

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

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA PERDA DE
TRANSMISSÃO SONORA EM PAREDES EXTERNAS DE
*LIGHT STEEL FRAME***

Dissertação submetida à
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
para obtenção do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL

Graziella Ferrer Radavelli

Santa Maria, dezembro de 2014.

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Ferrer Radavelli, Graziella
AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA
EM PAREDES EXTERNAS DE LIGHT STEEL FRAME / Graziella
Ferrer Radavelli.-2014.
158 p.; 30cm

Orientador: Stephan Paul
Coorientador: Marco A. S. Pinheiro
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2014

1. Light Steel Frame 2. Isolamento sonoro 3. Perda de
transmissão sonora 4. Paredes duplas I. Paul, Stephan
II. A. S. Pinheiro, Marco III. Título.

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

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA PERDA DE TRANSMISSÃO
SONORA EM PAREDES EXTERNAS DE *LIGHT STEEL FRAME***

Graziella Ferrer Radavelli

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO CONFORTO AMBIENTAL
Sendo aprovada em sua forma final.

Stephan Paul, Dr. Eng. – Orientador

Marco A. S. Pinheiro, D. Sc. Eng. - Coorientador

BANCA EXAMINADORA

Stephan Paul, Dr. Eng. – Presidente

Giane Grigoletti, Dra. Arq. (UFSC)

Erasmus Felipe Vergara Miranda, Dr. Eng. (UFSC)

*À minha amada família, pelo
apoio incondicional na busca pelos meus sonhos.*

AGRADECIMENTOS

À Vera, Leopoldo, Luigi, Nelly, Ariel, Sandra e Sophie, minha amada família, pelo amor dedicado a todas as etapas da minha vida.

Às queridas amigas Aline, Teresinha e Camila, pelo apoio e amizade.

Ao Rafael, pelas correções ortográficas, incentivo e carinho.

Ao meu primo Luigi, pela hospedagem na sua casa ao longo do curso.

Aos meus adoráveis orientador e coorientador, Stephan e Marco, por toda ajuda e incentivo.

Ao Sr. Jurassi, Eder e Sr. Guerra, pela enorme ajuda prestada durante as medições e pelo carinho.

Ao Prof. Paris, por ajudar na execução das barras resilientes.

À Ana Maria, pela ajuda na formatação e revisão do trabalho.

À Placo Center, Center Steel e Cetro Tecnologia em Construções, pelo material e mão de obra para a execução das paredes.

À Géssica, Ricardo, Michael e Henrique, pela ajuda nas primeiras medições.

À Lívia, Larissa, Andriele, Renata, Eduardo, John e Fernando, colegas das disciplinas de acústica na UFSM.

À UFSM pelas instalações e equipamentos necessários a essa pesquisa.

À Marília, secretária da coordenação do PPGEC, pela presteza e gentileza todas às vezes que precisei.

Aos professores Giane, Vergara e Eric, por aceitarem compor minha banca de defesa.

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

RESUMO

**AVALIAÇÃO DA PERDA DE TRANSMISSÃO SONORA EM PAREDES EXTERNAS
DE *LIGHT STEEL FRAME***

AUTORA: GRAZIELLA FERRER RADAVELLI

ORIENTADOR: STEPHAN PAUL

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 11 de dezembro de 2014.

O excesso de ruído ambiental e as inadequadas técnicas construtivas dos sistemas convencionais utilizados no mercado da construção civil brasileira, fazem com que seja necessária a introdução de novas tecnologias construtivas – mais racionais e produtivas. A partir da entrada em vigor da NBR 15575:2013 foram estabelecidos diversos parâmetros de desempenho para edificações habitacionais. A referida norma também estabelece exigências mínimas de isolamento acústico para os sistemas que compõem as edificações, entre eles, as vedações verticais. Desta forma, informações sobre o isolamento acústico providenciado pelos diferentes sistemas construtivos tornaram-se de fundamental importância. Tendo em vista a pouca informação existente na literatura sobre o isolamento sonoro de paredes externas em *light steel frame* (LSF), foram realizadas medições de perda de transmissão sonora em paredes externas executadas neste sistema construtivo, usadas tipicamente no mercado brasileiro. Dezoito composições de paredes em LSF foram montadas na câmara reverberante de transmissão sonora da UFSM para realização dos ensaios de perda de transmissão conforme procedimentos propostos pela ISO 10140:2010. O isolamento sonoro foi quantificado a partir dos espectros do índice de redução sonora R , pelo índice de redução sonora ponderado R_w e pela classe de transmissão sonora STC, facilitando a comparação entre diferentes composições de parede e dados de isolamento sonoro encontrados na bibliografia. Os principais materiais utilizados no revestimento das paredes LSF foram painéis OSB, placas cimentícias, placas de gesso acartonado, régulas *Smartside*, régulas de *siding* vinílico, painéis XPS e placas de óxido de magnésio. A influência da utilização de barras resilientes e fitas de espuma de PVC, entre as placas de revestimento e a estrutura metálica, também foi avaliada. Determinou-se que o isolamento sonoro das diferentes paredes LSF avaliadas é de $43 \text{ dB} \leq R_w \leq 50 \text{ dB}$ e $45 \text{ dB} \leq \text{STC} \leq 52 \text{ dB}$. Dentre as paredes externas em LSF, aquela que utilizou placas de óxido de magnésio na face exterior apresentou o maior $R_w = 50 \text{ dB}$. As barras resilientes e fitas de espuma de PVC foram capazes de aumentar o R_w e STC em até 5 dB, se comparado à parede semelhante sem estes dispositivos, especialmente nas frequências a partir de 400 Hz. A partir da análise dos dados, concluiu-se que as paredes LSF – consideradas paredes duplas – são mais eficientes no isolamento sonoro quando comparadas às paredes simples ou homogêneas de mesma massa e até do que algumas paredes com massa muito superior, como paredes de tijolos maciços, de blocos de concreto ou de blocos cerâmicos.

Palavras-chave: paredes de *light steel frame*, isolamento acústico, perda de transmissão sonora, barras resilientes, índice de redução sonora ponderado (R_w) e classe de transmissão sonora (STC).

**FEDERAL UNIVERSITY OF SANTA MARIA
GRADUATE PROGRAM IN CIVIL ENGINEERING – MASTERS AND PhD**

ABSTRACT

**EVALUATION OF SOUND TRANSMISSION LOSS IN LIGHT STEEL FRAME
EXTERNAL WALLS**

AUTHOR: GRAZIELLA FERRER RADAVELLI

ADVISOR: STEPHAN PAUL

Place and date: Santa Maria, December 11, 2014.

Environmental noise at high levels and inappropriate construction techniques used in conventional buildings in Brazil claim for a transition to better construction systems. Recently the Brazilian standard NBR 15575:2013 established for the first time parameters and criteria for residential building performance. In standard minimum requirements for sound insulation are given, for example for external walls and roof structures. This way it is of fundamental importance to have sound transmission loss data for different types of such elements at hand. Taking into account that there is very little information on the sound transmission loss of external walls of the *light steel frame* (LSF) type measurements of sound insulation of different vertical external LSF walls typically used in Brazil were carried out. Eighteen different LSF walls were mounted in the sound transmission measurement chamber of the Federal University of Santa Maria and measurements were carried out in accordance with ISO 10140:2010. Sound insulation was characterized by means of the sound reduction index R , the weighted sound reduction index R_w and the sound transmission class, making it possible to compare the sound insulation of the LSF walls with data from the literature. The LSF walls under investigation in this study used different materials such as OSB panels, cement boards, plaster boards, *Smartside* panels, PVC panels, XPS panels and magnesium oxide boards for the outer face. The influence of resilient channels and sponge tape, placed between the outer face and the metallic studs, were also evaluated. The sound insulation of the different LSF walls were found to be $43 \text{ dB} \leq R_w \leq 50 \text{ dB}$ and $45 \text{ dB} \leq \text{STC} \leq 52 \text{ dB}$. Within the LSF walls measured the one which used magnesium oxide boards on the outer face showed to have the highest weight sound reduction index ($R_w = 50 \text{ dB}$). Resilient channels, fabricated especially for this study, and sponge tape were able to provide an increase of R_w and STC up to 5 dB compared to the same wall without this resilient elements, and provide better sound insulation especially for frequencies higher than 400 Hz. From the data it can be concluded that LSF walls are more efficient regarding the sound insulation than single walls of the same surface mass and in some cases even better than single walls of superior surface mass, such as walls made of massive brick or concrete blocks.

Palavras-chave: light steel frame walls, sound insulation, sound transmission loss, resilient channels, sound reduction index (R_w), sound transmission class (STC).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Influência da espessura e densidade na absorção sonora de materiais porosos/fibrosos. _____	23
Figura 2- Balanço energético sonoro em uma parede sob incidência de ondas sonoras. _____	26
Figura 3 – Partição separando dois meios com impedâncias características diferentes. _____	28
Figura 4 - Caminhos de transmissão sonora entre ambientes. _____	29
Figura 5 – Representação esquemática dos caminhos de transmissão em ensaio de perda de transmissão sonora em uma parede de <i>light steel frame</i> , em laboratório. _____	30
Figura 6 - Curvas de perda de transmissão medidas em campo e em laboratório, para uma parede de alvenaria com 6” de espessura. _____	31
Figura 7 – Parede instalada entre duas câmaras reverberantes - emissão e recepção, para ensaio de determinação da perda na transmissão sonora. _____	32
Figura 8 - Espectro da perda de transmissão sonora e curva de referência para determinação do índice de redução sonora ponderado. _____	35
Figura 9 - Exemplo da adaptação de um espectro de perda de transmissão sonora medido à curva STC de referência deslocada. _____	37
Figura 10 – Espectro de perda de transmissão sonora de duas paredes com classe de transmissão sonora de 46 dB. _____	37
Figura 11 - Curva típica de perda de transmissão para parede simples. _____	39
Figura 12 – Parede homogênea e o aumento da classe de transmissão sonora conforme a variação da espessura e da massa superficial. _____	40
Figura 13 – Frequências críticas para painéis de materiais típicos, conforme sua espessura. _____	42
Figura 14 - Transmissão sonora de uma parede composta, entre dois ambientes. _____	43
Figura 15 – Gráfico de estimativa de perda de transmissão para parede composta. _____	44
Figura 16 – Alvenaria de tijolos com janela, parede composta. _____	45
Figura 17 – Representação esquemática do sistema massa – mola – massa, em uma parede dupla. _____	47
Figura 18 - Curva típica de perda de transmissão de uma parede dupla ideal. _____	49
Figura 19 – Parede de <i>light steel frame</i> revestida com placas de gesso. _____	51
Figura 20 – Perda de transmissão sonora de parede em <i>light steel frame</i> e <i>wood frame</i> . _____	52
Figura 21 – Espectros de perda de transmissão de dois painéis de madeira com igual massa superficial. _____	53
Figura 22 – Parede dupla em <i>wood frame</i> com caibros independentes e revestimento em placas de gesso: perspectiva e secção. _____	54
Figura 23 - Residência unifamiliar em <i>light steel frame</i> , Americana/SP, 2010. _____	57
Figura 24 - Residência unifamiliar em <i>light steel frame</i> , Palhoça/SC, 2009. _____	57
Figura 25 - Residência multifamiliar em <i>light steel frame</i> , Eldorado do Sul/RS, 2012. _____	58
Figura 26 – Montagem dos painéis em <i>light steel frame</i> , na fábrica. _____	59
Figura 27 – Montagem do módulo de banheiro em <i>light steel frame</i> , na fábrica. _____	59

Figura 28 – Desenho de painel de parede em <i>light steel frame</i> : espaçamento entre os perfis estruturais e paginação do revestimento das placas, dimensões em metros. _____	61
Figura 29 – Componentes utilizados em uma parede típica em <i>light steel frame</i> _____	62
Figura 30 – Encaixe dos montantes na guia em painel estrutural de <i>light steel frame</i> . _____	63
Figura 31 – Instalação da lâ de vidro entre os perfis de <i>light steel frame</i> . _____	63
Figura 32 – Painel fixado ao perfil através de barras resilientes. _____	64
Figura 33 – Barra resiliente fixada entre a placa de gesso e o caibro estrutural. _____	65
Figura 34 – Placas de gesso para uso em áreas secas, áreas úmidas e resistentes ao fogo. ____	67
Figura 35 – Painel OSB 9,5 mm de espessura _____	67
Figura 36 - Painel XPS. _____	67
Figura 37 - Painel XPS. _____	67
Figura 38 – Instalação das placas de óxido de magnésio na parede de <i>light steel frame</i> . ____	68
Figura 39 – Instalação da placa cimentícia sobre a membrana impermeável. _____	69
Figura 40 – Painel estrutural de aço fixado no vão da câmara e recebendo vedação com espuma expansiva de poliuretano. _____	80
Figura 41 – Revestimento do painel estrutural utilizando painel OSB e instalação da membrana hidrófuga sobre os painéis OSB. _____	81
Figura 43 - Fixação das barras resilientes aos perfis e lado interno da parede de <i>light steel frame</i> revestida com placas de gesso. _____	82
Figura 42 – Instalação da lâ de vidro 50 mm e fita adesiva de espuma de PVC sendo colada em uma das faces dos perfis. _____	82
Figura 44- Desenho do plano de corte e dobra para fabricação das barras resilientes, _____	83
Figura 45 - Secção da barra resiliente desenvolvida, dimensões em mm. _____	84
Figura 46 – Fixação da barra resiliente aos perfis da parede de <i>light steel frame</i> . _____	84
Figura 47 - Lado externo das paredes de <i>light steel frame</i> revestidas com placas cimentícias e régua <i>Smartside</i> . _____	85
Figura 48 – Sala de recepção com a parede de <i>light steel frame</i> e janela instalada, no detalhe. _____	86
Figura 49 – Furos para instalação e posições das caixas de luz na parede de <i>light steel frame</i> - P23. _____	86
Figura 50 - Pontos de fonte e microfone para medição do tempo de reverberação. _____	88
Figura 51 - Pontos de fonte e microfone para medição da perda de transmissão sonora. ____	89
Figura 52 – Espectros de perda de transmissão sonora obtidos na Medição 9 e Medição 9 invertida. _____	90
Figura 53 – Espectros da perda de transmissão sonora medidos antes e depois do tratamento da sala com material absorvente. _____	91
Figura 54 – Representação da seção das paredes em <i>light steel frame</i> - P1, P2 e P3. _____	100
Figura 55 – Espectros de <i>R</i> das paredes em <i>light steel frame</i> - P1, P2 e P3. _____	101
Figura 56 - Espectros de <i>R</i> de cinco paredes em <i>light steel frame</i> - P3, P4, P6, P8 e P13. _	103
Figura 57 – Espectros de <i>R</i> das paredes em <i>light steel frame</i> - P4 e P5. _____	105
Figura 58 - Espectros de <i>R</i> de paredes em <i>light steel frame</i> - P3, P11 e P12. _____	107
Figura 59 - Espectros de <i>R</i> de paredes em <i>light steel frame</i> – P8 e P9. _____	108
Figura 60 – Espectros de <i>R</i> de paredes em <i>light steel frame</i> – P6 e P7. _____	110

Figura 61 – Relação entre massa superficial e R_w para as paredes em <i>light steel frame</i> - P1 a P13. _____	112
Figura 62 – Relação entre custo e R_w para as paredes em <i>light steel frame</i> - P1 a P13. ____	115
Figura 63 – Espectros de R de paredes em <i>light steel frame</i> – P13, P14 e P21. _____	118
Figura 64 – Corte esquemático da parede de <i>light steel frame</i> .com janela semiaberta instalada rente à face interna. _____	119
Figura 65 - Espectros de R de paredes em <i>light steel frame</i> - P14, P15 e P17. _____	120
Figura 66 – Espectros de R de paredes de <i>light steel frame</i> - P21 e P23. _____	121
Figura 67 – Representação da secção da parede típica em <i>light steel frame</i> , P3. _____	128
Figura 68 – Espectros de R de parede típica em <i>light steel frame</i> e paredes de blocos de concreto com espessura de 14 e 16 cm e m'' de 163 e 171 kg/m ² , respectivamente. _____	129
Figura 69 – Espectros de R de parede de <i>light steel frame</i> e de alvenaria de blocos de concreto com espessura de 10 cm e m'' de 75 kg/m ² . _____	130
Figura 70 - Espectros de R de parede típica em <i>light steel frame</i> e da alvenaria de blocos de concreto com espessura de 20,3 cm e m'' de 249 kg/m ² . _____	131
Figura 71 - Espectros de R de parede típica em <i>light steel frame</i> e alvenarias de blocos cerâmicos com espessura de 17,5 e 18 cm e m'' de 201 e 170 kg/m ² , respectivamente. ____	133
Figura 72 - Espectros de R de parede típica em <i>light steel frame</i> e de alvenaria de tijolos maciços com espessura de 12,5 cm e m'' de 240 kg/m ² . _____	134
Figura 73 – Espectros de R de parede típica em <i>light steel frame</i> e de alvenaria de tijolos maciços com espessura de 13 cm e m'' de 249 kg/m ² . _____	135
Figura 74 - Espectros de R de parede típica em LSF e painel de madeira (com espessura de 6,6 cm e m'' 44 kg/m ²). _____	137
Figura 75 - Espectros de R de parede típica em <i>light steel frame</i> e da parede de concreto com espessura de 10,2 cm e m'' de 255 kg/m ² . _____	138
Figura 76 - Espectros de R de parede típica em <i>light steel frame</i> , parede de concreto polimerizado (com espessura de 10 cm e m'' entre 190-195 kg/m ²) e parede de placas de concreto (com espessura de 10 cm e m'' entre 163 kg/m ²). _____	139
Figura 77 - Espectros de R de parede típica em <i>light steel frame</i> e parede de <i>wood frame</i> (com espessura de 14,2 cm e m'' entre 60 kg/m ²). _____	141
Figura 78 - Espectros de R de parede típica em <i>light steel frame</i> e parede de <i>wood frame</i> (com espessura de 13,4 cm e m'' não informada). _____	142
Figura 79 – Espectro de R de duas paredes em <i>light steel frame</i> . _____	144
Figura 80 – Espectros de ruído ambiental com ponderação “A” e “C” e espectro de R da parede típica em <i>light steel frame</i> . _____	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de isolamento sonoro da curva STC de referência.	36
Tabela 2 – Índice de redução sonora ponderado mínimo recomendado para elementos da fachada, R_w .	71
Tabela 3 – Valores de índice de redução sonora ao ruído aéreo para compor a curva de referência.	75
Tabela 4- Parâmetros acústicos de verificação conforme NBR 15575-4:2013.	76
Tabela 5 – Índice de redução sonora ponderado medido em laboratório.	77
Tabela 6 – Relação dos materiais utilizados nas paredes de <i>light steel frame</i> e suas características.	79
Tabela 7 – Valores de tempo de reverberação, T_{30} , nas bandas de 1/3 de oitava para a sala de recepção, antes e depois do tratamento com material absorvente.	92
Tabela 8 – Configurações das paredes externas de <i>light steel frame</i> , para medição de perda de transmissão sonora.	93
Tabela 9 – Frequência de ressonância massa – mola - massa, frequência crítica e frequência de ressonância da cavidade para as paredes em LSF avaliadas.	99
Tabela 10 – Isolamento sonoro e custo das paredes em <i>light steel frame</i> - P1, P2 e P3.	100
Tabela 11 - Isolamento sonoro das paredes em <i>light steel frame</i> - P3, P4, P6, P8 e P13.	104
Tabela 12 – Custo e respectivo isolamento sonoro de paredes em <i>light steel frame</i> - P4 e P5.	106
Tabela 13 – Custo e isolamento sonoro de paredes em <i>light steel frame</i> - P3, P11 e P12.	106
Tabela 14 – Custo e isolamento sonoro de paredes em <i>light steel frame</i> - P8 e P9.	109
Tabela 15 - Custo e isolamento sonoro de paredes em <i>light steel frame</i> - P6 e P7.	110
Tabela 16 – Massa superficial e isolamento sonoro de diversas de paredes em <i>light steel frame</i> .	113
Tabela 17 – Custo do material e isolamento sonoro de paredes em <i>light steel frame</i> – P1 a P13.	116
Tabela 18 – Isolamento sonoro de paredes em <i>light steel frame</i> – P13, P14 e P21.	118
Tabela 19 - Isolamento sonoro de paredes em <i>light steel frame</i> – P14, P15 e P17.	120
Tabela 20 – Classificação das cinco composições de paredes em <i>light steel frame</i> conforme os níveis de desempenho acústico requisitados pela NBR 15575:2013, na condição de classe de ruído tipo III.	123
Tabela 21 - Exigências mínimas para o isolamento sonoro conforme a DIN 4109:2010.	124
Tabela 22 – Classes de ruído da DIN 4109:2010 atendidas pelo isolamento sonoro das paredes de <i>light steel frame</i> avaliadas.	125
Tabela 23 – Exigências mínimas para isolamento sonoro conforme a ÖNORM B-81152:2002.	126

Tabela 24 – Comparação entre os índices de redução sonora ponderados entre a NBR 15575:2013, DIN 4109:2010 e a ÖNORM B-81142:2002.	127
Tabela 25 – Características das paredes de blocos de concreto (espessura de 14 e 16 cm e m'' de 163 e 171 kg/m ²) e de <i>light steel frame</i> .	130
Tabela 26 – Características das paredes de blocos de concreto (espessura de 10 cm e m'' de 75 kg/m ²) e de <i>light steel frame</i> .	131
Tabela 27 – Características das paredes de blocos de concreto (espessura de 20,3 cm e m'' de 249 kg/m ²) e de <i>light steel frame</i> .	132
Tabela 28 – Características das paredes de blocos de cerâmicos (espessura de 17,5 e 18 cm e m'' de 201 e 170 kg/m ²) e de <i>light steel frame</i> .	132
Tabela 29 – Características das paredes de tijolos maciços (espessura de 12,5 cm e m'' de 240 kg/m ²) e de <i>light steel frame</i> .	135
Tabela 30 – Características das paredes de tijolos maciços (espessura de 13 cm e m'' de 249 kg/m ²) e de <i>light steel frame</i> .	136
Tabela 31 – Características das paredes de madeira (espessura de 6,6 cm e m'' de 44 kg/m ²) e de <i>light steel frame</i> .	136
Tabela 32 – Características das paredes de concreto (espessura de 10,2 cm e m'' de 255 kg/m ²) e de <i>light steel frame</i> .	138
Tabela 33 – Características das paredes de concreto polimerizado (espessura de 10 cm e m'' entre 190-195 kg/m ²), de placas de concreto (espessura de 10 cm e m'' entre 163 kg/m ²) e de <i>light steel frame</i> .	140
Tabela 34 – Características das paredes de <i>wood frame</i> (espessura de 14,2 cm e m'' entre 60 kg/m ²) e de <i>light steel frame</i> .	142
Tabela 35 – Características das paredes de <i>wood frame</i> (espessura de 13,4 cm e m'' não informada) e de <i>light steel frame</i> .	143
Tabela 36 – Características das duas paredes de <i>light steel frame</i> .	144
Tabela 37 – Classes de transmissão sonora, condições de privacidade e classificações subjetivas associadas.	147
Tabela 38 – Privacidade proporcionada pelo isolamento sonoro das paredes de <i>light steel frame</i> avaliadas.	147
Tabela 39 – Paredes diversas: custo do material, isolamento sonoro, massa superficial e espessura.	148
Tabela 40 – Comparação do custo por m ² de uma obra convencional e em <i>light steel frame</i> .	149

LISTA DE SIGLAS E VARIÁVEIS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CBCA	Centro Brasileiro da Construção em Aço
CES	Construção energit�mica sustentável
EPU	Espuma de poliuretano expandido
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LAeq	Nível de pressão sonora equivalente com pondera�o em A
LCeq	Nível de pressão sonora equivalente com pondera�o em C
LSF	<i>Light Steel Frame</i>
MNPS	Medidor de nível de pressão sonora
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NPS	Nível de pressão sonora
OSB	<i>Oriented Strand Board</i>
PBQP-H	Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat
PT	Perda de transmissão sonora
PVC	Policloreto de vinila
TR	Tempo de reverbera�o
SINAT	Sistema Nacional de Avalia�es Técnicas
SINDUSCON/RS	Sindicato da Constr�o Civil do Rio Grande do Sul
UFMS	Universidade Federal de Santa Maria
XPS	Poliestireno extrudado

LISTA DE EQUAÇÕES

(Eq. 1) Coeficiente de absorção sonora em função do balanço energético sonoro _____	23
(Eq. 2) Coeficiente de absorção sonora em função do tempo de reverberação _____	24
(Eq. 3) Área de absorção sonora de uma superfície _____	24
(Eq. 4) Área de absorção sonora equivalente do ambiente _____	24
(Eq. 5) Tempo de reverberação _____	25
(Eq. 6) Balanço energético sonoro _____	26
(Eq. 7) Coeficiente de transmissão sonora em função do balanço energético sonoro _____	26
(Eq. 8) Coeficiente de transmissão sonora como função da frequência _____	26
(Eq. 9) Perda na transmissão sonora _____	27
(Eq. 10) Índice de redução sonora _____	32
(Eq. 11) Redução sonora em função nos níveis de pressão sonora _____	33
(Eq. 12) Redução sonora em função da área de absorção _____	33
(Eq. 13) Lei da massa _____	40
(Eq. 14) Frequência crítica _____	41
(Eq. 15) Coeficiente de transmissão sonora em parede composta _____	43
(Eq. 16) Perda de transmissão sonora em parede composta _____	44
(Eq. 17) Frequência de ressonância massa – mola - massa _____	47
(Eq. 18) Frequência de ressonância na cavidade _____	48
(Eq. 19) Rigidez _____	48
(Eq. 20) Frequência crítica em painéis <i>sandwich</i> _____	50
(Eq. 21) Frequência de ressonância na cavidade _____	50

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 Objetivo geral	19
1.2 Objetivos específicos	19
1.3 Estrutura da dissertação	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Isolamento sonoro de ruído aéreo e conceitos relacionados	22
2.1.2 Transmissão e perda de transmissão sonora	25
2.1.2.2 Transmissão sonora em laboratório e em campo	29
2.1.3 Quantificação da perda de transmissão sonora	31
2.1.3.1 Índice de redução sonora	32
2.1.3.2 Redução de ruído	33
2.1.3.3 Quantificação da perda de transmissão sonora através de número único	34
2.1.3.3.1 Índice de redução sonora ponderado	34
2.1.3.3.2 Classe de transmissão sonora	35
2.1.4 Perda de transmissão sonora em paredes	38
2.1.4.1 Perda de transmissão em paredes simples ou homogêneas	38
2.1.4.2 Perda de transmissão sonora em paredes compostas	42
2.1.4.3 Perda de transmissão em paredes duplas	45
2.2.1 Tempo de Reverberação	55
2.2.2 Perda de Transmissão Sonora Aérea	55
2.3. <i>Light steel frame</i>	56
2.3.1 Caracterização do sistema construtivo	56
2.3.2 Métodos de montagem	58
2.3.3 Parede típica em <i>light steel frame</i>	60
2.3.4 Principais componentes do sistema: estrutura, preenchimento e revestimento.	62
2.3.4.1 Estrutura	62
2.3.4.2 Preenchimento	63
2.3.4.3 Revestimento	64
2.3.5 Sustentabilidade do sistema construtivo <i>light steel frame</i>	70
2.4 Normas técnicas pertinentes	70

2.4.1 Diretriz SINAT 003:2012 –Sistemas construtivos estruturados em perfis leves de aço conformados a frio, com fechamentos em chapas delgadas – Sistemas leves tipo <i>light steel framing</i>	70
2.4.2 ISO 354:2003 - <i>Measurement of sound absorption in a reverberation room</i>	72
2.4.3 ISO 10140:2010 – <i>Laboratory measurement of sound insulation of building elements</i>	72
2.4.4 ISO 717:2013 - <i>Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of buildings elements - Part 1- Airborne sound insulation</i>	74
2.4.5 NBR 15575:2013 – Edificações habitacionais – Desempenho	75
3. MATERIAIS E MÉTODOS	78
3.1 Definição dos materiais e técnicas a serem empregados	78
3.2 Execução das paredes em <i>light steel frame</i> e as diversas composições de revestimento	79
3.3 Ensaio de perda de transmissão sonora	87
3.3.1 Equipamentos utilizados:	87
3.3.2 Grandezas e parâmetros a serem medidos:	87
3.3.3 Procedimentos de medição:	87
3.3.4 Plano de medições	93
3.4 Comparação entre os desempenhos no isolamento acústico das paredes de <i>light steel frame</i> avaliadas	95
3.5 Análise da massa das composições executadas	95
3.6 Avaliação do desempenho acústico medido nas paredes externas de <i>light steel frame</i> frente aos critérios estabelecidos pelas normas NBR 15575:2013, DIN 4109-11:2010 e ÖNORM B-81152:2002.	95
3.7 Avaliação do isolamento sonoro da parede típica em <i>light steel frame</i> frente ao ruído ambiental	96
3.8 Etapa 8: Análise de custos das composições executadas e comparação com paredes convencionais	96
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	98
4.1 Avaliação da perda de transmissão entre as paredes de LSF	98
4.1.1 Avaliação da influência da utilização de lã de vidro	99
4.1.2 Avaliação da influência do tipo de revestimento externo	102
4.1.3 Avaliação da influência da utilização de uma placa de gesso adicional	104
4.1.4 Avaliação da influência da utilização de barras resilientes e fitas de espuma de PVC	106
4.1.5 Avaliação da influência da substituição do painel OSB interno por uma placa de gesso	109
4.1.6 Avaliação da relação massa/isolamento sonoro proporcionado	111

4.1.7 Avaliação da relação custo/isolamento sonoro proporcionado _____	114
4.1.8 Avaliação da influência da instalação de uma janela _____	117
4.1.9 Avaliação da influência da instalação de caixas de luz _____	120
4.2 Avaliação do isolamento sonoro das paredes em <i>light steel frame</i> frente às normas: NBR 15575:2013, DIN 4109-11:2010 e ÖNORM B-81152:2002. _____	122
4.3 Avaliação do isolamento sonoro: parede típica em <i>light steel frame</i> x paredes convencionais. _____	128
4.3.1 Alvenarias de blocos de concreto x parede típica em <i>light steel frame</i> _____	129
4.3.2 Alvenarias de blocos cerâmicos x parede típica em <i>light steel frame</i> _____	132
4.3.3 Paredes de tijolos cerâmicos maciços x parede típica em <i>light steel frame</i> _____	134
4.3.4 Parede de madeira x parede típica em <i>light steel frame</i> _____	136
4.3.5 Paredes de concreto x parede típica em <i>light steel frame</i> _____	138
4.4 Avaliação do isolamento sonoro: parede típica em <i>light steel frame</i> x paredes secas _____	140
4.5 Avaliação do isolamento sonoro da parede típica em <i>light steel frame</i> frente ao ruído ambiental _____	145
4.6 Comparativo de custos entre paredes de <i>light steel frame</i> e paredes convencionais _____	148
5. CONCLUSÕES _____	150
Sugestões para trabalhos futuros _____	153
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____	154
APÊNDICES _____	156

1. INTRODUÇÃO

Devido ao significativo crescimento populacional e consequente aumento da densidade habitacional nos centros urbanos, o problema de excesso de ruído cada vez mais tem afetado seus habitantes. A Organização Mundial de Saúde (2014) alerta para a interferência que o excesso de ruído causa nas atividades diárias: na escola, no trabalho, em casa ou nos períodos de lazer. Muitos efeitos, como psicológicos e fisiológicos, são frequentemente atribuídos ao ruído, porém possuem relação causal menos evidente (IRVINE; RICHARDS, 1998, p.14).

O ruído aéreo, particularmente proveniente do trânsito de veículos e atividades laborais ou de lazer, chega ao interior de residências quando o isolamento sonoro das paredes externas não é suficiente para garantir conforto acústico adequado aos seus usuários. Segundo pesquisa realizada por Jobim (1997) entre usuários de habitações, o desconforto acústico foi apontado como uma das principais causas da insatisfação dos moradores, na cidade de Porto Alegre.

A falta de isolamento sonoro ocorre basicamente devido a dois fatores: a redução significativa na espessura das paredes - com objetivo de aumentar a área útil dos imóveis e reduzir custos com material e mão de obra - e as inadequadas técnicas utilizadas na execução das obras.

De encontro a isso, a adoção de sistemas construtivos alternativos aos convencionais pode ser uma resposta interessante para o mercado da construção civil, que carece urgentemente de sistemas e técnicas construtivas rápidas, eficientes e enxutas em termos de economia de materiais, mão de obra e, especialmente, de produção de resíduos. Crasto (2006, p.10) aponta que a construção civil brasileira é predominantemente artesanal e caracterizada pela baixa produtividade e alto desperdício. Nesse sentido, o sistema construtivo *light steel frame*, amplamente utilizado em países como Estados Unidos, Canadá, Alemanha e Chile, entre outros, mas ainda timidamente conhecido e aceito no Brasil, pode apresentar-se como solução adequada à demanda de construtoras e clientes.

A partir da recente entrada em vigor da NBR 15575-4:2013, que estabelece critérios de desempenho para edificações residenciais, a indústria da construção civil, que até então desconhecia ou raramente disponibilizava informações referentes ao desempenho acústico dos sistemas e componentes construtivos utilizados nas suas obras, deverá atender, entre outros, aos critérios de isolamento sonoros estabelecidos pela norma.

Em face do que foi anteriormente exposto, este trabalho propõe-se a avaliar o desempenho no isolamento acústico de uma vedação vertical executada em um sistema construtivo industrializado, o *light steel frame*. A parede externa foi montada utilizando diferentes componentes de revestimentos internos e externos e atendendo aos materiais e métodos descritos no Manual de Steel Frame do Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA, 2006) e a na Diretriz nº 003 do Sistema Nacional de Avaliações Técnicas (SINAT, 2012), publicada pelo Ministério das Cidades, do Governo Federal.

1.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho no isolamento acústico de paredes externas de *light steel frame* construídas com os componentes mais utilizados no Brasil.

1.2 Objetivos específicos

- Avaliar a perda de transmissão sonora em paredes externas de *light steel frame*;
- Avaliar a influência na perda de transmissão pela utilização de lã de vidro na cavidade das paredes;
- Analisar a influência na perda de transmissão sonora a partir da escolha dos tipos de revestimento utilizado interna e externamente;
- Avaliar o efeito da utilização de barras resilientes na perda de transmissão sonora;
- Avaliar o desempenho acústico para cada composição de parede medida frente aos requisitos exigidos por normas de isolamento acústico;
- Analisar a relação custo/desempenho acústico para cada composição ensaiada.

1.3 Estrutura da dissertação

Este trabalho é composto por cinco capítulos. Capítulo 1 – Introdução: contextualiza o problema, demonstrando a importância do estudo do tema para as áreas da construção civil e,

mais especificamente, do conforto acústico. Especifica os objetivos geral e específicos a serem atingidos a partir do desenvolvimento da presente pesquisa. Capítulo 2 – Revisão bibliográfica: define os conceitos que envolvem o tema de transmissão sonora aérea e faz um levantamento dos principais trabalhos já realizados sobre o assunto. Aborda as normas utilizadas para avaliação de transmissão sonora aérea. E, por fim, caracteriza a construção seca, mais especificamente o sistema construtivo *light steel frame*. Capítulo 3 – Materiais e métodos: apresenta o ambiente onde será executada a pesquisa, especifica os instrumentos a serem utilizados para sua realização e descreve os procedimentos executados em cada etapa de trabalho. Capítulo 4 - Resultados e discussões: apresenta os resultados obtidos nas medições de perda de transmissão sonora, comparando-os entre si e com dados bibliográficos de outros autores. Capítulo 5 – Conclusões: apresenta as considerações alcançadas a partir da análise dos resultados e discussões a respeito, além de propostas para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir será apresentada uma revisão bibliográfica abordando os principais conceitos relacionados ao isolamento sonoro e à perda de transmissão sonora. Serão abordados os principais tipos de paredes, as quandeças capazes de caracterizar sua perda de transmissão sonora, além de um levantamento dos principais trabalhos já desenvolvidos sobre o tema.

2.1 Isolamento sonoro de ruído aéreo e conceitos relacionados

O ruído aéreo é o resultado da excitação do ar por fontes sonoras diversas, como automóveis, aviões, trens e atividades variadas, como construção civil e lazer, entre outras.

O isolamento sonoro é uma maneira de atenuar a transmissão de energia sonora, via aérea e/ou via sólido, de um ambiente para outro (GERGES, 1992, p.175).

Frequentemente as funções de absorção e isolamento sonoro são confundidas. Com o aumento da absorção em um ambiente, os níveis de pressão sonora aparentam ser menores, porém, as características dos materiais que desempenham as duas funções são completamente distintas. A isolação sonora é proporcionada por materiais densos e reflexivos, impedindo que um ruído se transmita entre dois ambientes contíguos, enquanto a absorção sonora é assegurada através da utilização de materiais fibrosos ou porosos (BISTAFA, 2011, p.313).

Os materiais porosos e fibrosos oferecem boa resistência ao fluxo de ar e por isso são considerados bons absorvedores de energia sonora, porém, não evitam que a parcela da energia absorvida, e que não é dissipada, seja transmitida ao outro lado da parede.

Absorvedores sonoros porosos são isolantes muito pobres porque as moléculas de ar podem rapidamente atravessá-los (EGAN, 1988, p.172). Para que haja isolamento, e consequente perda de transmissão sonora, é necessária a utilização de uma superfície sólida e com propriedades isolantes, entre os dois ambientes adjacentes.

2.1.1 Absorção sonora e tempo de reverberação

Absorção sonora é a propriedade de certas amostras de materiais transformarem parte da energia sonora que incide sobre eles em outra forma de energia, geralmente térmica (LONG, 2006, p.249).

É necessário conhecer o coeficiente de absorção sonora, α , de um material para que se possa calcular a área equivalente de absorção sonora de uma superfície e de um ambiente e, assim, determinar a perda de transmissão sonora de uma parede, por exemplo.

O coeficiente de absorção sonora é expresso por um número de 0 a 1, em que 0 significa que nada da energia é absorvida – mas sim completamente refletida - e 1 significa a absorção total da energia incidente. O coeficiente de absorção sonora de um material é dado pela relação entre a energia sonora por ele absorvida, $E_{\text{absorvida}}$, e a quantidade de energia sonora que sobre este incide, $E_{\text{incidente}}$:

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorvida}}}{E_{\text{incidente}}}. \quad (\text{Eq. 1})$$

Geralmente α aumenta à medida que a espessura e a densidade dos materiais porosos e fibrosos analisados também aumentam (BISTAFA, 2011, p.245), conforme mostram os exemplos da Figura 1.

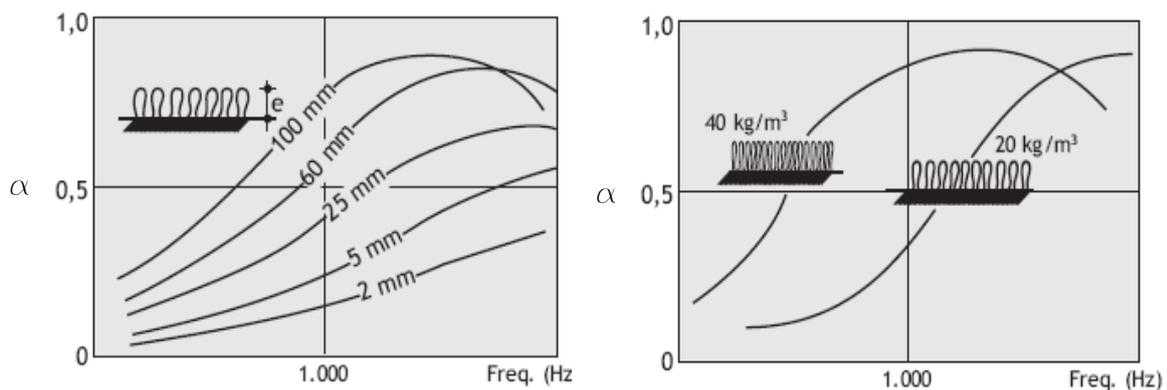


Figura 1- Influência da espessura e densidade na absorção sonora de materiais porosos/fibrosos.

Fonte: Gonzales (1980 apud BISTAFA, 2011, p.245).

O procedimento para obter o coeficiente de absorção sonora de um material, α , normalizado pela ISO 354:2003, consiste em medir o tempo de reverberação, TR , com e sem a amostra do material avaliado, em uma câmara reverberante, aplicando a equação:

$$\alpha = 0,161 \frac{V}{S} \left(\frac{1}{TR} - \frac{1}{TR'} \right) \quad (\text{Eq. 2})$$

sendo:

V = volume da sala [m^3]

S = área da amostra [m^2]

TR = tempo de reverberação medido com a amostra [s]

TR' = tempo de reverberação medido sem a amostra [s].

A capacidade de absorção sonora de uma superfície, A_{sup} , pode ser quantificada pela sua área equivalente de absorção sonora, que é o produto do coeficiente de absorção sonora do material da amostra, α , pela sua área, S :

$$A_{\text{sup}} = \alpha S \quad [\text{m}^2]. \quad (\text{Eq. 3})$$

A área de absorção sonora equivalente do ambiente, A , considera ainda, além da absorção das superfícies - paredes, teto e piso - aquela conferida pelas pessoas, mobiliário e ar, assim:

$$A = A_{\text{superfícies}} + A_{\text{diversos}} + A_{\text{ar}} \quad [\text{m}^2] . \quad (\text{Eq. 4})$$

No entanto, para fins práticos, considera-se que absorção sonora do ambiente seja dada essencialmente pela absorção sonora das superfícies, a menos que se trate de um recinto com grande volume, grande quantidade de mobiliário ou grande concentração de pessoas.

A absorção sonora manifesta-se pela magnitude do tempo de reverberação, TR, que é definido como o tempo, em segundos, para que o nível de pressão sonora em um ambiente decaia 60 dB após cessada a fonte de emissão ou, em termos de energia, para que a energia sonora decaia até a milionésima parte da sua energia inicial (HOPKINS, 2007, p.30). O TR é fortemente dependente do volume da sala, frequência e absorção sonora total da sala. A ISO 354:2003 descreve os métodos e procedimentos para a geração de ruído e o número e posições de fontes e microfones a serem utilizados na medição do tempo de reverberação em salas.

Muitas são as equações desenvolvidas para medir o tempo de reverberação, entretanto, a mais difundida foi desenvolvida pelo professor de física da Universidade de Harvard, Wallace Clement Sabine e considera a constante 0,161, o volume do ambiente e a área de absorção sonora equivalente do ambiente. A equação de Sabine:

$$TR = 0,161 \frac{V}{A} \quad [s] \quad (\text{Eq. 5})$$

estabelece uma relação entre o TR e a área de absorção sonora equivalente do ambiente, A, permitindo que a área de absorção sonora equivalente do ambiente seja determinada a partir tempo de reverberação medido, sem que seja necessário conhecer o coeficiente de absorção sonora das superfícies, materiais e equipamentos existentes neste.

