piso cerâmico), onde pode ter havido contato direto com os elementos adjacentes (SVVIE).

Nota-se que que tal deficiência é mais intensa no ensaio da composição LP13G: na banda de 2000 Hz, a transmissão sonora observada foi 7,6 dB superior à composição LP13D, esta com forro suspenso. Tal comportamento corrobora o que fora observado anteriormente em laboratório, em que a efetividade do forro suspenso foi mais sobressalente nos sistemas com característica elástica desfavorável da superfície de acabamento.

A seguir a Figura 119 sobrepõe comportamento observado em campo comportamento com o estimado via simulação computacional.

Figura 119 - Comparativo: transmissão de ruído de impacto estimada e medida em campo



Fonte: Elaborada pelo autor

Nas baixas frequências, o comportamento de campo mostra-se mais favorável para o sistema sem forro suspenso (LP13G), enquanto para o sistema equivalente com adição de forro, o comportamento em campo iguala-se ao comportamento estimado, com diferença de apenas 0,2 dB na banda de 160 Hz. Entretanto, para ambas as composições, a partir da banda de 250 Hz a estimativa de desempenho pressupõe níveis consideravelmente inferiores de transmissão sonora, para ambos os sistemas, o que não é observado nos ensaios de campo. Logo, considerando o perfil gráfico esperado em função das características elásticas relacionadas ao uso de manta resiliente, é possível supor que a execução do contrapiso flutuante, ou da camada de acabamento, não transcorreu de forma totalmente adequada, haja vista

que os perfis gráficos de campo mostram menos eficiência que a estimada computacionalmente

Em termos de resultados ponderados, a estimativa de desempenho para ambas as composições apresentou resultado de 57 dB, tendo os resultados de campo retornado 63 dB (LP13G) e 62 dB (LP13D), ou seja, com diferenças de 6 dB e 5 dB, respectivamente. De forma oposta ao observado para ruído aéreo, a estimativa previu melhores resultados do que na prática foram observados em campo, comportamento observado anteriormente por De Toni (2020) e Oliveira e Heissler (2021). Tal comportamento pode ter ligação com alguma ineficiência da execução da camada resiliente.

Percebe-se maior afinidade entre os resultados estimados para sons de impacto em relação aos sons aéreos, também como nos trabalhos de De Toni (2020) e Oliveira e Heissler (2021).

5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

Buscando investigar o comportamento acústico dos sistemas de lajes nervuradas unidirecionais de vigotas pré-fabricadas protendidas e lajotas cerâmicas, este trabalho determinou, para as amostras propostas, a capacidade de atenuação sonora em laboratório, estimou seu desempenho via simulação computacional e aferiu o desempenho em campo, para a edificação amostrada. Neste contexto, pode-se ponderar:

- A utilização de lajotas de maior espessura não repercutiu no comportamento das lajes, quando somente compostas por suas camadas estruturais, sem adição de revestimento.
- Quando somadas camadas complementares, os sistemas com lajotas de maior espessura apresentaram maior desempenho. Ou seja, a adição de camadas parece ser mais efetiva nas lajes com maior rigidez e maior massa, ainda que, quando avaliadas isoladamente, as lajes mais espessas e rígidas tenham apresentado comportamento muito próximo, com resultados ponderados idênticos.
- O acréscimo de massa aos sistemas pouco impactou a eficiência em atenuar a transmissão de sons aéreos. Conforme mencionado, quando advindo da utilização de lajotas de maior espessura, o ganho de isolamento observado é consideravelmente pequeno. Quando oriundo da aplicação de camadas complementares ao sistema estrutural, como camada de contrapiso e acabamento, o maior ganho observado se deu na composição LP21A, sugerindo que o aumento de rigidez do sistema pode contribuir para que o aumento de massa resulte em melhor atenuação sonora.
- Aparentemente, o efeito de ressonância nas cavidades das lajotas foi observado em todas as composições analisadas, não tendo sido atenuado pela adição de camadas complementares, com exceção da camada de forro suspenso de gesso acartonado, que compensou as transmissões sonoras observadas a partir da banda de 250 Hz.
- Os maiores valores de R_w foram observados nas lajes com forro suspenso.