2.1.2 Transmissão e perda de transmissão sonora

Quando o som transmitido via aérea encontra uma superfície - uma parede, por exemplo - parte da energia sonora é refletida de volta e parte é absorvida dentro do elemento e dissipada ou transmitida para o ambiente adjacente, ou seja, a sala do receptor (EGAN, 1988, p.44), conforme ilustra a Figura 2.

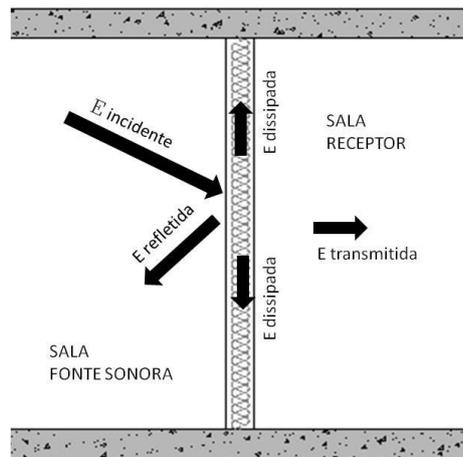


Figura 2- Balanço energético sonoro em uma parede sob incidência de ondas sonoras.

Fonte: Adaptado de Long (2006, p.249).

A análise da Figura 2 permite determinar o balanço energético sonoro, conforme:

$$E_{\text{incidente}} = E_{\text{refletida}} + E_{\text{absorvida}} = E_{\text{refletida}} + E_{\text{dissipada}} + E_{\text{transmitida}} \quad (\text{Eq. 6})$$

O parâmetro utilizado para caracterizar a transmissão sonora de um elemento construtivo é o coeficiente de transmissão sonora τ , definido pela razão entre a energia sonora transmitida e a energia sonora incidente (VIGRAN, 2008, p. 208):

$$\tau = \frac{E_{\text{transmitida}}}{E_{\text{incidente}}}, \quad (\text{Eq. 7})$$

ou ainda:

$$\tau = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega m''}{2\rho_0 c_0} \right)^2}, \quad (\text{Eq. 8})$$

sendo:

ω = frequência angular = $2\pi f$ [Hz]

m'' = massa superficial [kg/m²]

ρ_0 = densidade do ar = 1,2 kg/m³

c_0 = velocidade de propagação do som = 340 m/s.

O isolamento de uma partição ou parede geralmente é estimado através de uma grandeza chamada de perda na transmissão sonora, PT, que está inversamente relacionada ao coeficiente de transmissão sonoro, por:

$$PT = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad [\text{dB}], \quad (\text{Eq. 9})$$

sendo ambos, PT e τ , funções da frequência.

A perda de transmissão sonora é uma medida de quanta energia sonora é reduzida na transmissão através de elementos construtivos (EGAN, 1988, p.175). Segundo Bies (2003, p.346) e Vigran (2008, p.209), ambos os termos: perda de transmissão sonora ou índice de redução sonora R são utilizados na literatura para descrever a redução da energia sonora transmitida de um meio a outro.

A redução na transmissão sonora entre dois ambientes, separados por uma parede, pode ser atribuída às distintas propriedades que o material da parede possui do ar, visto que, toda vez que ocorrer uma mudança das características do meio de propagação da onda sonora, haverá redução da energia sonora transmitida para o meio seguinte (BISTAFA, 2011, p.279). Essa redução pode ser atribuída às diferentes impedâncias características, z , entre os meios 1 e 2 (GERGES, 1992, p.179-180), conforme ilustrado na Figura 3.

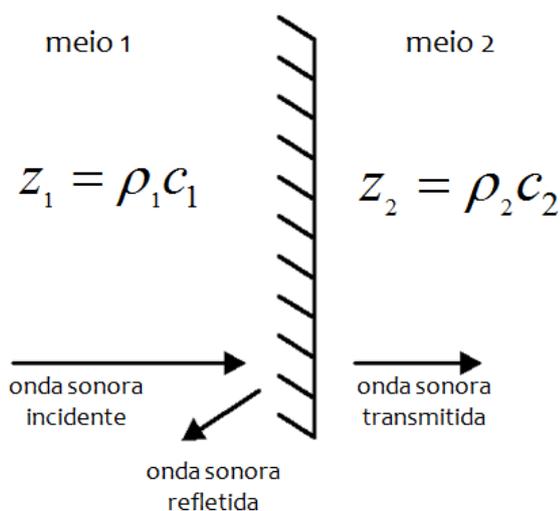


Figura 3 – Partição separando dois meios com impedâncias características diferentes.

Fonte: Adaptado de Gerges (1992, p. 180)

A Figura 3 apresenta a reflexão e a transmissão de uma onda sonora incidente em uma superfície divisora de dois meios com impedâncias características diferentes, em função de diferentes densidades e velocidades de propagação do som.

A PT de um elemento construtivo pode ser experimentalmente determinada através de um ensaio normatizado pela ISO 10140:2010 e realizado em câmara reverberante¹ de transmissão sonora. O ensaio requer duas câmaras reverberantes adjacentes vertical ou horizontalmente, com uma abertura entre elas, onde será instalado o elemento teste. Na sala de emissão, uma fonte em duas posições distintas deve gerar um campo difuso e em ambas as salas - recepção e emissão - a captação do sinal emitido pela fonte é feita através de microfones rotativos instalados no centro de cada uma das salas. A PT sonora será obtida a partir dos níveis de pressão sonora medidos, L_{p1} e L_{p2} , na sala de emissão e de recepção.

No ensaio de avaliação de PT, realizado em laboratório, deve-se assegurar que os caminhos de transmissão sonora indiretos - que não aqueles diretamente através da parede teste - possam ser negligenciáveis, ou seja, que a contribuição de energia sonora transmitida pelos elementos construtivos da câmara reverberante à energia total transmitida seja insignificante (BIES; HANSEN, 2003, p.347).

¹ Sala com superfícies lisas e preferencialmente não paralelas.

² A regra dos 8 dB determina que a diferença entre os valores de R da curva STC de referência e da curva medida

2.1.2.1 Transmissão sonora direta e indireta

A transmissão sonora pode ser classificada em direta e indireta. A transmissão sonora direta ocorre apenas via elemento teste e pode ser considerada como a única forma de transmissão apenas em medições realizadas em laboratório, desde que o ambiente de ensaio deste laboratório seja construído de forma adequada. Em situações reais, em campo, podem participar da transmissão sonora entre dois recintos as chamadas transmissões secundárias ou indiretas (BISTAFA, 2011, p.312).

A transmissão sonora direta é aquela que, quando o elemento teste é excitado de um lado, por via aérea ou estrutural, radia som de outro, sem nenhuma transmissão indireta (HOPKINS, 2007, p.409).

A Figura 4 ilustra as três formas pelas quais a energia sonora pode ser transmitida de um ambiente a outro: através do ar, por aberturas como portas ou janelas (1); através da vibração da partição que divide os dois ambientes, uma parede, por exemplo (2); e indiretamente, através de superfícies limítrofes ou flancos (3).

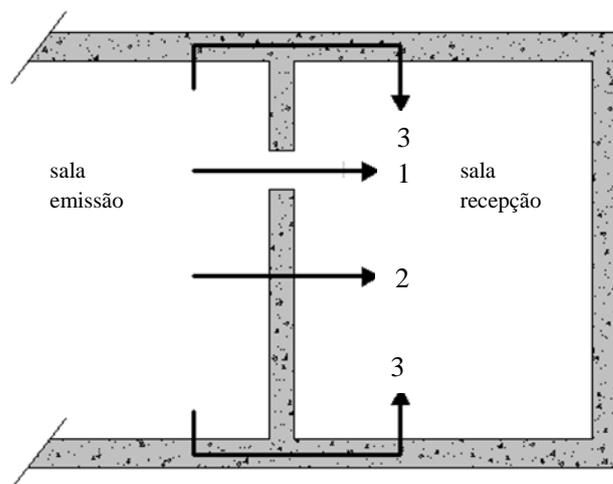


Figura 4 - Caminhos de transmissão sonora entre ambientes.

Fonte: Adaptado de Vigran (2008, p.211).

2.1.2.2 Transmissão sonora em laboratório e em campo

Em laboratório, assume-se que o efeito da transmissão sonora indireta seja negligenciável, pois a estrutura da câmara reverberante de transmissão sonora sala - onde será

instalado o elemento teste - usualmente tem muito mais massa por unidade de área do que o elemento a ser avaliado. Isto geralmente é necessário para evitar que haja transmissão indireta - pelos flancos - via estrutura do laboratório (HOPKINS, 2007, p.253).

Em se tratando de transmissão sonora medida em laboratório, Egan (1988, p.197) considera que as paredes da câmara irão transmitir muito menos energia do que o elemento teste e que, portanto, praticamente toda a energia transmitida de um ambiente ao outro será transmitida através deste.

Câmaras para ensaios de transmissão sonora de ruído aéreo possuem estruturas pesadas e são geralmente construídas em alvenaria maciça ou concreto, de forma que o elemento teste tenha menos da metade da massa por unidade de área do que os elementos estruturais aos quais esteja conectado (GERRETSEN, 1990 apud HOPKINS, 2007, p.247), a exemplo da Figura 5, na qual uma parede de *light steel frame* é inserida entre duas câmaras reverberantes, em concreto, para ensaio da perda de transmissão sonora em laboratório.

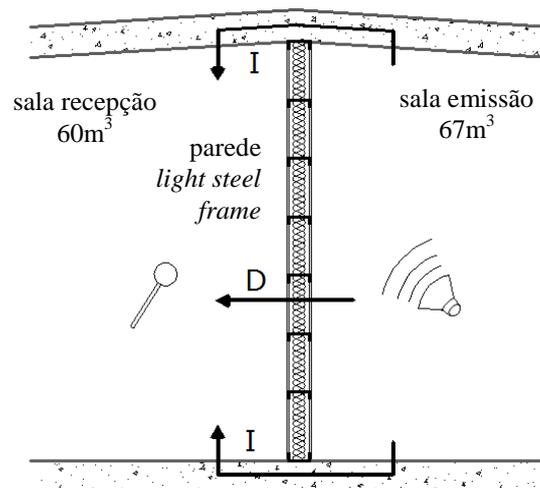


Figura 5 – Representação esquemática dos caminhos de transmissão em ensaio de perda de transmissão sonora em uma parede de *light steel frame*, em laboratório.

Fonte: Autora.

A análise da Figura 5 indica a presença de dois caminhos de transmissão sonora: o direto (D) e o indireto (I). O caminho indireto é através da estrutura da câmara reverberante – paredes, piso e forro - enquanto que o caminho direto é apenas através do elemento teste – neste caso, a parede de *light steel frame*. Devido à grande diferença entre as massas superficiais da estrutura do laboratório m''_1 e da partição teste m''_2 ($m''_1 \gg m''_2$) a contribuição de energia sonora transmitida pela primeira, em relação à segunda, pode ser

desprezada. Ao avaliar paredes leves ($m'' < 150 \text{ kg/m}^2$) não há necessidade de considerar a transmissão sonora indireta via estrutura do laboratório, pois esta é irrelevante em relação à energia sonora transmitida pelo elemento teste (ISO 10140-5:2010 , p.3)

Além da transmissão sonora pelos flancos, a avaliação da PT *in loco* também depende da fonte sonora no ambiente. Egan (1988, p.197) aponta que a perda de transmissão sonora pode ser 6 dB mais alta quando as ondas incidentes forem perpendiculares ao elemento teste do que no caso de incidência aleatória. “Quando as ondas sonoras do ruído rodoviário ou aeronáutico são paralelas à fachada do edifício, o desempenho na perda de transmissão medida em campo pode ser significativamente menor do que a perda de transmissão sonora medida em laboratório”. O mesmo autor atribui às condições idealizadas de materiais e técnicas de instalação praticadas em laboratório o acréscimo na PT medido, quando comparado à situação *in loco*, conforme caracteriza a Figura 6.

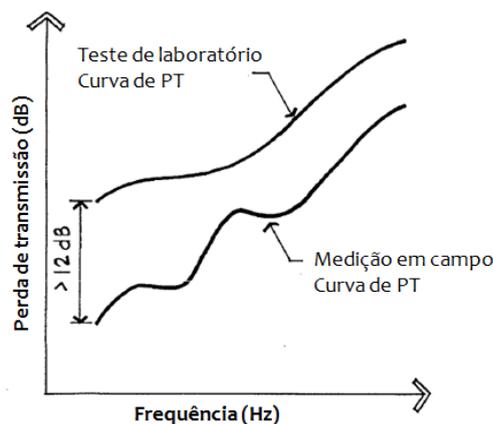


Figura 6 - Curvas de perda de transmissão medidas em campo e em laboratório, para uma parede de alvenaria com 6” de espessura.

Fonte: Adaptado de Egan (1988, p. 202).

2.1.3 Quantificação da perda de transmissão sonora

A perda de transmissão sonora, PT, expressa em escala logarítmica [dB], conforme as Equações 9 e 10, é a diferença entre dois níveis de pressão sonora ou a razão entre a energia incidente e a energia transmitida (IRVINE, 1998, p.46). Pode ser quantificada através dos parâmetros índice de redução sonora, R , redução de ruído, NR , ou ainda, através do índice de redução sonora ponderado, R_w , e da classe de transmissão sonora, STC , que classificam o

espectro de perda de transmissão sonora, medido nas diferentes frequências, em um número único capaz de classificar a perda de transmissão sonora de um elemento.

2.1.3.1 Índice de redução sonora

Segundo a ISO 10140:2010, a perda de transmissão sonora, quando medida em laboratório, pode ser quantificada através do índice de redução sonora, R , e obtida pela equação:

$$R = L_{p1} - L_{p2} + 10 \log \left(\frac{S}{A} \right) \text{ [dB]}, \quad (\text{Eq. 10})$$

sendo:

L_{p1} = Nível de pressão sonora na sala da fonte [dB]

L_{p2} = Nível de pressão sonora na sala de recepção [dB]

S = área da divisória ou parede entre as duas salas [m²]

A = área de absorção sonora equivalente da sala de recepção [m²].

Cabe ressaltar que R , L e A são funções da frequência e geralmente são dadas para as frequências centrais de oitava ou 1/3 de oitava.

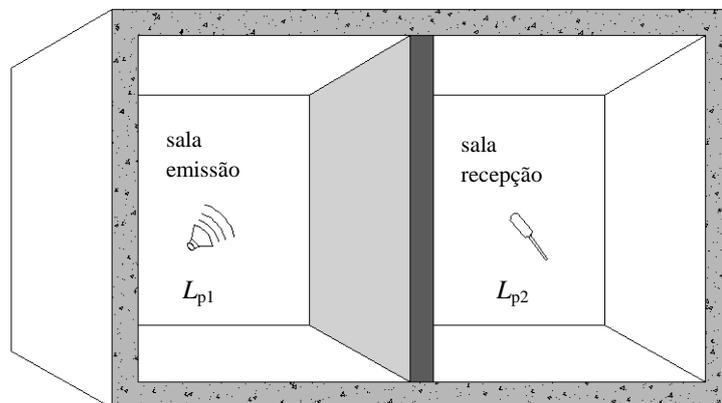


Figura 7 – Parede instalada entre duas câmaras reverberantes - emissão e recepção - para ensaio de determinação da perda na transmissão sonora.

Fonte: Autora.

A Figura 7 ilustra, de forma esquemática, o ensaio em laboratório e descrito pela ISO 10140:2010, para avaliação da perda de transmissão, PT , ou índice de redução sonora, R , em uma partição teste, inserida na abertura entre as câmaras de emissão e recepção. Os níveis de pressão sonora na sala de emissão (L_{p1}) e de recepção (L_{p2}) são medidos e depois convertidos em índices de redução sonora, R , através da Equação 10, que considera ainda a área do elemento teste e a área de absorção sonora equivalente na sala de recepção.

2.1.3.2 Redução de ruído

Os níveis de pressão sonora medidos em duas salas reverberantes adjacentes - sala de emissão e de recepção - separadas pelo elemento teste, permitem calcular a *noise reduction* (NR) ou a redução de ruído, de uma partição ou elemento teste, em um ambiente específico (BIES; HANSEN, 2003, p.347). Para tal, basta subtrair os níveis de pressão sonoros medidos em ambas as salas, conforme a Equação 11:

$$NR = L_{p1} - L_{p2} \quad [\text{dB}]. \quad (\text{Eq. 11})$$

A NR depende de três fatores básicos: da área do elemento teste – ou partição entre a sala de emissão e recepção - do isolamento sonoro promovido por esta partição e, por fim, da absorção na sala de recepção (EGAN, 1988, p.192).

A redução de ruído e o índice de redução sonora estão relacionados através de:

$$NR = R + 10 \log \frac{A_2}{S} \quad [\text{dB}] , \quad (\text{Eq. 12})$$

sendo:

R = Índice de redução sonora [dB]

A_2 = Absorção na recepção [Sabine]

S = área partição [m^2].

2.1.3.3 Quantificação da perda de transmissão sonora através de número único

A perda de transmissão sonora de um elemento construtivo, medida em laboratório, pode ser quantificada através de duas grandezas, o índice de redução sonora ponderado, R_w , e a classe de transmissão sonora, STC. O R_w é a grandeza mais comumente utilizada na Europa e no Brasil e a STC é a grandeza mais comumente utilizada nos Estados Unidos e Canadá.

Ambos parâmetros – R_w e STC - classificam a perda de transmissão sonora através de um número único e possuem procedimentos para a obtenção deste bastante similares. A principal diferença entre os parâmetros anteriormente descritos é a faixa de frequências abrangida – na STC compreende as bandas de 1/3 de oitava com as frequências centrais de 125 a 4000 Hz e no R_w de 100 a 3150 Hz - além da regra dos 8 dB², utilizada na obtenção da STC (PARK, 2008, p.1).

Ao especificar a capacidade de isolamento sonoro de um elemento construtivo é conveniente utilizar-se de um número único, ao invés de uma curva com o índice de redução sonora R do elemento em cada banda de 1/3 de oitava (VIGRAN, 2008, p.211). Hopkins (2007, p.vi) aponta ainda que, geralmente, normas de isolamento sonoro têm seus parâmetros requeridos através de números únicos, em decibels. Desta forma justifica-se a necessidade de utilizar-se de números únicos para quantificar a perda de transmissão.

2.1.3.3.1 Índice de redução sonora ponderado

O objetivo do R_w é facilitar a escolha através da comparação entre diferentes configurações (GERGES, 1992, p. 213).

A ISO 717-1:2013 descreve a forma de obtenção do índice de redução sonora ponderado, R_w , a partir dos valores dos índices de redução sonora, R , medidos em cada banda de frequência, nas medições de perda de transmissão sonora para ruído aéreo. Trata-se de um método comparativo entre a curva de isolamento sonoro medido e a curva de referência. A curva de referência deve ser deslocada de 1 dB em 1dB em direção à curva medida até que a soma dos desvios desfavoráveis – isto é, quando o valor medido em determinada frequência for inferior ao valor de referência - seja o maior possível, porém não ultrapasse 32 dB. Após

² A regra dos 8 dB determina que a diferença entre os valores de R da curva STC de referência e da curva medida não deve, em nenhum ponto do espectro sonoro, ser superior a 8 dB.

este procedimento, o número único do índice de redução sonora ponderado, R_w , será obtido a 500 Hz na curva de referência, conforme a Figura 8.

A Figura 8 apresenta a curva perda de transmissão sonora, medida em laboratório, de uma parede de *light steel frame*, revestida com placas OSB em ambos os lados, lã mineral preenchendo a cavidade, placas de gesso internamente e placas cimentícias externamente; em comparação à curva de referência, para obtenção do R_w .

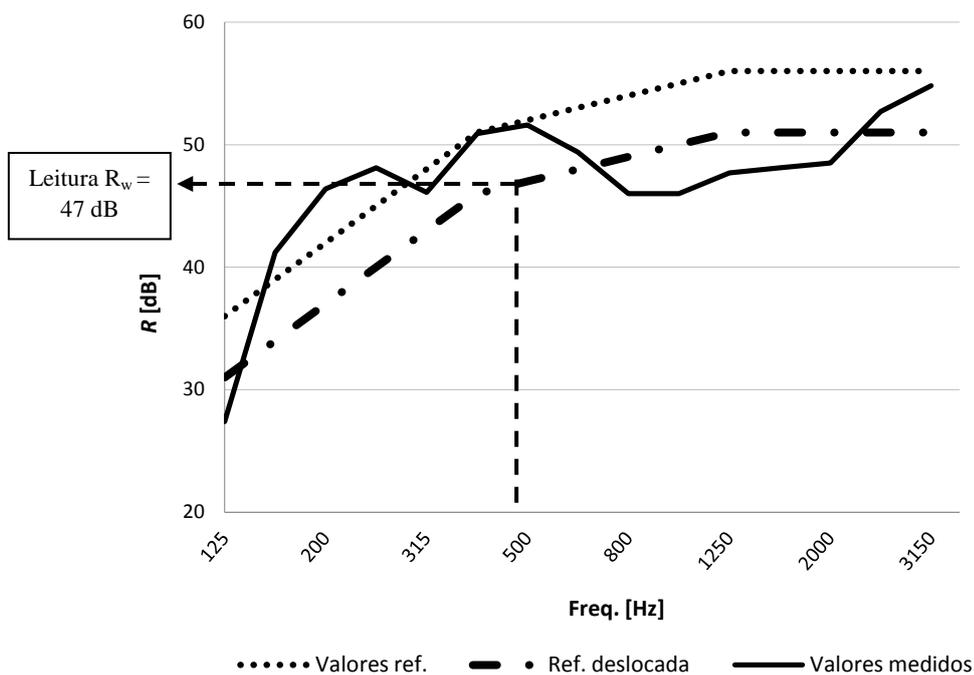


Figura 8 - Espectro da perda de transmissão sonora e curva de referência para determinação do índice de redução sonora ponderado.

Fonte: Autora.

2.1.3.3.2 Classe de transmissão sonora

A *sound transmission class* ou classe de transmissão sonora, STC, classifica o desempenho na perda de transmissão sonora para ruídos aéreos de partições, através de um número único, com o objetivo de que diferentes partições possam ser comparadas.

Os valores relativos de perda de transmissão sonora para bandas de 1/3 de oitava, apresentados na Tabela 1, são usados para gerar a curva de referência STC composta por três segmentos e que posteriormente servirá para comparação com os valores de perda de transmissão sonora medidos, para obtenção da STC, do elemento em avaliação. A norma que regulamenta o procedimento para obter o número único que classificará a transmissão sonora é a ASTM E413:2010 (IRVINE; RICHARDS, 1998, p.47) e o método descrito nesta norma, representado na Figura 9, consiste em comparar a curva de isolamento sonoro medido com a curva STC de referência, deslizando verticalmente a segunda em direção à primeira.

Tabela 1 – Valores de isolamento sonoro da curva STC de referência.

Frequência [Hz]	Valor de referência [dB]
125	-16
160	-13
200	-10
250	-7
315	-4
400	-1
500	0
630	1
800	2
1000	3
1250	4
1600	4
2000	4
2500	4
3200	4
4000	4

Fonte: Long (2006, p.317).

A diferença entre a curva STC de referência e valores de perda de transmissão sonora medidos não deve, em nenhuma das frequências, ultrapassar 8 dB, e a soma das deficiências nos valores de isolamento medidos, nas dezesseis bandas de 1/3 de oitava, em relação a curva STC de referência não devem ultrapassar 32 dB (LONG, 2006, p.317), conforme exemplo proposto na Figura 9.

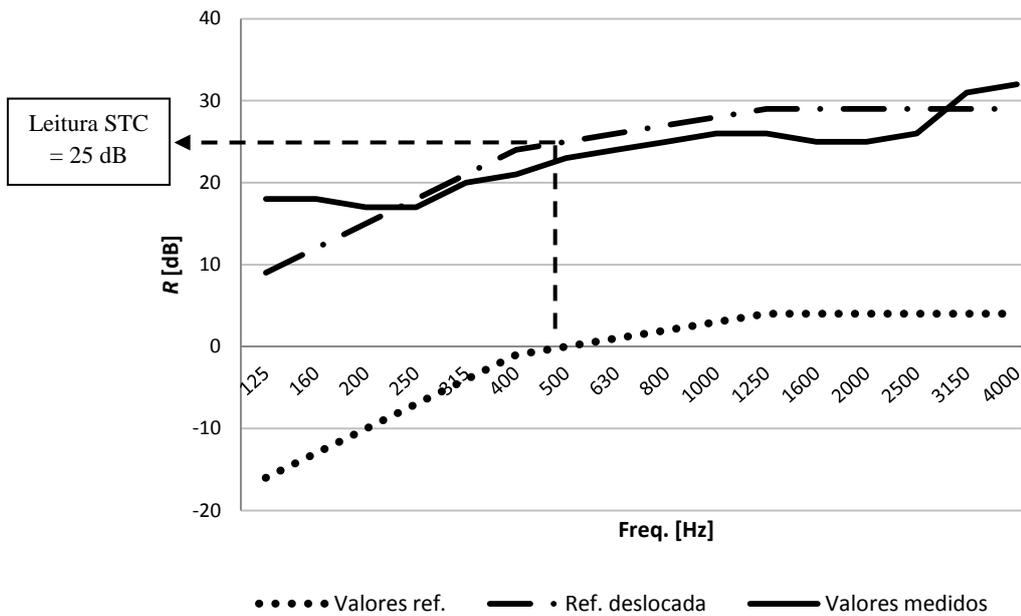


Figura 9 - Exemplo da adaptação de um espectro de perda de transmissão sonora medido à curva STC de referência deslocada.

Fonte: Autora.

O número que classifica a STC pode representar o desempenho de diferentes elementos construtivos com espectros de perda de transmissão sonora absolutamente distintos, a exemplo do gráfico da Figura 10.

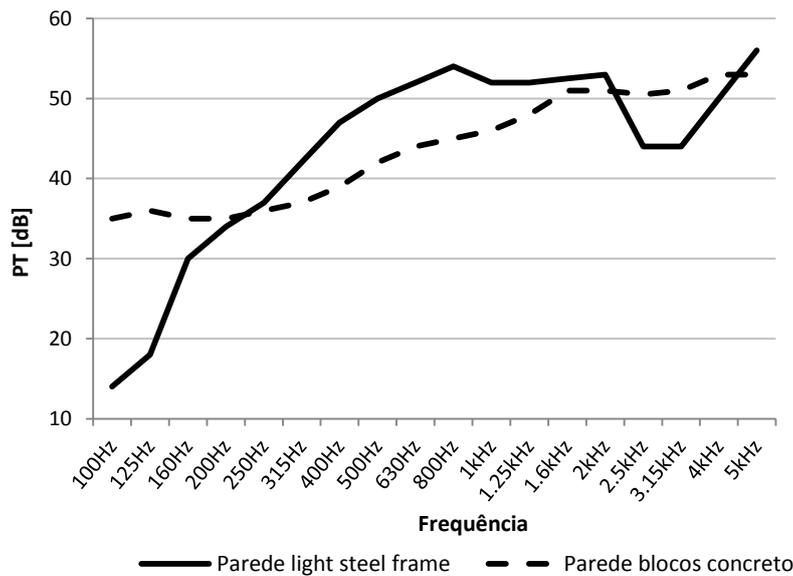


Figura 10 – Espectro de perda de transmissão sonora de duas paredes com classe de transmissão sonora de 46 dB.

Fonte: Adaptado de Irvine (1998, p.47).

Na Figura 10 estão representadas as curvas de perda de transmissão sonora de duas paredes – a primeira delas com estrutura metálica e revestimento de placas de gesso, representada pela linha contínua - e a segunda, de blocos de concreto, representada pela tracejada. Apesar das diferenças verificadas nos espectros de R , ambas possuem a mesma STC: 46 dB. A análise da Figura 10 permite ainda constatar que a escolha entre as duas soluções construtivas apresentadas deve estar baseada no tratamento acústico pretendido para o ambiente, visto que a parede de blocos de concreto possui aproximadamente 20 dB a mais de perda de transmissão sonora nas baixas frequências, enquanto a parede de estrutura metálica possui um desempenho melhor no isolamento sonoro nas frequências entre 250 e 2500 Hz.

2.1.4 Perda de transmissão sonora em paredes

Uma parede é um elemento construtivo vertical com função de dividir dois ambientes, sendo capaz de, quando sob incidência de ondas sonoras, refletir, dissipar e transmitir parte desta energia sonora, conforme ilustrado na Figura 2.

Os principais tipos de paredes e o seu comportamento em relação à perda de transmissão sonora são apresentados nas seções que seguem.

2.1.4.1 Perda de transmissão em paredes simples ou homogêneas

Paredes simples podem ser não apenas aquelas de concreto ou tijolo maciço, entre outros materiais homogêneos, mas também aquelas com heterogeneidades de pequenas dimensões em relação ao comprimento das ondas sonoras incidentes, como uma parede de blocos vazados, por exemplo (SANTOS, 2012, p. 13). Ainda segundo o mesmo autor, este tipo de paredes é aquele que se presta mais facilmente a predições de perda de transmissão sonora.

Segundo Irvine (1998, p.44), “As principais características físicas dos painéis simples que afetam a perda de transmissão são a massa, a rigidez e o amortecimento”. A curva de estimativa de perda de transmissão sonora, representada na Figura 11, baseia-se num modelo idealizado, representado por um painel sólido e homogêneo (BISTAFA, 2011, p.279).

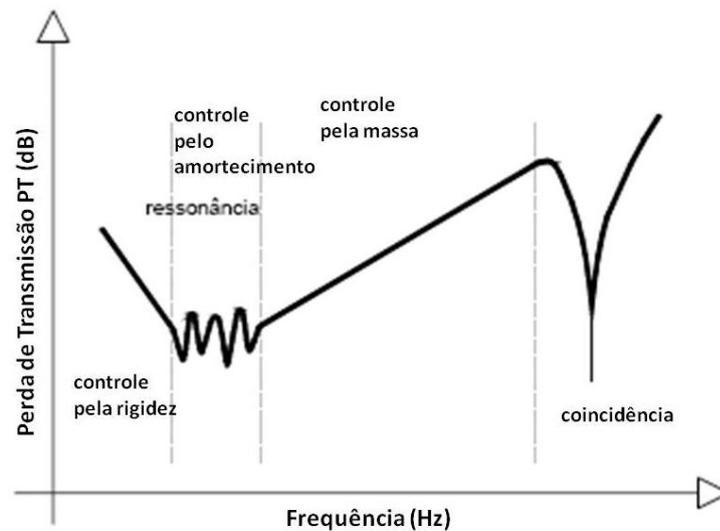


Figura 11 - Curva típica de perda de transmissão para parede simples.

Fonte: Adaptado de Gerges (1992, p. 197).

A Figura 11 representa uma curva típica de perda de transmissão sonora em função da frequência, para uma partição nas condições anteriormente descritas. É possível identificar quatro regiões distintas onde cada propriedade do painel atua mais incisivamente na perda de transmissão sonora entre dois ambientes.

Na região onde a rigidez à flexão controla a PT, nas frequências muito baixas, observa-se um fenômeno inverso à lei da massa, já que a PT diminui 6 dB com a duplicação da frequência.

A PT, na segunda região, é determinada pelo amortecimento do painel. Observam-se nessa região quedas na PT devido às primeiras frequências de ressonância³ do painel. São várias as frequências de ressonância de uma partição e a cada uma está associado um modo particular de vibração do painel (BISTAFA, 2011, p.280).

Na terceira região, controlada pela massa, a partição apresenta um aumento de 6 dB na PT a cada duplicação da frequência e/ou duplicação da massa superficial do painel (GERGES, 1992, p.195 e BISTAFA, 2011, p.282). Assim, a partição terá seu desempenho regido pela chamada lei da massa, admitindo-se que o produto da frequência pela massa superficial seja maior que a impedância característica do meio de propagação ($fm'' > \rho_0 C_0$).

³ Frequências em que o movimento do painel é máximo e o som incidente eficazmente transmitido (BISTAFA, 2012, p.281).

A lei da massa é dada por:

$$PT = -42,4 + 20 \log (m'' f) \quad [\text{dB}], \text{ para } 2f_r < f < f_c/2, \quad (\text{Eq. 13})$$

sendo:

f = frequência do som incidente [Hz]

m'' = massa superficial da parede [kg/m^2].

Segundo a equação 13, a PT sonora depende apenas da massa superficial do material e da frequência da onda incidente. Assim, a PT para qualquer parede homogênea e rígida, onde haja ar em ambos os lados, é válida para frequências maiores que o dobro da frequência de ressonância e frequências menores que a metade da frequência de coincidência (BISTAFA, 2011, p.282).

Painéis homogêneos utilizados como partição entre dois ambientes, como vidro, madeira e concreto, têm a classe de transmissão sonora aumentada em aproximadamente 5 dB a cada duplicação da espessura (EGAN, 1988, p.177), conforme Figura 12.

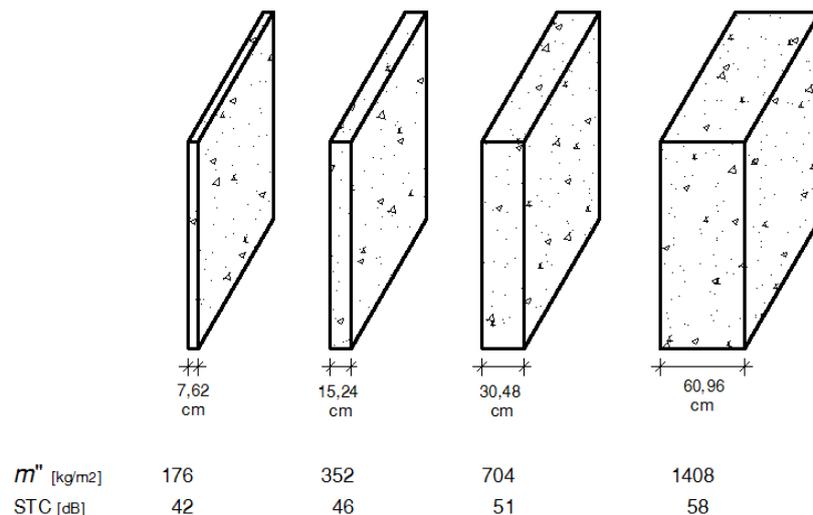


Figura 12 – Parede homogênea e o aumento da classe de transmissão sonora conforme a variação da espessura e da massa superficial.

Fonte: Adaptado de Egan (1988, p.179).

Na quarta região, a PT é consideravelmente reduzida pela coincidência, que ocorre quando o comprimento da onda acústica projetada na estrutura é igual ao comprimento da onda de flexão do painel (GERGES, 1992, p.201).

Em um recinto com campo sonoro difuso, as ondas sonoras provêm de variadas direções e suas frentes de onda formam diversos ângulos em relação ao painel, de forma que facilmente ocorrerá o fenômeno da coincidência e consequente queda na PT do painel avaliado (BISTAFA, 2011, p.281). Similarmente à região controlada pela ressonância, na região controlada pela coincidência, a PT do painel também é influenciada pelo amortecimento deste.

A frequência de coincidência, também chamada de frequência crítica, f_c , de painéis simples, homogêneos e isotrópicos pode ser determinada através de (BIES; HANSEN, 2003, p 341):

$$f_c = \frac{C_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m''}{B}} \quad [\text{Hz}] \quad , \quad (\text{Eq. 14})$$

sendo:

C_0 = velocidade de propagação do som = 340 m/s

m'' = massa superficial da parede [kg/m^2]

B = rigidez à flexão [$\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$].

Na prática, é comum determinar a frequência crítica a partir de gráficos que relacionam a espessura do painel homogêneo e isotrópico com a frequência crítica para materiais típicos, como exemplificado na Figura 13.

Para Long (2006, p. 325), haveria ainda outra região, nas altas frequências e acima da frequência crítica, onde a PT é novamente determinada pela rigidez do painel, assim como na primeira região, porém, nesta região a PT cresce 18 dB por oitava. Assumindo como exemplo uma parede simples e homogênea de concreto, com 100 mm de espessura, tem-se a frequência crítica em 200 Hz, conforme determinado pela Figura 13, fazendo com que nas frequências superiores a esta, a PT cresça 18 dB por oitava; o que explica a elevada PT deste tipo de parede, quando comparada a outras paredes.

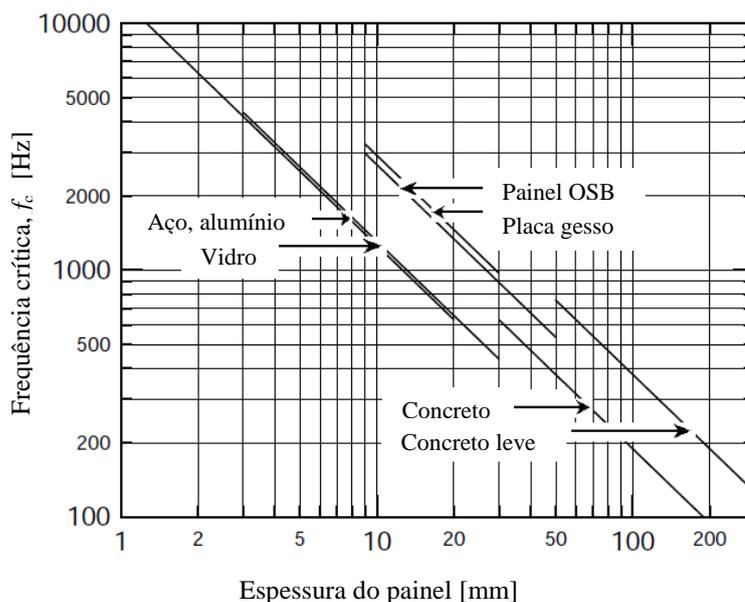


Figura 13 – Frequências críticas para painéis de materiais típicos, conforme sua espessura.

Fonte: Vigran (2008, p. 223).

Entretanto, Egan (1988, p.179) afirma que cada sucessiva duplicação da massa de uma parede simples produz proporcionalmente menor ganho na perda de transmissão, além de gerar um alto custo e que, portanto, faz-se necessário, utilizar construções mais complexas para que a perda na transmissão sonora seja satisfatória. Isto pode ser alcançado através da utilização de paredes duplas, por exemplo, conforme abordado no item 2.1.4.3.

2.1.4.2 Perda de transmissão sonora em paredes compostas

A utilização de portas, janelas e passagens ou aberturas, entre outros, é necessária para que os ambientes possam cumprir sua função de ocupação. Assim, uma forma de minimizar o impacto na PT que a inserção destes elementos pode provocar, é escolher elementos com baixo coeficiente de transmissão, τ , e cuja instalação siga práticas corretas, visando evitar frestas e vazamentos sonoros.

Elementos como esquadrias, aberturas ou materiais diversos do restante, interrompem a homogeneidade de uma parede ou partição e interferem no desempenho da sua perda de transmissão sonora. Ao inserir elementos com baixa perda de transmissão em uma partição

com elevada perda de transmissão, a perda de transmissão composta poderá ser significativamente degradada (BISTAFA 2011, p.299).

Devido ao fato da PT ser operada e expressa em uma escala logarítmica, quando um elemento mais fraco como uma janela ou uma porta é usado numa construção, geralmente a perda de transmissão composta está mais próxima do elemento fraco do que do elemento forte.

A transmissão sonora de cada componente é determinada separadamente – através do seu τ e sua área – e então somada, para obtenção da energia total transmitida e do nível de pressão sonora na sala de recepção (IRVINE; RICHARDS, 1998, p.72), conforme representado na Figura 14.

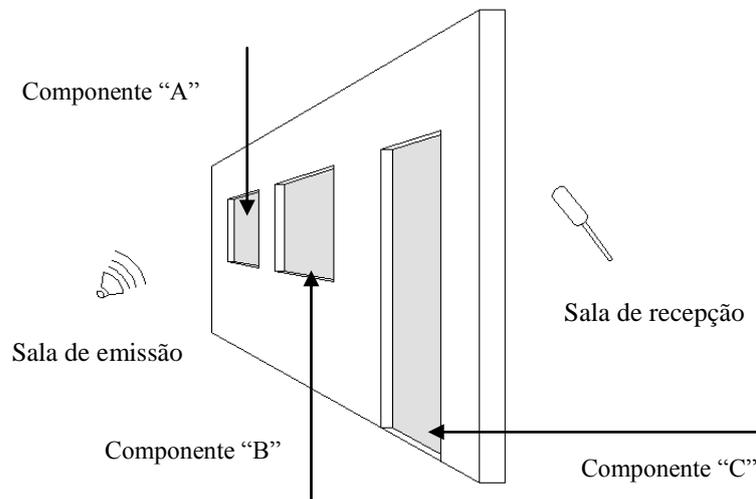


Figura 14 - Transmissão sonora de uma parede composta, entre dois ambientes.

Fonte: Adaptado de Irvine (1998, p.72).

As paredes compostas podem ter sua perda de transmissão composta determinada a partir do coeficiente de transmissão composto, τ_{comp} , que considera o coeficiente de transmissão e a área de cada elemento componente da partição, através das equações 15 e 16:

$$\tau_{\text{comp}} = \frac{\sum_{i=1}^N S_i \tau_i}{\sum_{i=1}^N S_i}, \quad (\text{Eq. 15})$$

sendo:

τ_{comp} = coeficiente de transmissão sonora da partição composta

S_i = a área do i -ésimo componente da partição [m^2]

τ_i = coeficiente de transmissão sonora do i -ésimo componente da partição,

$$PT_{\text{comp}} = 10 \log \frac{1}{\tau_{\text{comp}}} \quad [\text{dB}]. \quad (\text{Eq. 16})$$

O gráfico da Figura 15 é proposto por Egan (1988, p.191). Trata-se de uma forma simplificada e aproximada para determinar a PT_{comp} para uma partição composta por dois materiais com coeficientes de transmissão, τ , e áreas distintos.

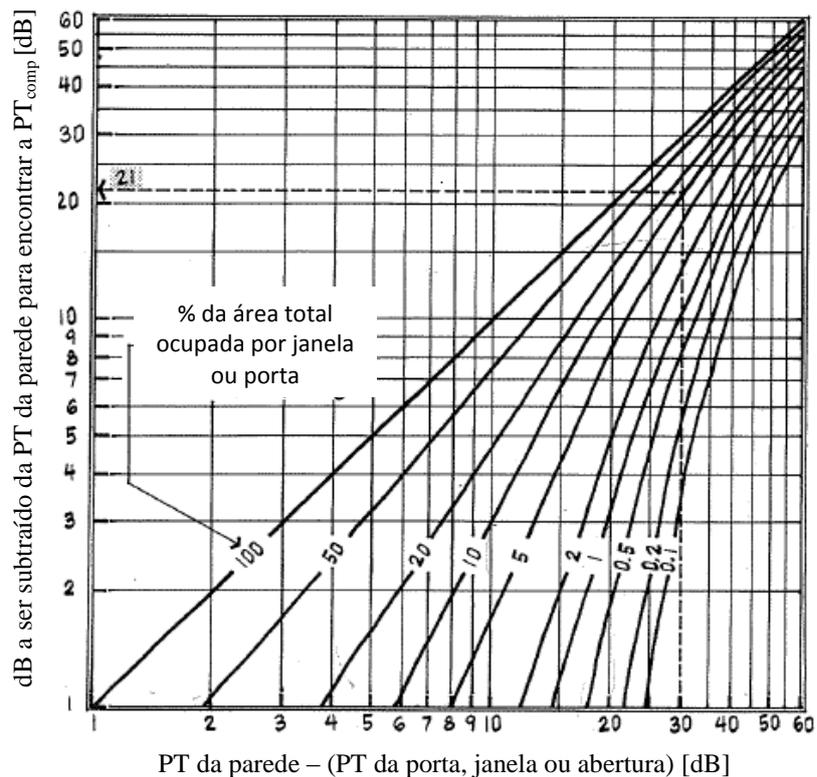


Figura 15 – Gráfico de estimativa de perda de transmissão para parede composta.

Fonte: Adaptado de Egan (1989, p.191).

Primeiro, encontra-se a porcentagem, representada pelas curvas do gráfico, que o componente mais fraco, em termos de isolamento sonoro, ocupa na área total da partição. Depois, subtrai-se a PT do componente mais fraco àquele de melhor desempenho. Em seguida, entra-se com o valor da diferença de PT dos componentes no eixo x do gráfico, até encontrar a curva de porcentagem e, por fim, no ponto onde ambos se cruzarem, a leitura da PT_{comp} poderá ser feita no eixo y do gráfico.

A linha tracejada que marca 21 dB no eixo y é a PT_{comp} de uma parede hipotética com área de $9,29 \text{ m}^2$, sendo $8,13 \text{ m}^2$ a área de tijolos, com PT de 50 dB, e $1,16 \text{ m}^2$ a área de uma janela de, com PT de 20 dB. Desta forma, a diferença de perda de transmissão sonora entre os dois componentes, no caso 30 dB, no eixo horizontal, encontra a curva com 12,5% - porcentagem da área da janela sobre a área da parede - resultando nos 21 dB apontados no eixo y.

A Figura 16 ilustra o objeto do exemplo proposto por Egan: uma alvenaria de tijolos com uma janela de 1/8 ou 12,5% da área da parede.

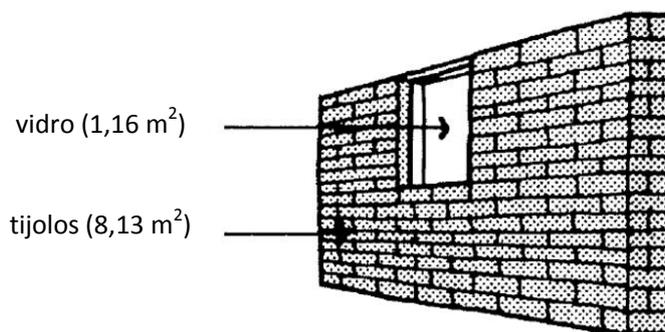


Figura 16 – Alvenaria de tijolos com janela, parede composta.

Fonte: Egan (1989, p.189).

2.1.4.3 Perda de transmissão em paredes duplas

Paredes duplas são aquelas que possuem dois elementos construtivos separados por uma cavidade de ar entre eles, que pode ou não ser preenchida com material absorvente.

Devido às exigências de códigos de incêndio ou normas de isolamento sonoro é comum que as paredes duplas utilizem mais do que uma placa de revestimento em cada lado da cavidade (VIGRAN, 2008, p. 277 e 278). Para fins de explicação da PT em paredes duplas, cada lado da parede, composto por placas de revestimento acopladas, será considerado como um painel.

Quando o objetivo é alcançar uma elevada perda de transmissão sonora, torna-se inútil seguir aumentando a massa de uma parede simples, assim, ao dividir a massa de uma parede em dois ou mais elementos, a camada de ar formada entre eles irá aumentar o isolamento sonoro (IRVINE; RICHARDS, 1998, p.45). Isto explica porque o uso de paredes duplas proporciona aumento no isolamento sonoro quando comparado às paredes simples e homogêneas.

O uso de paredes duplas ou triplas é a melhor solução em projetos de sistemas que requerem alta perda de transmissão sonora. Ao construir duas paredes simples e homogêneas, com idêntica espessura e igual perda de transmissão sonora, sem espaço entre elas, a perda de transmissão final será a de uma delas acrescida de apenas 6 dB, conforme o princípio da lei da massa. Enquanto que, se as mesmas paredes forem construídas isoladamente uma da outra – com espaço de ar entre elas - a perda de transmissão sonora total será igual ou maior do que a soma aritmética da perda de transmissão de cada uma delas (GERGES, 1992, p.201-207).

O comportamento das paredes duplas, no que tange a transmissão sonora, é regido por três fenômenos:

- acoplamento entre as placas de revestimento, podendo ser modelado, como um sistema massa – mola – massa;
- coincidência entre comprimento da onda sonora no ar e comprimento da onda de flexão no painel;
- ressonância na cavidade entre os painéis.

A compreensão da transmissão sonora através de paredes duplas é dificultada pelo fato de haver um grande número de fatores de influência e condições de contorno, sendo que estas últimas podem diferir bastante entre teoria e prática. O modelo mais simples de transmissão sonora através de paredes duplas considera apenas ondas planas incidindo normalmente no painel, cujas dimensões são infinitas e que não esteja sujeito ao amortecimento.

Fazendo as considerações simplificadoras mencionadas acima, as placas de revestimento são modeladas como corpos rígidos e podem ser representadas por massas

conectadas através de uma mola conforme esquematicamente ilustrado na Figura 17, na qual a mola representa a rigidez do ar ou do material de absorção na cavidade.

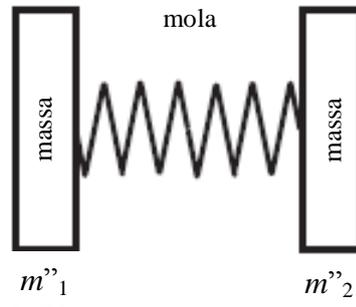


Figura 17 – Representação esquemática do sistema massa – mola – massa, em uma parede dupla.

Fonte: Adaptado de Hopkins (2007, p. 479).

Apesar de ser um modelo simples e não muito fiel da realidade, a determinação da frequência de ressonância do modelo simplificado massa – mola – massa é útil ao projetar um sistema de isolamento acústico, pois abaixo dessa frequência, a parede dupla comporta-se como uma parede simples e homogênea (HOPKINS, 2007, p.457) cuja PT será regida pela lei da massa (Equação 13). Desta forma, se a frequência de interesse estiver situada na região da frequência de ressonância do sistema massa – mola – massa, em uma parede dupla, a melhor opção em termos de isolamento sonoro será obtida utilizando uma parede simples. A ressonância do sistema massa – mola – massa ocorre geralmente nas baixas frequências, devido ao pouco espaçamento entre os painéis, e assim, elevada rigidez, e/ou pouca massa superficial dos mesmos.

A Equação 17 é utilizada para obtenção da frequência de ressonância, f_0 , do sistema massa – mola – massa, em paredes duplas, e é válida para cavidades preenchidas com ar ou com material absorvente de elevada porosidade (σ próximo a 1), por exemplo, lã de vidro ou lã de rocha, desde que não comprimidos no vão (HOPKINGS, 2007, p.457; VIGRAN, 2008, p.281; SANTOS, 2012, p.33).

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_0}{d} \left(\frac{1}{m''_1} + \frac{1}{m''_2} \right)} \approx 60 \sqrt{\frac{m''_1 + m''_2}{m''_1 m''_2 d}} \text{ [Hz]} , \quad (\text{Eq. 17})$$

sendo:

c_0 = velocidade de propagação do som = 340 m/s

ρ_0 = densidade do ar = 1,2 kg/m³

d = espaçamento entre os painéis [m]

m''_1 = massa superficial do painel 1 [kg/m²]

m''_2 = massa superficial do painel 2 [kg/m²].

No caso de haver material de absorção na cavidade, a frequência de ressonância pode ser calculada de forma melhor através de (HECKL, 1994, p. 552-554)

$$f_0 = 190 \sqrt{\frac{s''}{m''}} \quad [\text{Hz}] , \quad (\text{Eq. 18})$$

sendo s'' a rigidez dinâmica do material de absorção que pode ser determinado por

$$s'' = \frac{0,11}{d} \quad [\text{MN/m}^3] , \quad (\text{Eq. 19})$$

para materiais de absorção com resistividade ao fluxo de no mínimo 50 Nsm⁻³.

Importante observar que as Equações 17 e 18 são validas apenas para paredes duplas com revestimentos de pouca espessura e pouca rigidez de flexão.

A perda de transmissão sonora aumenta com o preenchimento da cavidade com material absorvente, desde que o material inserido não fique comprimido de modo que uma ponte mecânica seja formada e com ela parte da energia sonora seja transmitida de um lado a outro da parede (BISTAFA, 2011, p.287). Se o material absorvente ficar comprimido na cavidade entre os painéis da parede dupla, gerando acoplamento mecânico entre estes, a

parede dupla não mais se comportará como tal e sim, como um painel tipo *sandwich*⁴ (HOPKINGS, 2007, p.458), havendo transmissão de forças de cisalhamento entre as placas.

Acima da frequência de ressonância massa – mola – massa, 250 Hz, a parede se comporta de fato como uma parede dupla e sua PT aumenta aproximadamente 18 dB por banda de oitava (LONG, 2006, p.334; VIGRAN, 2008, p.282) conforme se verifica na Figura 18.

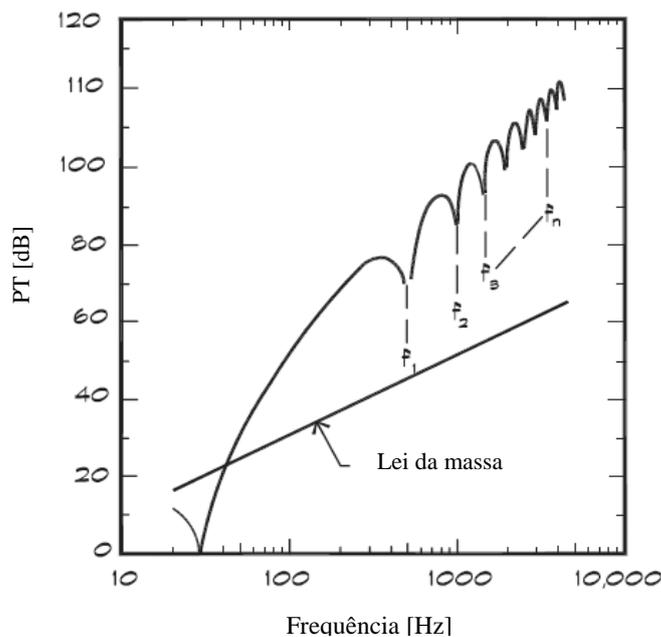


Figura 18 - Curva típica de perda de transmissão de uma parede dupla ideal.

Fonte: Long (2006, p. 335).

No exemplo da Figura 18 verificam-se quedas de PT nas frequências entre 500 e 5000 Hz, devido ao fenômeno de coincidência e às ressonâncias da cavidade.

No que se refere ao fenômeno da coincidência, a frequência crítica em paredes duplas é de difícil determinação, especialmente se os painéis são compostos por camadas de materiais diferentes, que é o caso no sistema LSF. Para um painel simples a frequência crítica, de

⁴ Geralmente um painel *sandwich* é formado por um interior (*core*) relativamente leve, colado ou rigidamente acoplado a um painel de revestimento de cada lado (HOPKINS, 2007, p. 480), podendo transmitir força de cisalhamento.

painéis simples, homogêneos e isotrópicos pode ser determinada através da Equação 14 (BIES; HANSEN, 2003, p 341).

Para painéis tipo *sandwich*, a frequência crítica é dada pela Equação 20 (BIES; HANSEN, 200, p 342):

$$f_c = \frac{C_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m''_{ef}}{B''_{ef}}} \quad [\text{Hz}] \quad , \quad (\text{Eq. 20})$$

sendo:

c_0 = velocidade de propagação do som = 340 m/s

m''_{ef} = massa eficaz considerando as m'' de cada painel [kg/m²]

B''_{ef} = rigidez eficaz à flexão [kg.m²/s²].

Além do fenômeno da coincidência, ocorrem ressonâncias (modos acústicos⁵). Os modos acústicos ocorrem na cavidade entre painéis, como em um tubo fechado em ambas as extremidades, sendo as frequências de ressonância da cavidade não preenchida, f_n , calculadas por:

$$f_n = \frac{nc_0}{2d} \quad \text{para } n=1, 2, 3... \quad [\text{Hz}] \quad , \quad (\text{Eq. 21})$$

sendo:

n = ordem do modo acústico

c_0 = velocidade de propagação do som = 340 m/s

d = espaçamento entre os painéis [m].

Nas frequências de ressonância, a PT da parede dupla é reduzida. Inserindo material de absorção na cavidade essas quedas na PT são amenizadas (LONG, 2006, p.335; HOPKINS, 2007, p.78; VIGRAN, 2008, p.279), podendo desaparecer para elevadas

⁵ Conjunto de ressonâncias em uma cavidade.

resistividades ao fluxo do material de absorção. Neste caso, as considerações feitas anteriormente, sobre aumento da rigidez da mola no modelo massa – mola – massa, e eventual acomplamento entre os painéis, são válidas e cuidados devem ser tomados.

O preenchimento da cavidade com material de absorção é representado de forma simplificada na Figura 19, para uma parede em *light steel frame*. No caso específico da parede em *light steel frame*, representada na Figura 19, os perfis metálicos também fazem a conexão mecânica entre as placas de revestimento presentes em ambos os lados da parede, transmitindo assim uma parcela da energia sonora para o ambiente adjacente e, comprometendo assim, parte do isolamento sonoro da parede. Tais conexões mecânicas também são responsáveis pela divergência entre resultados analíticos de PT e os resultados experimentais, principalmente em alta frequência (HECKL, 1994, p.553). Em casos extremos, ou seja, para placas de revestimentos e montantes muito rígidos, a parede dupla pode ter menos PT do que uma parede simples, de mesma massa superficial.

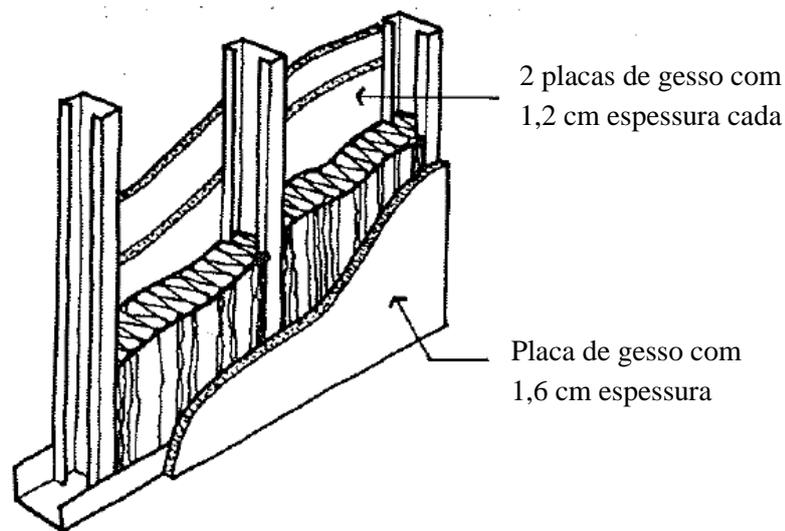


Figura 19 – Parede de *light steel frame* revestida com placas de gesso.

Fonte: Adaptado de Egan (1988, p.209).

Considerando a complexidade do problema de transmissão sonora através de paredes duplas e o grande número de fatores de influência existem modelos de complexidades diferentes para descrever a transmissão sonora através do elemento construtivo. Em função disso existem também equações específicas para determinar a perda de transmissão sonora para cada um dos modelos mais ou menos complexos.

Perda de transmissão em paredes de *light steel frame* e *wood frame*

Paredes com estrutura de aço ou madeira, são mundialmente utilizadas na construção civil e, por serem revestidas com placas em ambos os lados, também são classificadas como paredes duplas.

Segundo Warnock (2008, p.8), os fatores que interferem no isolamento sonoro ou na PT de uma parede de *light steel frame* são a massa superficial de cada placa de revestimento, a profundidade da cavidade formada entre um lado e outro da parede, a espessura e a densidade do material absorvente utilizado na cavidade entre os perfis e o espaçamento entre perfis. O mesmo autor indicou um aumento de 2 dB na PT de uma parede de *light steel frame*, com STC inicial de 38 dB, ao aumentar o espaçamento entre perfis de 40 para 60 cm.

Os perfis metálicos utilizados no sistema *light steel frame*, quando comparados com os caibros de madeira utilizados no sistema *wood frame*, proporcionam maior isolamento sonoro devido a menor rigidez torcional dos perfis (EGAN, 1988, p.208; IRVINE; RICHARDS 1998, p. 53), conforme indicado na Figura 20.

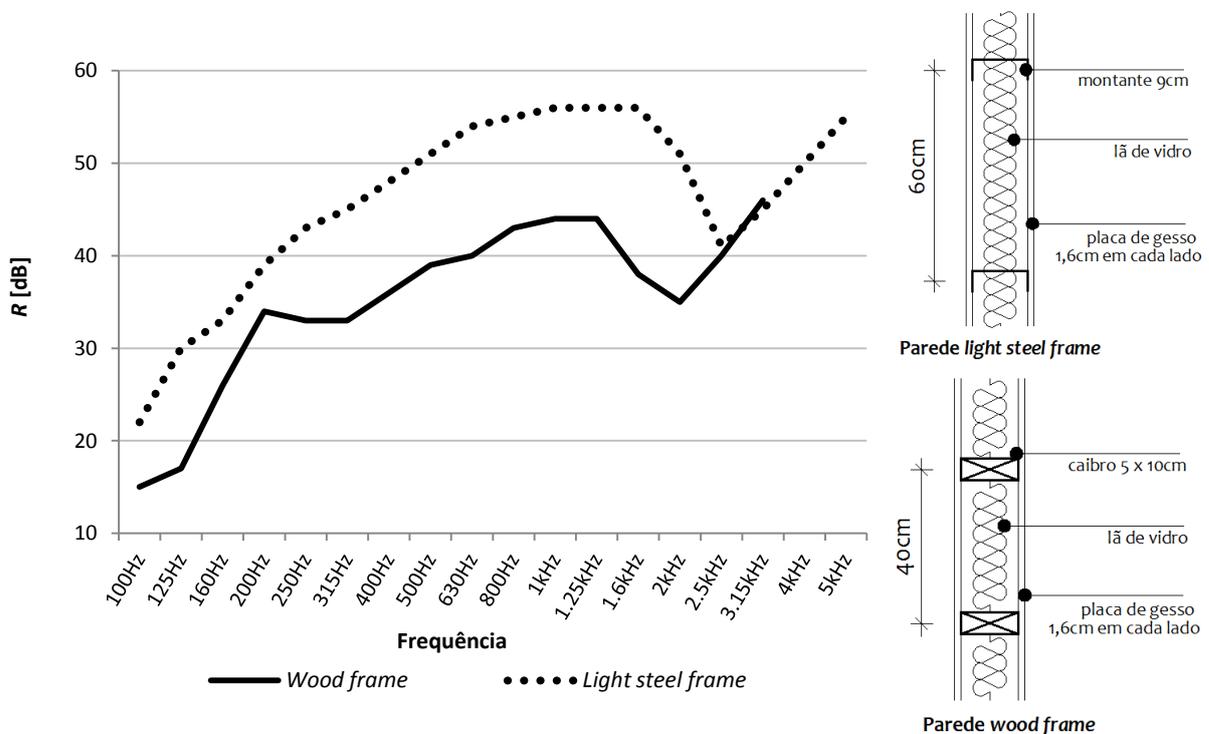


Figura 20 – Perda de transmissão sonora de parede em *light steel frame* e *wood frame*.

Fonte: Adaptado de Irvine (1998, p.54).

Os espectros de perda de transmissão representados na Figura 20 são de uma parede com estrutura metálica (*light steel frame*) e outra com estrutura de madeira (*wood frame*). Ambas utilizam lã de vidro na cavidade e são revestidas com uma placa de gesso com espessura de 1,6 cm em cada lado, resultando em um STC de 48 dB e de 37 dB, respectivamente. Pode-se observar, na seção das paredes, que o espaçamento entre os caibros de madeira é menor do que o espaçamento entre os montantes de aço leve. Desta forma reduzem-se os elementos de contato entre os lados da parede e isso também contribui para que menos vibração seja transmitida de um lado a outro da parede.

Conforme se observou na discussão da Figura 11 e a partir da análise da Figura 20, a rigidez é uma das propriedades que interfere no desempenho no isolamento sonoro de partições. A Figura 21 ilustra a perda de transmissão sonora, PT, de dois painéis de madeira compensada, com igual massa superficial.

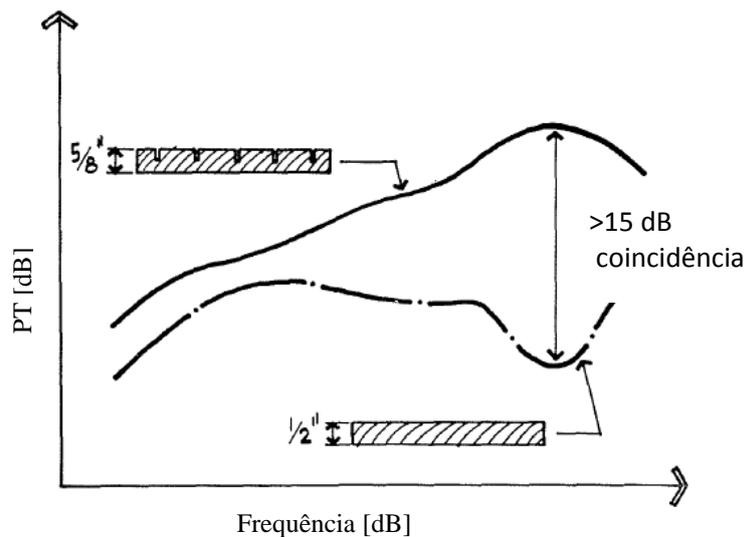


Figura 21 – Espectros de perda de transmissão de dois painéis de madeira com igual massa superficial.

Fonte: Adaptado de Egan (1988, p.180).

Pela lei da massa, ambas deveriam ter a mesma perda de transmissão, porém, devido a menor rigidez de flexão do painel sulcado, resultante da sua forma geométrica, este apresenta melhor desempenho no isolamento sonoro. A diferença de aproximadamente 15 dB verificada na PT entre os dois painéis, nas altas frequências, é devido à coincidência entre o

comprimento da onda⁶ sonora incidente e o comprimento da onda de flexão do painel. Tal fenômeno, representado na Figura 20, pode comprometer a eficiência no isolamento sonoro de uma partição, ou seja, reduzir significativamente sua PT.

Existem basicamente dois tipos de paredes secas, em relação à configuração da sua estrutura, a primeira e mais comum delas, observada nas Figuras 19 e 20, é quando as placas de revestimentos são fixadas em elementos estruturais comuns aos dois lados da parede. A segunda delas, representada na Figura 22, é quando a estrutura para fixação das placas é independente para cada lado da parede.

Para que haja elevada PT em paredes de *light steel frame* ou de *wood frame*, devem-se utilizar caibros ou montantes independentes para cada lado da parede (BISTAFA, 2011, p.289), conforme representado na Figura 22.

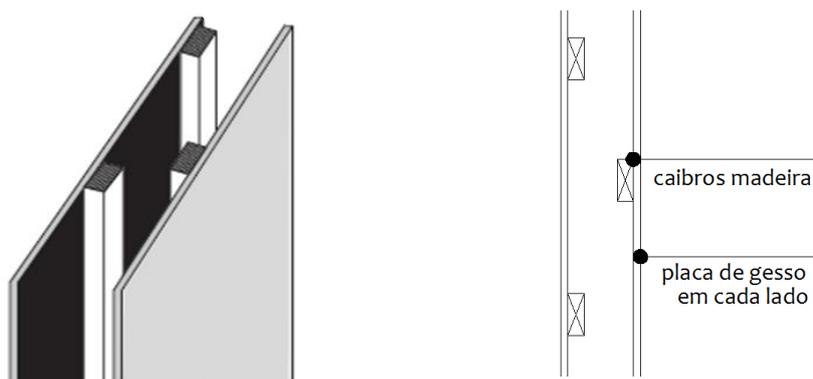


Figura 22 – Parede dupla em *wood frame* com caibros independentes e revestimento em placas de gesso: perspectiva e secção.

Fonte: Adaptado de Bistafa (2011, p.287).

A prática representada na Figura 22 reduzirá os elementos de contato entre os dois lados da parede, capazes de formar pontes mecânicas e com isso transmitir energia vibratória entre os ambientes adjacentes. Neste tipo de construção, o perímetro da montagem será a única ligação entre os dois lados da parede (EGAN, 1988, p. 208; IRVINE, 1998, p. 52 e BISTAFA, 2011, p. 291) e esta razão justifica o melhor desempenho no isolamento sonoro para este tipo de solução estrutural.

⁶ Distância entre duas amplitudes iguais em uma onda.

2.2. Medição da Perda de Transmissão Sonora

2.2.1 Tempo de Reverberação

O tempo de reverberação, TR , necessário para obtenção da área de absorção sonora da sala de recepção, A , e posteriormente do índice de redução sonora, R , é medido a partir dos procedimentos de medição descritos na ISO 354:2003, que trata da medição da absorção sonora em câmara reverberante, conforme descrito na Seção 2.4.2.

2.2.2 Perda de Transmissão Sonora Aérea

A perda de transmissão sonora PT é avaliada através de parâmetros como o índice de redução sonora, R , o índice de redução sonora ponderado, R_w , a redução de ruído, NR , e a classe de transmissão sonora, STC .

Para obtenção do R e do NR , os níveis de pressão sonora são medidos em câmara reverberante de transmissão aérea, utilizando a norma ISO 10140:2010, desenvolvida especificamente para avaliação do isolamento sonoro de elementos construtivos em laboratório.

O R_w é fornecido pelo medidor de nível de pressão sonora - MNPS, a partir dos valores dos níveis de pressão sonora (L_p) medidos na sala de emissão e recepção, ou pode ser obtido através de um método comparativo entre os valores de R medidos e uma curva de referência, conforme descrito na ISO 717-1:2013.

E a STC é obtida através da comparação entre os valores de R medidos e a curva STC de referência, conforme procedimento descrito na ASTM E413:2010.

2.2.3 Ruído de Fundo

A cada medição de PT o nível de pressão sonora do ruído de fundo deve ser medido na sala de recepção, com o objetivo de verificar se os valores medidos estão suficientemente abaixo do nível de pressão sonora do sinal, tornando assim válidos os resultados de PT determinados.

2.3. *Light steel frame*

2.3.1 Caracterização do sistema construtivo

O sistema construtivo mundialmente conhecido como *light steel framing* ou *light steel frame* é caracterizado por uma estrutura composta por perfis de aço leve formados à frio e protegidos contra corrosão através de zincagem feita por imersão à quente, além de outros subsistemas de fechamento que o complementam.

O *light steel frame*, LSF, é considerado um tipo de construção seca, uma vez que, a partir da utilização dos perfis metálicos e demais componentes industrializados, dispensa o uso da argamassa e do concreto utilizados na execução de elementos construtivos convencionais, como paredes, lajes, vigas e pilares; tornando, desta forma, o uso de água em obra praticamente desnecessário.

No Brasil, o sistema construtivo LSF é reconhecido pelo Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H), do Ministério das Cidades e regulamentado pelo Sistema Nacional de Avaliações Técnicas (SINAT). A Diretriz SINAT nº 003 estabelece critérios e requisitos mínimos aos quais o sistema deve atender em relação ao desempenho estrutural, segurança contra incêndio, estanqueidade contra à água, desempenho térmico, desempenho acústico e manutenibilidade. A mesma diretriz autoriza a utilização deste sistema construtivo para residências e edifícios uni e multifamiliares com até cinco pavimentos, como estrutura portante.

A Figura 23 apresenta uma obra em LSF, onde a estrutura metálica está parcialmente revestida com placas cimentícias e na Figura 24 pode-se observar o esqueleto de aço

galvanizado, composto por perfis guias⁷ e perfis montantes⁸, sendo revestido por painéis *oriented strand board*, OSB, membrana hidrófuga e placas cimentícias, respectivamente.



Figura 23 - Residência unifamiliar em *light steel frame*, Americana/SP, 2010.

Fonte: Autora.



Figura 24 - Residência unifamiliar em *light steel frame*, Palhoça/SC, 2009.

Fonte: Autora.

⁷ Peças metálicas estruturais e horizontais.

⁸ Peças metálicas estruturais e verticais que se encaixam pelo lado interno das guias.

Na Figura 25, as placas cimentícias recebem o tratamento de juntas, no encontro entre placas, feito com massa e fita tela, específicas para o sistema construtivo LSF.



Figura 25 - Residência multifamiliar em *light steel frame*, Eldorado do Sul/RS, 2012.

Fonte: Autora.

2.3.2 Métodos de montagem

Freitas (2006, p.24) descreve os quatro métodos de montagem do sistema *light steel framing*: *stick*, *painel*, *modular* e *balloon framing* ou *plataform framing*.

- Método *stick* – nesse método os perfis são cortados e aparafusados no canteiro de obra, formando os painéis. Pode ser considerado o método menos industrializado dentro do sistema construtivo LSF, já que toda a montagem é feita no local da obra, podendo haver atraso na conclusão da obra em função das condições climáticas. As vantagens sobre os demais métodos são a facilidade no transporte de peças de tamanho reduzido e a dispensa de o construtor ter um local para a pré-fabricação do sistema.
- Método *painel* - os painéis que formam as paredes, lajes e treliças, entre outros elementos, são montados na fábrica e posteriormente transportados à obra. Os painéis podem ter somente a estrutura metálica montada na fábrica, conforme demonstra a Figura 26, recebendo os demais revestimentos na obra ou chegarem à obra com as instalações elétricas e hidráulicas embutidas e revestidos com as placas OSB, gesso e

cimentícias, entre outras. Essa prática reduz significativamente o tempo de obra e proporciona maior controle e precisão estrutural no processo de montagem dos painéis. Provavelmente seja o método mais comumente utilizado no Brasil.



Figura 26 – Montagem dos painéis em light steel frame, na fábrica.

Fonte: Autora.

→ Método modular – a planta baixa arquitetônica é dividida em módulos com dimensões transportáveis e as unidades modulares resultantes são montadas em fábrica e entregues com as paredes já fixadas à laje seca. As instalações elétricas e hidrossanitárias são embutidas nos painéis de paredes e as placas de revestimento já fixadas, conforme Figura 27.



Figura 27 – Montagem do módulo de banheiro em *light steel frame*, na fábrica.

Fonte: Steel Construction Institute.

→ Método *balloon framing* e *plataform framing* - semelhante ao método modular, porém os módulos têm dimensões muito grandes e geralmente mais de um pavimento. É a versão mais industrializada dentre os métodos de montagem anteriormente descritos e também a de transporte mais difícil, devido a grande dimensão dos conjuntos.

2.3.3 Parede típica em *light steel frame*

As paredes em LSF são frequentemente confundidas com as paredes de gesso acartonado ou *dry wall*, como são conhecidas, devido a ambas possuírem uma estrutura metálica revestida por placas de gesso. No entanto, há diferenças consideráveis entre ambas. A espessura das chapas de aço utilizadas na fabricação dos perfis de uma parede de *dry wall*, bem como a secção destes perfis, tem quase a metade da espessura e da secção dos perfis utilizados no LSF. Isto faz com que, posteriormente, este tipo de paredes não possa cumprir função estrutural e sim, apenas de vedação, ao contrário do sistema construtivo LSF.

As paredes de LSF são compostas por painéis estruturais ou de vedação, formados pelos perfis de aço galvanizado unidos geralmente através de parafusos auto-atarrachantes. Os perfis utilizados nos painéis de paredes podem ser perfurados em alturas pré-determinadas, para a passagem das instalações elétricas e hidrossanitárias.

O espaçamento entre os montantes - perfis verticais que compõe os painéis de paredes, é de 40 ou 60 cm, conforme a solicitação de cargas a que a edificação estará sujeita, por exemplo, seu peso próprio ou cargas decorrentes da utilização ou forças do vento, entre outras. As placas utilizadas para o revestimento da estrutura mais comumente utilizadas são OSB, gesso acartonado e cimentícia, entre outras. Na maioria dos casos as placas de revestimento possuem 1,20 m de largura – medida múltipla do espaçamento entre montantes, que é de 0,40 ou 0,60 m - caracterizando assim, o LSF como um sistema construtivo modular e racional. As bordas das placas devem necessariamente estar apoiadas e serem aparafusadas nos perfis horizontais e verticais. Desta forma, atrás de cada placa há dois ou três perfis verticais, a exemplo da Figura 28.

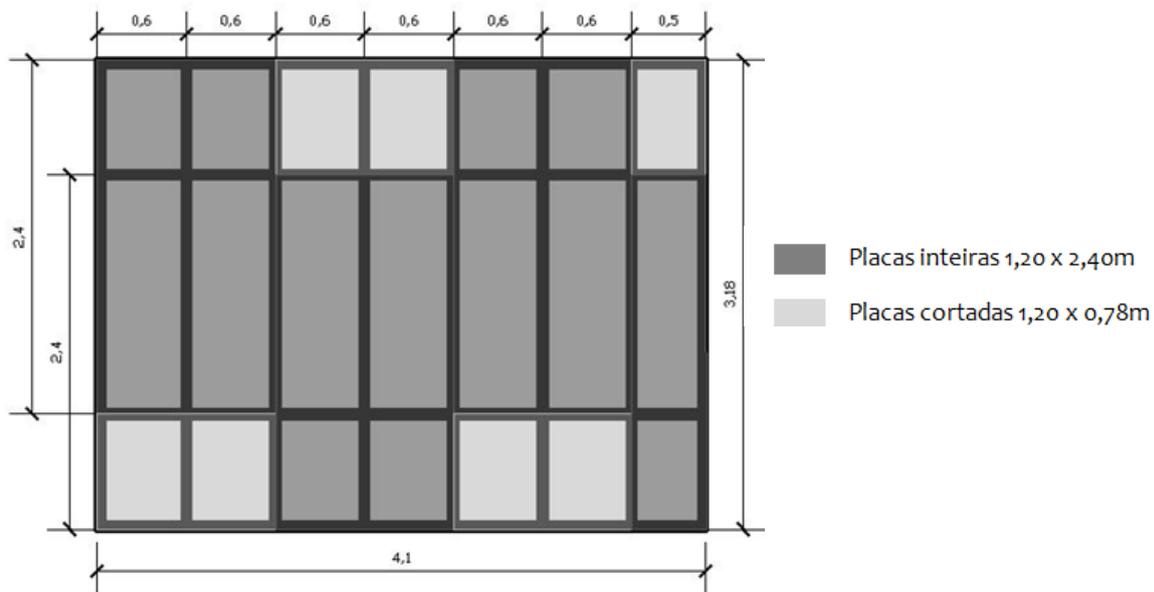


Figura 28 – Desenho de painel de parede em *light steel frame*: espaçamento entre os perfis estruturais e paginação do revestimento das placas, dimensões em metros.

Fonte: Autora.

A Figura 28 ilustra o painel de parede construído entre as câmaras reverberantes de emissão e recepção da UFSM, nas dimensões do vão, 4,10 x 3,18 m. Pode-se observar que os perfis distam 60 cm, com exceção do último com 50 cm, para completar a largura do vão existente no local. As placas, em dois tons de cinza, revestem um dos lados da parede, de forma desencontrada, para que as juntas horizontais não fiquem alinhadas e com isso haja diminuição da resistência estrutural do conjunto. Também é desejável que as juntas da camada de placas justaposta estejam desalinhadas destas, promovendo melhor travamento e rigidez estrutural. O mesmo vale para as juntas das placas utilizadas no outro lado da parede.

Uma parede típica em LSF recebe lã mineral – de vidro ou rocha - na cavidade formada entre os perfis, placas de gesso do lado interno e placas OSB, membrana impermeável e placas cimentícias do lado externo, conforme Figura 29.

Em todo perímetro das placas de revestimento, no encontro vertical e horizontal formado entre estas, devem ser previstas e executadas juntas de dilatação de aproximadamente 3 mm de afastamento, para que as eventuais alterações dimensionais ocasionadas por variações de umidade e temperatura do ar não provoquem pequenas rachaduras superficiais. Para o cobrimento das juntas de dilatação entre as placas de gesso,

utiliza-se fita de papel e massa, específicas para gesso, resultando no acabamento conhecido como junta invisível. Entretanto, as placas cimentícias utilizadas como revestimento externo, além do acabamento junta invisível, feito comumente com fita tela e massa, podem ter juntas aparentes, dispensando o tratamento de juntas.

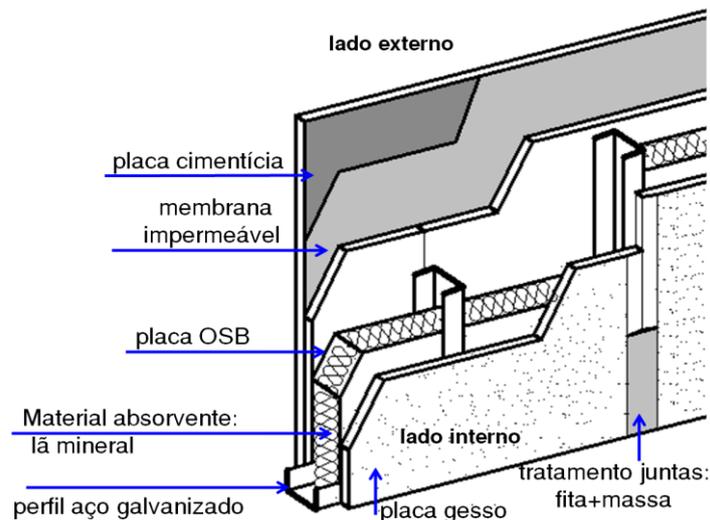


Figura 29 – Componentes utilizados em uma parede típica em *light steel frame*

Fonte: Autora.

2.3.4 Principais componentes do sistema: estrutura, preenchimento e revestimento.

2.3.4.1 Estrutura

A estrutura que compõe os painéis de LSF é composta por perfis de aço galvanizado denominados perfis. Os perfis, que incluem as guias e montantes, utilizados neste sistema construtivo, são obtidos a partir da perfilagem de bobinas de aço previamente protegido contra a corrosão atmosférica, em um processo conhecido como zincagem ou galvanização. As espessuras mais usuais são 0,8 e 0,95 mm. Na Figura 30, os perfis montantes são encaixados nos perfis guia para posterior aparafusamento.



Figura 30 – Encaixe dos montantes na guia em painel estrutural de *light steel frame*.

Fonte: <https://www.centersteel.com.br>.

2.3.4.2 Preenchimento

Lãs minerais:

A lã de vidro e lã de rocha são materiais incombustíveis, com baixa condutividade térmica e alta absorção sonora. Devido a estas propriedades, são amplamente utilizadas como isolante térmico e absorvedor acústico na cavidade formada entre os perfis estruturais da construção seca, conforme ilustra a Figura 31.



Figura 31 – Instalação da lã de vidro entre os perfis de *light steel frame*.

Fonte: Autora

A principal diferença entre ambas é a matéria prima utilizada na fabricação do produto: na primeira, rocha e na segunda, areia. Outra diferença está na densidade. A lâ de rocha geralmente é mais densa que a lá de vidro, tendo as duas igual espessura (OWENS CORNING, 2014).

2.3.4.3 Revestimento

Barras resilientes:

O objetivo das barras resilientes é providenciar o desacoplamento mecânico ou uma conexão flexível entre o revestimento e a estrutura, em paredes secas, porém, em se tratando de perfis de aço leve – usados no sistema LSF - a melhora na PT pode ser pequena (LONG, 2006, p.360).

As barras resilientes também são apontadas por Bistafa (2011, p.289) como elementos que, quando utilizados entre os perfis e as placas de revestimento, como ilustra a Figura 32, são capazes de amortecer a vibração mecânica das placas e reduzir a transmissão de energia sonora entre ambientes.

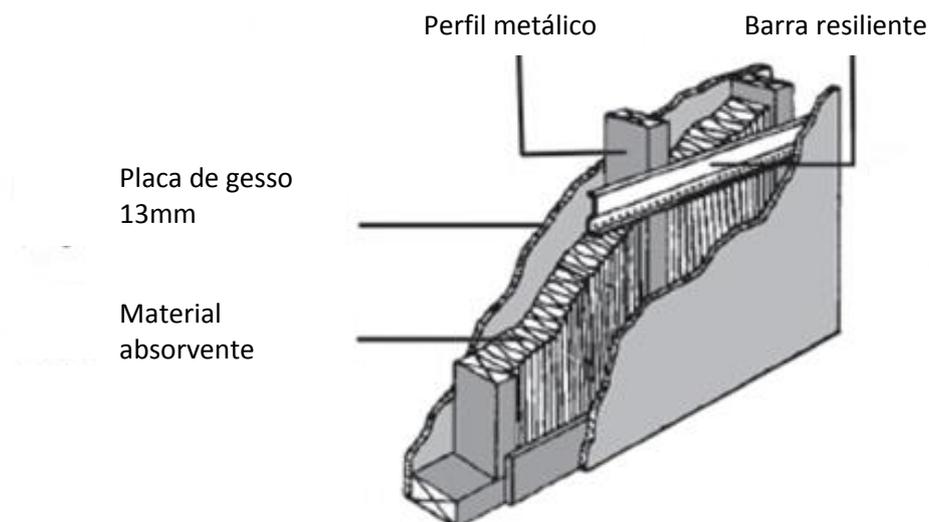


Figura 32 – Pannel fixado ao perfil através de barras resilientes.

Fonte: Bistafa (2011, p.288).

A utilização de barras resilientes em um dos lados da parede seca - entre os perfis estruturais e as placas de revestimento - promove a interrupção na transmissão sonora via estrutural, tornando o ar o caminho mais importante na propagação sonora e, conseqüentemente, causando uma melhora substancial na perda de transmissão sonora da parede (IRVINE, 1998, p.51).

Bistafa (2011, p. 288) classifica como duas as formas possíveis de fixação das placas de revestimento aos caibros ou montantes⁹: fixação em linha ou pontual. A fixação em linha ocorre quando o revestimento é aparafusado diretamente ao painel estrutural, formando uma linha de contato entre estes elementos. A fixação pontual é quando as placas de revestimento são aparafusadas às barras resilientes, limitando a superfície de contato entre as placas de revestimento e os perfis estruturais. A segunda forma de fixação é responsável por promover maior redução da energia sonora transmitida ao meio seguinte.

Egan (1988, p.211) menciona que a classe de transmissão sonora STC de uma parede pode ser aumentada utilizando barras resilientes em um dos lados dos perfis de madeira, no sistema *wood frame*. O autor destaca ainda que, para que a resiliência do sistema seja eficiente, deve-se utilizar parafusos curtos para a instalação das barras resilientes, de maneira a não conectar a placa de revestimento ao caibro, conforme apresentado na figura 33.