- Os menores níveis sonoros de impacto em laboratório ($L_{n,w}$) foram observados nas amostras com camada de acabamento em piso laminado, que por conta do comportamento observado pode ser considerado como revestimento resiliente.
- A presença de forro suspenso se mostrou mais eficiente nas amostras de maior espessura: foram observados aumento de atenuação sonora aos ruídos aéreos de 5 dB para LP13, 14 dB (LP17) e 13 dB (LP21). Para transmissão de ruídos de impacto, foram notadas diminuições de 6 dB para LP13, 14 dB para LP17 e 19 dB para LP21.
- A escala da eficiência da incorporação de forro suspenso foi maior nos sistemas sem camada de acabamento resiliente (piso laminado)
- Não se observa uma tendência clara de ganho de desempenho obtido com a aplicação de camada de acabamento em piso cerâmico. Em se tratando de ruídos aéreos, foi observado ganho de atenuação sonora de 1 dB em apenas um dos sistemas de laje amostrados (LP21). Para ruído de impacto, a adição de camada de contrapiso e camada de acabamento em piso cerâmico pode proporcionar redução dos níveis sonoros de impacto, porém com eficiência limitada para sons agudos (altas frequências). Os resultados ponderados mostram, para a laje LP13, redução dos níveis sonoros em 1 dB, enquanto para a LP21 foi aferido aumento de 3 dB. Cabe salientar que a adição de contrapiso e piso cerâmico contribuiu para minimizar incertezas decorrentes do comportamento ortotrópico do sistema. Este comportamento pode estar conectado com o aumento de massa adicionado ao sistema em sua face superior, distribuído por toda a área do elemento.
- Ainda que o melhor desempenho frente ao ruído aéreo e de impacto tenha sido observado na mesma amostra (LP17E), os demais resultados indicam que, de modo geral, as soluções adotadas para melhor resposta do sistema de piso frente ao ruído aéreo não necessariamente consistem nas soluções de melhor eficiência para os ruídos de impacto.
- As diferenças observadas entre os valores estimados e medidos em campo pode ter conexão com o ainda pequeno conhecimento do comportamento dos sistemas construtivos brasileiros em relação às transmissões marginais (Oliveira e Heissler, 2021) e também com variáveis não consideradas no

software de estimativa, que podem exercer influência relevante nos resultados como a rigidez do sistema decorrente das vinculações adotadas junto à estrutura, e a direção das nervuras, em caso de lajes unidirecionais como as do presente estudo.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se que trabalhos futuros com seções transversais variadas de lajes sejam produzidos, a saber, com lajotas de EPS e concreto, e com composição dupla de vigotas, de modo que se avance na compreensão da variação das respostas dos sistemas frente a alterações de massa e rigidez da seção transversal das lajes.

Para efeitos de maior compreensão do comportamento em campo dos sistemas de piso heterogêneos, uma análise numérico-experimental pode ser realizada, por meio da calibração de um modelo computacional que possa refletir características não consideradas nos modelos de predição atualmente empregados.

Por fim, sugere-se estudos que possibilitem compreensão mais refinada de fenômenos observados nessa e em pesquisas anteriores, como a ressonância ocorrida no interior das lajotas, de modo que esse entendimento possibilite o desenvolvimento de soluções que agreguem eficiência ao sistema construtivo.

REFERÊNCIAS

ABSOLUT EMPREENDIMENTOS IMOBILIÁRIOS. **Residencial El Caná - Projeto Arquitetônico**. Lajeado, Rio Grande do Sul, Brasil, 2021.

ALONSO, A. *et al.* Acoustical retrofit of existing residential buildings: Requirements and recommendations for sound insulation between dwellings in Europe and other countries worldwide. **Building and Environment**, v. 174, p. 106771, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106771>>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **E492-09**: Standard test method for laboratory measurement of impact sound transmission through floor-ceiling assemblies using the tapping machine. West Conshohocken, Estados Unidos, 2019.

ARAÚJO, A. M. S.; PAUL, S.; VERGARA, E. F. Isolamento do ruído de impacto de pisos em baixa frequência com fontes normalizada e não normalizada. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 1, p. 163–174, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s1678-86212016000100066>>. Acesso em: 28 ago. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10151**: Acústica — Medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas — Aplicação de uso geral. Rio de Janeiro, 2020a.

_____. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015a.

_____. **NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento. Rio de Janeiro, 2001.

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

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

_____. **NBR 14931**: Execução de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15200:** Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2015b.

_____. **NBR 15522:** Laje pré-fabricada - Avaliação do desempenho de vigotas e pré-lajes sob carga de trabalho. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 15575-1:** Edificações habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro, 2021a.

_____. **NBR 15575-3:** Edificações habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro, 2021b.

_____. **NBR 15575-5:** Edificações habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro, 2021c.

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

_____. **NBR 16889:** Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020b.

_____. **NBR 5626:** Sistemas prediais de água fria e água quente - Projeto, execução, operação e manutenção. Rio de Janeiro, 2020c.

_____. **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018a.

_____. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014b.

_____. **NBR 9062:** Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR ISO 16283-1:** Acústica - Medição de campo do isolamento acústico nas edificações e nos elementos de edificações Parte 1: Isolamento a ruído aéreo. Rio de Janeiro, 2018b.

_____. **NBR ISO 16283-2:** Acústica - Medição de campo do isolamento acústico

nas edificações e nos elementos de edificações Parte 2: Isolamento a ruído de impacto. Rio de Janeiro, 2021d.

_____. **NBR ISO 717-1: Acústica — Classificação de isolamento acústico em edificações e elementos de edificações Parte 1: Isolamento a ruído aéreo.** Rio de Janeiro, 2021e.

_____. **NBR ISO 717-2: Acústica — Classificação de isolamento acústico em edificações e elementos de edificações Parte 2: Isolamento a ruído de impacto.** Rio de Janeiro, 2022.

BARBARESI, Luca; SEMPRINI, Giovanni. Experimental Results of Flanking Transmission in Hollow Brick and Concrete-Slab Floor. *In: EUROREGIO*, Merano, 2013. **Anais [...]**. Merano: Associazione Italiani di Acustica, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1491.9283>>.

BBC, 2020. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/brasil-52363220>>. Acesso em 17 jul. 2020.

BET, Kelvin *et al.* Avaliação do desempenho acústico de laje nervurada com diferentes composições *In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído*, João Pessoa, 2019. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2019.

BIES, D. A.; HANSEN, C. H. **Engineering noise control: theory and practice**. 4th ed. Nova York: CRC Press, 2017.

BISTAFA, Sylvio. R. **Acústica aplicada ao controle de ruído**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2018.

BORGES, Carlos Alberto de Moraes. **O conceito de desempenho de edificações e sua importância para o setor da construção civil no Brasil**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica (EPUSP), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-25092008-094741/pt-br.php>>.

BRASIL. **Portaria nº 959 de 18 de maio de 2021**. Brasília/DF: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2021. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-959-de-18-de-maio-de-2021-320687425>>.

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

BUREAU VOOR NORMALISATIE (NBN). **S 01-400-1: Akoestische criteria voor woongebouwen**. Bruxelas, Bélgica, 2019.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). **Desempenho de edificações habitacionais: guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013**. 2 Ed. Brasília, 2013.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). **Indicadores imobiliários nacionais - 2º trimestre de 2021**. Brasília, 2021 Disponível em: <http://www.cbicdados.com.br/media/anexos/MERCADO_IMOBILI%C3%81RIO_NACIONAL_2_TRI_2021.pdf>. Acesso em: 01 set. 2021.

CANIATO, Marco *et al.* Impact sound of timber floors in sustainable buildings. **Building and Environment**, v. 120, p. 110–122, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2017.05.015>>.

CARVALHO, Leandro Nepomuceno. **Ruído de impacto em lajes: análise comparativa entre desempenho de modelos computacionais e ensaios de campo**. 22 f. 2015. Artigo (Curso de Acústica de Edificações e Ambiental) – Poli Integra, Universidade de São Paulo (USP), 2015. Disponível em: <<http://poliintegra.poli.usp.br/library/pdfs/33970684f1bbfc1c4e7924028c0b69f7.pdf>>.

CASTAÑON, José Alberto Barroso. *et al.* O home office e a ergonomia nas condições de trabalho e saúde de arquitetos e engenheiros. *In*: 1º Congresso Internacional de Ergonomia Aplicada, **Blucher Engineering Proceedings**, v. 3, 2016, p. 643–654. Disponível em: <<https://doi.org/10.5151/engpro-conaerg2016-7406>>.

CHIANG, Che-Ming; LAI, Chi-Ming. A study on the comprehensive indicator of indoor environment assessment for occupants' health in Taiwan. **Building and Environment**, v. 37, n. 4, p. 387–392, 2002. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00034-8](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00034-8)>.

CHIK, Tuan Norhayati Tuan; KAMIL, M. R. H.; YUSOFF, Bin Nor Azizi. Vibration Analysis of Beam and Block Precast Slab System due to Human Vibrations. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 995, p. 12115, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1742-6596/995/1/012115>>.

CHMELÍK, Vojtech *et al.* Methodology for development of airborne sound insulation descriptor valid for light-weight and masonry walls. **Applied Acoustics**, v. 160, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107144>>.