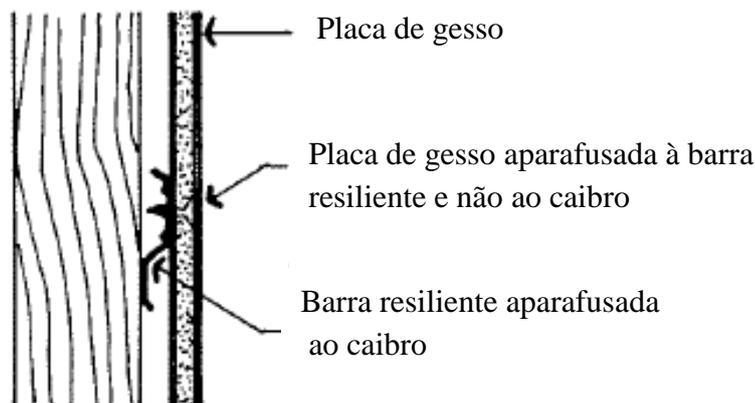


Figura 33 – Barra resiliente fixada entre a placa de gesso e o caibro estrutural.

Fonte: Egan (1988, p.211).

⁹ Na estrutura de painéis do sistema *wood frame* utilizam-se caibros e na estrutura dos painéis em *steel frame* utilizam-se montantes.

Réguas *SmartSide*:

As réguas *SmartSide* são fabricadas com a mesma tecnologia e matéria prima dos painéis OSB, sendo protegidas contra o ataque de cupins e a degradação de fungos. Recebem adicionalmente uma película que confere ao produto resistência às intempéries e que permite sua aplicação como revestimento tanto interno como externo. Disponíveis nas versões placas ou réguas, as peças possuem ranhuras que lhes conferem aparência semelhante à madeira natural. Ambas as versões devem ser aplicadas sobre a membrana hidrófuga, sendo que a versão em placas dispensa a necessidade de placas OSB sob a membrana hidrófuga (LP BUILDING PRODUCTS, 2014).

Placas OSB:

O termo OSB vem do inglês e significa *Oriented Strand Board* ou painel de tiras de madeira orientadas. Trata-se de um painel estrutural que, quando fixado à estrutura metálica, atua como um diafragma vertical, contribuindo significativamente para a estabilidade estrutural do sistema. As placas são feitas com tiras de madeira provenientes de reflorestamento, orientadas em camadas perpendiculares, unidas com resina resistentes a intempéries e prensadas sob alta temperatura, garantindo sua resistência mecânica e estabilidade. As placas OSB possuem tratamento contra cupim e as espessuras comercialmente disponíveis vão de 9 a 18 mm (LP BUILDING PRODUCTS, 2014).

Placas de gesso acartonado:

Para uso exclusivamente interno, as placas de gesso são constituídas de um núcleo de gesso natural e aditivos e revestidas com duas lâminas de cartão. O gesso proporciona a resistência à compressão e o cartão, resistência à tração. A união destes dois elementos torna a placa resistente. Comercialmente disponíveis nas versões para utilização em áreas secas, áreas úmidas e resistentes ao fogo, nas espessuras de 9,5 a 15 mm e com borda rebaixada ou plana (PLACO, 2014).



Figura 34 – Placas de gesso para uso em áreas secas, áreas úmidas e resistentes ao fogo.

Fonte: PLACO.



Figura 35 – Painel OSB 9,5 mm de espessura

Fonte: Autora.

Membrana hidrófuga:

A membrana hidrófuga foi criada especialmente para uso na construção seca – *light steel frame* e *wood frame*. É fabricada com fibras de polietileno de alta densidade, unidas através de um processo de centrifugação que lhe garante resistência à tração. Quando aplicada em paredes externas atua como barreira contra vento, poeira e umidade, permitindo a saída do vapor d'água do interior das paredes e evitando o acúmulo de umidade e a proliferação de fungos no interior das paredes. Pode ser fixada diretamente sobre os perfis de aço ou sobre as placas OSB (LP BUILDING PRODUCTS, 2014).



Figura 36 – Membrana hidrófuga.

Fonte: Autora.



Figura 37 - PAINEL XPS.

Fonte: Autora.

Painéis XPS:

Leves e rígidos, os painéis de espuma rígida de poliestireno extrudado (XPS), possuem alta resistência à compressão e à flexão, alta estabilidade dimensional, baixa absorção de água e alta resistência térmica. Podem ser usados como fechamentos verticais ou em coberturas e lajes. Quando usados no revestimento de paredes secas, as placas podem ser fixadas sobre as placas OSB - ou diretamente sobre os montantes de aço ou madeira - e recebem uma camada de argamassa para acabamento. Disponíveis nas espessuras de 25 a 75 mm, com bordas retas ou encaixe tipo macho e fêmea (OWENS CORNING, 2014).

Placas de óxido de magnésio:

As placas de óxido de magnésio¹⁰ podem ser aplicadas como revestimento de paredes, como piso ou como cobertura. Disponíveis em espessuras de 6 a 16 mm, estas placas são resistentes à umidade, raios ultravioleta, não utilizam materiais tóxicos ou metais pesados na sua composição e possuem boa resistência contra o fogo (ECCOBOARD PRODUCTS, 2014). Na Figura 38 as placas de óxido de magnésio são aparafusadas aos perfis metálicos estruturais, sobre a membrana hidrófuga. Observa-se que as placas são dispostas de forma desencontrada - prática comum em obras no sistema construtivo LSF - evitando o encontro horizontal de juntas entre placas e, assim, aumentando a estabilidade estrutural da parede.



Figura 38 – Instalação das placas de óxido de magnésio na parede de *light steel frame*.

Fonte: Autora.

¹⁰ Cujos nomes comerciais dados pelo fabricante são placas *Eccoboard*.

Placas cimentícias impermeabilizadas:

Amplamente utilizadas na construção seca no Brasil, como revestimento externo e interno – no caso das áreas molhadas - as placas cimentícias não utilizam amianto. São produzidas a partir de uma mistura homogênea de cimento Portland, agregados naturais e fibras de celulose reforçada com fios sintéticos de polipropileno. Recebem tratamento de impermeabilização por imersão, garantindo baixa absorção de umidade. Têm alta resistência a impactos, são imcombustíveis, apresentam baixa condutividade térmica e bom isolamento acústico, devido à densidade do produto. Disponíveis nas espessuras de 6, 8, 10 e 12 mm, com bordas rebaixadas – para facilitar o tratamento das juntas em acabamento do tipo “junta invisível” - e com bordas planas, para acabamento como painéis de juntas aparentes. (BRASILIT, 2014).



Figura 39 – Instalação da placa cimentícia sobre a membrana impermeável.

Fonte: Autora.

Réguas *Siding* vinílico:

O *Siding* vinílico é o revestimento em PVC para uso externo que possui resistência, leveza, durabilidade, rapidez de instalação e de baixa manutenção. É utilizado com revestimento externo de fachadas, especialmente em construções secas. Resistente à ação de intempéries – umidade, maresia, radiação UV e poluição - é lavável e dispensa pintura, conservando aparência de novo (LP BULDING PRODUCTS, 2014).

2.3.5 Sustentabilidade do sistema construtivo *light steel frame*

“Um dos desafios da construção é diminuir a intensidade de uso de materiais, ou seja, construir mais utilizando menos materiais” (ISAIA, 2007, p.97 e 98). Isaia (2007) faz referência também à importância de se analisar o ciclo de vida dos materiais e o impacto ambiental que as diversas etapas da construção civil envolvem, desde a extração das matérias primas, passando pelas atividades de transporte necessárias e pela quantidade de energia envolvida no processo, abrangendo até a produção de resíduos.

O LSF é um sistema classificado como CES (Construção Energética Sustentável), sendo considerado sustentável devido ao excelente desempenho térmico das edificações, o que, em consequência, gera economia de energia, tanto no processo construtivo, como após a sua ocupação. Este método adota materiais ecologicamente corretos, como o aço e OSB e, devido à sua metodologia construtiva, possui um melhor aproveitamento dos materiais, reduzindo a geração de resíduos e o consumo de água durante a obra.

Após a água, o concreto e seus derivados cimentícios são os materiais mais consumidos pelo homem no planeta. Isaia (2007, Apud John, 2002) responsabiliza ainda a indústria cimenteira por 10% do CO₂ emitido no Brasil. De encontro a estas informações, é importante salientar que o consumo de cimento em uma obra de LSF é bastante reduzido, haja vista que os elementos tradicionalmente feitos em concreto - lajes, vigas e pilares - são substituídos por peças de aço. Além de o aço poder ser 100% reciclável, a estrutura de uma edificação em LSF pode ser desmontada e reutilizada inúmeras vezes.

2.4 Normas técnicas pertinentes

2.4.1 Diretriz SINAT 003:2012 – Sistemas construtivos estruturados em perfis leves de aço conformados a frio, com fechamentos em chapas delgadas – Sistemas leves tipo *light steel framing*

O Governo Federal, através da Secretaria Nacional de Habitação, criou o Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H), com o objetivo de tornar o setor de construção civil brasileira mais competitivo, reduzir os custos concomitantemente à

elevação da qualidade das construções e buscar uma confiabilidade maior dos agentes financiadores e do consumidor final.

A busca por estes objetivos envolve um conjunto amplo de ações, como a qualificação de construtoras e de projetistas, a melhoria da qualidade de materiais, a formação de mão de obra qualificada, a capacitação de laboratórios para a avaliação técnica de tecnologias inovadoras e a elaboração de normatização técnica, a exemplo da diretriz nº 003:2012.

A diretriz nº 003:2012 trata especificamente do sistema construtivo *light steel framing*. Dividida em seis partes, a diretriz caracteriza o sistema construtivo, define requisitos e critérios de desempenho, estabelece a metodologia de avaliação do produto, recomenda sobre a análise global do desempenho do produto e o controle da qualidade na montagem.

Dentro da parte 3 da referida diretriz - requisitos e critérios de desempenho - o subitem 3.5 aborda especificamente o desempenho no isolamento sonoro aos ruídos externos, proporcionado por produtos dispostos em fachadas, neste sistema construtivo. Para verificação do atendimento aos requisitos de isolamento sonoro são aceitáveis medições realizadas tanto em campo quanto em laboratório.

Para a determinação dos valores do índice de redução sonora R as medições de perda de transmissão sonora PT devem ser realizadas em bandas de 1/3 de oitava, entre 100 e 5000 Hz, e para a determinação do índice de redução sonora ponderado R_w a diretriz recomenda que seja utilizado o procedimento especificado na ISO 717-1:2013.

Os critérios para avaliação da isolação sonora promovida pelos elementos da fachada devem estar em conformidade com a NBR 15575-4, conforme os valores mínimos estabelecidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Índice de redução sonora ponderado mínimo recomendado para elementos da fachada, R_w .

Elemento	R_w [dB]	$R_w + 5$ [dB]
Fachada	30	35

Nota: Valores referenciais para fachadas cegas, por isso deve ser observado a isolação sonora do caixilho a ser empregado para desempenho acústico da parede

Fonte: Diretriz SINAT 003 (2012, p.31).

A Tabela 2 prevê um acréscimo de 5 dB ao índice de redução sonora ponderado mínimo ($R_w + 5$ dB) no caso do edifício estar localizado em áreas de tráfego rodoviário, ferroviário ou aéreo intensos.

2.4.2 ISO 354:2003 - *Measurement of sound absorption in a reverberation room*

Esta norma descreve os procedimentos de medição da absorção sonora e do tempo de reverberação – TR, em câmara reverberante. A medição do TR é necessária para obtenção área de absorção sonora equivalente na sala de recepção. A área de absorção sonora equivalente na sala de recepção é utilizada na equação de Sabine (Eq. 5) para posteriormente calcular o índice de redução sonora R , grandeza que quantifica a perda de transmissão sonora de um elemento construtivo, como uma parede, por exemplo.

O TR deve ser medido em bandas de 1/3 de oitava - na faixa de frequência de 100 Hz a 5000 Hz - utilizando uma fonte omnidirecional em, no mínimo, duas posições e três posições de microfone para cada posição de fonte, totalizando seis medições. As duas posições de fonte devem distar pelo menos 3 m uma da outra, estar a pelo menos 1 m de qualquer superfície – inclusive do elemento teste - e pelo menos 2 m distante de cada posição de microfone. Cada posição de microfone deve distar 1,5 m uma da outra e estar a pelo menos 1 m de qualquer superfície ou do elemento teste. A norma indica que a umidade relativa do ar esteja entre 30 e 90%, e que a temperatura ambiente seja de, no mínimo, 15 °C durante as medições de TR.

2.4.3 ISO 10140:2010 – *Laboratory measurement of sound insulation of building elements*

Esta norma, composta por cinco partes, foi desenvolvida para avaliação do isolamento sonoro de elementos construtivos em laboratório. As partes utilizadas na presente pesquisa, para a avaliação da perda de transmissão sonora de uma parede em laboratório, foram:

- ISO 10140-2:2010 - *Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 2 – Measurement of airborne insulation*

- ISO 10140-4:2010 - *Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 4 - Measurement procedures and requirements.*
- ISO 10140-5:2010 - *Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 5 - Requirements for test facilities and equipment.*

Parte 2 – Medição do isolamento sonoro

Essa parte da norma especifica o método de medição do isolamento sonoro para elementos construtivos como paredes, janelas e portas, em laboratório. Os resultados obtidos podem ser utilizados para comparação das propriedades de isolamento sonoro entre diferentes elementos, para classificação dos elementos construtivos de acordo com sua capacidade de isolamento e como auxílio a projetistas para estimar o desempenho do isolamento sonoro das edificações *in loco*.

Como procedimento geral, recomenda-se que na sala de emissão seja gerado um campo sonoro difuso, através do uso de uma fonte omnidirecional em, no mínimo, duas posições, e que os resultados do índice de redução sonora R estejam em acordo com a ISO 717-1:2013 e sejam dados para a faixa de frequências de 100 a 5000 Hz, em bandas de 1/3 de oitava

A norma determina que as instalações do laboratório, onde as medições serão realizadas, devem ser capazes de suprimir as transmissões indiretas, de forma a não comprometer a avaliação do elemento teste.

Ainda nesta parte, a norma recomenda que seja elaborado um relatório de medição no qual conste o nome e endereço do laboratório onde foram realizadas as medições, o tamanho, a forma e o volume das câmaras reverberantes, o dia das medições, a temperatura, pressão e umidade relativa do ar, entre outras informações.

Parte 4 – Procedimentos de medição e requisitos

A norma recomenda que a medição do nível de pressão sonora – ao utilizar um microfone rotativo - deve ter duração igual ao tempo que o microfone leva para dar uma volta completa, e não menos do que 30 s, e que o raio de varredura deste seja de no mínimo 1 m. O

som deve ser gerado na sala de emissão por uma fonte sonora em no mínimo duas posições ou uma fonte sonora rotativa.

O Nível de pressão sonora, NPS, do ruído de fundo deve ser medido na sala de recepção de forma a assegurar que ele esteja no mínimo 6 dB abaixo do nível de pressão sonora do sinal mas que, preferencialmente, seja 15 dB menor do que este.

Parte 5 – Requisitos para as instalações e equipamentos

As instalações do laboratório para medição do isolamento ao ruído aéreo consistem em duas câmaras reverberantes adjacentes verticalmente e com uma abertura entre elas, onde o elemento teste - no caso a parede - será instalada cobrindo todo o vão. O volume de cada câmara deve ser de no mínimo 50 m^3 , sendo que ambas devem ter uma diferença no volume e nas dimensões lineares de, no mínimo, 10%. A sala com maior volume deverá ser a sala de emissão. Aconselha-se que, no caso de avaliação do isolamento sonoro de uma parede, esta tenha aproximadamente 10 m^2 . O TR recomendado para as salas onde serão realizados os ensaios de isolamento sonoro é entre 1 e 2 s, para frequências $\geq 100 \text{ Hz}$.

Quando avaliadas paredes leves ($m'' < 150 \text{ kg/m}^2$), como uma parede de *light steel frame*, por exemplo, não há necessidade de considerar a transmissão sonora indireta - via estrutura do laboratório - pois esta é irrelevante se comparada à energia sonora transmitida pelo elemento teste.

A posição das fontes sonoras deve ser adequada para que o som seja igualmente distribuído na sala de emissão, criando um campo sonoro difuso no ambiente. A distância entre posições de fontes não deve ser menor do que 0,7 m e, em pelo menos duas posições, essa distância deve ser, no mínimo, 1,4 m. A distância entre as superfícies da sala e o centro da fonte não deve ser inferior a 0,7 m.

2.4.4 ISO 717:2013 - *Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of buildings elements - Part 1- Airborne sound insulation*

A parte 1 desta norma trata especificamente de isolamento sonoro de ruído aéreo, definindo o número único que quantifica o isolamento sonoro em edificações, através do R' , e o isolamento sonoro de elementos construtivos medidos em laboratório, através do R_w , como paredes, portas e janelas, por exemplo.

A norma apresenta a metodologia para obtenção do R_w , - índice de redução sonora ponderado - através do método comparativo, segundo a ISO 10140-2:2010, ISO 140-4:1998 e ISO 140-5:1998 e fornece a tabela com os valores que compõe a curva de referência de R , para ruído aéreo, conforme a Tabela 3.

Os valores do índice de redução sonora R descritos na Tabela 3, plotam as curvas de referência em bandas de 1/3 de oitava e em bandas de oitava, que deverão ser utilizadas para obtenção do índice de redução sonora ponderado R_w , conforme o método anteriormente descrito na seção 2.1.3.2.

Tabela 3 – Valores de índice de redução sonora ao ruído aéreo para compor a curva de referência.

Frequência	Valor de referência [dB]	
	Bandas de 1/3 oitava	Bandas de oitava
100	33	36
125	36	
160	39	
200	42	45
250	45	
315	48	
400	51	52
500	52	
630	53	
800	54	55
1000	55	
1250	56	
1600	56	56
2000	56	
2500	56	
3150	56	-

Fonte: ISO 717-1: 2013 (p.3).

2.4.5 NBR 15575:2013 – Edificações habitacionais – Desempenho

Depois de passar por um longo período de revisão, em 2013 entrou em vigor a norma brasileira que regulamenta o desempenho de edificações residenciais de até cinco pavimentos.

A NBR 15575:2013 estabelece requisitos, critérios e métodos de avaliação para cada sistema que compõe uma edificação, através de seis partes, compreendendo:

- Parte 1: Requisitos gerais;
- Parte 2: Sistemas estruturais;
- Parte 3: Sistemas de piso;
- Parte 4: Sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE;
- Parte 5: Sistemas de coberturas;
- Parte 6: Sistemas hidrossanitários.

A parte 4 da referida norma trata das vedações verticais internas e externas, sendo que o item 12, especificamente, apresenta os requisitos, critérios e a metodologia para a verificação do isolamento acústico entre os meios externo e interno, entre unidades autônomas e entre dependências de uma unidade e áreas comuns.

A NBR 15575-4 recomenda que o isolamento sonoro de componentes e elementos construtivos - como paredes, portas e janelas, por exemplo - seja avaliada em laboratório segundo a metodologia descrita na ISO 10140-2.

Os parâmetros acústicos adotados para a avaliação de vedações verticais internas e externas estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4- Parâmetros acústicos de verificação conforme NBR 15575-4:2013.

Símbolo	Descrição	Norma	Aplicação
R_w	Índice de redução sonora ponderado	ISO 10140-2 ISO 717-1	Componentes, em laboratório
$D_{nT,w}$	Diferença padronizada de nível ponderada	ISO 140-4 ISO 717-1	Vedações verticais e horizontais internas, em edificações (paredes, etc.)
$D_{2m,nT,w}$	Diferença padronizada de nível ponderada a 2m de distância da fachada	ISO 140-5 ISO 717-1	Fachadas, em edificações, fachadas e coberturas em casas térreas e sobrados

Fonte: NBR 15575-4:2013 (p.30).

O R_w é o parâmetro utilizado para avaliar, em laboratório, o isolamento sonoro proporcionado por elementos utilizados nas vedações verticais, como paredes e esquadrias, entre outros. O método de ensaio recomendado é descrito na ISO 10140.

De forma a possibilitar aos usuários das edificações fazerem uma comparação entre diferentes elementos de fachadas e de fornecer as informações necessárias aos projetistas e consumidores, a norma classifica o nível de desempenho das vedações verticais em: mínimo (M), intermediário (I) e superior (S). Os níveis mínimos de desempenho devem ser obrigatoriamente atendidos, enquanto que os demais são opcionais. A norma recomenda ainda que construtores e incorporadores classifiquem seus sistemas conforme os três níveis de desempenho.

No anexo “F” da referida norma há uma tabela que fornece os valores exigidos para o índice de redução sonora ponderado R_w de elementos utilizados em fachadas e medidos em laboratório, em função da localização onde a habitação está inserida e o respectivo ruído ambiental presente, classificado de I a III, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 - Índice de redução sonora ponderado medido em laboratório.

Classe de ruído	Localização da habitação	R_w [dB]	Nível de desempenho
I	Habitação localizada distante de fontes de ruído intenso de quaisquer naturezas	≥ 25	M
		≥ 30	I
		≥ 35	S
II	Habitação localizada em áreas sujeitas e situações de ruído não enquadráveis nas classes I e III	≥ 30	M
		≥ 35	I
		≥ 40	S
III	Habitação sujeita a ruído intenso de meios de transporte e de outras naturezas, desde que seja de acordo com a legislação	≥ 35	M
		≥ 40	I
		≥ 45	S

Fonte: NBR 15575-4:2013 (p.58).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Diferentes procedimentos permitem avaliar o isolamento ou a perda de transmissão sonora de um elemento construtivo, como uma parede, por exemplo. Analiticamente, numericamente ou através de medições em campo ou em laboratório. Cada um dos procedimentos mencionados possui vantagens e desvantagens em relação aos demais. A proposta para a presente pesquisa é realizar as medições de perda de transmissão sonora, PT, em laboratório, controlando desta forma, mais adequadamente, as técnicas de montagem e avaliando o desempenho acústico de paredes externas utilizando diferentes componentes do sistema construtivo LSF.

A presente pesquisa será desenvolvida utilizando o método experimental e a abordagem quantitativa, conforme as etapas abaixo descritas.

3.1 Definição dos materiais e técnicas a serem empregados

As paredes de LSF serão construídas na câmara reverberante de transmissão sonora do laboratório de acústica da UFSM. Sua montagem será de acordo com as técnicas utilizadas pelo sistema construtivo, descritas no Manual de *Steel Frame* do Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA) e na Diretriz nº 003 do Sistema Nacional de Avaliações Técnicas (SINAT), do Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H), desenvolvida pelo Ministério das Cidades e Governo Federal. Os materiais utilizados serão os componentes estruturais, de preenchimento e de vedação, usualmente empregados pelo sistema LSF no Brasil, também descritos na bibliografia anteriormente mencionada.

Os componentes para estrutura, preenchimento e revestimento utilizados na execução das paredes externas em LSF, sua espessura e massa superficial são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Relação dos materiais utilizados nas paredes de *light steel frame* e suas características.

Material	Fabricante	Espessura [mm]	m'' [kg/m ²]
Barra resiliente	-	0,5	39
Fita adesiva de espuma de PVC	Engefitas	3	0,6
Fita de papel	Placo	-	-
Fita tela	Brasilit	-	-
Lã de vidro	Owens Corning	90	1,1
Lã de vidro	Isover	50	0,6
Massa para gesso	Placo	-	-
Massa para cimentícia	Brasilit	-	-
Membrana impermeável	Lp Building Products	-	0,11
Painel OSB	Lp Building Products	9,5	6,2
Painel OSB	Lp Building Products	11,1	7,2
Painel XPS	Owens Corning	25	0,9
Perfil de aço galvanizado	Center Steel	0,8	62
Placa cimentícia	Brasilit	10	17
Placa de gesso acartonado <i>standard</i>	Placo	12,5	8,4
Placa de óxido de magnésio	Ecco Board Products	10	10
Régua <i>Siding</i> vinílico	Lp Building Products	1,5	2
Régua <i>SmartSide</i>	Lp Building Products	9,5	5,5

Fonte: Autora.

3.2 Execução das paredes em *light steel frame* e as diversas composições de revestimento

A montagem das paredes contou com mão de obra especializada, gentilmente cedida por uma construtora do ramo de LSF de Porto Alegre, e seguiu rigorosamente as técnicas e procedimentos determinados pelo Manual de *Steel Frame* do Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA) e anteriormente descritos na Seção 2.3.3, que descreve a montagem de uma parede típica neste sistema construtivo.

As etapas de montagem do painel estrutural de aço galvanizado, a fixação e a vedação deste no vão da câmara, bem como o preenchimento da cavidade com material absorvente, o revestimento com as diversas placas internas e externas e o tratamento de juntas, foram diariamente registrados, por meio de fotografias, conforme algumas imagens que seguem.

A ancoragem dos painéis estruturais de aço galvanizado à estrutura da câmara reverberante da UFSM foi feita com *parabolts*, fixando as guias metálicas inferior e superior e os montantes laterais do painel diretamente ao contrapiso, paredes e laje superior, feitos em concreto.

Devido às dimensões da porta de acesso à câmara reverberante, o painel estrutural de aço teve que ser dividido em duas partes. No perímetro dos painéis estruturais - entre o aço e as superfícies da parede, piso e teto da câmara reverberante - foi colada a fita adesiva de espuma de PVC, conhecida como banda acústica. Para complementar a vedação entre estes elementos, foi utilizada espuma expansiva de poliuretano (EPU), conforme representado na Figura 40.



Figura 40 – Painel estrutural de aço fixado no vão da câmara e recebendo vedação com espuma expansiva de poliuretano.

Fonte: Autora.

O painel estrutural de aço foi revestido externamente e internamente por painéis OSB com duas espessuras distintas, conforme relacionado na Tabela 6. Os painéis de maior espessura foram utilizados como revestimento externo, e os de menor espessura foram utilizados como revestimento interno das paredes de LSF. Usualmente, painéis OSB eram utilizadas somente do lado externo da parede, porém, a utilização também do lado interno permite que móveis e outros elementos pesados possam ser fixados com mais flexibilidade à parede, sem a necessidade de encontrar o montante de aço atrás do gesso para aparafusar. Essa prática, embora não exigida pelas normas, começa a ser adotada por diversas construtoras especializadas em LSF.

As placas de revestimento foram aparafusadas sobre as guias e montantes a cada 40 cm, aproximadamente, usando parafusos específicos¹¹ conforme a superfície a conectar, por exemplo, metal-metal ou metal-placa, e a espessura das placas. Pelo lado externo da parede, sobre os painéis OSB, foi instalada a membrana hidrófuga, conforme Figura 41.



Figura 41 – Revestimento do painel estrutural utilizando painel OSB e instalação da membrana hidrófuga sobre os painéis OSB.

Fonte: Autora.

A cavidade entre os perfis de LSF foi preenchida com lã de vidro ora de 50 mm, ora de 90 mm e, em outra composição ainda, mantida vazia, com objetivo de avaliar a influência da utilização do material absorvente na PT da parede.

Na Figura 42, o rolo de lã de vidro com papel *kraft*, na espessura de 50 mm, é instalado no vão entre os perfis. Na outra composição de parede, utilizando lã de vidro de 90 mm de espessura, a fita adesiva de espuma de PVC é colada no lado interno da parede, entre os perfis e as placas de revestimento. Esta fita de espuma de PVC é comumente utilizada em obras de LSF para promover a vedação entre o painel de aço e o contrapiso de concreto, porém, na presente pesquisa, foi instalada de forma experimental em uma das faces dos perfis, conforme a Figura 42, para avaliação da influência no isolamento sonoro que esta prática pode ter.

¹¹ parafusos auto-atarrachantes com ponta “broca ou agulha” e cabeça “lenticilha ou trombeta”.



Figura 42 – Instalação da lã de vidro 50 mm e fita adesiva de espuma de PVC sendo colada em uma das faces dos perfis.

Fonte Autora.

O tratamento das juntas nas placas de gesso foi feito com fita de papel e massa, específicos para a finalidade, conforme representado na Figura 43. A utilização de barras resilientes entre os perfis e as placas de gesso, conforme a Figura 43, tiveram o desempenho na PT avaliado em três composições de paredes, utilizando como revestimento externo placas cimentícias, régua *Smartside* e painéis XPS, respectivamente.



Figura 43 - Fixação das barras resilientes aos perfis e lado interno da parede de *light steel frame* revestida com placas de gesso.

Fonte: Autora.

As barras resilientes ou canais resilientes utilizados nos sistemas construtivos *light steel frame* e *wood frame* são barras de metal flexíveis, projetadas para suportar as camadas de gesso, ou outras placas de revestimento, enquanto promovem a isolação mecânica dos perfis (LONG, 2006, p.358).

Por não estarem disponíveis no mercado brasileiro, foram fabricadas barras resilientes metálicas baseadas nos modelos encontrados nos Estados Unidos. As peças foram confeccionadas na própria UFSM, utilizando chapas de aço galvanizado com espessura de 5 mm, dobradas e perfuradas longitudinalmente, conforme o plano de corte e dobra, em *Autocad*¹², representado na Figura 44. Cada barra resiliente possui 75 mm de largura pelo comprimento total da chapa – 2 m.

A face de 15 mm foi perfurada com uma máquina de plasma, no formato e espaçamento especificados no desenho da Figura 44, com o objetivo de reduzir a rigidez à flexão da peça e com isso reduzir a transmissão de vibração das placas para os perfis estruturais e conseqüentemente para o outro lado na parede.

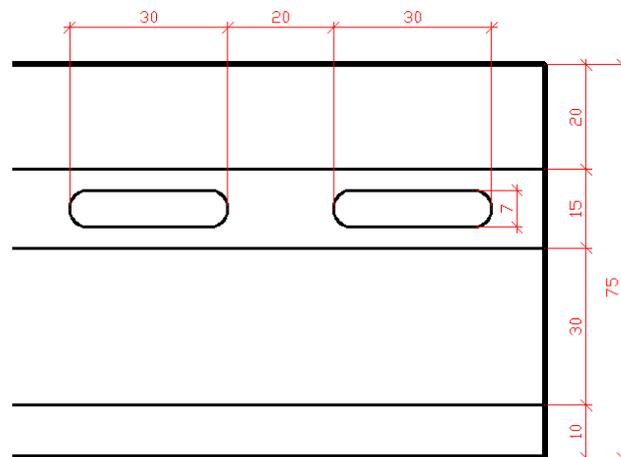


Figura 44- Desenho do plano de corte e dobra para fabricação das barras resilientes, dimensões em mm.

Fonte: Autora.

A Figura 45 representa a secção transversal das barras resilientes, que posteriormente foram fixadas aos montantes da estrutura da parede a cada 60 cm, para fixação das placas de revestimento, no lado interno da parede de LSF, conforme Figura 46.

¹² Programa para desenho técnico.

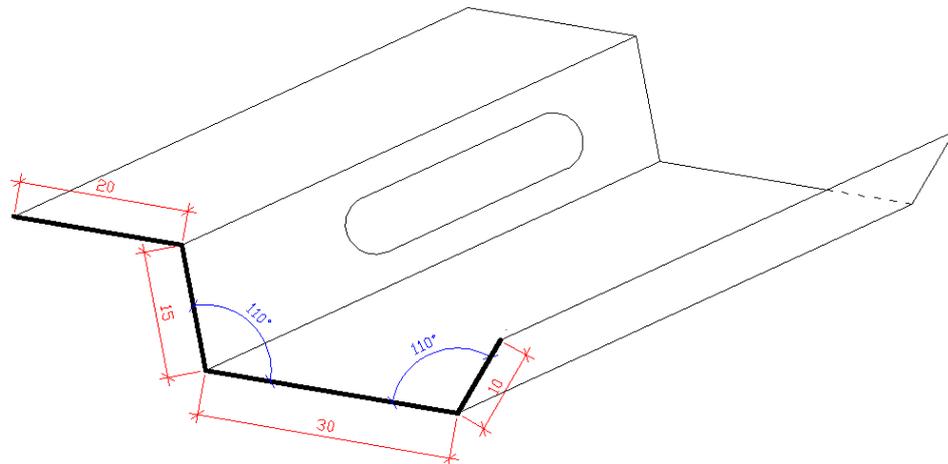


Figura 45 - Secção da barra resiliente desenvolvida, dimensões em mm.

Fonte: Autora.



Figura 46 – Fixação da barra resiliente aos perfis da parede de *light steel frame*.

Fonte: Autora.

Com o objetivo de avaliar a influência da utilização das barras resilientes no isolamento sonoro das paredes em LSF, foram utilizados três tipos de revestimentos externos distintos, antes e após a instalação das barras resilientes: painéis XPS, régua *Smartside* e placas cimentícias. As placas cimentícias e as régua *Smartside* aparecem sendo instaladas na Figura 47.



Figura 47 - Lado externo das paredes de *light steel frame* revestidas com placas cimentícias e régulas *Smartside*.

Fonte: Autora.

Na Figura 47 as placas cimentícias são tratadas com fita tela e massa, específicos para a finalidade, e na outra composição de parede, as régulas *Smartside* são instaladas sobre a membrana hidrófuga.

A influência do tipo de revestimento externo na PT das paredes de LSF foi avaliada através da utilização de cinco revestimentos distintos. São eles: placas cimentícias, régulas *Smartside*, *Siding* vinílico, painéis XPS e placas de óxido de magnésio. Com exceção das placas de óxido de magnésio que, segundo fabricante, dispensam a instalação sobre painéis OSB, todas as demais placas seguiram esta prática.

A influência da instalação de uma janela na PT de uma parede de LSF foi avaliada, nas condições fechada e semi-aberta. A janela de 0,77 m² do tipo maxim-ar, de PVC e vidro duplo, fabricada pela Weiku esquadrias, foi instalada na parede P13, com área de 13,04 m² e placas de óxido de magnésio como revestimento externo e gesso acartonado como revestimento interno, conforme ilustrado na Figura 48.

Uma cortina de tecido com massa superficial, m'' , de 0,33 kg/m², foi instalada sobre a janela de PVC semi-aberta e a influência desta prática na PT da parede de LSF também foi avaliada.

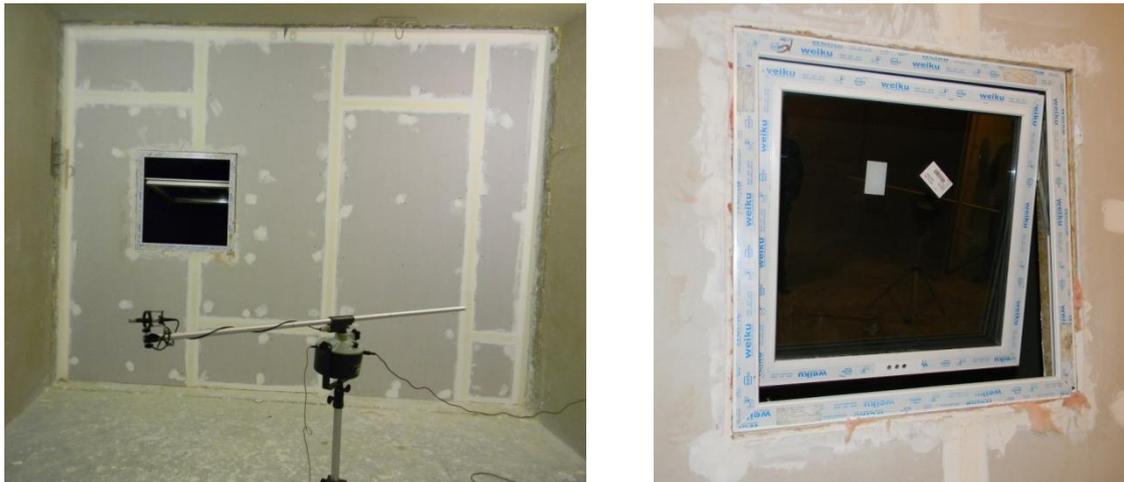


Figura 48 – Sala de recepção com a parede de *light steel frame* e janela instalada, no detalhe.

Fonte: Autora.

Com o objetivo de verificar a interferência que a instalação de quatro pontos de energia podem ter no isolamento sonoro de uma parede de *LSF*, foram instalados três tomadas e um interruptor, atravessando a placa de gesso e o painel OSB. Utilizando furadeira e a serra-copo, foram feitos dois furos para cada caixa de luz e posteriormente colocado o espelho sobre a abertura, conforme representado na Figura 49.



Figura 49 – Furos para instalação e posições das caixas de luz na parede de *light steel frame* - P23.

Fonte: Autora.

3.3 Ensaio de perda de transmissão sonora

3.3.1 Equipamentos utilizados:

- Fonte sonora: Brüel & Kjaer;
- Microfone capacitivo de ½”;
- Microfone rotativo: Brüel & Kjaer;
- Medidor do Nível de Pressão Sonora: Brüel & Kjaer, *type* 2270;
- Calibrador sonoro: Brüel & Kjaer, *type* 4231;
- Amplificador de sinal: Brüel & Kjaer, *type* 2716.

3.3.2 Grandezas e parâmetros a serem medidos:

Ao se realizar um ensaio de perda de transmissão sonora entre dois ambientes são necessárias medições de:

- Tempo de reverberação na sala de recepção, TR, em segundos;
- Nível de pressão sonora na sala da fonte, NPS, em dB;
- Nível de pressão sonora na sala de recepção, NPS, em dB.

3.3.3 Procedimentos de medição:

Medição de TR

O tempo de reverberação, TR, foi medido antes de cada medição de perda de transmissão sonora, visto que, para determinação do índice de redução sonora, *R*, é necessário conhecer a área de absorção sonora equivalente da sala de recepção, *A*, obtida através da medição do TR.

A fonte omnidirecional foi colocada na sala de recepção, da câmara reverberante de transmissão sonora da UFSM, em duas posições distintas, sendo que para cada posição de fonte foram utilizadas três posições de microfones, totalizando seis leituras de TR, conforme ilustra a Figura 50.

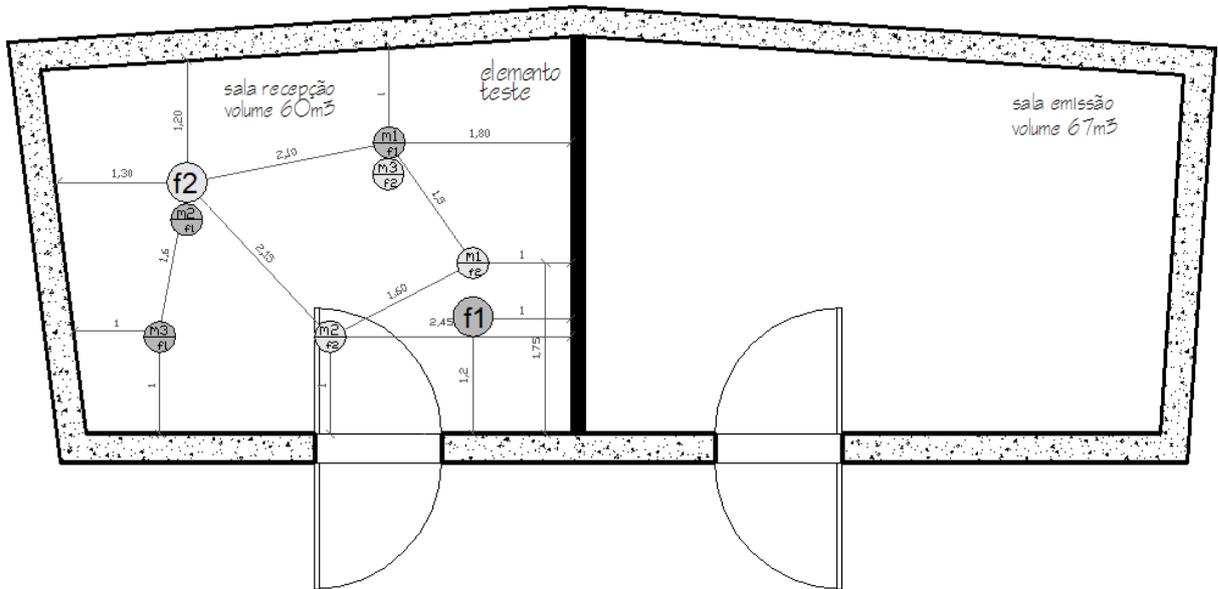


Figura 50 - Pontos de fonte e microfone para medição do tempo de reverberação.

Fonte: Autora.

O TR foi medido em bandas de 1/3 de oitava, na faixa de frequência de 100 a 5000 Hz. Todo procedimento de medição de TR, bem como os pontos de medição, especificados na Figura 50, seguiram as determinações da ISO 354:2003, especificados na Seção 2.4.2. Os valores de TR obtidos em cada uma das dezoito medições, para bandas de 1/3 de oitava, constam no Apêndice 2.

Medição de perda de transmissão sonora

A PT foi avaliada a partir dos índices de redução sonora, R , fornecidos pelo MNPS, após as medições dos níveis de pressão sonora, realizadas na câmara reverberante da UFSM, para cada composição de parede testada. Os valores de R obtidos nas medições de PT de cada parede em LSF avaliada, nas para bandas de 1/3 de oitava, constam no Apêndice 3. As medições de perda de transmissão sonora, das paredes de LSF seguiram os procedimentos de

medição e os requisitos para instalações e equipamentos, constantes no conjunto de normas da ISO 10140:2010, que trata do isolamento sonoro de elementos construtivos em laboratório.

Na sala de emissão, o campo sonoro difuso foi gerado através do uso de uma fonte omnidirecional em duas posições distintas. Um tripé com microfone rotativo foi posicionado no centro de cada sala, emissão e recepção, representado por m1 e m2, e o círculo tracejado representa o raio de varredura destes microfones. A Figura 51 ilustra essa situação.

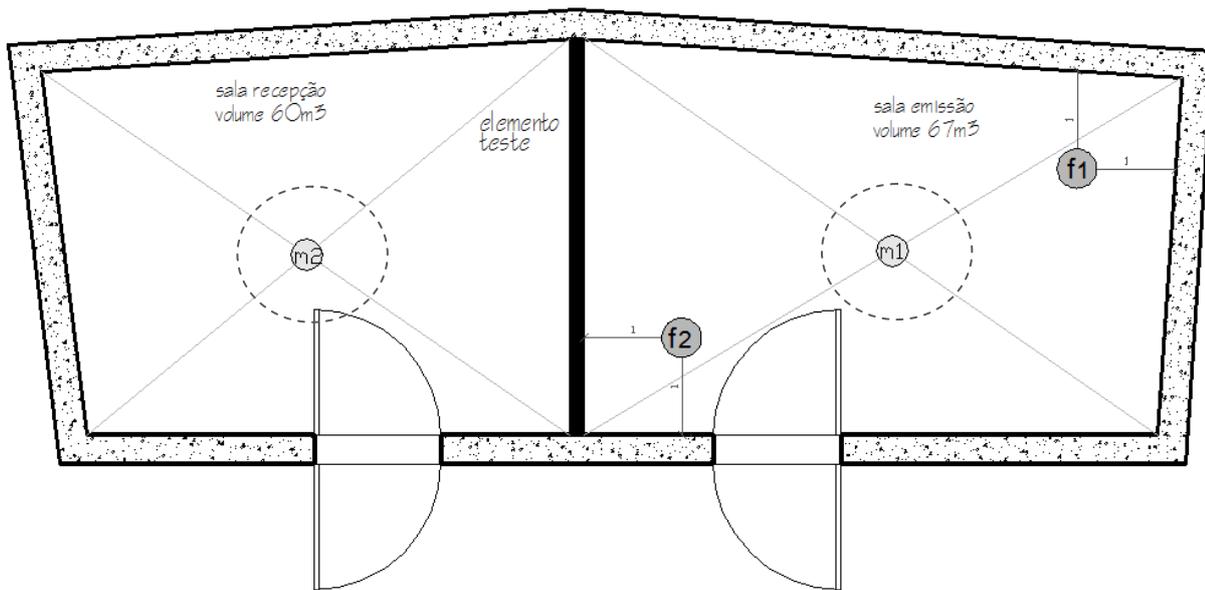


Figura 51 - Pontos de fonte e microfone para medição da perda de transmissão sonora.