CONSEIL NATIONAL DU BRUIT. **Guide du CNB n° 6**: Réglementations acoustiques des bâtiments. Paris, França, 2017.

CONSTRUROHR, 2021. Disponível em: <<http://www.construrohr.com.br/categoria/lajes>>. Acesso em: 13 maio 2021.

CORREIO POPULAR, 2020. Disponível em: <https://correio.rac.com.br/_conteudo/2020/07/campinas_e_rmc/963372-home-office-tendencia-na-pos-pandemia.html>. Acesso em 19 jul. 2020.

CUNHA, Mateus Ortigosa. **Recomendações para projeto de lajes formadas por vigotas com armação treliçada**. 119 f. 2012. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.11606/D.18.2012.tde-25092012-083340>>.

DANSK STANDARD (DS). **DS 490**: Lydklassifikation af boliger. Dinamarca, 2018.

DEMERTZI, M. *et al.* Life cycle assessment of alternative building floor rehabilitation systems. **Structures**, v. 26, p. 237–246, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2020.03.060>>.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN). **DIN 4109-01**: Schallschutz im Hochbau – Teil 1: Mindestanforderungen. Berlim, Alemanha, 2018.

DE TONI, Rafael. **Desempenho acústico de edifícios com laje nervurada bidirecional: comparativo entre estimativa com software e ensaios em campo**. 2020, 68 f. Dissertação (mestrado) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, São Leopoldo, 2020.

DI BELLA, Antonino *et al.* An Experimental Approach to the Evaluation of Acoustic Behaviour of Beam and Clay Block Floors. *In*: Forum Acusticum, 2011. **Anais [...]**. Aalborg, Dinamarca, 2011. p. 1661–1664. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/An-experimental-approach-to-the-evaluation-of-of-Bella-Schiavi/29a118a37a13744938dd38903593efd0ac5186a6>>.

DÜMEN, Ayca Sentop; RASMUSSEN, Birgit. Verification of sound insulation performance of housing by field measurements and/or calculations – A case study. *In: Inter-Noise*. Seul: 2020, p. 1-9.

EL DEBS, M. K. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. 2ª Edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

EUROPEAN STANDARD. **EN 15037-1**: Precast concrete products - Beam-and-block floor systems - Part 1: Beams. Versão 1. Bruxelas, 2008.

_____. **EN 15037-2+A1**: Precast concrete products - Beam-and-block floor systems - Part 2: Concrete blocks. Versão 2. Bruxelas, 2011a.

_____. **EN 15037-3+A1**: Precast concrete products - Beam-and-block floor systems - Part 3: Clay blocks. Bruxelas, 2011b.

_____. **EN 15037-4+A1**: Precast concrete products - Beam-and-block floor systems - Part 4: Expanded polystyrene blocks. Bruxelas, 2013a.

_____. **EN 15037-5**: Precast concrete products - Beam-and-block floor systems - Part 5: lightweight blocks form simple formwork. Bruxelas, 2013b.

FERRAZ, Natan Magalhães. **Avaliação de desempenho acústico em lajes maciças em pacimentos de pisos múltiplos**. 2018, 65 f. (Trabalho de Conclusão de Curso - Monografia), Curso de Engenharia de Produção, Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido, Universidade Federal de Campina Grande, Sumé, Paraíba. 2018. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/4126>>.

FINNISH STANDARDS ASSOCIATION. **SFS 5907**: Lydklassifikation af boliger. Finlândia, 2004.

FRONTCAZAK, M. *et al.* Quantitative relationships between occupant satisfaction and satisfaction aspects of indoor environmental quality and building design. **Indoor air**, v. 22, p. 119–131, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2011.00745.x>>.

GATTI, Daniele P. *et al.* Home Office - vantagens, desvantagens e desafios para empresas e funcionários. **Revista de Administração do UNIFATEA-RAF**, v. 16, n.

16, p. 187–200, 2018. Disponível em:
<<http://unifatea.com.br/seer3/index.php/RAF/article/view/877/877>>.

GAUCHAZH, 2020. Disponível em: <<https://gauchazh.clicrbs.com.br/porto-alegre/noticia/2020/05/reclamacoes-de-barulho-entre-vizinhos-aumentaram-32-durante-a-pandemia-em-porto-alegre-saiba-como-lidar-ckascrdg700cc015n7lchtqz.html>>. Acesso em: 4 jul. 2020.

GOLMOHAMMADI, Rostam; ALIABADI, Mohsen; NEZAMI, Trifah. An Experimental Study of Acoustic Comfort in Open Space Banks Based on Speech Intelligibility and Noise Annoyance Measures. **Archives of Acoustics**, v. 42, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1515/aoa-2017-0035>>.

GOMES, Fabio Luiz. **As causas do baixo investimento em tecnologias digitais e suas consequências para vantagem competitiva no setor de incorporação imobiliária no Brasil**. 2019, 125 f. Dissertação (mestrado profissional MPGC) - Fundação Getúlio Vargas, Escola de Administração de Empresas de São Paulo, São Paulo, 2019.

GRAZZIOTTI, Adriano Giacomini; TIBIRIÇÁ, Antônio Cléber Gonçalves. A ergonomia no ambiente de escritório. **III Workshop de análise ergonômica do trabalho na UFV**, p. 1–18, Viçosa, 2007.

GREEK BUILDING REGULATION. **MD 2046/304/89**. Atenas, Grécia, 1989

HASSAN, Osama A. B. **Building Acoustics and Vibration: Theory and Practice**. 1. Ed. Umeå: World Scientific, 2009.

HEISSLER, Rafael Ferreira. **Análise comparativa do isolamento acústico em diferentes geometrias: ensaios em campo e simulações computacionais**. 2019, 89 f. Dissertação (mestrado) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, São Leopoldo, 2018.

HOELLER, Cristoph. Review and Comparison of ASTM and ISO Standards on Sound Transmission in Buildings. *In: Inter-Noise*. Chicago, Estados Unidos: 2018. p. 1–10.

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

HORR, Yousef Al *et al.* Occupant productivity and office indoor environment quality: A review of the literature. **Building and Environment**, v. 105, p. 369-389, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.001>>.

HUNGARIAN STANDARDS BOARD. **MSZ 15601-1**: Épületakusztika. 1. rész: Épületen belüli hangszigetelési követelmények (Building acoustics. Part 1: Sound insulation requirements inside building). Hungria, 2007.

ICELANDIC STANDARDS (IST). **IST 45**: Hljóðvist - Flokkun íbúðar- og atvinnuhúsnæðis. Islândia, 2016.

INSTITUTO ARGENTINO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (IRAM). **IRAM 4044**: Acústica -Protección contra el ruido en edificios. Requisitos de aislamiento acústico mínimo Método de medición y clasificación Cerramientos y aberturas, verticales y horizontales. Buenos Aires, Argentina, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 10140-2**: Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 2: Measurement of airborne sound insulation. Geneva, 2021a.

_____. **ISO 10140-3**: Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 3: Measurement of impact sound insulation. Geneva, 2021b.

_____. **ISO 10140-4**: Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 4: Measurement procedures and requirements. Geneva, 2021c.

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

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

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARDS COMITEE (JIS). **JIS 1418**: Acoustics - Measurement of floor impact sound insulation of buildings. Japão, 2019.

KIM, Jungsoo; DEAR, Richard de. Workspace satisfaction: The privacy-

communication trade-off in open-plan offices. **Journal of Environmental Psychology**, v. 36, p. 18–26, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.JENVP.2013.06.007>>

KLIPPEL, S. *et al.* Influência da espessura de revestimentos de argamassa no desempenho acústico de alvenarias de blocos cerâmicos. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 19, n. 2, p. 145–156, 2019. Available at: <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212019000200313>

LABRES, Henrique *et al.* Acoustic performance of brick masonry walls: Construction defects and influence of installations. **Building Acoustics**, v. 25, n. 4, p. 351–362, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1351010X18798092>>.

LEE, W.; KIM, K.; LIM, S. Improvement of floor impact sound on modular housing for sustainable building. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 263–275, jan. 2014.

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

MACHIMBARRENA, María; RASMUSSEN, Birgit. Acoustic regulations for housing and schools in Europe and South America – A pilot study in 2016. **Proceedings of Meetings on Acoustics**, v. 28, n. 1, p. 1-10, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/2.0000459>>.

MARTINS, Rodrigo Valdeci; MIRANDA, Erasmo Felipe Vergara. Conforto acústico de escritórios em ambiente industrial de usina hidrelétrica. **PARC - Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, v. 10, p. 1–19, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.20396/parc.v10i0.8653712>>

MERLIN, Andrei José. **Momentos fletores negativos nos apoios de lajes formadas por vigotas de concreto protendido**. 2002, 134 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

MINISTERIO DE FOMENTO. Documento Básico (DB-HR): Protección frente al ruido – **Código Técnico de la Edificació (CTE)**, Espanha, 2009.

MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO. **Ordenanza General de la Ley**

General de Urbanismo y Construcciones (OGUC). Chile, 2016.