Fonte: Autora.

As medições compreenderam a faixa de frequências de 100 a 5000 Hz, em bandas de 1/3 de oitava e duraram 32 s - tempo igual ao tempo que o microfone rotativo leva para dar uma volta completa. O raio de varredura utilizado foi de 1m. O volume das salas de emissão e recepção é de 67m^3 e 60m^3 , respectivamente, atendendo ao mínimo especificado pela norma, bem como a recomendação de que a maior sala deve ser a de emissão. No conjunto de normas da ISO 140, partes 1, 3 e 4 (1990, 1995, 1998), que foram substituídas pela ISO 10140 em 2010, não havia essa recomendação em relação ao volume das salas emissão/recepção. Desta forma, tradicionalmente os ensaios de PT realizados na câmara reverberante de transmissão sonora da UFSM utilizavam a sala com menor volume para instalação da fonte.

Com o objetivo de avaliar a influência do volume da câmara de emissão/recepção na da perda de transmissão sonora foram feitas duas medições com a mesma configuração de

parede, invertendo apenas as salas emissão/recepção. A Medição 9 utilizou como sala de emissão aquela com maior volume, 67 m^2 , enquanto a Medição 9 invertida utilizou como sala de emissão a sala de menor volume, 60 m^2 . A Figura 52 apresenta os espectros de R para ambas as medições.

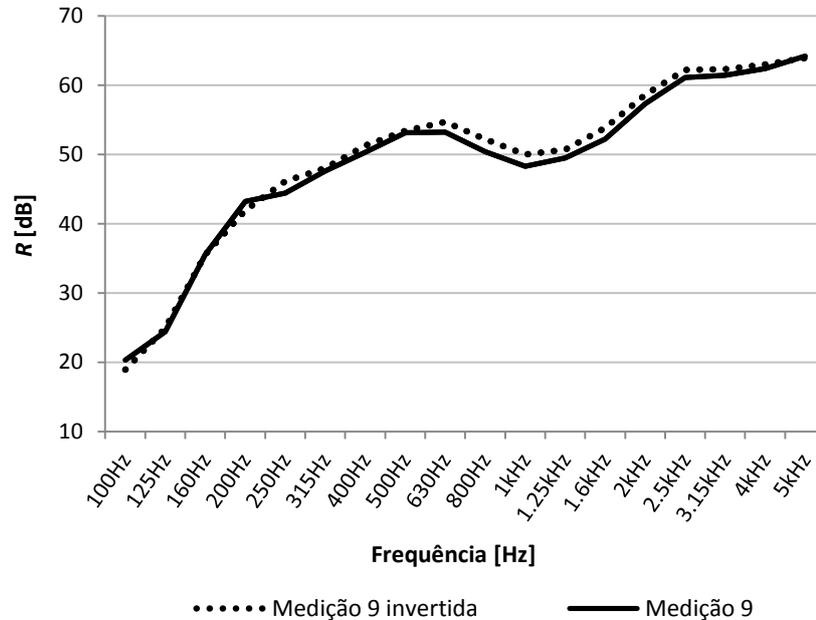


Figura 52 – Espectros de perda de transmissão sonora obtidos na Medição 9 e Medição 9 invertida.

Fonte: Autora.

A análise da Figura 52 permite constatar que a inversão da posição entre as salas emissão/recepção resultou em pouquíssima diferença entre os espectros de R de ambas as medições – Medição 9 e Medição 9 invertida – e nenhuma diferença no R_w . Assim, optou-se por seguir utilizando a sala com maior volume, 67 m^2 , para posicionamento da fonte, conforme recomendação da ISO 10140-5:2010 (p.9), para todas as demais medições realizadas na presente pesquisa.

Dados como temperatura, pressão e umidade relativa do ar, entre outras informações, foram apontados diariamente em uma Ficha de Medição, conforme Apêndice 1. Quando o elemento teste se tratar de uma parede, o anexo A da ISO 10140-1:2010 recomenda que a abertura entre as câmaras deve ser aproximadamente 10 m^2 ; a parede testada possui $13,04 \text{ m}^2$.

Conforme orientação da parte 5 da ISO 10140:2010 o TR indicado para as salas de ensaio de isolamento sonoro de ruído aéreo, nas frequências $\geq 100 \text{ Hz}$, deve ser entre 1 e 2 s, e, quando não atender a estes valores, deve-se verificar se o índice de redução sonora

ponderado é dependente do TR. Quando esta dependência for constatada, a norma recomenda que o TR da sala deve ser corrigido. O TR medido na câmara reverberante de transmissão sonora da UFSM foi consideravelmente maior do que o recomendado pela norma, em todas as medições, conforme tabela com valores de TR de cada medição, apresentados no Apêndice 2. Desta forma, com o intuito de verificar a influência do TR na perda de transmissão sonora e, conseqüentemente no R_w , tratou-se a sala de recepção com material absorvente¹³. A Figura 53 apresenta os espectros de R obtidos nas medições de PT na sala original e após o tratamento, mantendo o elemento teste inalterado.

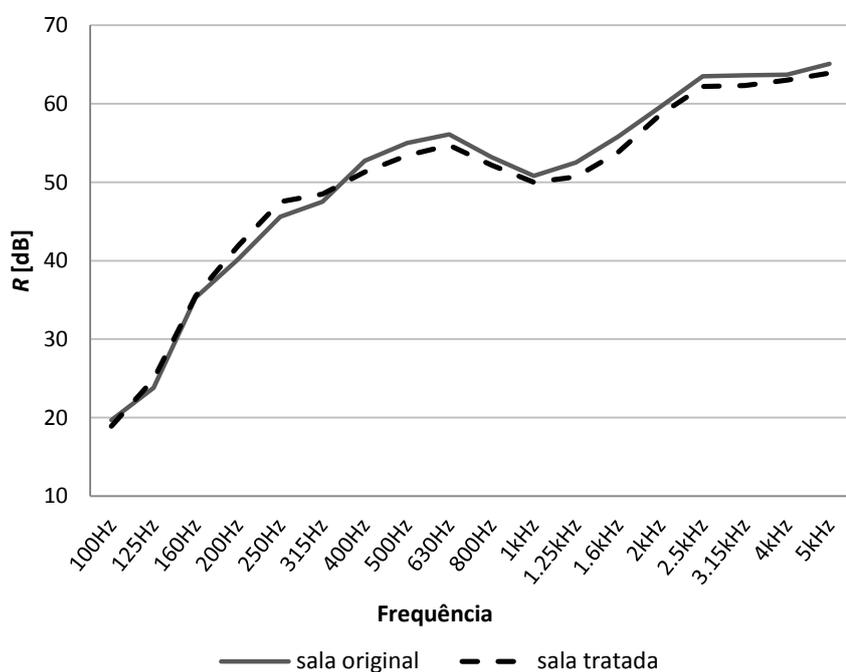


Figura 53 – Espectros da perda de transmissão sonora medidos antes e depois do tratamento da sala com material absorvente.

Fonte: Autora.

A Tabela 7 apresenta os valores de T_{30} obtidos nas duas medições (sala original e sala tratada), com igual configuração da parede, na sala de recepção, antes e após o tratamento com material absorvente.

¹³ O material absorvente utilizado foi lâ de vidro com 90 mm de espessura, disposta aleatoriamente.

Tabela 7 – Valores de tempo de reverberação, T_{30} , nas bandas de 1/3 de oitava para a sala de recepção, antes e depois do tratamento com material absorvente.

Frequência [Hz]	T_{30} [s]	
	Sala original	Sala tratada
100	6,53	1,05
125	7,71	0,8
160	7,2	1,05
200	7,57	0,73
250	8,73	0,95
315	8,88	1,42
400	8,68	1,89
500	7,93	2,15
630	7,02	1,88
800	6,03	1,03
1000	4,96	0,83
1250	4,56	1,05
1600	4,42	1,11
2000	4,21	1,26
2500	3,72	1,29
3150	3,05	1,04
4000	2,68	0,95
5000	2,34	0,93

Fonte: Autora

A análise da Tabela 7 permite constatar que o tratamento com material absorvente na sala de recepção da câmara reverberante reduziu consideravelmente os valores de TR medidos. Porém, os espectros da perda de transmissão sonora medidos nas duas condições – antes e após o tratamento da sala de recepção - são bastante semelhantes, conforme demonstrou a Figura 53. Além disso, o R_w medido nas duas condições anteriormente mencionadas foi o mesmo: 50 dB. Assim, permite-se concluir que, apesar do TR na câmara reverberante de transmissão sonora estar acima do recomendado pela ISO 10140-5:2010, tal fato não comprometeu os resultados determinados pelas medições de perda de transmissão sonora realizados no local, para a presente pesquisa.

Medição do ruído de fundo

O ruído de fundo foi medido após cada medição de perda de transmissão sonora, aproveitando que os microfones – m_1 e m_2 - já estavam posicionados na sala de emissão e recepção, conforme Figura 46. A ISO 10140-4:2010 recomenda que o ruído de fundo deve ser no mínimo 6 dB, mas preferencialmente 15 dB, menor do que o NPS do sinal. Nas 18 medições realizadas, a diferença entre o ruído de fundo e o nível do sinal foi consideravelmente maior que 15 dB, em todas as faixas de frequência.

3.3.4 Plano de medições

O plano de medições de perda de transmissão sonora para cada uma das 18 composições de paredes externas em LSF é resumido na Tabela 8.

Tabela 8 – Configurações das paredes externas de *light steel frame*, para medição de perda de transmissão sonora.

(continua)

Sem lã de vidro	Revestimento externo	Revestimento interno
P1 (SLCI-OG)	Painel OSB Membrana impermeável Placa cimentícia	Painel OSB Placa gesso acartonado
Com lã de vidro 50mm	Revestimento externo	Revestimento interno
P2 (CL50CI-OG)	Painel OSB Membrana impermeável Placa cimentícia	Painel OSB Placa gesso acartonado
Com lã de vidro 90mm	Revestimento externo	Revestimento interno
P3 (CL90CI-OG)	Painel OSB Membrana impermeável Placa cimentícia	Painel OSB Placa gesso acartonado
P4 (CL90SS-OG)	Membrana impermeável Painel OSB Régua <i>Smartside</i>	Painel OSB Placa gesso acartonado

(conclusão)

Com lâ de vidro 90mm	Revestimento externo	Revestimento interno
P5 (CL90SS-OGG)	Painel OSB Membrana impermeável Régua <i>Smartside</i>	Painel OSB Placa gesso acartonado Placa gesso acartonado
P6 (CL90SV-OG)	Painel OSB Membrana impermeável Régua <i>Siding</i> vinílico	Painel OSB Placa gesso acartonado
P7 (CL90SV-GG)	Painel OSB Membrana impermeável Régua <i>Siding</i> vinílico	Placa gesso acartonado Placa gesso acartonado
P8 (CL90XPS-OG)	Chapa OSB Membrana impermeável Painel XPS	Painel OSB Placa gesso acartonado
P13 (CL90OX-OG)	Membrana impermeável Placa de óxido de magnésio	Painel OSB Placa gesso acartonado
Com barra resiliente	Revestimento externo	Revestimento interno
P9 (CL90XPS-OG/BR)	Chapa OSB Membrana impermeável Painel XPS	Painel OSB Placa gesso acartonado
P10 (CL90SS-OG/BR)	Painel OSB Membrana impermeável Régua <i>Smartside</i>	Painel OSB Placa gesso acartonado
P11 (CL90CI-OG/BR)	Painel OSB Membrana impermeável Placa cimentícia	Painel OSB Placa gesso acartonado
Com fita de espuma de PVC	Revestimento externo	Revestimento interno
P12 (CL90CI-OG/FI)	Painel OSB Membrana impermeável Placa cimentícia	Painel OSB Placa gesso acartonado
Com janela de PVC	Revestimento externo	Revestimento interno
P14 (JAF-IN**)	Membrana impermeável Placa de óxido de magnésio	Painel OSB Placa gesso acartonado
P15 (JASA)	Membrana impermeável Placa de óxido de magnésio	Painel OSB Placa gesso acartonado
P17 (JASA-CO)	Membrana impermeável Placa de óxido de magnésio	Painel OSB Placa gesso acartonado
P21 (JAF-IN*)	Membrana impermeável Placa de óxido de magnésio	Painel OSB Placa gesso acartonado
P23 (JAF-LUZ)	Membrana impermeável Placa de óxido de magnésio	Painel OSB Placa gesso acartonado

IN* Janela instalada sem preenchimento adequado das frestas no perímetro.

IN** Janela instalada com a correta vedação das frestas no perímetro.

Fonte: Autora.

3.4 Comparação entre os desempenhos no isolamento acústico das paredes de *light steel frame* avaliadas

Após a realização das medições, a análise comparativa foi feita utilizando os espectros de PT e os números únicos que quantificam o isolamento sonoro de um elemento construtivo, o R_w e a STC, entre as 18 paredes de LSF e outros tipos de paredes, com dados obtidos da literatura.

3.5 Análise da massa das composições executadas

A massa superficial total de cada composição de parede avaliada foi calculada, considerando a massa de cada elemento utilizado na sua execução - estrutura, preenchimento e revestimentos - e relacionada com o respectivo desempenho no isolamento sonoro. Utilizando uma regressão linear analisou-se a existência de correlação entre massa/isolamento sonoro.

3.6 Avaliação do desempenho acústico medido nas paredes externas de *light steel frame* frente aos critérios estabelecidos pelas normas NBR 15575:2013, DIN 4109-11:2010 e ÖNORM B-81152:2002.

Os valores de perda de transmissão sonora obtidos para cada composição da parede foram convertidos em índices de redução sonora ponderados - R_w e STC - e confrontados com os critérios estabelecidos pela NBR 15575:2013, a fim de avaliar e classificar o desempenho no isolamento acústico das paredes externas em *light steel frame* e suas respectivas composições em mínimo, intermediário ou superior. O R_w e a STC das 13 composições de paredes externas em LSF também foram confrontados com os índices mínimos de isolamento acústico requeridos para vedações verticais externas pelas normas europeias DIN 4109-11:2010 e ÖNORM B-81152:2002.

3.7 Avaliação do isolamento sonoro da parede típica em *light steel frame* frente ao ruído ambiental

Com o objetivo de avaliar a capacidade de uma parede externa em LSF de isolar ruídos ambientais, espectros de ruído ambiental com ponderação “A” e “C” e o espectro de R da parede típica em LSF foram plotados em um gráfico. A privacidade acústica proporcionada por cada uma das 13 composições de paredes externas em LSF foi avaliada, sendo classificada de precária a excelente, conforme sua STC.

3.8 Etapa 8: Análise de custos das composições executadas e comparação com paredes convencionais

O custo de cada composição de parede em LSF avaliada foi calculado considerando apenas os insumos necessários a sua execução, desconsiderando o custo com a mão de obra. Posteriormente cada composição de parede teve seu custo relacionado ao respectivo desempenho no isolamento sonoro utilizando uma regressão linear para avaliação da correlação entre custo/isolamento sonoro.

O custo de quatro paredes convencionais foi calculado de forma aproximada, considerando as práticas correntes na construção civil brasileira. São elas:

- Parede de tijolos cerâmicos maciços nas dimensões¹⁴ de 10,5 x 5 x 22 cm, com reboco de 2,5 cm em um dos lados e com espessura total de 13 cm;
- Parede de blocos cerâmicos nas dimensões de 14 x 19 x 29 cm, com reboco de 1,75 cm em ambos os lados e com espessura total de 17,5 cm;
- Parede de blocos de concreto nas dimensões de 14 x 19 x 39 cm, sem reboco e com espessura total de 14 cm;
- Parede de concreto maciço com 10,2 cm de espessura e f_{ck} ¹⁵ 12 MPa.

¹⁴ Largura, altura e comprimento.

¹⁵ Resistência característica do concreto à compressão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nas medições de PT das 18 composições de paredes externas em *light steel frame*, realizadas na câmara reverberante de transmissão sonora da UFSM. Os valores de R , R_w e STC comparam o isolamento sonoro das paredes avaliadas entre si, são comparados com os valores requeridos pelas normas - ÖNORM B-81142:2002, DIN 4109:2010 e NBR 15575:2013 - e comparados com dados bibliográficos de isolamento sonoro provenientes de outras pesquisas semelhantes. Os valores de R obtidos nas medições de PT de cada parede em LSF avaliada, para bandas de 1/3 de oitava, constam no Apêndice 3.

4.1 Avaliação da perda de transmissão entre as paredes de LSF

Conforme introduzido na Revisão bibliográfica, Seção 2.1.4.3, a PT das paredes duplas é regida por três fenômenos: ressonância massa – mola – massa, ressonância na cavidade e coincidência, todos resultam em quedas na PT neste tipo de paredes.

Tendo em vista a importância destes fenômenos para a transmissão sonora obtida nas composições das paredes em LSF avaliadas, determinaram-se, inicialmente, as frequências de ressonância do sistema massa – mola – massa, utilizando a Equação 17. É importante observar que as frequências de ressonância do sistema massa – mola – massa, f_0 , conforme a Equação 17, estão entre 62 e 81 Hz para todas as paredes em LSF ensaiadas, não aparecendo, portanto, nos espectros de R apresentados nesta seção, que compreendem as frequências de 100 a 5000 Hz. Posteriormente, as frequências de coincidência, f_c , foram estimadas utilizando a Equação 20 e a Figura 13, considerando que a frequência crítica dos painéis não pode ser determinada com precisão, já que os mesmos são compostos por várias camadas de revestimento, porém, não podem ser considerados painéis do tipo *sandwich*. Além disso, as propriedades mecânicas como a rigidez à flexão, B , dos materiais que compõe os painéis não é conhecida. Desta forma, é possível determinar apenas uma faixa de frequências nas quais as frequências críticas se situam. E, por fim, as frequências de ressonância na cavidade entre os

painéis, f_n , foram determinadas pela Equação 21. A Tabela 9 apresenta as frequências acima descritas, para as 13 composições de parede em LSF.

Tabela 9 – Frequência de ressonância massa – mola - massa, frequência crítica e frequência de ressonância da cavidade para as paredes em LSF avaliadas.

Parede	Frequência de ressonância do sistema massa – mola – massa, f_0 [Hz]	Frequência crítica, f_c [Hz]	Frequência de ressonância da cavidade, f_n [Hz]
P1 – (SLCI-OG)	62	1000 a 3000	1700; 3400; 5100...
P2 - (CL50CI-OG)	62		
P3 - (CL90CI-OG)	62		
P4 - (CL90SS-OG)	71		
P5 - (CL90SS-OGG)	65		
P6 - (CL90SV-OG)	78		
P7 - (CL90SV-GG)	76		
P8 - (CL90XPS-OG)	81		
P9 - (CL90XPS-OG/BR)	81		
P10 - (CL90SS-OG/BR)	71		
P11 - (CL90CI-OG/BR)	62		
P12 - (CL90CI-OG/FI)	62		
P13 - (CL90OX-OG)	77		

Fonte: Autora

As paredes P14, P15, P17, P21 e P23, não foram incluídas no cálculo das frequências determinadas na Tabela 9, pois a partir da instalação da janela de PVC, o comportamento destas em relação à transmissão sonora foi significativamente alterado.

4.1.1 Avaliação da influência da utilização de lã de vidro

As paredes P1 (SLCI-OG), sem lã de vidro, P2 (CL50CI-OG), com lã de vidro de 50 mm e P3 (CL90CI-OG), com lã de vidro de 90 mm, representadas na Figura 54, tiveram sua

PT medida com o objetivo de avaliar a influência que a utilização de lã de vidro com 50 e 90 mm de espessura possui no isolamento sonoro das paredes.

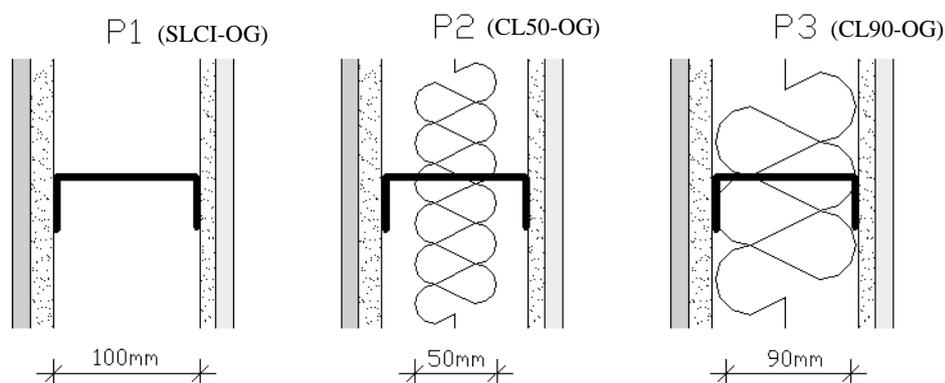


Figura 54 – Representação da seção das paredes em *light steel frame* - P1, P2 e P3.

Fonte: Autora.

As três paredes diferem-se apenas no que diz respeito ao preenchimento da cavidade entre perfis com material absorvente. Na P1 (SLCI-OG), a cavidade entre perfis foi mantida vazia ou sem material absorvente, na P2 (CL50CI-OG) a cavidade foi preenchida com lã de vidro de 50 mm de espessura e na P3 (CL90CI-OG) utilizou-se lã de vidro de 90 mm de espessura na cavidade entre perfis, conforme representado na Figura 54. Como revestimento do lado interno, as três composições de paredes utilizam painel OSB e placa de gesso e, externamente, utilizam painel OSB e placa cimentícia.

A Tabela 10 apresenta o isolamento sonoro das paredes P1, P2 e P3, quantificado através do R_w e da STC, e o respectivo custo por m^2 de cada uma das paredes.

Tabela 10 – Isolamento sonoro e custo das paredes em *light steel frame* - P1, P2 e P3.

Parede	Custo [R\$/m ²]	R_w [dB]	STC [dB]
P1 (SLCI-OG)	130	44	45
P2 (CL50CI-OG)	140	47	48
P3 (SL90CI-OG)	146	47	48

Fonte: Autora.

A análise dos dados permite constatar que a melhor relação custo x benefício está na composição P2 (CL50CI-OG), ou seja, na utilização da lã de vidro com 50 mm de espessura, já que na medição de PT na parede P3 (CL90CI-OG) não houve aumento no isolamento em

relação à parede P2, porém, ocorreu aumento de 4% no custo do m² de parede. A parede P3 (CL90CI-OG) será chamada de parede típica em LSF, pois é a composição de parede, neste sistema construtivo, mais comumente utilizada no Brasil.

O gráfico da Figura 55 apresenta os espectros de R medidos nas três composições de paredes P1 (SLCI-OG), P2 (CL50CI-OG) e P3 (CL90CI-OG).

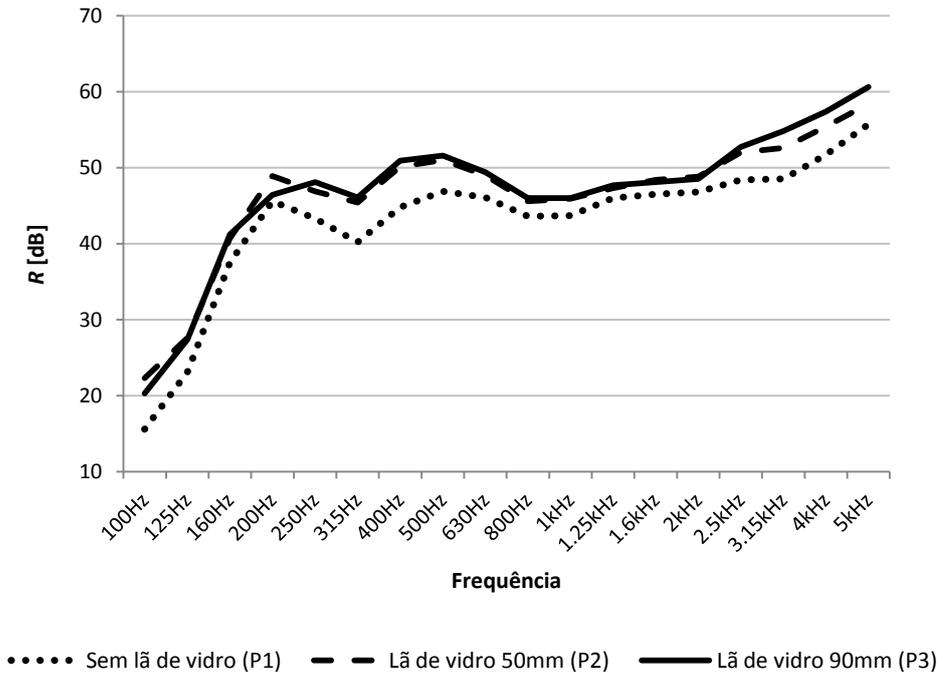


Figura 55 – Espectros de R das paredes em *light steel frame* - P1, P2 e P3.

Fonte: Autora.

Na análise da Figura 55 observa-se a sobreposição em parte dos espectros de R das paredes P2 (CL50CI-OG) e P3 (CL90CI-OG), enquanto P1(SLCI-OG) apresenta uma curva de PT bastante semelhante às demais, porém com menores valores de R .

O R_w determinado nas medições de PT realizadas nas paredes P1, P2 e P3 foi de 44 dB, 47 dB e 47 dB e o STC foi de 45 dB, 48 dB e 48 dB, respectivamente. Constata-se que a utilização de lã de vidro - tanto de 50 mm, em P2, ou de 90 mm de espessura, em P3 (CL90CI-OG) - aumentou o R_w e o STC em 3 dB. Porém, devido a maior espessura da lã mineral utilizada na parede P3 (CL90CI-OG), esperava-se um aumento no R_w e na STC em relação à parede P2 (CL50CI-OG), o que não ocorreu. Warnock (2008, p. 21) relatou um aumento de 3 dB na STC ao aumentar a espessura do material absorvente de 75 para 90 mm,

na cavidade de uma parede de LSF com STC de 50 dB. Provavelmente, a incoerência entre os dados determinados por Warnock e os obtidos na presente pesquisa se dê ao fato do material absorvente ter ficado bastante justo no vão entre perfis da parede típica em LSF, formando uma conexão mecânica entre as placas de revestimento internas e externas e, contribuindo assim, para aumentar a transmissão sonora de um lado a outro da parede. Irvine (1998, p. 50) apontou como 2 dB o aumento na STC para uma parede de *wood frame* que recebeu lã de vidro na cavidade entre os caibros, passando de 35 dB para 37 dB o valor da classe de transmissão sonora. Neste caso, a diferença medida em laboratório na presente pesquisa, para a STC antes e depois da inserção de material absorvente na cavidade das paredes P1, P2 e P3 é bastante coerente com os resultados determinados por Irvine.

4.1.2 Avaliação da influência do tipo de revestimento externo

Nas medições de PT realizadas nas paredes de LSF foram avaliados cinco tipos de revestimentos externos: placas cimentícias, régua *Smartside*, régua *siding vinílico*, painéis XPS e placas de óxido de magnésio. Com exceção das placas de óxido de magnésio, os demais revestimentos foram instalados sobre painéis OSB.

A Figura 56 apresenta os espectros de R das paredes P3 (cimentícia), P4 (*Smartside*), P6 (*Siding vinílico*), P8 (XPS) e P13 (óxido de magnésio), composições de paredes que se diferem apenas quanto aos revestimentos externos utilizados.

A análise da Figura 56 permite verificar que, apesar dos diferentes revestimentos externos utilizados, as curvas de R são bastante semelhantes. A área destacada como f_c e f_n é a região onde se situam as frequências críticas¹⁶ e frequências ressonância da cavidade. Ambas são observadas nos espectros de PT de todas as paredes avaliadas e são caracterizadas por quedas no isolamento sonoro.

A camada de ar e/ou material absorvente entre os elementos sólidos que compõem este tipo de paredes, fazem com que o sistema funcione como se fossem massas ligadas por molas, podendo haver ressonâncias em diversas frequências e, assim, reduzindo drasticamente o

¹⁶ A frequência crítica é a menor frequência de coincidência (BISTAFA, 2012, p.281), entretanto, em paredes duplas compostas por várias placas - como as paredes de LSF avaliadas - devido aos diferentes materiais e espessuras utilizados, as frequências críticas são diversas e por esta razão compreendem uma ampla faixa de frequências.

isolamento sonoro das paredes em questão (SANTOS, 2012, p. 32). Desta forma, na região onde se situam as frequências críticas e as frequências de ressonância da cavidade, a PT em paredes duplas pode ser inferior do que seria em paredes simples de mesma massa por unidade de área. Na região onde se observa a frequência crítica, se produz o fenômeno chamado de coincidência, ou seja, o acoplamento máximo entre a onda plana no ar e a onda de flexão da parede. Com isso há um aumento na eficiência da radiação sonora e uma queda significativa na PT da parede.

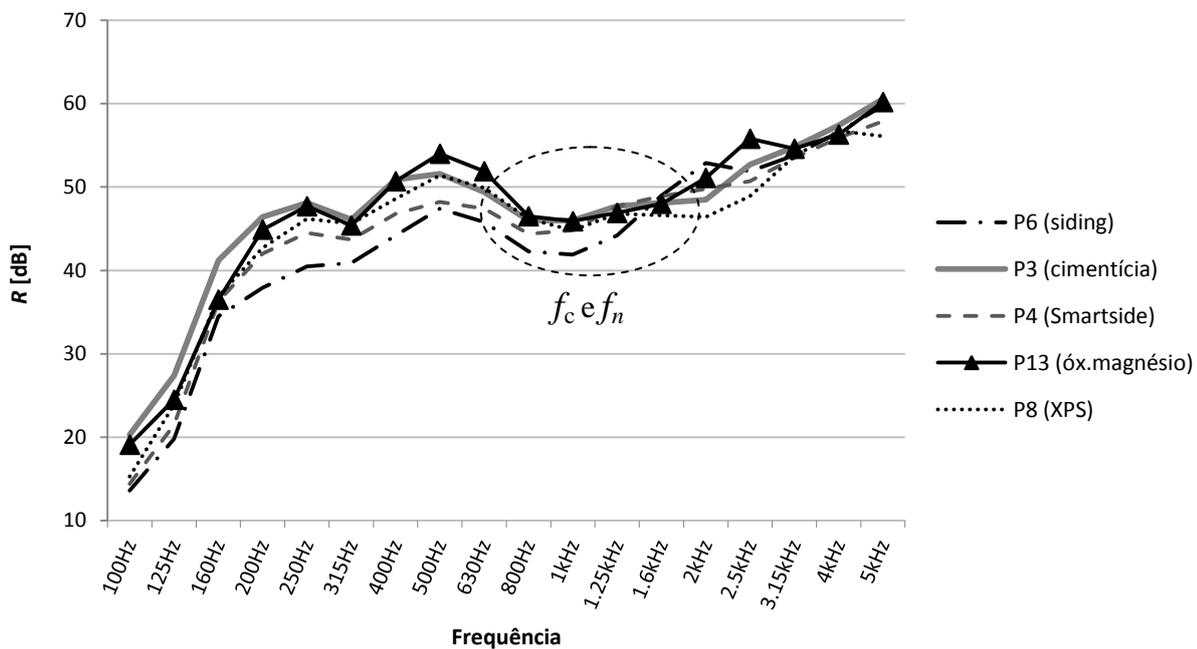


Figura 56 - Espectros de R de cinco paredes em *light steel frame* - P3, P4, P6, P8 e P13.

Fonte: Autora.

Na Tabela 11 são apresentados, para as cinco composições de paredes externas em LSF avaliadas, os valores das duas grandezas que classificam a perda de transmissão sonora de um elemento construtivo através de um número único - o R_w e a STC.

Tabela 11 - Isolamento sonoro das paredes em *light steel frame* - P3, P4, P6, P8 e P13.

Parede	R_w [dB]	STC [dB]
P6 (SL90SV-OG)	43	45
P4 (SL90SS-OG)	45	47
P8 (SL90XPS-OG)	45	47
P3 (SL90CI-OG)	47	48
P13 (SL90OX-OG)	47	49

Fonte: Autora.

A análise dos dados da Tabela 11 permite verificar que o melhor desempenho no isolamento sonoro foi obtido pela P13 (SL90OX-OG), composição que utiliza placas de óxido de magnésio como revestimento externo, ainda que, dentre as cinco composições avaliadas, esta é a única que não utilizou placas OSB sob o revestimento, visto que o fabricante das placas de magnésio não afirma ser necessário. Tal fato permite constatar que, na utilização das placas OSB, haveria ainda um pequeno aumento na diferença da PT da parede P13 em relação às demais composições de parede.

O menor desempenho no isolamento sonoro, em termos de R_w e STC, pode ser observado na composição de parede P6, que utiliza réguas de *siding* vinílico como revestimento externo, pois apesar das réguas de PVC terem baixa rigidez à flexão, o material tem pouquíssima massa superficial.

4.1.3 Avaliação da influência da utilização de uma placa de gesso adicional

A configuração mais usual para o lado interno de uma parede externa de LSF é uma painel OSB e uma placa de gesso, entretanto, com a finalidade de avaliar o efeito na melhora do isolamento sonoro da parede, foi adicionada ao lado interno da parede P4 (CL90SS-OG), mais uma placa de gesso.

A Figura 57 compara a PT de uma parede com uma (P4) e com duas placas de gesso (P5), mantendo os demais revestimentos internos e externos. De acordo com a referida figura, somente nas frequências inferiores a 500 Hz pode se observar uma pequena melhora no índice de redução sonora - da parede P5 em relação à parede P4 - que justifique a utilização de uma placa de gesso adicional. Desta forma, o acréscimo da placa torna-se interessante em situações

nas quais uma atenuação em baixas frequências seja desejada. Nas demais frequências há praticamente sobreposição nos espectros de R de ambas as paredes.

A diferença na PT medida em laboratório entre parede referência (P4) e a parede com uma placa adicional de gesso (P5), foi de apenas 1 dB na STC, a mesma diferença de 1 dB se repetiu para o R_w , conforme demonstra a Tabela 12. Warnock (2008, p. 33) também relata um acréscimo de 1 dB na PT de uma parede de LSF com STC de 47 dB ao receber uma placa adicional de gesso. Entretanto, Irvine (1998, p.48) relata uma STC de 30 dB para uma placa de gesso e uma STC de 34 dB para duas placas de gesso, um aumento de 4 dB na STC a partir da utilização de uma placa adicional de gesso.

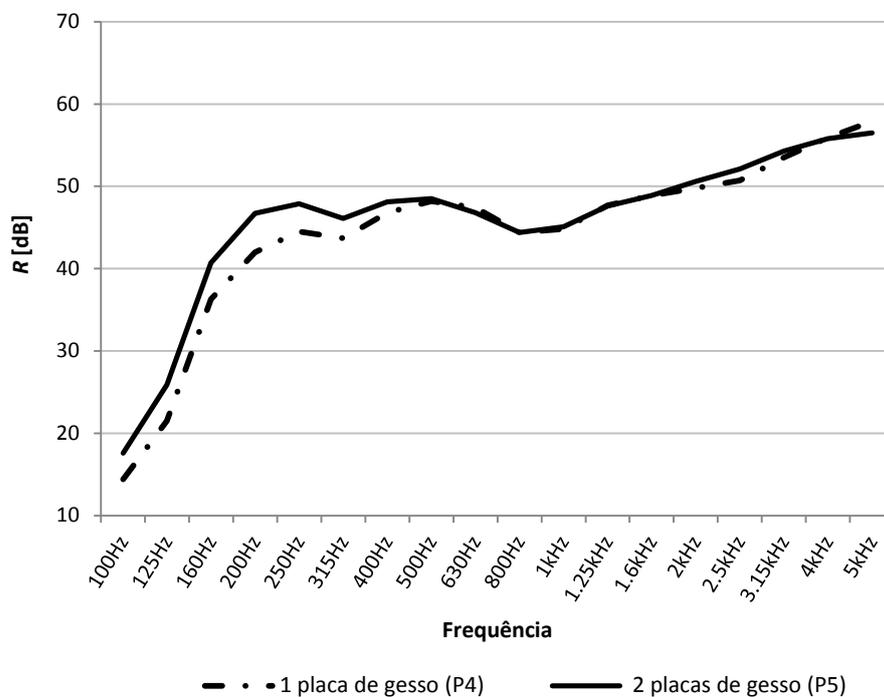


Figura 57 – Espectros de R das paredes em *light steel frame* - P4 e P5.

Fonte: Autora.

A explicação para a incoerência entre os valores encontrados no trabalho de Irvine e àqueles medidos nesta pesquisa se deve ao fato do painel referência do autor possuir apenas 30 dB de STC, enquanto que a parede referência desta pesquisa tem 47 dB de STC. Devido a PT ser uma grandeza logarítmica, há mais facilidade em implementar melhorias no isolamento em um elemento com baixa PT do que em outro com PT elevada. Além disso, por conta da placa de gesso ensaiada por Irvine ser um elemento homogêneo, a adição de mais

uma placa de gesso, com igual espessura, significou a duplicação da massa superficial e por isso, segundo a lei da massa, o aumento previsto na STC deveria ser de aproximadamente 5 dB, valor coerente com o aumento de 4 dB na STC relatado pelo autor.

Tabela 12 – Custo e respectivo isolamento sonoro de paredes em *light steel frame* - P4 e P5.

Parede	Custo [R\$/m ²]	R _w [dB]	STC [dB]
P4 (CL90SS-OG)	158	45	47
P5 (CL90SS-OGG)	174	46	48

O custo pela adição de uma placa de gesso à P4 foi de aproximadamente 10%, conforme a Tabela 12. Apesar do pouco aumento em termos de R_w e STC, no caso apresentado não justificar o uso de uma placa adicional de gesso, tal medida seria útil no caso específico de melhorar o isolamento sonoro nas baixas frequências.

4.1.4 Avaliação da influência da utilização de barras resilientes e fitas de espuma de PVC

Nas três medições que seguem são comparadas as composições das paredes P3 (parede típica em LSF), P11 (parede com barra metálica resiliente) e P12 (parede com fita de espuma de PVC).

A Tabela 13 relaciona o custo de cada uma das três composições de parede ao seu respectivo desempenho no isolamento sonoro.

Tabela 13 – Custo e isolamento sonoro de paredes em *light steel frame* - P3, P11 e P12.

Parede	Custo [R\$]	R _w [dB]	STC [dB]
P3 (CL90CI-OG)	146	47	48
P12 (CL90CI-OG/FI)	156	50	51
P11 (CL90CI-OG/BR)	173	50	52

Fonte: Autora.

Em relação à parede referência (P3), as paredes P12 e P11 apresentaram um acréscimo no custo de aproximadamente 8% e 18%, respectivamente. O desempenho na PT entre utilizar

fita de espuma (P12) ou barra resiliente (P11), quantificado através do R_w , foi o mesmo, apenas na STC a composição de parede com barra resiliente obteve 1 dB maior do que a parede com fita de espuma de PVC.

A Figura 58 apresenta os espectros de R para as paredes P3, P11 e P12.

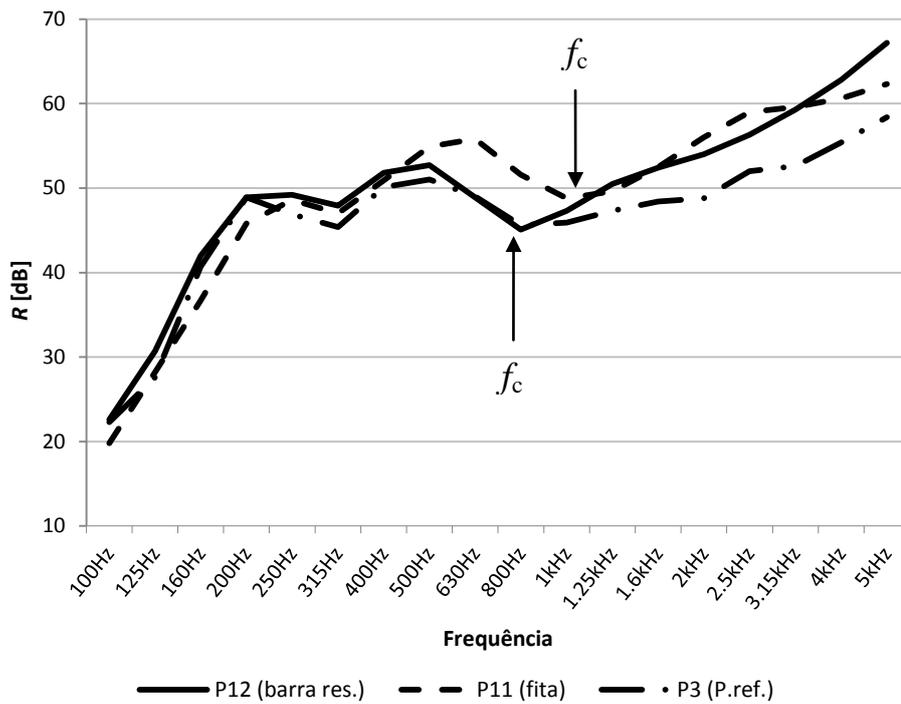


Figura 58 - Espectros de R de paredes em *light steel frame* - P3, P11 e P12.

Fonte: Autora.

Os espectros de R das paredes P3 (CL90CI-OG), P11 (CL90CI-OG/BR) e P12 (CL90CI-OG/FI) apontam que, nas frequências até 250 Hz, há uma sobreposição nos valores de R entre P11 e P12, fazendo com que o desempenho no isolamento sonoro destas seja ligeiramente superior à parede típica em LSF (P3). Nas médias frequências, observa-se um desempenho consideravelmente superior da parede com barra resiliente (P11) em relação às demais. E, nas frequências acima de 1000 Hz, as paredes P11 e P12 têm PT consideravelmente maior do que a parede P3 ou parede típica em LSF, o que justifica o aumento de 3 dB no R_w e na STC da P11 e da P12 se comparadas à P3. Na Figura 58 observa-

se que a f_c das paredes P3 e P12 ocorre por volta de 800 Hz, enquanto que a f_c da parede P11 - composição de parede que utiliza barras resilientes fixadas entre os perfis de aço e as placas de revestimento - é maior e ocorre em torno de 1250 Hz. Tal fato se deve à frequência crítica ser dependente da rigidez à flexão da parede, de acordo com a Equação 20. Desta forma, constata-se que as barras resilientes da parede P11 promoveram amortecimento entre as placas de revestimento e a estrutura metálica e, conseqüentemente, reduziram a energia sonora transmitida de um lado a outro da parede.