MINISTRSTVO ZA OKOLJE IN PROSTOR. **TSG-1-005:** Zaščita pred hrupom v stavbah. Ljubljana, Eslovênia, 2012.

MINISTRY OF HOUSING COMMUNITIES & LOCAL GOVERNMENT. **Building Regulation in England.** Resistance to sound: Approved Document E. Londres, 2015.

MÜNZEL, Thomas. *et al.* Cardiovascular effects of environmental noise exposure. **European Heart Journal**, v. 35, n. 13, p. 829–836, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehu030>>.

NATIONAL CONSTRUCTION CODE AUSTRALIA (NCC). **Sound transmission and insulation - Part F5.** Camberra, 2016.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NBCC). **National Building Code of Canada.** Ottawa, Canadá, 2015.

NCUBE, Matiwaza; RIFFAT, Saffa. Developing an indoor environment quality tool for assessment of mechanically ventilated office buildings in the UK – A preliminary study. **Building and Environment**, v. 53, p. 26–33, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.01.003>>

OLIVEIRA, Maria Fernanda de *et al.* Desempenho acústico de laje com vigota e lajota: isolamento ao som aéreo e de impacto. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 3, p. 243–254, 2021a. Disponível em: <<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000300549>>.

OLIVEIRA, Maria Fernanda de *et al.* Influence of ceramic block geometry and mortar coating on the sound reduction of walls. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 2, p. 195–207, 2021b. Disponível em: <<https://doi.org/https://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000200521>>.

OLIVEIRA, Maria Fernanda de; HEISLER, Rafael Ferreira. Análise comparativa do isolamento acústico em diferentes geometrias: ensaios em campo e simulações computacionais. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 1, p. 385-402, 2021. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000100510>>.

OLIVEIRA, Maria Fernanda de; PATRICIO, Jorge Viçoso. Impact Noise of Non-

homogeneous Floors: Analysis of Different Input Parameters for Computational Modeling Predictions. **Journal of Civil Engineering and Architecture**, v. 11, n. 3, p. 274-281, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.17265/1934-7359/2017.03.007>>.

OLIVEIRA, Maria Fernanda de; ZINI, Aline; PAGNUSSAT, Daniel Tregnago. Desempenho Acústico de Sistemas de Piso: Estudos de Caso Para Isolamento ao Ruído Aéreo e de Impacto. **Acústica e Vibrações**, v. 46, p. 13–19, 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/277305728_Desempenho_Acustico_de_Sistemas_de_Piso_Estudos_de_Caso_Para_Isolamento_ao_Ruido_Aereo_e_de_Impacto>.

OMS. **Burden of disease from environmental noise: quantification of healthy life years lost in Europe**. Copenhagen, Dinamarca, 2011. Disponível em: <https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0008/136466/e94888.pdf>.

ÖSTERREICHISCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNICK (OIB). **ÖNORM B 8115-5: Schallschutz und Raumakustik im Hochbau - Teil 5: Klassifizierung**. Viena, Áustria, 2012.

PARK, Hyo Seon; YOON, Da Yoon; CHO, Tongjun. Influence of plan configuration on low frequency vibroacoustic behaviour of floating floor with low natural frequency. **Applied Acoustics**, v. 158, p. 107040, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107040>>.

PARMEGGIANI, Lucas B. **Habitabilidade em edificações segundo a NBR 15575-1: funcionalidade, acessibilidade e conforto antropodinâmico**. 2014, 65f. Monografia (graduação em engenharia civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, (UFRGS), Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/110144/000951995.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.

PATRÍCIO, Jorge Viçoso. **Acústica nos edifícios**. Engebook. 9 ed. Lisboa, 2018.

PAZ, Elaine Carvalho da; FERREIRA, Andressa Maria Coelho; ZANNIN, Paulo Henrique Trombetta. Estudo comparativo da percepção do ruído urbano. **Revista de Saúde Pública**, v. 39, n. 3, p. 467–472, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0034-89102005000300019>>.

PEREYRON, Daniel. **Estudo de tipologias de lajes quanto ao isolamento ao ruído de impacto**. 2008, 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, 2008. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7712/DANIELPEREYRON.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>

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

POLSKI KOMITET NORMALIZACYJNY. **PN-B-02151-5**: Akustyka budowlana - Ochrona przed hałasem w budynkach - Część 5: Wymagania dotyczące budynków mieszkalnych o podwyższonym standardzie akustycznym oraz zasady ich klasyfikacji. Varsóvia, Polónia, 2017.

RAFALSKI, Julia C.; ANDRADE, Alexsandro L. de. Home-Office: Aspectos Exploratórios do Trabalho a partir de Casa. **Temas em Psicologia**, v. 23, p. 431–441, 2015. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=513751491013>>.

RASMUSSEN, B. Sound insulation between dwellings - Comparison of national requirements in Europe and interaction with acoustic classification schemes. *In*: Proceedings of the 23^o International Congress on Acoustics: Integrating 4^o EAA Euroregion, 2019b. **23^o International Congress on Acoustics**. Aachen, Alemanha, p. 5102-5109. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.18154/RWTH-CONV-239983>>.

RASMUSSEN, Birgit. Building acoustic regulations in Europe - Brief history and actual situation. *In*: Proceedings of the Baltic-Nordic Acoustics Meeting, 2019a. **Baltic-Nordic Acoustics Meeting**. Reykjavik, Islândia, p. 1–16, 2019.

RASMUSSEN, Birgit. Sound insulation between dwellings – Requirements in building regulations in Europe. **Applied Acoustics**, v. 71, n. 4, p. 373–385, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2009.08.011>>.

RASMUSSEN, Birgit; RINDEL, Jens Holger. Sound insulation between dwellings – Descriptors applied in building regulations in Europe. **Applied Acoustics**, v. 71, n. 3, p. 171–180, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2009.05.002>>.

REGULAMENTO DOS REQUISITOS ACUSTICOS DOS EDIFICIOS (RRAE). Regulamento dos Requisitos Acusticos dos Edifícios: **Decreto-Lei 96/2008**. Portugal, 2008.

REZENDE, E. C. L. et al. Comparative Analysis of Numerical Simulations and Experimental Tests for Acoustic Performance in Horizontal Partitions of Buildings. In: DELGADO, João M. P. Q. **Building Pathologies and Acoustic Performance**. Porto: Springer, 2019, p. 73-177.

RIBAS, Carlos; CLADERA, Antoni. Experimental study on shear strength of beam-and-block floors. **Engineering Structures**, v. 57, p. 428–442, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.10.001>>.

RUSSIAN FEDERATION BUILDING REGULATIONS. **SP 51.13330**: Защита от шума". Moscou, Rússia, 2011.

RUTTEN, P. **E04B5/26 - Floor structures partly formed in situ with stiffening ribs or other beam-like formations wholly or partly prefabricated with filling members between the beams**. US2636377A. Concessão: 1935.

SAKELLARIS, Ioannis A. et al. Perceived Indoor Environment and Occupants' Comfort in European "Modern" Office Buildings: The OFFICAIR Study. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 13, p. 1-15, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ijerph13050444>>.

SAP Consultoria. **Entendendo a prática de home office**. Campinas, 2015. Disponível em: <<https://pesquisahomeoffice.com.br/homeoffice/resultados-2014/>>. Acesso em 18 de abril de 2021.

SCHERER, Claudio Trindade et al. Desempenho acústico de conjuntos de portas e paredes separadas pelo hall de entrada. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 3, p. 165–181, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s167886212019000300331>>.

SCHIAVI, Alessandro. Improvement of impact sound insulation: A constitutive model for floating floors. **Applied Acoustics**, v. 129, p. 64–71, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.07.013>>.

SCHIAVI, Alessandro; TARIZZO, P.; ASTOLFI, Arianna. Considerations on the impact sound pressure level of bare floor slabs in hollow brick and concrete. In: INTERNOISE, Lisboa, 2010. Anais do **39º International Congress on Noise Control Engineering**. Lisboa: Institute of Noise Control Engineering, 2010.

SCOTTISH GOVERNMENT. **Building Standards Technical Handbook: Domestic 5**. Escócia, 2019.

SCHWEIZERISCHER INGENIEUR UND ARCHITEKTENVEREIN POSTFACH (SIA). **SIA 181**: Schallschutz im Hochbau. Zurique, Suíça, 2006.

STANDARDS NORWAY (NS). **NS 8175**: Lydforhold i bygninger - Lydklasser para ulike bygningstyper. Noruega, 2019.

SEMPRINI, Giovanni *et al.* Acoustical Behaviour of Bare Floor in Hollow Brick and Concrete: Italian Building Technology. *In*: INTER-NOISE, 2010, Lisboa, Portugal. **39º International Congress on Noise Control Engineering 2010, INTER-NOISE 2010**. Lisboa: Sociedade Portuguesa de Acústica, p. 1–8, 2010.