Os resultados obtidos em laboratório, na presente pesquisa, utilizando barras metálicas resilientes ficaram aquém dos indicados por Irvine (1998, p.50), que para uma parede de *wood frame* com 37 dB de STC de obteve um acréscimo de 11 dB, pela utilização de barras resilientes industrializadas.

As diferenças entre os dados bibliográficos e medidos nesta pesquisa podem ser resultantes das diferenças entre as barras resilientes disponíveis no mercado norte americano e àquelas fabricadas para este projeto de pesquisa, conforme abordado na Seção 3.2.

Outra análise da influência do uso das barras resilientes na PT foi realizada nas medições de PT nas paredes P8 e P9, composições que utilizam painéis XPS como revestimento externo, diferindo-se apenas pelo uso das barras resilientes. A Figura 59 apresenta os dois espectros sonoros obtidos a partir das medições.

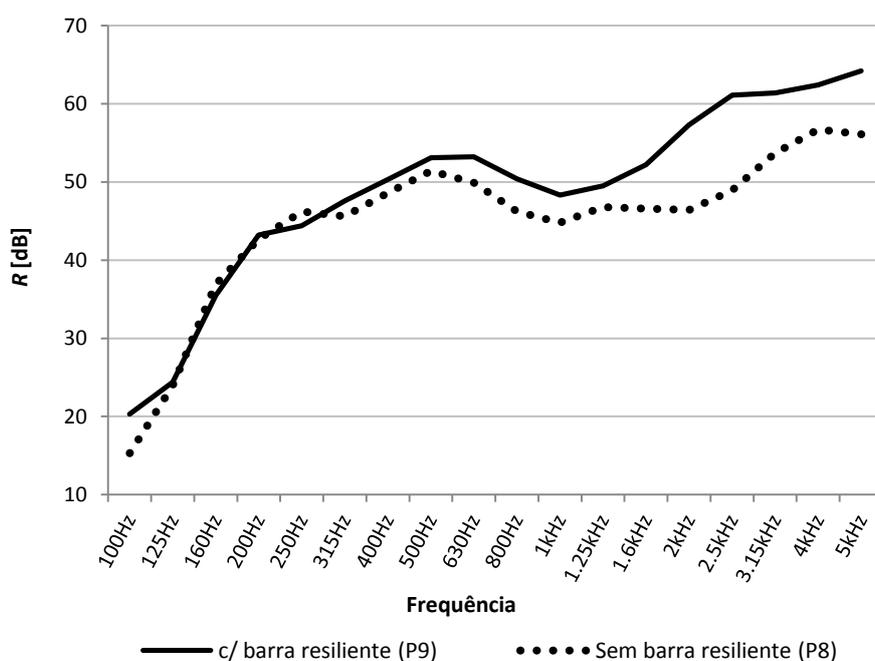


Figura 59 - Espectros de R de paredes em *light steel frame* – P8 e P9.

Fonte: Autora.

A análise dos espectros da Figura 59 permite verificar que, nas frequências acima de 400 Hz, a parede P9 (com barra resiliente) apresenta considerável melhora na PT em relação à P8 (sem barra resiliente). Essa diferença entre os espectros se confirma através do aumento do R_w e da STC da parede P9 (CL90XPS-OG/BR) em relação à parede P8 (CL90XPS-OG), conforme apresentado na Tabela 14.

Valores compatíveis com os determinados na presente pesquisa, a partir da utilização de barras resilientes – aumento na STC de 4 dB e de 5 dB, respectivamente nas paredes P11 (CL90CI-OG/BR) e P9 (CL90XPS-OG/BR) - foram relatados por Irvine (1998, p.55) e Warnock (2008, p.18) ao utilizar barras resilientes em paredes de LSF. A parede avaliada por Irvine possuía STC inicial de 56 dB e obteve aumento de 5 dB. A parede de Warnock, por sua vez, com STC inicial de 50 dB, aumentou sua STC em 3 dB, a partir da instalação das barras resilientes.

A partir da análise dos espectros da Figura 58 e Figura 59 é possível afirmar que as barras resilientes promovem melhora no isolamento sonoro em frequências acima dos 400 Hz, especialmente por reduzirem a rigidez à flexão das paredes e, com isso, reduzirem também a transmissão de energia sonora entre dois ambientes adjacentes.

Tabela 14 – Custo e isolamento sonoro de paredes em *light steel frame* - P8 e P9.

Parede	Custo [R\$/m ²]	R_w [dB]	STC [dB]
P8 (CL90XPS-OG)	128	45	47
P9 (CL90XPS-OG/BR)	160	50	52

Fonte: Autora.

A análise dos valores presentes na Tabela 14 demonstra que a utilização das barras resilientes aumentou o custo em 25% e proporcionou um aumento de 5 dB no R_w e na STC na parede P9 (CL90CI-OG/BR), em relação à parede P8 (CL90XPS-OG).

4.1.5 Avaliação da influência da substituição do painel OSB interno por uma placa de gesso

As medições de PT realizadas nas paredes P6 (CL90SV-OG) e P7 (CL90SV-GG) têm o objetivo de avaliar a influência no isolamento sonoro obtido pela substituição do painel

interno de OSB por uma placa de gesso. Assim, a parede P6 tem a mesma configuração da parede P7 e utiliza os mesmos revestimentos, porém, substitui uma placa OSB por uma placa de gesso.

A troca do painel OSB pela placa de gesso praticamente não alterou o custo das paredes P6 para P7, conforme demonstra a Tabela 15, entretanto, aumentou o R_w e a STC em 2 dB, o que significa que, do ponto de vista da relação custo/isolamento proporcionado, essa mudança foi positiva.

Tabela 15 - Custo e isolamento sonoro de paredes em *light steel frame* - P6 e P7.

Parede	Custo [R\$/m ²]	R_w [dB]	STC [dB]
P6 (CL90SV-OG)	154	43	45
P7 (CL90SV-GG)	153	45	47

Fonte: Autora.

A Figura 60 apresenta os espectros de PT para ambas as composições de parede, P6 e P7, sendo possível observar a semelhança entre eles.

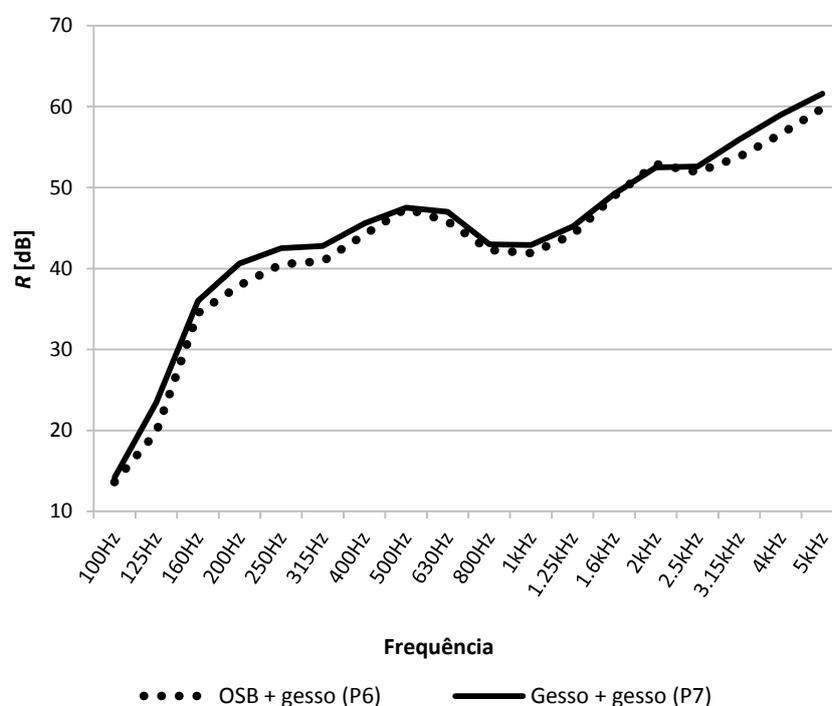


Figura 60 – Espectros de R de paredes em *light steel frame* – P6 e P7.

Fonte: Autora.

O aumento de 2 dB no R_w e na STC da parede P7 (CL90SV-GG) em relação à parede P6 (CL90SV-OG) se deve principalmente aos maiores valores de R obtidos nas frequências até 500Hz, provavelmente devido ao aumento da massa superficial do gesso em relação ao OSB, visto que, em baixas frequências, o isolamento acústico de uma parede dupla se assemelha ao de uma parede simples. Assim, nesta região, terá maior PT aquela parede que possuir maior massa por unidade de área. Acima 2500 Hz observa-se novamente um pequeno aumento no R da parede P7 em relação à parede P6.

4.1.6 Avaliação da relação massal/isolamento sonoro proporcionado

Apesar das paredes duplas, ao contrário das paredes simples, não terem seu desempenho na PT determinado pela “lei da massa”, conforme abordado na Seção 2.1.4.1, a avaliação da massa de cada composição de parede é importante para o mercado da construção civil. Geralmente, quanto maior a massa das paredes, maior será o peso próprio da edificação e, conseqüentemente, maior o custo referente à parte estrutural para suportar toda a carga desta obra. Desta forma, paredes mais leves necessitam de menor quantidade de material na estrutura e nas fundações, tornando a obra conseqüentemente mais econômica. O sistema construtivo LSF, que utiliza aço leve galvanizado como estrutura, permite construções portantes em até cinco pavimentos. Entretanto, nada impede que uma obra com estrutura convencional - de aço ou concreto, por exemplo - possua as vedações verticais internas e/ou externas em LSF, tendo, desta forma, redução significativa no seu peso e usufruindo as demais vantagens deste sistema construtivo.

As paredes P14, P15, P17, P21 e P23, nas quais uma janela de PVC foi instalada, não foram incluídas na análise da massa/isolamento, pois estas se tornaram paredes compostas, cuja PT passou a depender de outros fatores que não a massa, tornando inviável a comparação com as demais paredes.

A massa superficial, m'' , das paredes P1 a P13 foi calculada considerando cada um dos componentes utilizados – estrutura de aço galvanizado, preenchimento em lã de vidro e placas de revestimentos – e posteriormente relacionada ao R_w obtido para cada parede ensaiada.

A Figura 61 apresenta as massas superficiais e os respectivos isolamentos sonoros proporcionados para as paredes de LSF avaliadas, quantificados a partir do R_w e da STC.

A linha tracejada é uma linha de tendência feita por regressão linear, entre a variável independente, massa superficial, e a variável dependente, R_w . O r^2 é o coeficiente de correlação, e o valor de 0,09 significa que não há quase nenhuma relação entre as massas e o R_w das paredes, visto que, 1 representaria total correlação, 0,5 representaria pouca correlação e 0 representaria nenhuma correlação entre a massa superficial e o R_w das paredes.

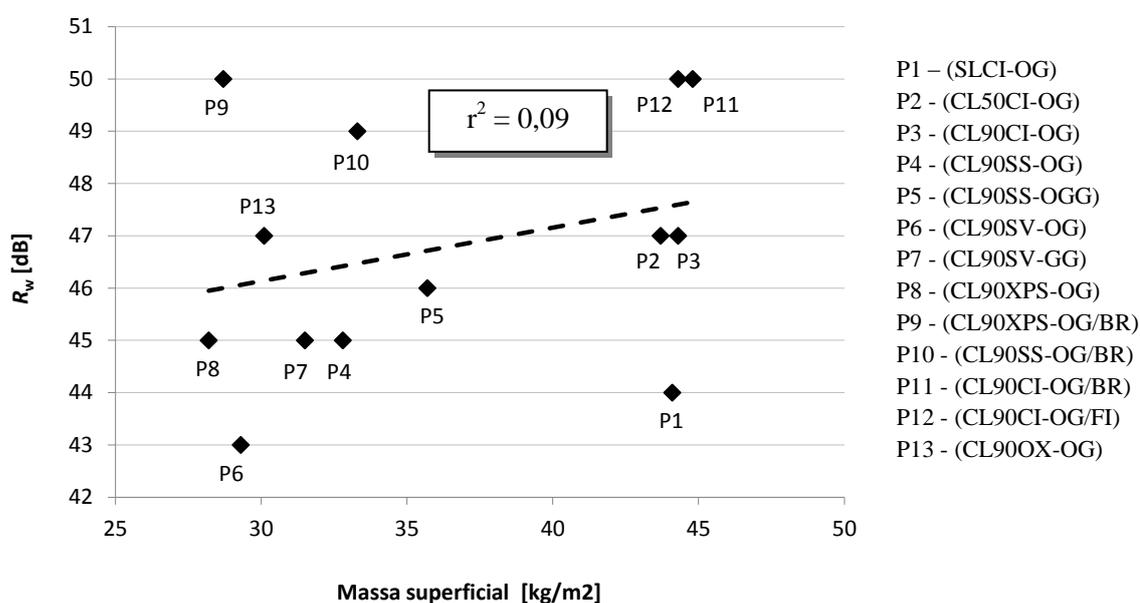


Figura 61 – Relação entre massa superficial e R_w para as paredes em *light steel frame* - P1 a P13.

Fonte: Autora.

Dentre as composições de parede que apresentam o melhor desempenho no isolamento sonoro - R_w de 50 dB e STC de 52 dB – a parede P9 é a que o faz com a menor massa superficial. A parede P9 (CL90XPS-OG/BR) possui menos massa superficial até mesmo que a parede P6 (CL90SV-OG), composição que apresenta o pior desempenho no isolamento sonoro - R_w de 43 dB e STC de 45 dB – e utiliza como revestimento externo régua *siding* vinílico. Comparando as paredes P9 (CL90XPS-OG/BR) e P11 (CL90CI-OG/BR), ambas as composições com igual desempenho no isolamento acústico - R_w de 50 dB e STC de 52 dB - a primeira é 53% mais leve do que a segunda. Isto ocorre porque um painel de XPS - revestimento utilizado na parede P9 - tem quase vinte vezes menos massa superficial do que

uma placa cimentícia, revestimento utilizado na parede P11. Apesar dessa diferença, o R_w e a STC de ambas são iguais.

A Tabela 16 apresenta as 13 composições paredes em LSF avaliadas, elencando-as em ordem crescente de massa superficial.

Tabela 16 – Massa superficial e isolamento sonoro de diversas de paredes em *light steel frame*.

Parede	m'' [kg/m ²]	R_w [dB]	STC [dB]
P8 (CL90XPS-OG) (Rev: XPS + OSB/OSB + gesso) ***	28,2	45	47
P9 (CL90XPS-OG/BR) (Rev: XPS + OSB/ barra res. + OSB + gesso) ***	28,7	50	52
P6 (CL90SV-OG) (Rev: <i>siding</i> vinílico + OSB/OSB + gesso) ***	29,3	43	45
P13 (CL90OX-OG) (Rev: <i>Eccoboard</i> /OSB + gesso) ***	30,1	47	49
P7 (CL90SS-GG) (Rev: <i>siding</i> vinílico + OSB/gesso + gesso) ***	31,5	45	47
P4 (CL90SS-OG) (Rev: <i>Smartside</i> + OSB/OSB + gesso) ***	32,8	45	47
P10 (CL90SS-OG/BR) (Rev: <i>Smartside</i> + OSB/ barra res. + OSB + gesso) ***	33,3	49	50
P5 (CL90SS-OGG) (Rev: <i>Smartside</i> + OSB/OSB + gesso + gesso) ***	35,7	46	48
P1 (SLCI-OG) (Rev: cimentícia + OSB/ OSB + gesso) *	43,2	44	45
P2 (CL50CI-OG) (Rev: cimentícia + OSB/OSB + gesso) **	43,7	47	48
P3 (CL90CI-OG) (Rev: cimentícia + OSB/OSB + gesso) ***	44,3	47	48
P12 (CL90CI-OG/FI) (Rev: cimentícia + OSB/ fita espuma + OSB + gesso) ***	44,3	50	51
P11 (CL90CI-OG/BR) (Rev: cimentícia + OSB/ barra res. + OSB + gesso) ***	44,8	50	52

* Não há lã de vidro na cavidade entre perfis.

** Lã de vidro com 50 mm de espessura instalada na cavidade entre perfis.

*** Lã de vidro com 90 mm de espessura instalada na cavidade entre perfis.

Todas as composições de paredes avaliadas utilizaram perfis de aço galvanizado e membrana hidrófuga.

Fonte: Autora.

As paredes P9, P10 e P11 – que utilizam como revestimento externo respectivamente painéis XPS, réguas de *Smartside* e placas cimentícias - são iguais às paredes P8, P4 e P3, porém utilizam barras resilientes. O acréscimo nas massas verificado a partir da utilização das barras resilientes foi de apenas $0,5 \text{ kg/m}^2$, entretanto, a diferença no R_w da parede P8 (CL90XPS-OG) para a P9 (CL90XPS-OG/BR), da parede P4 (CL90SS-OG) para a P10 (CL90SS-OG/BR) e da parede P3 (CL90CI-OG) para a P11 (CL90CI-OG/BR) foi respectivamente de 5 dB, 4 dB e 3 dB. Na STC as diferenças verificadas foram de 5 dB, 3 dB e 4 dB, respectivamente, entre as referidas composições. Isto ocorre porque a introdução de dispositivos leves com função de mola, como barras resilientes, por exemplo, é capaz de aumentar consideravelmente a PT sonora de uma parede, com o mínimo acréscimo de massa.

Outra situação exemplifica que um aumento mínimo na massa de uma parede pode gerar uma melhora de 3 dB no R_w é observada nas medições de PT realizadas nas paredes P3 (CL90CI-OG/BR) e P12 (CL90CI-OG/FI). A composição de parede P12 é idêntica à parede típica em LSF (P3), ambas as composições utilizam os mesmos revestimentos, porém, na parede P12 (CL90CI-OG/FI) foram coladas fitas de espuma de PVC, em uma das faces dos perfis, entre o aço e as placas de revestimento. A melhora no isolamento sonoro obtido pela utilização da fita de espuma de PVC foi quantificado em 3 dB pelo R_w e pela STC e representou um aumento de massa inferior a $0,1 \text{ kg/m}^2$, equivalente a menos de 0,3 % da massa inicial da parede.

4.1.7 Avaliação da relação custo/isolamento sonoro proporcionado

O custo é um fator importante na escolha entre determinados produtos, desta forma, com o objetivo de avaliar qual a relação entre o custo das paredes avaliadas e o respectivo isolamento sonoro proporcionado, calculou-se, para todas as composições de paredes, o custo referente aos insumos utilizados, desconsiderando o custo de mão de obra referente à montagem das paredes, conforme apresentado na Figura 62 e na Tabela 17. As paredes P14, P15, P17, P21 e P23, nas quais uma janela de PVC foi instalada, não foram incluídas no gráfico na avaliação do custo, visto que o objetivo é comparar o isolamento sonoro entre as opções de revestimento.

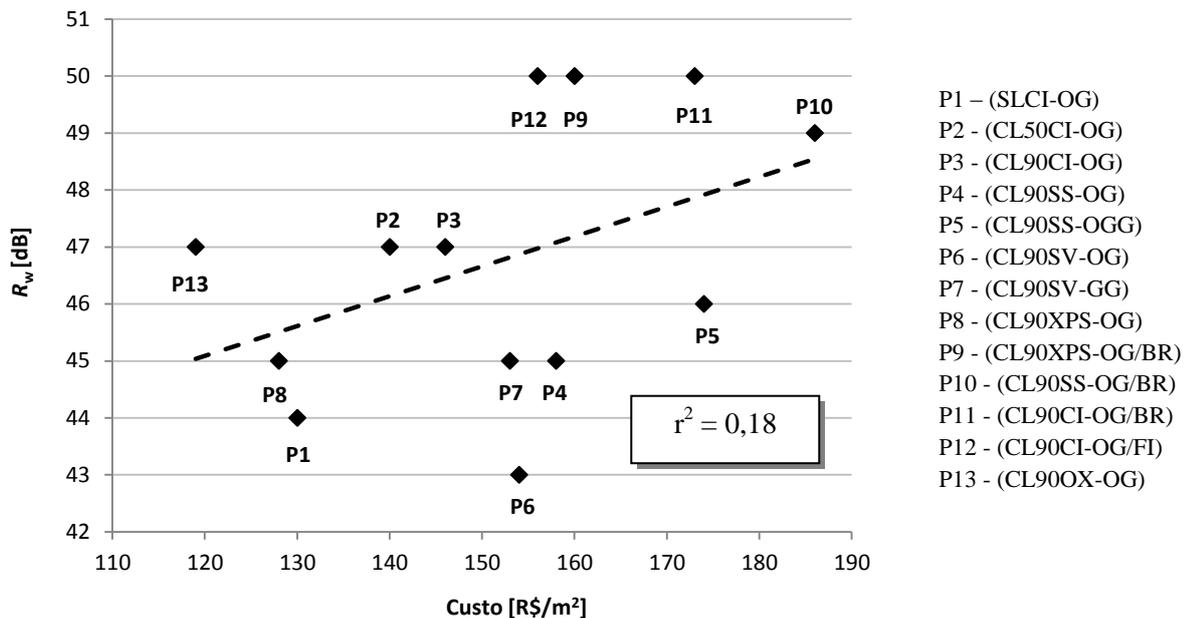


Figura 62 – Relação entre custo e R_w para as paredes em *light steel frame* - P1 a P13.

Fonte: Autora.

Assim como no gráfico da Figura 61, que avalia a relação da massa e do R_w , na Figura 62, a massa é substituída pelo custo e, assim como na figura anterior, novamente a linha de tendência revela haver muito pouca relação entre o custo e o isolamento sonoro das paredes, haja vista o valor de r^2 ser de 0,18.

A partir da análise da relação custo e isolamento sonoro, pode-se concluir que o melhor desempenho com o menor custo ocorreu na parede P12 (CL90CI-OG/FI), onde o custo dos insumos utilizados na execução da parede foi de R\$ 156/m² e o R_w medido foi de 50 dB. A composição da parede P12 (CL90CI-OG/FI) é idêntica à parede típica em LSF (P3), porém, utiliza fitas de espuma de PVC coladas entre os perfis de aço e as placas de OSB e de gesso, pelo lado interno da parede. Em relação à parede típica (P3), a utilização de fitas de espuma de PVC aumentou o custo da parede em apenas 7% e aumentou 3 dB no R_w . Outras duas composições de parede que também tiveram o mesmo desempenho de P12 - R_w de 50 dB - foram as paredes P9 (CL90XPS-OG/BR) e P11 (CL90CI-OG/BR). A parede P9 utilizou XPS e a parede P11 utilizou placa cimentícia, como revestimentos externos e o custo de ambas foi equivalente a 7% e 11% maior, respectivamente, em relação à parede P12 (CL90CI-OG/FI).

O menor custo entre as paredes avaliadas foi de R\$ 119/m², verificado na parede P13 (CL90OX-OG), composição que utiliza como revestimento externo placas de óxido de magnésio diretamente sobre a membrana hidrófuga, dispensando a utilização de placas OSB no lado externo. Tal particularidade contribuiu para a redução no custo desta composição, que ainda assim, apresenta um R_w elevado em relação às demais paredes, igual a 49 dB.

A Tabela 17 apresenta as 13 composições de paredes avaliadas, elencando-as em ordem crescente de custo.

Tabela 17 – Custo do material e isolamento sonoro de paredes em *light steel frame* – P1 a P13.

Parede	Custo [R\$/m ²]	R_w [dB]	STC [dB]
P13 (CL90OX-OG)	119	47	49
P8 (CL90XPS-OG)	128	45	47
P1 (SLCI-OG)	130	44	45
P2 (CL50CI-OG)	140	47	48
P3 (CL90CI-OG)	146	47	48
P7 (CL90SV-GG)	153	45	47
P6 (CL90SV-OG)	154	43	45
P12 (CL90CI-OG/FI)	156	50	51
P4 (CL90SS-OG)	158	45	47
P9 (CL90XPS-OG/BR)	160	50	52
P11 (CL90CI-OG/BR)	173	50	52
P5 (CL90SS-OGG)	174	46	48
P10 (CL90SS-OG/BR)	186	49	50

Fonte: Autora.

As paredes P8 (CL90XPS-OG) e P9 (CL90XPS-OG/BR) utilizaram XPS como revestimento externo, sendo que na parede P9 (CL90XPS-OG/BR) foram instaladas barras resilientes no lado interno da parede. O aumento no custo do m² de parede pela utilização das barras resilientes na parede P9 (CL90XPS-OG/BR) foi de 25%, enquanto que o R_w aumentou de 45 dB, na P8, para 50 dB, na P9, e a STC aumentou de 47 dB para 52 dB, respectivamente.

O pior desempenho no isolamento sonoro ou perda de transmissão sonora foi verificado na parede P6 (CL90SV-OG), onde o custo da composição - que utilizou *siding* vinílico como revestimento externo, foi de R\$ 154/m², o que representa um custo médio dentre as opções avaliadas. Um acréscimo de aproximadamente 30% no custo em relação à

P13 (CL90OX-OG) e redução de 4 dB no R_w e na STC, se comparado com a mesma composição.

Analisando-se a diferença por m^2 nos custos entre a parede mais barata (P13) e a mais cara (P10), aproximadamente 45%, observa-se que a melhora no desempenho no isolamento é de apenas 2 dB no R_w e 1 dB na STC.

Os fatos mencionados tornam evidente que um bom isolamento sonoro não é uma questão de custo, mas de projeto.

4.1.8 Avaliação da influência da instalação de uma janela

Ao instalar um elemento que interrompa a homogeneidade de uma parede – como uma esquadria, por exemplo – esta passa a ser classificada como uma parede composta, conforme abordado na Seção 2.1.4.2.

A PT de uma parede composta depende da área de cada elemento e do seu coeficiente de transmissão sonora, mas, de uma forma geral, ao instalar um elemento “mais fraco” em termos de PT, mesmo que este possua dimensões reduzidas em relação à parede, haverá significativa redução na PT sonora do conjunto, conforme observado na Figura 63. Nas três medições de PT que seguem, instalou-se uma janela do tipo maxim-ar, de PVC, com duas lâminas de vidro de 4 e 6mm, afastadas 10mm, rente à face interna da parede, conforme ilustrado na Figura 64. A instalação foi registrada na Figura 48, na Seção 2.3, Materiais e Métodos.

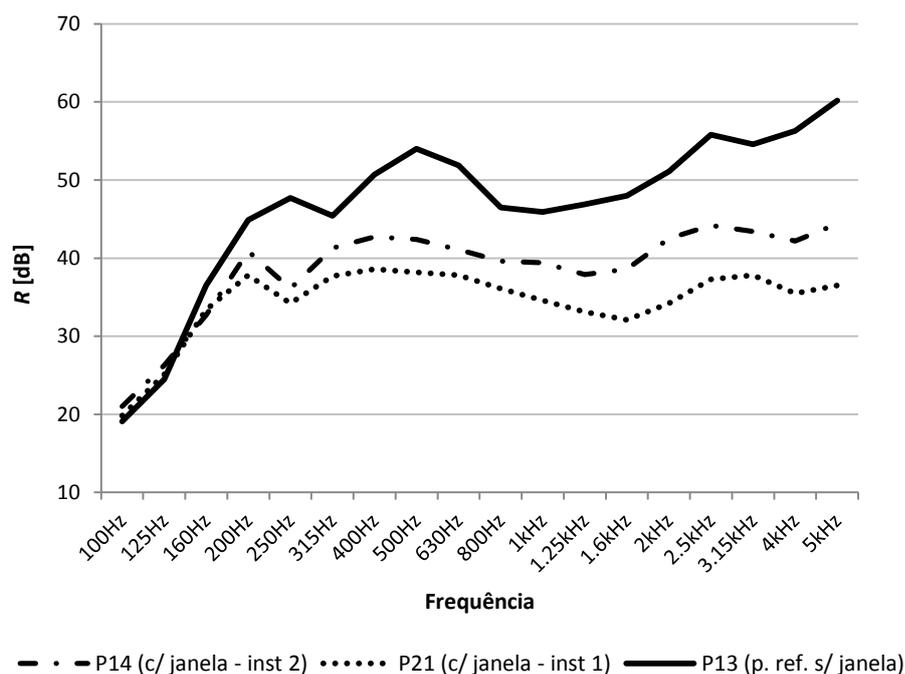
As técnicas utilizadas na instalação da janela também revelaram interferir no resultado da PT da parede, a exemplo da diferença observada entre os espectros sonoros de R das paredes P14 (JF-IN**) e P21 (JF-IN*), na Figura 63.

A curva P13 é o espectro de R da parede (CL90OX-OG) sem a janela, com R_w de 47 dB e STC de 49 dB. Após a instalação de uma janela de PVC com vidro duplo nesta parede, a PT da parede composta é representada pela curva P21 (JF-IN*), o R_w passa a ser 36 dB e a STC 34 dB, apresentando uma redução de 11 dB no R_w e 15 dB no STC. Quando é feita a correta vedação no perímetro da janela, utilizando EPU, evitando vazamentos sonoros pelas frestas, a curva de PT passa a ser a P14 (JF-IN**), com R_w e STC de 41 dB, conforme apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 – Isolamento sonoro de paredes em *light steel frame* – P13, P14 e P21.

Parede	R_w [dB]	STC [dB]
P13 (CL90OX-OG)	47	49
P21(JF-IN*)	36	34
P14 (JF-IN**)	41	41

Fonte: Autora

Figura 63 – Espectros de R de paredes em *light steel frame* – P13, P14 e P21.

Fonte: Autora.

A análise da Tabela 18 permite constatar, apesar da janela corresponder a apenas 6% da área da parede P13 (CL90OX-OG), na qual a janela foi instalada, um aumento de 5 dB no R_w e de 7 dB na STC, da parede P14 em relação à parede P21, ocasionado simplesmente pela correta vedação da esquadria durante sua instalação na parede.

Avaliação da influência da utilização de uma cortina sobre a janela

A simples medida comportamental de abrir uma janela influencia consideravelmente na quantidade de energia sonora capaz de acessar um imóvel e na sensação de desconforto

sonoro que isto pode causar e a utilização de uma cortina sobre ela também. A Figura 64 ilustra esta situação.

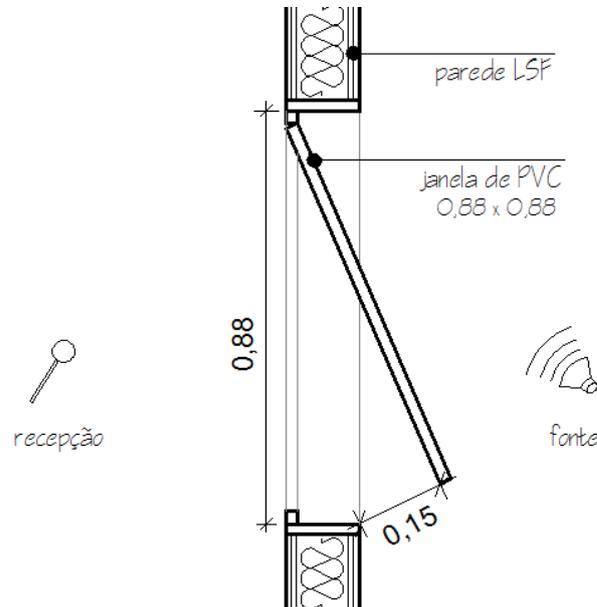


Figura 64 – Corte esquemático da parede de *light steel frame* com janela semiaberta instalada rente à face interna.

Fonte: Autora.

Utilizou-se uma cortina de tecido, com massa superficial de $0,33 \text{ kg/m}^2$, instalada rente à face interna da parede de referência (P14), sobrepondo a área da janela e transpassando 10 cm o perímetro desta.

Os espectros de R das paredes P14 (com janela fechada), P15 (com janela semi-aberta) e P17 (com janela semi-aberta e cortina), com R_w e STC de 41 dB, 20 dB e 25 dB, respectivamente, revelam que, ao abrir parcialmente uma janela o isolamento sonoro proporcionado pela parede é severamente reduzido, conforme demonstra a Figura 65.

A utilização de uma cortina de tecido pelo lado interno da parede, avaliada na medição de PT da parede P17, aumentou o R_w e a STC em 5 dB em relação à parede P15, conforme observado na Tabela 19, afetando principalmente a transmissão sonora nas médias e altas frequências.

O aumento de 5 dB no R_w proporcionado pela cortina de tecido, instalada sobre a janela do tipo maxim-ar, semi-aberta, é comparável à melhora relatada por Santos (2012, p.

65), a partir da utilização de uma cortina do tipo *blackout*¹⁷ em uma janela de correr, que foi de 4 dB.

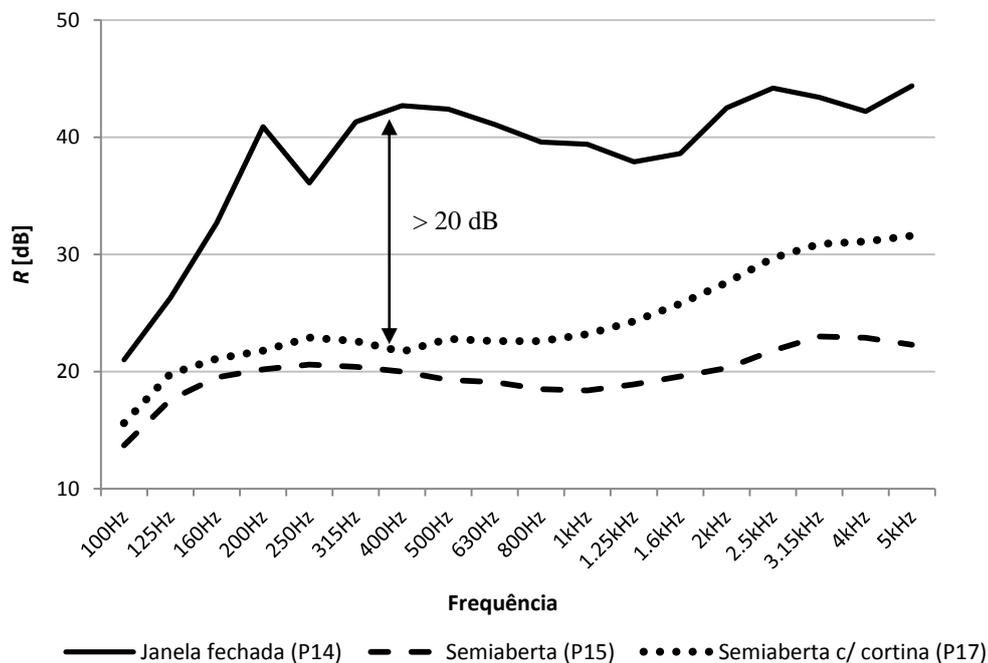


Figura 65 - Espectros de R de paredes em *light steel frame* - P14, P15 e P17.

Fonte: Autora.

Tabela 19 - Isolamento sonoro de paredes em *light steel frame* – P14, P15 e P17.

Parede	R_w [dB]	STC [dB]
P14 (JF-IN**)	41	41
P15 (JSA)	20	20
P17 (JSA-CO)	25	25

Fonte: Autora

4.1.9 Avaliação da influência da instalação de caixas de luz

Nas medições de PT das paredes P21 e P23 avaliou-se a influência que a instalação de 4 pontos de energia na parede podem ter no isolamento sonoro de uma parede de LSF. A

¹⁷ Nome comercial dado a cortinas de vinil e poliéster.

técnica de instalação utilizada e os pontos escolhidos constam na Seção 2.3, Materiais e Métodos, conforme a Figura 49.

A Figura 66 apresenta os espectros de R obtidos na parede de LSF, antes e após a instalação dos quatro pontos de energia elétrica.

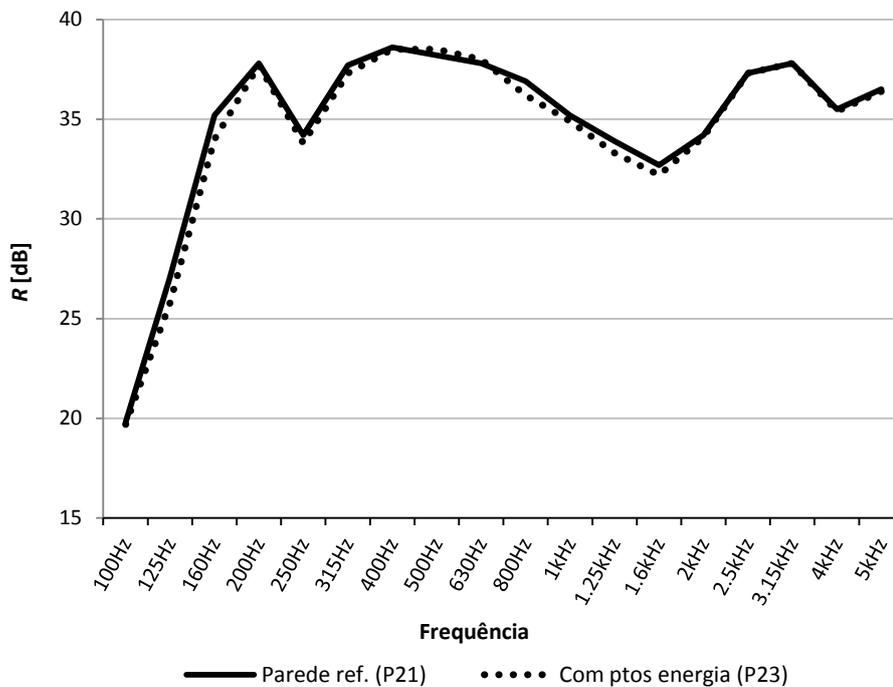


Figura 66 – Espectros de R de paredes de *light steel frame* - P21 e P23.

Fonte: Autora.

Observa-se muito pouca diferença entre os espectros de perda de transmissão medidos na parede referência e na parede após a instalação dos quatro pontos de energia, como demonstrou a Figura 66. Também não houve alteração no R_w , que era de 36 dB e assim permaneceu.

A situação mais crítica para a redução do isolamento sonoro em paredes secas, ao receberem pontos de energia elétrica, ocorre quando as duas caixas de luz estão alinhadas em ambos os lados da parede (NIGHTINGALE, 1998, p.3), situação possível de ocorrer em paredes internas. Segundo ainda o mesmo autor, a utilização de material absorvente na cavidade da parede é outro fator responsável por amenizar a redução na PT provocada pela instalação de pontos de energia.

Devido ao fato das paredes de LSF avaliadas serem externas, as caixas de luz foram instaladas somente em um dos lados da parede, de forma que a condição descrita por Nightingale não foi avaliada. Além disso, a parede referência também utilizava lã de vidro com 90 mm de espessura na cavidade entre perfis, assim, provavelmente estas sejam as razões para a pouca alteração na perda de transmissão da parede.

4.2 Avaliação do isolamento sonoro das paredes em *light steel frame* frente às normas: NBR 15575:2013, DIN 4109-11:2010 e ÖNORM B-81152:2002.

Na presente seção, as paredes externas de LSF executadas para a presente pesquisa têm seu desempenho no isolamento acústico submetido aos parâmetros de isolamento da norma brasileira de desempenho de edificações habitacionais e aos parâmetros de duas outras normas de países europeus, tradicionalmente mais rigorosos em relação aos critérios de conforto acústico.

NBR 15575:2013

Com o objetivo de avaliar o desempenho no nível de isolamento sonoro de acordo com os requisitos estabelecidos pela NBR 15575:2013 para vedações verticais externas, foram avaliadas as cinco composições de paredes com diferentes revestimentos externos: placas cimentícias, régua *Smartside*, régua *siding* vinílico, painéis XPS e placas de óxido de magnésio.

A NBR 15575-4:2013 fornece no anexo “F” uma tabela com os valores exigidos para o R_w de elementos de fachada medidos em laboratório, conforme apresentado na Seção 2.4.5, classificando-os conforme seu desempenho no isolamento sonoro em mínimo, intermediário e superior. A Tabela 20 apresenta o R_w medido para cinco das paredes externas em LSF avaliadas, utilizando diferentes revestimentos externos e especifica em qual dos níveis de desempenho a composição de parede se enquadra. Para a condição de “classe de ruído III¹⁸”, os níveis de redução sonora ponderado exigidos são ≥ 35 dB, ≥ 40 dB e ≥ 45 dB, para os níveis mínimo, intermediário e superior, respectivamente.

¹⁸ A NBR 15575:2013 define como Classe III como a condição de ruído mais extrema: habitações sujeitas a ruído intenso de meios de transporte e de outras naturezas.

Considerando a condição mais extrema de poluição sonora ambiental, definida pela NBR 15575:2013 como “classe de ruído III”, as composições de paredes avaliadas – P3, P4, P6, P8 e P13 - podem ser classificadas conforme seu nível de desempenho no isolamento sonoro, de acordo com a Tabela 20.

Tabela 20 – Classificação das cinco composições de paredes em *light steel frame* conforme os níveis de desempenho acústico requisitados pela NBR 15575:2013, na condição de classe de ruído tipo III.

Parede	Tipo de revestimento externo	R_w [dB]	Nível de desempenho acústico atendido conforme NBR 15575
P3 (CL90SV-OG)	placa cimentícia	47	superior
P4 (CL90SS-OG)	régua <i>Smartside</i>	45	superior
P6 (CL90SV-OG)	régua <i>Siding</i> vinílico	43	intermediário
P8 (CL90XPS-OG)	painel XPS	45	superior
P13 (CL90OX-OG)	placa de óxido de magnésio	47	superior

Fonte: Autora.

A análise da Tabela 20 demonstra que a composição de parede P6 (CL90SV-OG), que utiliza como revestimento externo régua de *Siding* vinílico, também atendeu à NBR 15575, porém apenas com desempenho intermediário. Se a intenção fosse atender ao nível superior para o desempenho no isolamento acústico utilizando *Siding* vinílico, como na parede P6, poderia ser feito o uso de barras resilientes ou fitas de espuma de PVC, de forma a aumentar a PT da referida parede.

DIN 4109-11:2010

A parte 11 da norma alemã trata especificamente da verificação do isolamento sonoro de elementos construtivos, estabelecendo valores mínimos de R_w a que as vedações externas devem atender, conforme a classe de ruído a que estejam expostas e o ambiente específico onde sejam executadas.

Os ruídos são classificados de 1 a 6, de acordo com LAeq¹⁹ e os ambientes são divididos em três classes, sendo cômodos em hospital aqueles que requerem maior isolamento sonoro, e escritório e similares, aquele com menor exigência para o isolamento sonoro, conforme apresentado na Tabela 21.

Tabela 21 - Exigências mínimas para o isolamento sonoro conforme a DIN 4109:2010.

Classe de ruído externo	Ruído Externo [LAeq]	Cômodos em hospital	Cômodos residenciais (dormitório, sala estar, etc) e hotel	Escritório e similares*
		R_w exigido para vedações verticais externas [dB]		
1	56 a 60	35	30	30
2	61 a 65	40	35	30
3	66 a 70	45	40	35
4	71 a 75	50	45	40
5	76 a 80	**	50	45
6	> 80	**	**	50

*Em ambientes onde a atividade exercida produza elevados NPS, não há exigência de isolamento sonoro para as paredes externas.