SHUSHKEWICH, K. W. Eugène Freyssinet—Invention of Prestressed Concrete and Precast Segmental Construction. **Structural Engineering International**, v. 22, n. 3, p. 415–420, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.2749/101686612X13363869853338>>.

SILVA, Jannerpaula Souza da *et al.* A Ergonomia como um Fator Determinante no Bom Andamento da Produção: um Estudo de Caso. **Revista Científica Interdisciplinar da Graduação**, v. 4, n. 1, p. 1–14, 2010. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/anagrama/article/view/35485>>.

SILVEIRA, Suzana. Maria Loureiro; ROSSI, Renan; VUONO, Gabriel Dib Daud de. Pandemia: (mesmos) modos de morar e trabalhar?. **Revista Políticas Públicas & Cidades**, v. 1, p. 1–5, 2020. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.23900/2359-1552v1n1-5-2020>>.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PRODUTOS DE CIMENTO (SINAPROCIM). **Pesquisa de produção 2020**. São Paulo, 2021.

SOMANI, Mohit *et al.* Indirect implications of COVID-19 towards sustainable environment: An investigation in Indian context. **Bioresource Technology Reports**, v. 11, p. 1-10, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100491>>.

SOUZA, Anderson Rodrigues de. **Análise do conforto térmico de uma edificação de Ensino Superior em Campina Grande - PB**. 2017. 128 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação) em Ciência e Tecnologia Ambiental - PPGTCA) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2017. Disponível em: <<http://tede.bc.uepb.edu.br/jspui/handle/tede/2879>>.

SOUZA, Camila Fernandes Natus *et al.* Impact sound insulation of floor systems with

hollow brick slabs. **Case Studies in Construction Materials**, v. 13, p. 1-10, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00387>>.

SOUZA, Jony Henrique Silva de. **Avaliação Ergonômica em postos de trabalho em escritório de engenharia – estudo de caso**. 2014. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Curitiba, 2014. Disponível em: <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/17627>>.

SPURK, Daniel; STRAUB, Caroline Flexible employment relationships and careers in times of the COVID-19 pandemic. **Journal of Vocational Behavior**, v. 119, p. 1-14, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jvb.2020.103435>>.

TATU PRÉ-MOLDADOS. **Lajes pré-fabricadas protendidas - Instruções para utilização de tabelas de dimensionamento**. Limeira, São Paulo, Brasil, 2017. Disponível em: <https://www.tatu.com.br/pdf_novo/vigotas-

TAKAHASHI, Vanessa Fátima de Medeiros. **Desempenho acústico de edificações: ferramenta computacional para avaliação**. 2016. 168 f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, São Paulo. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/322125>>.

TERRADOS-CEPEDA, F. Javier.; LIZANA, Jesus. Advanced lightweight steel floor towards high sound insulation and fire resistance. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 169, p. 1-11, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106023>>.

TOMITAKA, Ryu; NOJIMA, Ryoko; MASUDA, Kiyoshi. Study on reduction of floor impact sound by heavy impact source using double-layered ceiling with damping by granular materials. **Journal of Environment Engineering**, v. 81, n. 719, p. 29–39, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.3130/aije.81.29>>.

TURKISH MINISTRY OF ENVIRONMENT AND URBANIZATION. **Binaların Gürültüye Karşı Korunması HakkındaYönetmelik**. Turquia, 2017.

UNITÀ IMMOBILIARI (UNI). **UNI 11367**: Acustica in edilizia - Classificazione acustica delle unità immobiliari - Procedura di valutazione e verifica in opera. Itália, 2010.

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS (UNISINOS) - Institutos

Tecnológicos - **F96 - Relatório de ensaio nº 1417/2016**, 2016a.

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS (UNISINOS) - Institutos Tecnológicos - **F96 - Relatório de ensaio nº 1422/2016**, 2016b.

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS (UNISINOS) - Institutos Tecnológicos - **F96 - Relatório de ensaio nº 4245/2021**, 2021b.

VON GAUDECKER, Hans-Martin. *et al.* **Labour Supply in the Early Stages of the COVID-19 Pandemic: Empirical Evidence on Hours, Home Office, and Expectations**. Bonn: Institute of Labor Economics (IZA), 2020. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10419/216470>>.

VOORDT, Theo J. M. van der; WEGEN, Herman. B. R. van. **Arquitetura sob o olhar do usuário**. 240 f. 1ªed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

WU, Chendge; CLAYTON, Mark J. BIM-based acoustic simulation framework. In: 30º CIB W78 International Conference. Beijing, China, 2013. **Anais [...]**. Beijing, China, 2013.