** Exigências devem ser definidas conforme situação local encontrada.

Fonte: Adaptada da Norma DIN 4109-11:2010.

Observa-se que os índices mínimos de isolamento sonoro exigidos pela norma alemã para residências - de 30 a 50 dB - são significativamente maiores que os índices mínimos exigidos pela NBR 15575:2013, que compreendem de 25 a 35 dB, conforme a classe de ruído encontrada no local.

A Tabela 22 apresenta as classes de ruído externo a que cada uma das 13 composições de paredes em LSF avaliadas atendem, conforme o índice de redução sonora ponderado mínimo exigido para cada tipo dos três ambientes específicos: cômodos em hospital, cômodos residenciais e escritório e similares.

A partir da análise da Tabela 22 verifica-se que a maioria das paredes externas em LSF avaliadas atende ao nível mínimo de isolamento requerido por pelo menos quatro das seis classes de ruído, para cômodos residenciais, com exceção das paredes P1 e P6.

¹⁹ Nível de pressão sonora equivalente e com ponderação "A".

Tabela 22 – Classes de ruído da DIN 4109:2010 atendidas pelo isolamento sonoro das paredes de *light steel frame* avaliadas.

Parede	R_w [dB]	Atende ao R_w exigido para paredes externas de:		
		Cômodos em hospital	Cômodos residenciais (dormitório, sala estar, etc) e hotel	Escritório e similar
		Classes de ruído: 1, 2, 3, 4, 5 e 6		
P1 (SLCI-OG)	44	Classes 1 e 2	Classes 1, 2 e 3	Classes 1, 2, 3 e 4
P2 (CL50CI-OG)	47	Classes 1, 2 e 3	Classes 1, 2, 3 e 4	Classes 1, 2, 3, 4 e 5
P3 (CL90CI-OG)	47	Classes 1, 2 e 3	Classes 1, 2, 3 e 4	Classes 1, 2, 3, 4 e 5
P4 (CL90SS-OG)	45	Classes 1, 2 e 3	Classes 1, 2, 3 e 4	Classes 1, 2, 3, 4 e 5
P5 (CL90CI-OGG)	46	Classes 1, 2 e 3	Classes 1, 2, 3 e 4	Classes 1, 2, 3, 4 e 5
P6 (CL90SV-OG)	43	Classes 1 e 2	Classes 1, 2 e 3	Classes 1, 2, 3 e 4
P7 (CL90SV-GG)	45	Classes 1, 2 e 3	Classes 1, 2, 3 e 4	Classes 1, 2, 3, 4 e 5
P8 (CL90XPS-OG)	45	Classes 1, 2 e 3	Classes 1, 2, 3 e 4	Classes 1, 2, 3, 4 e 5
P9 (CL90XPS-OG/BR)	50	Classes 1, 2, 3 e 4	Classes 1, 2, 3, 4 e 5	Todas
P10 (CL90SS-OG/BR)	49	Classes 1, 2 e 3	Classes 1, 2, 3 e 4	Classes 1, 2, 3, 4 e 5
P11 (CL90CI-OG/BR)	50	Classes 1, 2, 3 e 4	Classes 1, 2, 3, 4 e 5	Todas
P12 (CL90CI-FI)	50	Classes 1, 2, 3 e 4	Classes 1, 2, 3, 4 e 5	Todas
P13 (CL90OX-OG)	47	Classes 1, 2 e 3	Classes 1, 2, 3 e 4	Classes 1, 2, 3, 4 e 5

Fonte: Autora.

A parede P1 é a única dentre as composições de parede avaliadas em que a cavidade entre perfis não recebeu lã de vidro, de maneira que facilmente se elevaria seu isolamento sonoro adotando esta prática. A parede P6 (CL90SV-OG), por sua vez, é a composição de parede que utiliza como revestimento externo *siding* vinílico, material com baixíssima massa superficial e baixa resistência à flexão. As composições de parede P9, P11 e P12 atenderam ao nível mínimo de isolamento sonoro em cinco das seis classes de ruído. A parede P9 (CL90XPS-OG/BR) é a parede que utiliza como revestimento externo painéis XPS e barras

resilientes e as paredes P11(CL90CI-OG/BR) e P12 (CL90SS-OG/FI) são iguais à parede típica em LSF, P3 (CL90CI-OG), porém utilizam barras resilientes e fitas de espuma de PVC, respectivamente.

ÖNORM B-81152:2002

A Tabela 23 apresenta os parâmetros para isolamento acústico de vedações verticais da norma austríaca ÖNORM B-81152:2002, considerando o nível de pressão sonora equivalente de ruído externo e o tipo de edificação.

Tabela 23 – Exigências mínimas para isolamento sonoro conforme a ÖNORM B-81152:2002.

Tipo de edificação	Elementos construtivos de ambientes que devem ser protegidos do ruído externo	LAeq ruído externo dia/noite [dBA]						
		Dia	≤ 50	51 a 55	56 a 60	61 a 65	66 a 70	71 a 75
		Noite	≤ 40	41 a 45	46 a 50	51 a 55	56 a 60	61 a 65
R_w mínimo exigido [dB]								
Hospitais e similares	Paredes externas	33	38	43	48	52	*	
	Paredes geminadas	52	52	52	52	52	*	
	Paredes de sótão	47	47	47	52	52	*	
Residência s, escolas, hotéis e similares	Paredes externas	32	38	38	43	43	48	
	Paredes geminadas	52	52	52	52	52	52	
	Paredes de sótão	42	42	42	47	47	47	
Escritórios e Similares	Paredes externas	33	33	33	33	38	43	
	Paredes geminadas	52	52	52	52	52	52	
	Paredes de sotão	42	42	42	42	42	42	

* Nível de ruído externo tão elevado que não se recomenda construir este tipo de edificação no local.

Fonte: Adaptada da norma ÖNORM B-81152 – 2:2002.

A análise da Tabela 23 permite constatar que, dentre as 13 composições de paredes de LSF avaliadas, mesmo aquelas com maior índice de redução sonora ponderado - P9 (CL90XPS-OG/BR), P11 (CL90CI-OG/BR) e P12 (CL90CI-OG/FI), com R_w de 50 dB – não atendem ao mínimo exigido para paredes externas de geminação entre paredes diferentes unidades autônomas, que é de 52 dB, independente da tipologia da edificação. Na tentativa de

assegurar condições razoáveis de privacidade entre diferentes unidades autônomas separadas por uma parede geminada, é uma prática comum nos órgãos municipais ser exigido, para a aprovação de projetos de edificações, que estas sejam consideravelmente mais espessas que as demais vedações. Com o objetivo de atender ao requisito de R_w de 52 dB, às paredes de LSF P9, P11 e P12 poderiam ser adicionadas mais uma placa de gesso no lado interno ou, uma solução ainda mais eficiente em termos de isolamento sonoro: utilizar perfis estruturais independentes para cada lado da parede, conforme representado na Figura 17. Esta técnica, utilizada nos sistemas construtivos LSF ou *wood frame*, elimina a conexão mecânica entre os dois lados da parede e aumenta significativamente sua PT. Irvine (1998, p.50 e 52) relatou um aumento de 10 dB na STC de uma parede de *wood frame* revestida com uma placa de gesso de cada lado após a separação dos caibros estruturais.

Com exceção da condição de ruído mais extrema – de 71 a 75 dBA durante o dia e de 61 a 65 dBA durante a noite - todas as composições de parede, de P1 a P13, podem ser utilizadas como vedação externa tanto para residências, escolas e hotéis, quanto para escritórios e similares.

Também é possível constatar que, assim como na norma alemã DIN 4109:2010, os valores de R_w requeridos pela ÖNORM B-81152:2002 também são maiores do que os praticados pela NBR 15575:2013, conforme demonstra a Tabela 24.

Tabela 24 – Comparação entre os índices de redução sonora ponderados entre a NBR 15575:2013, DIN 4109:2010 e a ÖNORM B-81142:2002.

Valores mínimos de R_w requeridos para vedações verticais externas, conforme o tipo de edificação e a classe de ruído externo [dB]		
Brasil NBR 15575:2013	Alemanha DIN 4109:2010	Áustria ÖNORM B-81152:2002
25 a 35	30 a 50	33 a 52

Fonte: Autora.

É muito importante salientar, no entanto, que as 13 composições de paredes externas de LSF, tal como ensaiadas nesta pesquisa, são paredes externas cegas – sem esquadrias ou aberturas – e que no caso de inserir um elemento como uma porta ou janela, por exemplo, a nova perda de transmissão sonora do conjunto será uma composição entre a PT da parede de

LSF e a PT de cada elemento inserido. A PT composta, por sua vez, dependerá do coeficiente de transmissão sonora e da área de cada elemento presente na parede, conforme abordado na Seção 2.1.4.2. As três normas utilizadas como parâmetros para avaliar o desempenho das paredes de LSF estabelecem valores mínimos de R_w a que as vedações externas devem atender, independente destas paredes serem cegas ou possuírem esquadrias. Desta forma, para que o isolamento sonoro do conjunto parede com esquadrias não fique comprometido e possa continuar atendendo às referidas normas, deve-se optar pela utilização de elementos que também tenham uma elevada PT. A Seção 4.1.8, a partir da medição de PT da parede P14, oferece uma ideia de como o isolamento sonoro de uma parede pode ser afetado pela instalação de uma janela, por exemplo.

4.3 Avaliação do isolamento sonoro: parede típica em *light steel frame* x paredes convencionais.

Nesta sessão, são comparados os espectros de R obtidos nas medições de PT realizadas para a presente pesquisa, utilizando a parede típica em LSF (P3), representada na Figura 67, e os espectros de R obtidos a partir de dados bibliográficos de medições de isolamento sonoro em paredes convencionais.

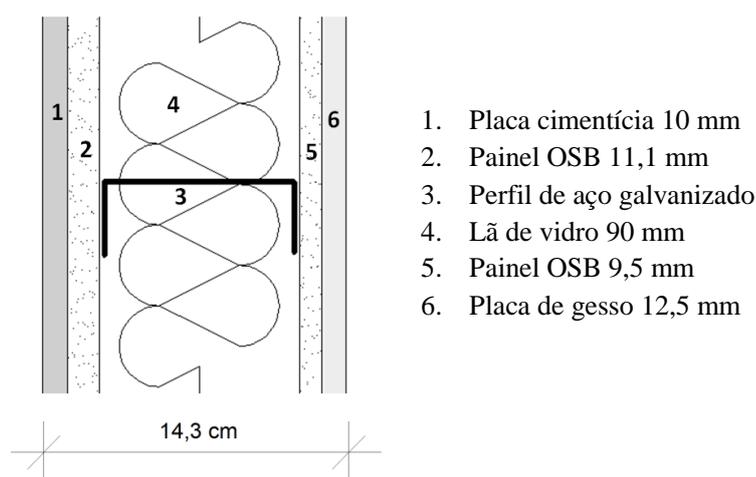


Figura 67 – Representação da secção da parede típica em *light steel frame*, P3.

Fonte: Autora.

4.31 Alvenarias de blocos de concreto x parede típica em *light steel frame*

Nesta seção foi comparado o isolamento acústico de quatro alvenarias de blocos de concreto com o isolamento sonoro proporcionado pela parede típica em LSF (P3).

Na Figura 68 observam-se os espectros de R de três paredes: uma delas é uma parede típica em LSF, P3 (CL90CI-OG), executada para a presente pesquisa, e as outras são duas paredes de blocos de concreto vazados, sendo uma delas sem reboco e a outra com reboco de gesso em ambos os lados, conforme as características obtidas de Santos (2012, p.24 e 25) e especificadas na Tabela 25.

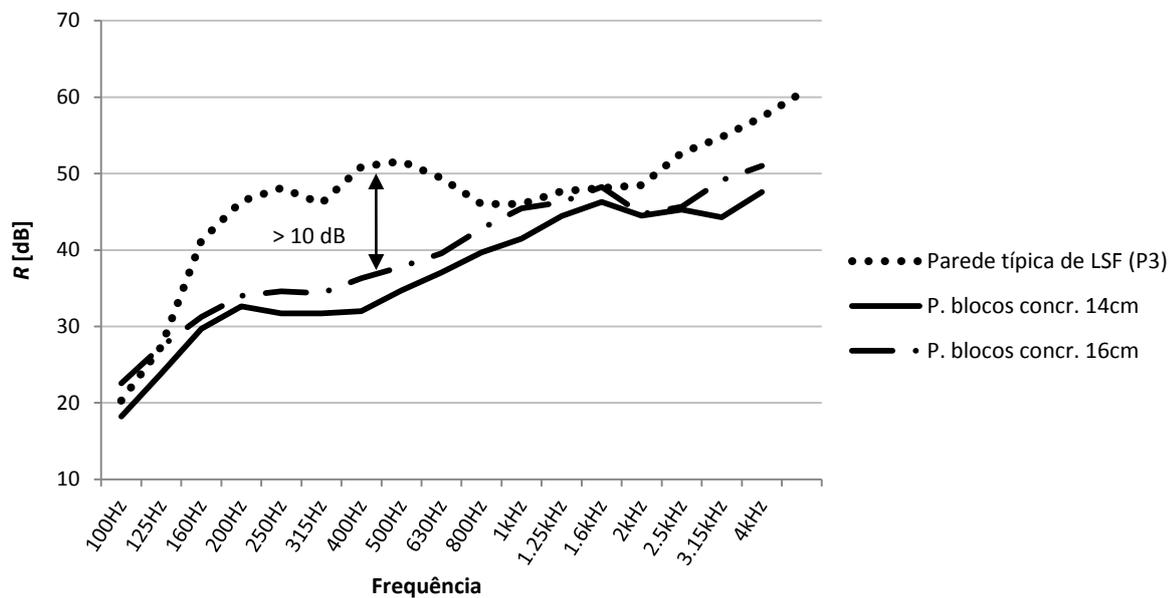


Figura 68 – Espectros de R de parede típica em *light steel frame* e paredes de blocos de concreto com espessura de 14 e 16 cm e m'' de 163 e 171 kg/m^2 , respectivamente.

Fonte: Autora.

A análise da Figura 68 permite constatar que, especialmente entre as frequências de 160 a 800 Hz, a parede de LSF possui desempenho consideravelmente melhor no isolamento sonoro em relação às demais. A partir de 2000 Hz observa-se novamente que a parede em LSF tem maior R , se comparada às paredes de blocos de concreto. Este aumento pode ser atribuído ao efeito de desacoplamento, que ocorre após a frequência crítica, na região da coincidência (SANTOS, 2012, p. 33).

Tabela 25 – Características das paredes de blocos de concreto (espessura de 14 e 16 cm e m'' de 163 e 171 kg/m^2) e de *light steel frame*.

Tipo de parede	Espessura [cm]	m'' [kg/m^2]	R_w [dB]	STC [dB]
Blocos de concreto*	14*	163*	39*	-
Blocos de concreto*	16*	171*	43*	-
<i>Light steel frame</i> (P3)	14,3	44,3	47	48

* Dados fornecidos por Santos (2012, p.24 e 25).

Fonte: Autora.

A Figura 69 apresenta o espectro de PT sonora de outra parede de blocos de concreto, obtido de Bistafa (2011, p.296) juntamente com os espectros da parede típica em LSF (P3) e a Tabela 26 apresenta as características destas paredes.

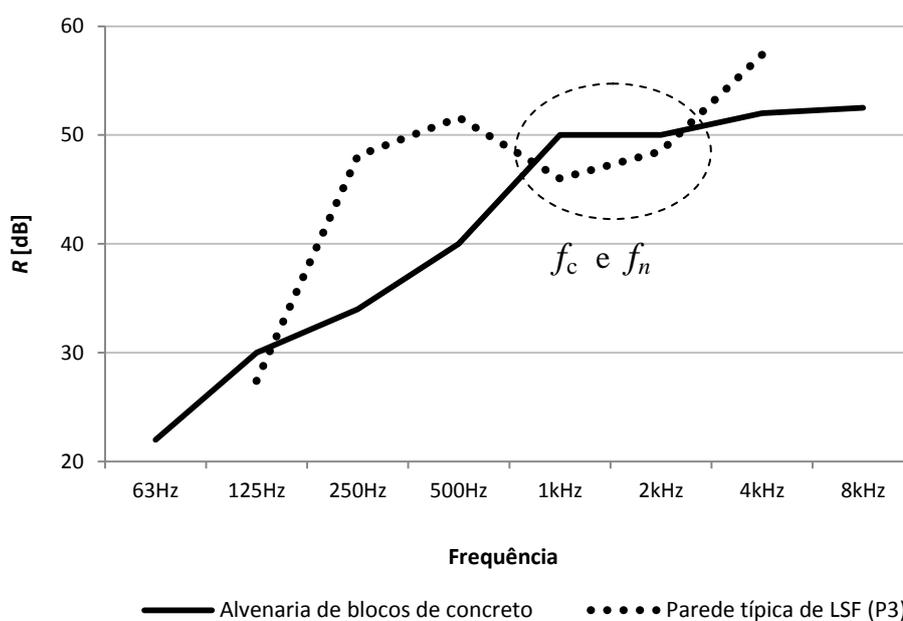


Figura 69 – Espectros de R de parede de *light steel frame* e de alvenaria de blocos de concreto com espessura de 10 cm e m'' de 75 kg/m^2 .

Fonte: Autora.

A análise dos espectros de R de ambas as paredes, na Figura 69, permite observar que o desempenho no isolamento sonoro da parede típica em LSF (P3) é superior ao da alvenaria de blocos de concreto entre as frequências de 125 e 1000 Hz e novamente após 2000 Hz, quando a curva de R da parede de blocos apresenta certa estagnação no isolamento sonoro. O R_w de 45 dB da parede de blocos de concreto contra o R_w de 47 dB da parede típica em LSF

(P3), apresentados na Tabela 26, confirmam a tendência observada nos espectros de R da Figura 69. Entretanto, na região destacada como f_c e f_n , onde ocorrem as frequências de coincidência e as ressonâncias na cavidade, observa-se uma queda na PT da parede dupla, fazendo com a parede de blocos de concreto tenha maior isolamento sonoro em relação à parede típica em LSF (P3), nesta região.

Tabela 26 – Características das paredes de blocos de concreto (espessura de 10 cm e m'' de 75 kg/m²) e de *light steel frame*.

Tipo de parede	Espessura [cm]	m'' [kg/m ²]	R_w [dB]	STC [dB]
Blocos de concreto*	10*	75*	45	-
<i>Light steel frame</i> (P3)	14,3	44,3	47	48

* Dados fornecidos por Bistafa (2011, p.296).

Fonte: Autora.

Irvine (1998, p. 57) apresenta os valores de R para uma alvenaria de blocos de concreto, compondo o espectro de R representado na Figura 70, juntamente com o espectro de R obtido nas medições de PT na parede típica em LSF (P3).

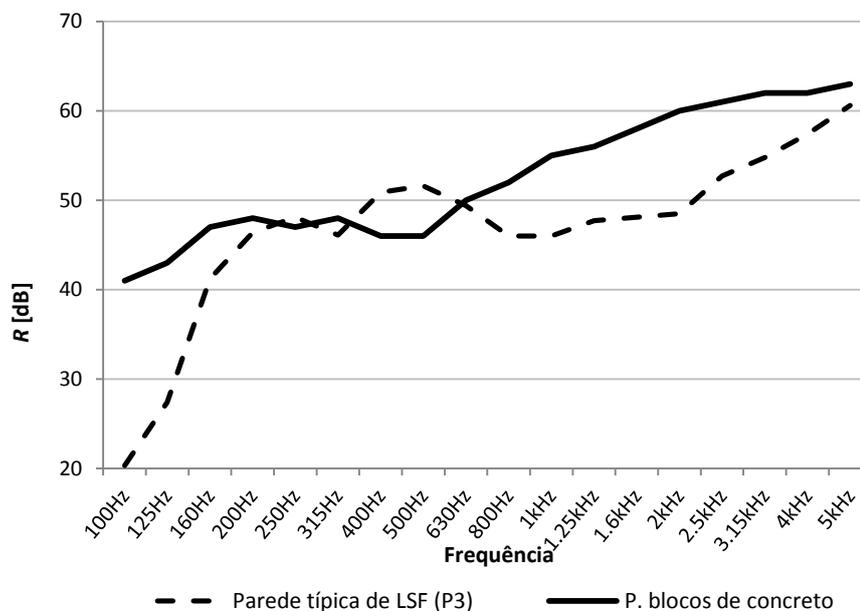


Figura 70 - Espectros de R de parede típica em *light steel frame* e da alvenaria de blocos de concreto com espessura de 20,3 cm e m'' de 249 kg/m².

Fonte: Autora.

A análise da Figura 70 permite observar que a parede de blocos de concreto apresenta melhor desempenho no isolamento sonoro em relação à parede típica em LSF (P3). A STC de ambas as paredes, verificada na Tabela 27, permite essa confirmação.

Tabela 27 – Características das paredes de blocos de concreto (espessura de 20,3 cm e m'' de 249 kg/m²) e de *light steel frame*.

Tipo de parede	Espessura [cm]	m'' [kg/m ²]	R_w [dB]	STC [dB]
Blocos de concreto*	20,3*	249*	-	54*
<i>Light steel frame</i>	14,3	44,3	47	48

* Dados fornecidos por Irvine (1998, p.57).

Fonte: Autora.

No entanto, é importante destacar que a parede de LSF tem 1/6 da massa superficial da alvenaria de blocos de concreto e é 30% menos espessa, o que justifica a superioridade no isolamento sonoro da segunda em relação à primeira, principalmente em baixas frequências, onde o fator massa por unidade de área é decisivo na PT de uma parede.

4.3.2 Alvenarias de blocos cerâmicos x parede típica em *light steel frame*

A Tabela 28 apresenta as características de duas alvenarias de blocos cerâmicos, bem como a classificação dos seus isolamentos sonoros - pelo R_w e STC - em comparação com a parede típica em LSF (P3).

Tabela 28 – Características das paredes de blocos de cerâmicos (espessura de 17,5 e 18 cm e m'' de 201 e 170 kg/m²) e de *light steel frame*.

Tipo de parede	Espessura [cm]	m'' [kg/m ²]	R_w [dB]	STC [dB]
Blocos cerâmicos (12 MPa)*	17,5*	201*	44*	-
Blocos cerâmicos (vedação)*	18*	170*	43*	-
<i>Light steel frame</i> (P3)	14,3	44,3	47	48

* Dados fornecidos por Santos (2012, p.21 e 22).

Fonte: Autora.

Na Figura 71 são apresentados os espectros de R de duas alvenarias em blocos cerâmicos, a partir dos dados de Santos (2012, p.21 e 22), juntamente com os espectros de R da parede típica em LSF (P3).

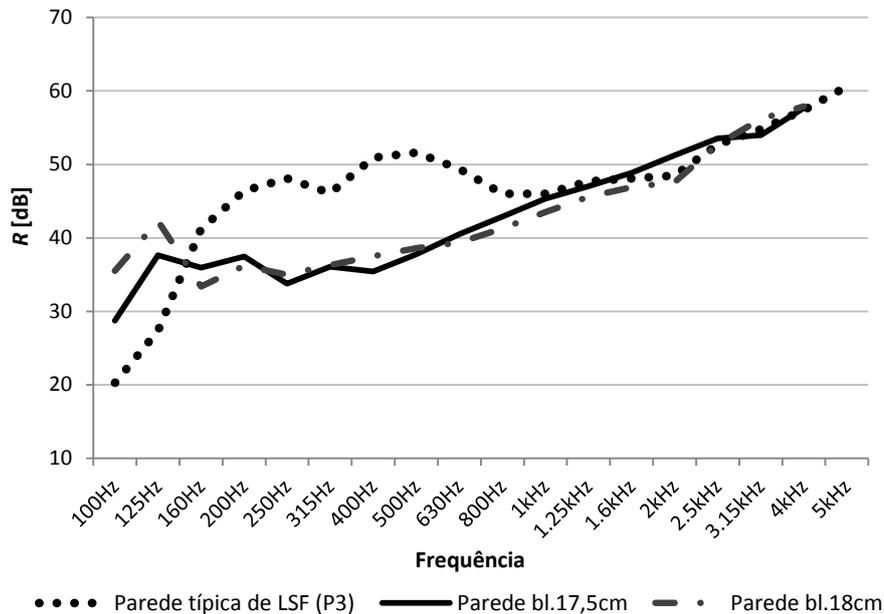


Figura 71 - Espectros de R de parede típica em *light steel frame* e alvenarias de blocos cerâmicos com espessura de 17,5 e 18 cm e m'' de 201 e 170 kg/m^2 , respectivamente.

Fonte: Autora.

A diferença entre os espectros de R das três paredes, na Figura 71, é especialmente perceptível nas frequências entre 160 e 1000 Hz, onde se observa que a parede típica em LSF (P3) tem melhor desempenho na PT em relação às outras duas. Além disso, conforme apresentado na Tabela 28, a parede típica em LSF possui menor espessura do que as outras duas paredes, possibilitando um ganho de área útil nos ambientes. A massa da parede típica em LSF tem no mínimo 1/4 da massa superficial quando comparada às paredes de blocos cerâmicos, permitindo economia com a parte estrutural da obra.

Apenas abaixo da frequência de 160 Hz as paredes de blocos cerâmicos apresentam maior PT em relação à parede típica em LSF (P3), pois nessa região, a ligação elástica entre as faces das paredes duplas, se comporta como uma ligação rígida. Assim, a maior capacidade de isolamento sonoro pertence àquela parede que possuir maior massa por unidade de área, neste caso, as paredes de blocos cerâmicos.

4.3.3 Paredes de tijolos cerâmicos maciços x parede típica em *light steel frame*

Na Figura 72, a partir dos espectros de R , são comparados o desempenho no isolamento acústico entre a alvenaria de tijolos maciços, com valores de R fornecidos por Bistafa (2011, p.295), e a parede típica em LSF (P3).

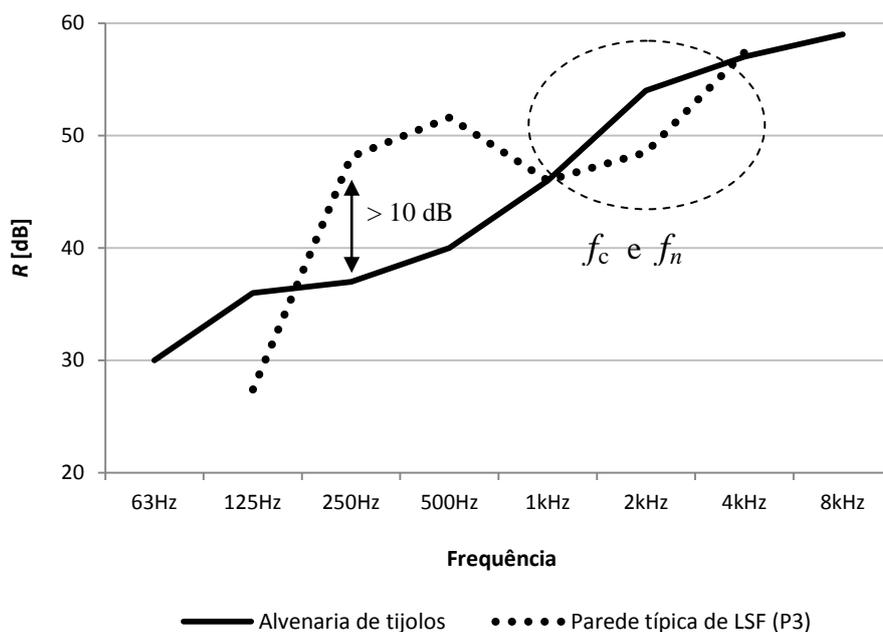


Figura 72 - Espectros de R de parede típica em *light steel frame* e de alvenaria de tijolos maciços com espessura de 12,5 cm e m'' de 240 kg/m².

Fonte: Autora.

A análise da Figura 72 permite verificar, nas frequências entre 200 e 1000 Hz, um aumento superior a 10 dB no índice de redução sonora, R , da parede típica em LSF (P3) em relação à parede de tijolos maciços. Porém, nas frequências abaixo de 160 Hz e entre 1000 e 4000 Hz pode-se observar certa superioridade da parede de tijolos maciços em relação à parede típica em LSF (P3) no que diz respeito à PT. Essa tendência também pode ser observada na Figura 69 e na Figura 71.

A Tabela 29 também permite a comparação entre ambas as paredes – tijolos maciços e LSF – através dos seus respectivos R_w .

Tabela 29 – Características das paredes de tijolos maciços (espessura de 12,5 cm e m'' de 240 kg/m²) e de *light steel frame*.

Tipo de parede	Espessura [cm]	m'' [kg/m ²]	R_w [dB]	STC [dB]
Tijolos maciços*	12,5*	240*	45	-
<i>Light steel frame</i> (P3)	14,3	44,3	47	48

* Dados fornecidos por Bistafa (2011, p.295).

Fonte: Autora.

O espectro de R de outra alvenaria de tijolos cerâmicos maciços, a partir dos dados de Santos (2012, p. 23), é apresentado na Figura 73, juntamente com a curva de PT da parede típica em LSF (P3). Ambas as paredes possuem R_w de 47 dB, conforme a Tabela 30, entretanto, podem ser observadas curvas de R bastante distintas entre elas.

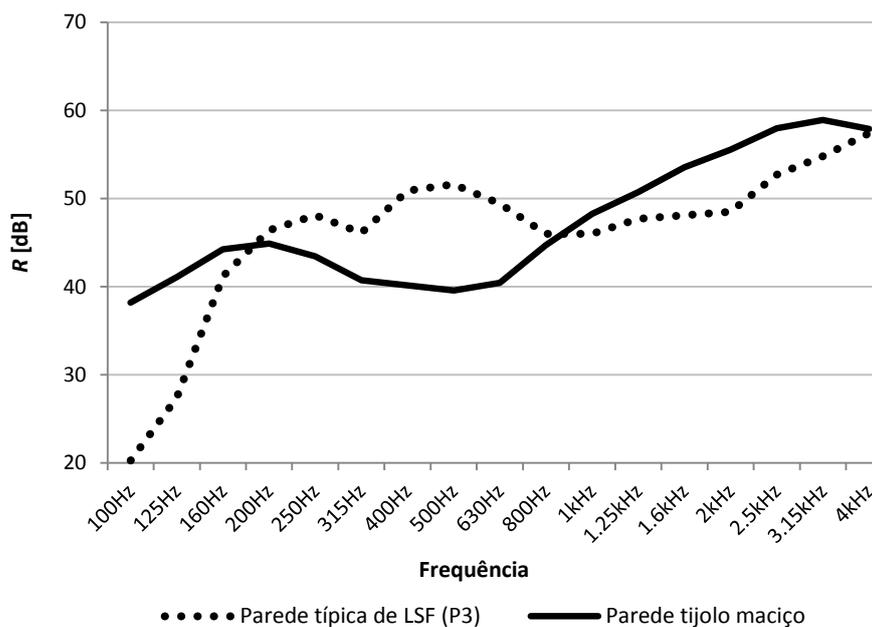


Figura 73 – Espectros de R de parede típica em *light steel frame* e de alvenaria de tijolos maciços com espessura de 13 cm e m'' de 249 kg/m².

Fonte: Autora

A partir da análise da Figura 73 e da Tabela 30, se pode observar que, apesar do R_w das suas paredes avaliadas ser o mesmo, há superioridade no isolamento sonoro de uma sobre a outra em determinadas frequências e vice-versa.

Tabela 30 – Características das paredes de tijolos maciços (espessura de 13 cm e m'' de 249 kg/m²) e de *light steel frame*.

Tipo de parede	Espessura [cm]	m'' [kg/m ²]	R_w [dB]	STC [dB]
Tijolos maciços*	13*	249*	47*	-
<i>Light steel frame</i> (P3)	14,3	44,3	47	48

* Dados fornecidos por Santos (2012, p.23).

Fonte: Autora.

A parede de tijolos cerâmicos maciços apresenta maior PT nas frequências abaixo de 200 Hz e acima de 1 kHz em relação à parede típica em LSF (P3) e, esta por sua vez, apresenta maior isolamento sonoro entre as frequências de 200 Hz e 1 kHz. Desta forma, torna-se evidente que se deve atentar para a grande diferença entre as massas das paredes comparadas, e para qual faixa de frequências especificamente se deseja isolar, ao escolher por uma das duas soluções construtivas apresentadas.

4.3.4 Parede de madeira x parede típica em *light steel frame*

Na avaliação duas paredes com igual massa superficial espera-se, pela lei da massa, que o desempenho no isolamento sonoro de ambas seja semelhante. Entretanto, a lei da massa é válida apenas para painéis simples ou homogêneos e para uma determinada frequência, conforme anteriormente abordado na Seção 2.1.4.1.

A Tabela 31 apresenta as características de duas paredes com igual massa superficial, sendo uma, homogênea ou simples e a outra, dupla.

Tabela 31 – Características das paredes de madeira (espessura de 6,6 cm e m'' de 44 kg/m²) e de *light steel frame*.

Tipo de parede	Espessura [cm]	m'' [kg/m ²]	R_w [dB]	STC [dB]
Painel de madeira*	6,6*	44*	34	-
<i>Light steel frame</i> (P3)	14,3	44,3	47	48

* Dados fornecidos por Bistafa (2011, p.298).

Fonte: Autora.

A análise da Tabela 31 permite constatar a diferença na superioridade de 13 dB no R_w da parede típica em LSF (P3) em relação ao painel simples de madeira.

Os espectros de R representados na Figura 74 são do painel de madeira - considerado uma parede simples ou homogênea - e da parede típica em LSF (P3), considerada uma parede dupla com varias camadas de revestimento. Ambas as paredes possuem a mesma massa superficial.

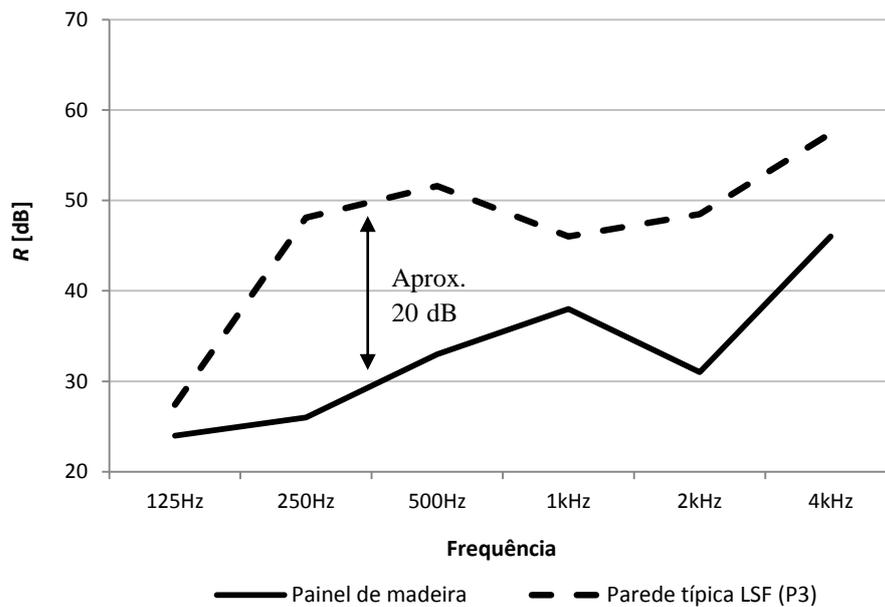


Figura 74 - Espectros de R de parede típica em LSF e painel de madeira (com espessura de 6,6 cm e m'' 44 kg/m²).

Fonte: Autora.

A Figura 74 não deixa dúvidas a respeito da capacidade de cada uma em isolar ruídos externos, permitindo constatar que a parede típica em LSF (P3) possui desempenho bastante superior na PT se comparada ao painel de madeira, embora ambas tenham a mesma massa superficial. Tal fato confirma o apontado por Irvine (1998, p.45), o qual afirma que, quando a massa de uma parede é dividida em dois ou mais elementos, há um aumento significativo na PT promovida.

4.3.5 Paredes de concreto x parede típica em *light steel frame*

Os valores de R de uma parede de concreto maciça são apresentados por Irvine (1998, p.58) e juntamente com os espectros de R da parede típica em LSF (P3), compõe a Figura 75.

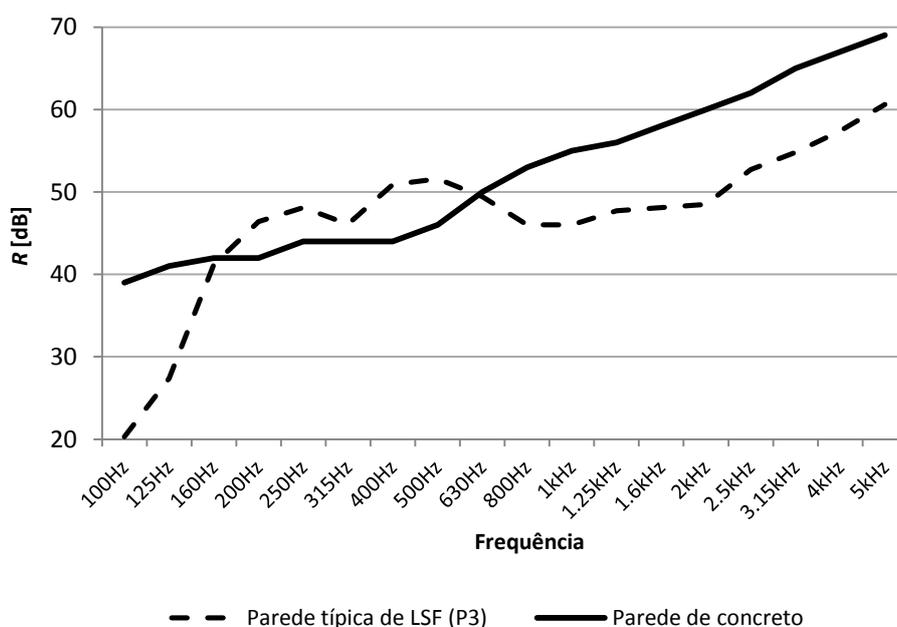


Figura 75 - Espectros de R de parede típica em *light steel frame* e da parede de concreto com espessura de 10,2 cm e m'' de 255 kg/m².

Fonte: Autora

A Figura 75 demonstra maior PT da parede de concreto em relação à parede típica em LSF (P3), exceto entre 160 e 630 Hz, quando a segunda parede apresenta um desempenho ligeiramente superior à primeira. Esta superioridade também é confirmada pelos valores de STC de ambas as paredes, constantes na Tabela 32.

Tabela 32 – Características das paredes de concreto (espessura de 10,2 cm e m'' de 255 kg/m²) e de *light steel frame*.

Tipo de parede	Espessura [cm]	m'' [kg/m ²]	R_w [dB]	STC [dB]
Concreto*	10,2*	255*	-	53*
<i>Light steel frame</i> (P3)	14,3	44,3	47	48

* Dados fornecidos por Irvine (1998, p.58).

Fonte: Autora.

Também é possível observar, a partir dos espectros de R da Figura 75, que nas frequências inferiores à 160 Hz, há uma diferença de quase 20 dB na PT de ambas as paredes. Isto é justificado, pois na região onde ocorre a frequência de ressonância massa – mola – massa, as paredes duplas, como uma parede em LSF, por exemplo, têm o comportamento no isolamento sonoro semelhante às paredes simples ou homogêneas. Assim, é natural que elas apresentem menor PT, nesta faixa de frequência, uma vez que possuem massa superficial geralmente muito menor em relação às paredes homogêneas, especialmente aquelas em concreto maciço. Esta tendência, de baixo isolamento sonoro nas baixas frequências pode ser observada em todas as paredes em LSF avaliadas na presente pesquisa.

Dados fornecidos por Santos (2012, p.27), compõem os espectros de R apresentados no gráfico de PT, na Figura 76, e são comparados ao espectro de PT da parede típica em LSF (P3).

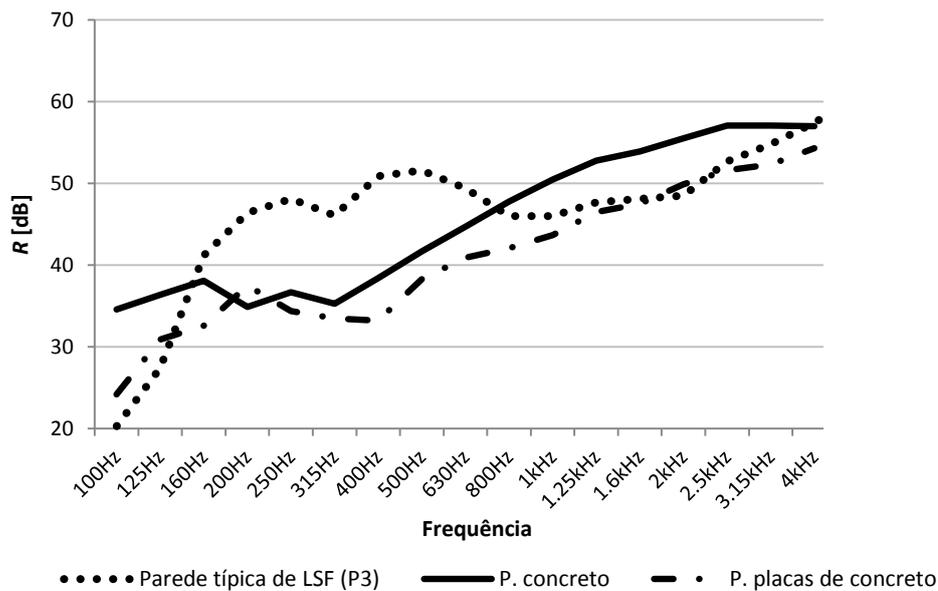


Figura 76 - Espectros de R de parede típica em *light steel frame*, parede de concreto polimerizado (com espessura de 10 cm e m'' entre 190-195 kg/m²) e parede de placas de concreto (com espessura de 10 cm e m'' entre 163 kg/m²).

Fonte: Autora.

A análise da Figura 76 permite constatar espectros sonoros bastante distintos entre a parede de concreto e a parede típica em LSF (P3), apesar de ambas as paredes possuírem o mesmo R_w , 47 dB. Enquanto a parede típica em LSF (P3) se destaca com melhor isolamento

sonoro nas frequências entre 160 e 800 Hz em relação à parede de concreto, a parede de concreto apresenta maior PT de 800 a 3150 Hz em relação à parede típica em LSF (P3). O espectro de PT da parede de placas de concreto, com juntas verticais e horizontais preenchidas com espuma de polietireno expandido, demonstra claramente seu inferior desempenho no isolamento sonoro quando comparado às outras duas, confirmado pelo seu R_w , 4 dB inferior às demais, conforme apresentado na Tabela 33.

A Tabela 33 apresenta as características de duas paredes de concreto, sendo uma delas de concreto polimerizado²⁰ e a outra de placas de concreto.

Tabela 33 – Características das paredes de concreto polimerizado (espessura de 10 cm e m'' entre 190-195 kg/m²), de placas de concreto (espessura de 10 cm e m'' entre 163 kg/m²) e de *light steel frame*.

Tipo de parede	Espessura [cm]	m'' [kg/m ²]	R_w [dB]	STC [dB]
Concreto polimerizado*	10*	190-195*	47*	-
Placas de concreto*	10*	163*	43*	-
<i>Light steel frame</i> (P3)	14,3	44,3	47	48

* Dados fornecidos por Santos (2012, p.27).

Fonte: Autora.

Desta forma, a escolha por uma das soluções construtivas com igual R_w - parede de concreto polimerizado ou parede típica em LSF (P3) - dependerá de qual frequência sonora se deseja isolar, entretanto, também deve levar em consideração as espessuras e massas superficiais bem distintas que cada uma apresenta.

4.4 Avaliação do isolamento sonoro: parede típica em *light steel frame* x paredes secas

Nesta seção, o desempenho na PT da parede típica em LSF é comparado com o desempenho de paredes de *wood frame* e de *light steel frame*.

A partir dos dados de R fornecidos por Bistafa (2011, p. 298) para uma parede de *wood frame* e aqueles obtidos nas medições de PT realizadas na parede típica em LSF (P3) na

²⁰ Autoadensável e modificado com polímero (SANTOS, 2012, p.27).

presente pesquisa, é possível plotar os espectros de R apresentados na Figura 77, comparando o desempenho no isolamento sonoro de ambas as paredes.

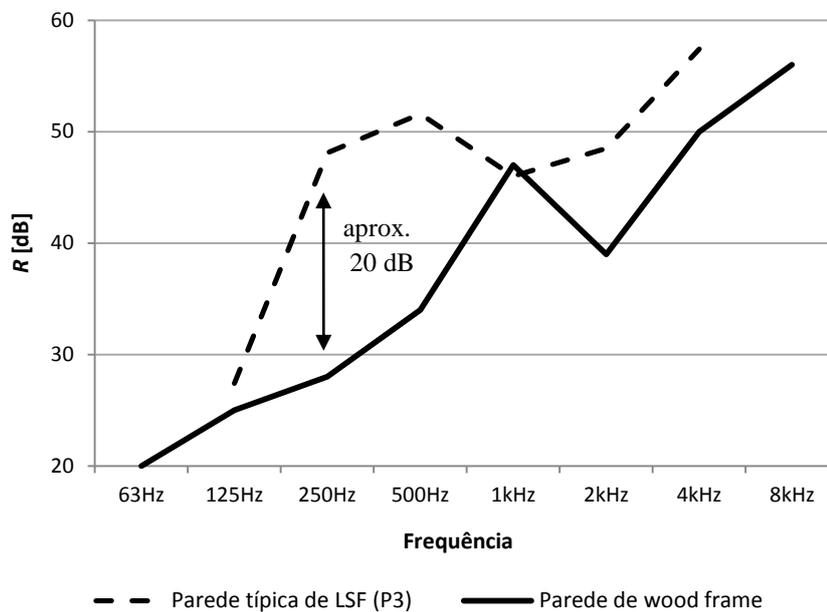


Figura 77 - Espectros de R de parede típica em *light steel frame* e parede de *wood frame* (com espessura de 14,2 cm e m'' entre 60 kg/m²).

Fonte: Autora.

A análise dos espectros de R das duas paredes permite facilmente constatar o melhor desempenho no isolamento acústico da parede típica em LSF (P3) em relação à parede de *wood frame*. Apesar da parede de *wood frame* também ser classificada como uma parede dupla e possuir mais massa do que a parede típica em LSF (P3), em algumas frequências a diferença nos valores do índice de redução sonora entre ambas as paredes alcança 20 dB. Tal fato se deve a menor rigidez torcional dos perfis metálicos em relação aos caibros de madeira, conforme anteriormente abordado na Seção 2.1.4.3.

O R_w da parede de *wood frame* é 9 dB inferior ao R_w da parede típica em LSF (P3), conforme apresentado na Tabela 34, que também apresenta a espessura e massa superficial para ambas as paredes.

Tabela 34 – Características das paredes de *wood frame* (espessura de 14,2 cm e m'' entre 60 kg/m^2) e de *light steel frame*.

Tipo de parede	Espessura [cm]	m'' [kg/m^2]	R_w [dB]	STC [dB]
<i>Wood frame</i> *	14,2*	60*	38	-
<i>Light steel frame</i> (P3)	14,3	44,3	47	48

* Dados fornecidos por Bistafa (2011, p.296).

Fonte: Autora.

O desempenho no isolamento sonoro de outra parede de *wood frame* é apresentado na Figura 78, onde a curva de PT foi gerada a partir dos valores do índice de redução sonora, R , fornecidos por Irvine (1998, p.50) e utilizados para comparação com a curva de PT da parede típica em LSF (P3).

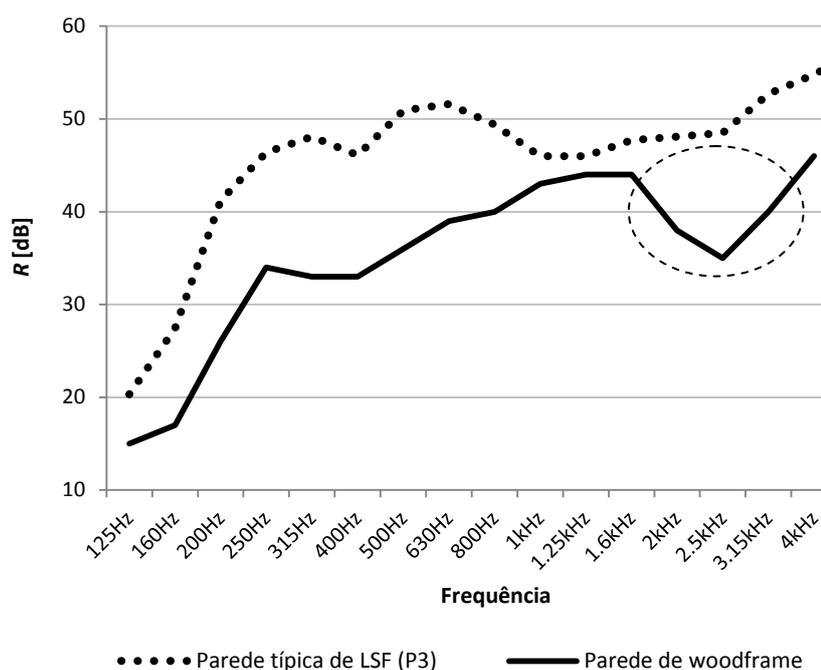


Figura 78 - Espectros de R de parede típica em *light steel frame* e parede de *wood frame* (com espessura de 13,4 cm e m'' não informada).

Fonte: Autora.

A análise dos espectros sonoros da Figura 78 revela novamente que a parede típica em LSF (P3) apresenta maior PT em relação à parede de *wood frame*, em todas as frequências. Pode se observar, na área destacada, que a parede de *wood frame* possui uma queda de PT

bem mais acentuada na região da coincidência – indicada pela frequência crítica – se comparada à parede típica em LSF (P3). O fenômeno da coincidência ocorre quando há igualdade no comprimento da onda sonora incidente e o comprimento de flexão do painel. Ocorre que, ao utilizar placas de revestimentos de mesmo material e igual massa superficial em ambos os lados de uma parede dupla – como é o caso da parede de *wood frame* de Irvine (1998, p.50), que utiliza uma placa de gesso de 1,6 cm em cada lado dos caibros – as duas faces da parede terão mesma frequência crítica, visto que a frequência crítica depende do material e da sua espessura. Neste caso, o acoplamento da parede ao ar, é facilitado, resultando em menor isolamento sonoro. A mesma tendência de queda drástica do isolamento sonoro na região da coincidência pode ser observada nos espectros de R de outra parede, em LSF, na Figura 79.

A superioridade no desempenho do isolamento sonoro da parede típica em LSF (P3) em relação à parede de *wood frame* também pode ser constatada através da comparação entre as classes de transmissão sonora, na Tabela 35.

Tabela 35 – Características das paredes de *wood frame* (espessura de 13,4 cm e m'' não informada) e de *light steel frame*.

Tipo de parede	Espessura [cm]	m'' [kg/m ²]	R_w [dB]	STC [dB]
<i>Wood frame</i> *	13,4*	-	-	37*
<i>Light steel frame</i> (P3)	14,3	44,3	47	48

* Dados fornecidos por Irvine (1998, p.50)

Fonte: Autora.

Apesar dos dados de Irvine não incluírem a massa superficial, conforme a Tabela 35, devido a espessura de ambas as paredes serem semelhantes e aos caibros de madeira maciça utilizados na estrutura do sistema *wood frame* serem mais pesados e o espaçamento entre eles ser menor do que entre os perfis de aço leve utilizados no sistema LSF, possivelmente a primeira parede tenha massa superficial maior do que a segunda.

A Tabela 36 apresenta as características de duas paredes em LSF, sendo uma delas a parede típica em LSF (P3), desenvolvida para a presente pesquisa e a outra, uma parede em LSF que teve seu desempenho acústico avaliado por Irvine (1998, p.55).

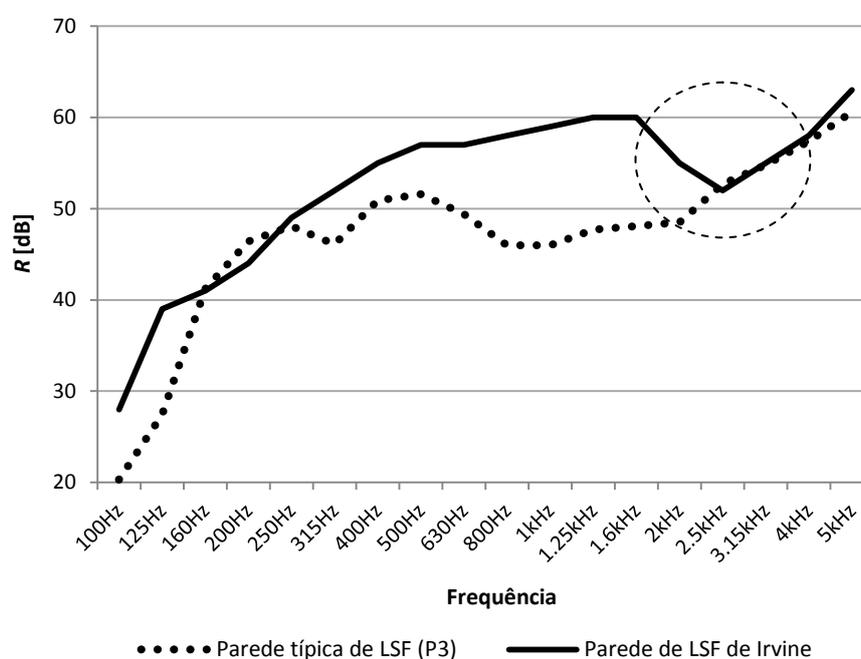
Tabela 36 – Características das duas paredes de *light steel frame*.

Tipo de parede	Espessura [cm]	m'' [kg/m ²]	R_w [dB]	STC [dB]
<i>Light steel frame</i> *	15,4*	50,3*	-	56*
<i>Light steel frame</i> (P3)	14,3	44,3	47	48

* Irvine (1998, p.55)

Fonte: Autora.

Na Figura 79 os espectros de R de ambas as paredes de LSF são apresentados.

Figura 79 – Espectro de R de duas paredes em *light steel frame*.

Fonte: Autora.

Na Figura 79 observa-se claramente a superioridade no isolamento sonoro da parede de Irvine em relação à parede típica em LSF (P3), confirmada pela STC 8 dB maior da primeira em relação à segunda, conforme apresentado na Tabela 36. A configuração de montagem das duas paredes é bastante semelhante, embora a parede típica em LSF (P3) seja uma parede externa e a parede de Irvine seja uma parede interna. A diferença entre elas está nas placas de revestimento. Na parede típica em LSF (P3), externamente, utilizou-se placa cimentícia e painel OSB e internamente, painel OSB e placa de gesso. Já na parede de LSF

ensaiada por Irvine, utilizaram-se duas placas de gesso em ambos os lados da parede, fazendo com que esta tenha mais massa superficial e espessura do que a parede típica em LSF (P3) e, justificando assim, sua superioridade no isolamento sonoro em relação à parede típica em LSF (P3).

Assim como a parede de *wood frame* cujo espectro de R foi apresentado no gráfico da Figura 78, com dados fornecidos por Irvine (1998, p.50), a parede de LSF novamente ensaiada por Irvine (1998, p.55), também apresenta uma queda bastante acentuada entre 2000 e 4000 Hz, destacada pela área tracejada na Figura 79. Tal fato se deve à utilização de placas de revestimento de mesmo material e espessura, portanto, igual massa superficial, m'' , em cada lado da parede dupla. Conforme anteriormente mencionado, isto faz com que as duas faces da parede tenham a mesma frequência crítica e com isso apresentem uma redução drástica da PT, comprometendo o isolamento sonoro nesta região.

4.5 Avaliação do isolamento sonoro da parede típica em *light steel frame* frente ao ruído ambiental

Com o objetivo de verificar a eficiência da parede típica em LSF (P3) em isolar o ruído geralmente presente nos centros urbanos, plotou-se em um mesmo gráfico os espectros sonoros de ruído ambiental e a curva de R da parede típica em LSF (P3), conforme demonstra a Figura 80. O espectro sonoro representado é do ruído ambiental²¹ da Avenida Getúlio Vargas, via com tráfego intenso de veículos automotores na cidade de Santa Maria/RS, obtido a partir da medição do LAeq e LCEq, no dia 14 de maio de 2012. Os dados foram fornecidos por um estudante da disciplina “Ruídos, Vibrações e o Ser Humano”, do curso de Engenharia Acústica na UFSM.

Ao aplicar aos NPS a ponderação²² C - conhecida por ser a mais representativa da sensação auditiva humana, para NPS em ponderação próximos a 100 dB - observa-se que a maior quantidade de energia sonora do espectro LCEq [dBC] está presente nas baixas frequências, decaindo gradualmente em direção as médias e altas frequências.

²¹ Ruído de veículos automotores e atividades em geral, como construção civil e de lazer, por exemplo.

²² A ponderação é uma tentativa de aproximar os NPS obtidos à sensação subjetiva de intensidade de ruído, ou seja, à audibilidade humana.

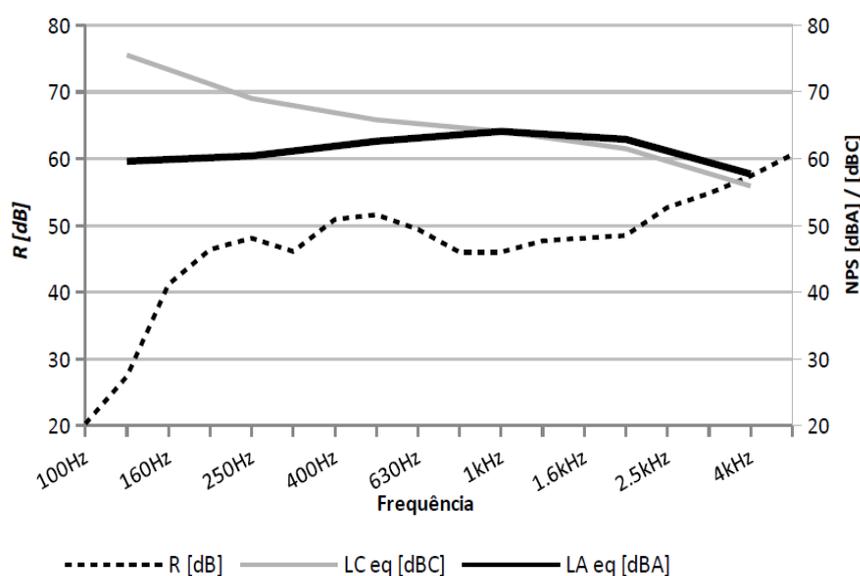


Figura 80 – Espectros de ruído ambiental com ponderação “A” e “C” e espectro de R da parede típica em *light steel frame*.

Fonte: Autora.

O isolamento sonoro proporcionado pela parede típica em LSF (P3) é visivelmente precário nas baixas frequências e essa é uma tendência observada em paredes duplas. Abaixo da frequência de ressonância a capacidade de uma parede dupla em isolar ruídos é menor do que a de uma parede simples com igual massa (SANTOS, 2012, p.32).

Ao aplicar a ponderação A aos NPS do ruído ambiental gravado, o espectro da parede típica em LSF revela-se mais eficiente no seu isolamento sonoro, visto que nas frequências onde a curva LAeq [dBA] possui maior quantidade de energia sonora, entre 630 e 2500 Hz, os valores do índice de redução sonora estão entre 40 e 50 dB.

O estabelecimento de níveis de desempenho no isolamento acústico para vedações verticais deve ser compatível com a proteção da privacidade contra ruídos de atividades nos ambientes adjacentes, como música e conversa, entre outras (NBR 15575-4:2013, p.56).

A Tabela 37 apresenta a privacidade proporcionada a partir da STC de uma parede e a classifica conforme seu desempenho no isolamento acústico proporcionado, de precária a excelente.

Tabela 37 – Classes de transmissão sonora, condições de privacidade e classificações subjetivas associadas.

STC [dB]	Privacidade	Classificação
25	Voz normal facilmente inteligível	Precária
30	Voz elevada razoavelmente inteligível; voz normal pouco inteligível	Fraca
35	Voz elevada pouco inteligível; voz normal não inteligível	Razoável
40	Voz normal não inteligível; voz normal inaudível	Boa
45	Voz elevada ouvida muito fracamente	Muito boa
50	Voz elevada inaudível	Excelente

Fonte: Adaptada de Bistafa (2012, p.293).

Embora as paredes avaliadas sejam paredes externas, no caso destas fazerem divisa com áreas de uso comum em um condomínio, por exemplo, como estacionamentos ou áreas de lazer, entre outras, pode-se considerar que garantir a privacidade também seja necessário.

Baseada nos parâmetros apontados por Bistafa (2012, p.293), constantes na Tabela 37, as treze paredes de LSF avaliadas nesta pesquisa têm a classificação da privacidade proporcionada determinada na Tabela 38.

Tabela 38 – Privacidade proporcionada pelo isolamento sonoro das paredes de *light steel frame* avaliadas.

Parede	STC [dB]	Classificação da privacidade proporcionada
P1 (SLCI-OG), P2 (CL50CI-OG), P3 (CL90CI-OG), P4 (CL90SS-OG), P5 (CL90SS-OGG), P6 (CL90SV-OG), P7 (CL90SV-GG), P8 (CL90XPS-OG) e P13 (CL90OX-OG)	45 - 49	Muito boa
P9 (CL90XPS-OG/BR), P10 (CL90SS-OG/BR), P11 (CL90CI-OG/BR) e P12 (CL90CI-OG/FI)	50 - 52	Excelente

Fonte: Autora.

A análise da Tabela 38 permite constatar que as paredes de LSF avaliadas proporcionam privacidade de forma satisfatória, especialmente aquelas que utilizam

dispositivos de amortecimento das vibrações – barras resilientes ou fita de espuma de PVC – como as paredes P9, P10, P11 e P12.

4.6 Comparativo de custos entre paredes de *light steel frame* e paredes convencionais

O custo, referente aos insumos, de quatro paredes convencionais foi calculado para comparação com os valores já obtidos para algumas das paredes construídas no sistema LSF. Características como massa superficial e espessura, além do respectivo isolamento sonoro proporcionado referente a cada parede, compõem os dados contidos na Tabela 36 e foram obtidos na bibliografia indicada. O objetivo é que a avaliação comparativa entre as paredes não se limite apenas ao fator custo e sim considere outras variáveis importantes.

As três paredes de LSF escolhidas para compor a Tabela 39, juntamente com as paredes convencionais foram: aquela que apresentou menor custo, P13 (CL90OX-OG), a parede típica em LSF, P3 (CL90CI-OG), e a parede com o melhor desempenho no isolamento acústico, P11 (CL90CI-OG/BR).

Tabela 39 – Paredes diversas: custo do material, isolamento sonoro, massa superficial e espessura.

Tipo de parede	Custo [R\$/m ²]	R _w [dB]	STC [dB]	m' ² [kg/m ²]	Espessura [cm]
Blocos de concreto *	47	39*	-	290*	14*
Blocos cerâmicos *	55	44*	-	201*	17,5*
Tijolos cerâmicos maciços *	83	43*	-	249*	13*
Concreto armado **	92	-	53**	255**	10,2**
P13 (CL90OX-OG)	119	47	49	30,1	13,2
Parede típica em LSF (P3)	146	47	48	44,3	14,3
P11(CL90CI-OG/BR)	173	50	52	44,3	14,3

*Dados obtidos de Santos (2012, p.21-24).

** Dados obtidos de Irvine (1998, p.58).

Fonte: Autora.

É possível constatar, a partir da análise da Tabela 39, que as três primeiras paredes convencionais são consideravelmente mais baratas que as paredes de LSF, especialmente as duas primeiras. Entretanto todas elas apresentam isolamento sonoro mais baixo, em termos de R_w , que as paredes de LSF. A parede de concreto armado, que apresenta o melhor isolamento sonoro entre as paredes avaliadas, tem ainda assim custo 29% inferior à parede P13, a mais barata entre as paredes de LSF.

É fundamental, no entanto, destacar que o custo por m^2 de parede não reflete o custo por m^2 de uma obra. Estima-se que o custo com paredes e estrutura seja equivalente a 25% do custo total de uma obra.

Baseado nisso, com objetivo de fornecer um comparativo entre o custo de uma obra nos sistema LSF e nos sistemas convencionais, utilizou-se como referência o custo unitário básico (CUB) divulgado pelo Sindicato da Construção Civil do Rio Grande do Sul (SINDUSCON/RS) em dezembro de 2014, para uma residência multifamiliar de até 8 pavimentos, no padrão construtivo alto. O valor do m^2 para o sistema construtivo LSF foi informado por uma construtora de *light steel frame*, a Cetro Tecnologia em Construção, para estas mesmas condições. A Tabela 40 apresenta a comparação aproximada entre os custos.

Tabela 40 – Comparação do custo por m^2 de uma obra convencional e em *light steel frame*.

Custo total de obra [R\$/ m^2]	
Sistemas convencionais	<i>Light steel frame</i>
1442	1700

Fonte: Autora.

Ambos os custos, informados na Tabela 40, compreendem material, mão de obra, despesas administrativas e equipamentos, para todas as fases da obra, com exceção de fundações e acabamentos, devido às grandes variações que estes itens podem sofrer em função do terreno específico ou dos materiais escolhidos.

Deve-se salientar, no entanto, que além do desempenho acústico e do custo de obra, outros fatores importantes em ambos os sistemas construtivos devem ser considerados durante a escolha entre uma das opções de parede ou entre o sistema LSF e os sistemas convencionais apresentados, como por exemplo, o tempo de obra, a produção de resíduos, a durabilidade da edificação, a manutenção e a qualidade de acabamento, entre outros.

5. CONCLUSÕES

A análise dos resultados da presente pesquisa permitiu chegar a algumas conclusões acerca da perda de transmissão sonora em paredes de *light steel frame*. Foram avaliadas no total dezoito composições de paredes externas, sendo cinco delas utilizando uma janela de PVC, cortina e caixas de luz.

De uma forma geral, o comportamento das paredes externas em LSF avaliadas, frente à incidência de ondas sonoras, é bastante semelhante. Os espectros de perda de transmissão apresentaram claramente duas regiões onde ocorreram reduções no isolamento sonoro em paredes deste tipo. Nas baixas frequências, próximo às frequências de ressonância massa – mola - massa, onde o isolamento destas paredes em alguns casos foi inferior àqueles verificados em paredes simples ou homogêneas, e na região onde ocorre a frequência crítica e a ressonância da cavidade, verificaram-se quedas na PT nas paredes duplas de LSF avaliadas.

O preenchimento da cavidade formada entre os perfis com lã de vidro mostrou-se uma medida de baixo custo e eficiente em aumentar a perda de transmissão sonora da parede de LSF, contanto que o material não fique comprimido dentro do vão, evitando que este forme uma conexão mecânica e transmita energia sonora de um lado a outro da parede, comprometendo parte do isolamento sonoro.

No caso dos cinco tipos de revestimentos externos avaliados, as placas de magnésio, seguidas pelas placas cimentícias, mostraram-se as melhores opções em termos de isolamento sonoro, proporcionando nas paredes de LSF R_w de 47 e 45 dB e STC de 48 e 47 dB, respectivamente. Os painéis XPS - reconhecidos pelo bom desempenho térmico – tiveram o desempenho empatado com as régulas *Smartside*, caracterizado por R_w de 45 dB e STC de 47 dB. E, por sua vez, as régulas *siding* vinílico – revestimento com maior apelo estético pelo seu acabamento, textura e opções de cores – apresentaram menor PT dentre as cinco opções de revestimento externo, sendo que a parede de LSF revestida desta forma obteve apenas R_w de 43 dB e STC de 45 dB.

A adição de mais uma placa de gesso no lado interno nas paredes de LSF – que originalmente apresentam elevada PT – mostrou-se uma opção razoável apenas quando o isolamento sonoro em baixas frequências - até 500 Hz - for pretendido, devido a praticamente nenhuma melhora verificada nas demais frequências.

Foi avaliado se a massa superficial e o custo de cada parede em LSF ensaiada possuía relação com isolamento sonoro por ela proporcionado. O coeficiente de correlação r^2 revelou não haver praticamente nenhuma correlação em ambas as avaliações.

Quando dispositivos para o amortecimento das vibrações estruturais – como barras resilientes ou fitas de espumas de PVC - foram introduzidos no lado interno das paredes de LSF, entre os perfis e as placas de revestimento, constatou-se melhora no isolamento sonoro das referidas paredes, particularmente nas frequências acima de 400 Hz. Os espectros de R verificados nas paredes de LSF após a introdução de ambos dispositivos foi bastante semelhante. A melhora na PT, caracterizada pelo aumento de 3 dB no R_w foi o mesmo, entretanto, o custo das fitas de espuma de PVC em relação às barras resilientes aqui ensaiadas, foi significativamente menor, fazendo desta a opção custo/benefício mais vantajosa.

A instalação de uma esquadria nas paredes de LSF, segundo práticas adequadas, também demonstrou ser capaz de melhorar o desempenho do isolamento acústico, bem como a utilização de cortinas. Por outro lado, a instalação de alguns pontos de energia elétrica, no lado interno da parede de LSF, não causou alteração na PT.

Observou-se que a maioria das composições de paredes em LSF avaliadas, atende facilmente aos requisitos de nível superior para isolamento sonoro de vedações verticais requeridos pela NBR 15575:2013 - inclusive sem fazer uso dos dispositivos absorvedores de vibrações, como as barras resilientes e fitas de espuma de PVC - e que, mesmo as normas europeias - com parâmetros mais rigorosos que a norma nacional - também têm seus requisitos de isolamento sonoro atendidos por grande parte das paredes de LSF avaliadas.

Ao comparar a parede típica em LSF (P3) com diversas paredes convencionais os resultados foram razoavelmente previsíveis e coerentes com os dados de outras referências bibliográficas. É importante salientar que, a parede de LSF escolhida para comparação com as demais paredes convencionais, não é a que tem o maior R_w dentre as paredes de LSF avaliadas, e sim aquela mais usualmente utilizada pelo sistema construtivo LSF no Brasil. A chamada parede típica em LSF (P3) utiliza como revestimento externo painel OSB e placa cimentícia, lã de vidro de 90 mm de espessura na cavidade entre perfis e painel OSB e placa de gesso como revestimento interno.

Quando se comparou o isolamento sonoro entre quatro paredes de blocos de concreto e a parede típica em LSF, a última obteve desempenho superior a três delas, sendo que em duas delas o R_w foi 4 dB e 8 dB, respectivamente, inferior ao R_w da parede típica em LSF

(P3). Na terceira parede de blocos de concreto não havia número único que classificasse sua PT, tendo a comparação com a parede típica em LSF sido feita apenas pelos espectros sonoros de ambas, entretanto, os espectros sonoros não deixaram dúvidas da inferioridade da parede de blocos no isolamento acústico quando comparada à parede típica em LSF (P3). A última parede de blocos de concreto comparada apresentou STC 6 dB maior em relação à parede típica em LSF (P3), superioridade justificada pela massa superficial quase seis vezes maior e a espessura 30% maior em relação à parede típica em LSF (P3).

Os espectros de R de duas paredes de blocos cerâmicos foram comparados ao espectro da parede típica em LSF (P3), e nesta comparação apresentaram pior desempenho no isolamento sonoro em relação à parede típica em LSF (P3). O R_w das duas paredes de blocos cerâmicos foi de 43 e 44 dB, enquanto que o R_w da parede típica em LSF (P3) foi de 47 dB.

Três tipos de paredes de concreto foram comparados à parede típica em LSF (P3), uma delas em concreto maciço, uma em concreto polimerizado e outra de placas de concreto. A parede de placas de concreto obteve um R_w 4 dB inferior em relação à parede típica em LSF (P3). A parede de concreto com adição de polímeros e a parede típica em LSF obtiveram igual desempenho no R_w de 47 dB. E, por fim, a parede em concreto maciço que apresentou STC 5 dB maior do que a parede típica em LSF (P3). É importante destacar que a última parede comparada, em concreto maciço possui uma massa superficial quase seis vezes maior que a parede típica em LSF (P3).

A parede típica em LSF (P3) e as duas paredes de tijolos cerâmicos maciços - com massa superficial aproximadamente cinco vezes superior à parede típica em LSF - também tiveram seu desempenho no isolamento acústico comparado. Uma das paredes de tijolos maciços não possuía número único que classificasse o desempenho no isolamento acústico - R_w ou STC - portanto, a comparação com a parede típica em LSF (P3) foi realizada através dos espectros de R de ambas. Os espectros de ambas revelaram claramente que a parede típica em LSF (P3) é a que tem maior perda de transmissão entre elas, especialmente nas médias frequências. A segunda parede de tijolos maciços e a parede típica em LSF (P3) tinham o mesmo R_w , entretanto apresentavam espectros sonoros bastante distintos, revelando haver superioridade no isolamento sonoro de uma sobre a outra em determinadas frequências e vice-versa.

As paredes de madeira, por sua vez, quando comparadas à parede típica em LSF (P3) revelaram, através dos espectros de R e ou da STC, desempenho bastante inferior a esta.

É importante, ao escolher as placas de revestimentos de uma parede de LSF, considerar não apenas sua classificação no R_w e na STC, mas verificar se a frequência crítica destes painéis não ocorre na faixa de frequências que se pretende isolar, pois, como foi visto na análise dos resultados, isto pode comprometer significativamente a PT da parede na região da coincidência, onde a frequência crítica ocorre. Deve-se também evitar que as massas superficiais em cada lado da parede sejam iguais, pois neste caso as frequências de ressonância também seriam iguais e o conjunto apresentaria uma resposta vibratória máxima e o isolamento sonoro da parede poderia ser drasticamente reduzido.

Sugestões para trabalhos futuros

- Avaliar o isolamento acústico ou perda de transmissão sonora em lajes secas – lajes utilizadas no sistema *light steel frame* – utilizando diferentes tipos de pisos, como porcelanato, madeira, laminado e vinílico, entre outros. Para a realização deste tipo de ensaio seria necessário uma câmara reverberante de transmissão sonora em que as salas de emissão e recepção fossem verticalmente adjacentes e que o elemento teste pudesse ser instalado entre elas.
- Avaliar a participação individual que cada um dos quatro fatores que interferem na perda de transmissão de uma parede – massa superficial de cada placa de revestimento, profundidade da cavidade formada entre um lado e outro da parede, espessura e densidade do material absorvente utilizado na cavidade entre os perfis e espaçamento entre perfis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575:2013 Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho - Parte 4: Sistemas verticais de vedações externas**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 37p.
- BIES, D. A.; HANSEN, C. H. **Engineering Noise Control: theory and practice**. 3ª edição. London: Spon Press, 2003. 733p.
- BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle de ruído**. 2ª edição. São Paulo: Blucher, 2011. 380p.
- BRASILIT – Disponível em: <<http://www.brasilit.com.br/produtos/paineis/placa-cimenticia.php>> Acesso em 20/06/2014.
- CENTERSTEEL - Disponível em: <<https://www.centersteel.com.br>> Acesso em 20/06/2014.
- CRASTO, R. C. M. **Arquitetura e tecnologia em sistemas construtivos industrializados**. 2005. 254p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.
- DIN 4109:2010 - **Sound insulation in buildings. Part 11: Verification of sound insulation - Quality and suitability testing**. Germany, 2010.
- EGAN, M. D. **Architectural Acoustics**. McGraw-Hill, 1988. 411p.
- EVEREST, A. F. **The Master Handbook of Acoustics**. 4th edition. EUA: McGraw-Hill, 2001. 616p.
- FREITAS, A. M. S; CRASTO, R. C. M. Centro Brasileiro da Construção em Aço. **“Steel Framing: Arquitetura.”** CBCA: Rio de Janeiro, 2006.
- GERGES, S. N. Y. **Ruído: Fundamentos e Controle**. Florianópolis: UFSC, 1992. 600 p.
- HECKL, M; MULLER, H. A. **Taschenbuch der Technischen Akustik**. Berlin: Springer, 1994. 670 p.
- HOPKINS, C. **Sound Insulation**. Slovenia: Elsevier Ltd., 2007. 622p.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 354:2003 - Acoustics: Measurement of sound absorption in a reverberation room**. Geneve: 2003. 21p.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 717:2013 - Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of buildings elements - Part 1- Airborne sound insulation**.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 10140:2013 - Laboratory measurement of sound insulation of building elements**.
- IRVINE, K. L; RICHARDS, R. L. **Acoustics and noise control handbook for architects and builders**. Florida: Krieger Publishing Company, 1998. 194p.
- ISAIA. G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. Vol 1. São Paulo: IBRACON, 2007. 2v. 832p.

JOBIM, M. S. S. **Método de avaliação do nível de satisfação dos clientes de imóveis residenciais**. 1997. 147p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

LONG, M. **Architectural Acoustics**. EUA: Elsevier Inc, 2006. 844p.

LP BUILDING PRODUCTS – Disponível em: <<http://www.lpbrasil.com.br/produtos/lp-osb-home-plus-estrutural.html>> Acesso em 15/06/2014.

LP BUILDING PRODUCTS — Disponível em: <<http://www.lpbrasil.com.br/produtos/lp-membrana.html>> Acesso em 15/06/2014.

LP BUILDING PRODUCTS – Disponível em: <<http://www.lpbrasil.com.br/produtos/lp-siding-vinilico.html>> Acesso em 15/06/2014.

LP BUILDING PRODUCTS– Disponível em: < <http://www.lpbrasil.com.br/produtos/lp-smartside.html> > Acesso em 15/06/2014.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. Diretriz SINAT nº 003. **Sistemas construtivos estruturados em perfis leves de aço conformados a frio, com fechamentos em chapas delgadas (Sistemas leves tipo “Light Steel Framing”)**. Brasília: Governo Federal, 2012. 48p.

NIGHTINGALE, T. R. T; QUIRT, J. D; SULTAN, M. A. **Effect of Electrical Outlet Boxes on Sound Insulation of Gypsum Board Walls**. National Research Council of Canada, 1999.

ONORM B8115 –**Schallschutz und Raumakustik im Hochbau. Teil: Anforderungen an den Schallschutz**. Germany, 2002.

OWENS CORNING – Disponível em: <<http://www.owenscorning.com.br/pt-br/building-materials-produtos-produto?id=80>> Acesso em 02/10/2014.

PARK, H. K.; BRADLEY, S. J.; GOVER, B. N. **Evaluating airborne sound insulation in terms of speech intelligibility**. The Journal of the Acoustical Society of America, 2008.

PLACO - Disponível em: < http://placocenterpoars.com.br/?page_id=1901> Acesso em 22/06/2014.

SANTOS, J. L. P. **Isolamento Sonoro de Partições Arquitetônicas**. Santa Maria: UFSM, 2012. 174p.

STEEL CONSTRUCTION INSTITUTE (SCI) – Disponível em: <<http://www.steelconstruction.info>> Acesso em 14/08/2014.

VIGRAN, T. E. **Building Acoustics**. New York: Taylor & Francis, 2008. 362p.

WARNOCK, A. C. C. **Estimation of Sound Transmission Class and Impact Insulation Class Rating for Steel Framed Assemblies**. National Research Council Canada – NRC: 2008, 49p.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - Disponível em: <<http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise>> Acesso em 05/05/2014.

Apêndice 2 – TR medido na sala de recepção da câmara reverberante de transmissão sonora da UFSM, para cada parede de *light steel frame*.

Parede	T30 [s] Freqüência [Hz]																	
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
P1	8	7.07	8.04	9.25	10.02	9.8	10.32	9.55	8.24	7.23	6.23	5.31	4.84	4.36	3.87	3.28	2.79	2.37
P2	8.45	7.57	7.85	9.45	9.45	10.33	10.24	9.2	8.22	7.09	6.2	5.2	4.9	4.42	3.95	3.29	2.84	2.42
P3	6.44	6.87	7.49	8.54	9.69	10.2	10.1	9.32	8.18	6.94	6	5.19	4.9	4.47	3.95	3.36	2.88	2.5
P4	5.5	6.24	7.1	7.33	8.83	8.68	8.7	8	7.17	5.94	4.81	4.47	4.28	3.99	3.56	2.95	2.59	2.22
P5	5.78	7.71	7.65	8.64	8.9	8.68	7.86	6.94	5.8	5.02	4.44	4.35	4.2	3.98	3.57	2.98	2.62	2.3
P6	5.49	5.82	6.85	7.23	8.29	8.79	8.79	7.75	7.02	5.98	4.71	4.43	4.28	3.98	3.55	2.98	2.62	2.28
P7	4.79	8.08	7.17	7.76	9.09	9.02	9.3	8.11	6.76	5.48	4.73	4.51	4.29	3.95	3.6	3.01	2.61	2.26
P8	4.86	7.74	7.37	7.98	8.9	8.94	8.58	8	6.67	5.45	4.7	4.54	4.3	3.99	3.6	3.04	2.69	2.31
P9	6.53	7.71	7.2	7.57	8.73	8.88	8.68	7.93	7.02	6.03	4.96	4.56	4.42	4.21	3.72	3.05	2.68	2.34
P10	5.48	7.48	7.05	8.01	8.01	8.79	8.35	7.81	7.21	6.05	4.91	4.54	4.46	4.19	3.75	3.06	2.71	2.37
P11	4.61	7.94	7	8.7	8.61	8.59	8.83	7.94	7.17	5.95	4.82	4.51	4.42	4.24	3.73	3.05	2.71	2.35
P12	5.74	6.23	7.03	7.82	8.42	8.38	8.43	7.36	6.27	5.3	4.62	4.3	4.17	3.92	3.62	3.02	2.67	2.42
P13	7.15	6.47	7.02	8.41	8.34	8.38	8.32	7.31	6.31	5.31	4.44	4.28	4.15	3.99	3.64	3.04	2.72	2.33
P14	4.72	6.49	5.52	5.23	5.79	6.5	6.86	7.45	7.83	7.63	6.97	6.16	5.26	4.31	4.12	3.99	3.82	3.48
P15	7.9	6.46	5.73	6.21	7.27	7.67	7.83	7.09	6.11	5.18	4.24	3.99	3.8	3.6	3.28	2.74	2.46	2.07
P17	7.29	5.89	5.63	6.77	7.61	6.76	6.35	5.53	4.58	3.87	3.29	3.15	3.06	2.93	2.7	2.3	2.08	1.84
P21	5.23	5.79	6.5	6.86	7.45	7.83	7.63	6.97	6.16	5.26	4.31	4.12	3.99	3.82	3.48	2.91	2.58	2.3
P23	4.99	5.82	6.41	6.3	6.98	7.64	7.49	7	6.04	5.12	4.25	4.14	3.95	3.79	3.38	2.8	2.47	2.17

Apêndice 3 – R medido para cada uma das 18 composições parede em *light steel frame*.

Parede	Frequência [Hz]																	
	R [dB]																	
P1	15.6	23.1	37.5	45.6	43.3	40.2	44.8	46.9	46.1	43.6	43.7	46	46.5	46.8	48.4	48.5	51.7	55.7
P2	22.3	27.6	40.7	48.9	46.9	45.4	50.1	51	49	45.6	45.9	47.3	48.4	48.8	52	52.6	55.4	58.4
P3	20.3	27.4	41.2	46.4	48.1	46.1	50.9	51.6	49.4	46	46	47.7	48.1	48.5	52.7	54.8	57.4	60.6
P4	14.4	21.5	36.3	42	44.5	43.7	46.8	48.2	47.4	44.4	44.8	47.7	48.9	49.8	50.7	53.5	55.9	57.9
P5	17.6	25.9	40.7	46.7	47.9	46.1	48.1	48.5	46.8	44.4	45.1	47.6	48.9	50.6	52.1	54.3	55.8	56.5
P6	13.6	19.8	34.5	37.9	40.5	40.9	44.2	47.4	45.8	42.3	41.9	44.2	49	52.9	51.9	53.8	56.6	59.8
P7	14.2	23.4	36	40.6	42.5	42.8	45.6	47.5	47	43	42.9	45.2	49.2	52.5	52.6	55.9	59	61.6
P8	15.3	23.9	36.9	42.7	46.2	45.6	48.6	51.4	49.9	46.2	44.8	46.8	46.6	46.4	48.9	53.7	56.7	56.1
P9	18.9	24.9	35.5	41.9	46.1	48	51.3	53.4	54.7	52.2	50	50.7	53.8	58.6	62.2	62.3	63	63.9
P10	16.5	23.2	35.1	41.9	45.4	44.9	47.7	51.1	51	49.9	49.8	50.6	53.7	58	59.7	60.1	63	65.2
P11	19.8	28.2	36.7	45.8	48.6	47	50.9	54.9	55.8	51.6	48.8	49.6	52.5	56	59	59.6	60.6	62.3
P12	22.6	30.7	42	48.9	49.2	47.9	51.8	52.7	48.9	45.1	47.3	50.5	52.4	54	56.3	59.3	62.8	67.2
P13	19.1	24.5	36.5	44.9	47.7	45.4	50.7	54	51.9	46.5	45.9	46.9	48	51.1	55.8	54.6	56.3	60.2
P14	11.2	17.7	18	21	26.3	32.7	40.9	36.1	41.3	42.7	42.4	41.1	39.6	39.4	37.9	38.6	42.5	44.2
P15	13.7	17.6	19.5	20.2	20.6	20.4	20	19.3	19.1	18.5	18.4	18.9	19.6	20.3	21.8	23	22.9	22.3
P17	15.6	19.8	21.1	21.8	22.9	22.6	21.7	22.8	22.6	22.6	23.2	24.3	25.8	27.6	29.7	30.9	31.1	31.6
P21	19.8	27.1	35.2	37.8	34.2	37.7	38.6	38.2	37.8	36.9	35.2	33.9	32.7	34.2	37.3	37.8	35.5	36.5
P23	19.7	25.8	34	37.7	33.8	37.3	38.5	38.5	38	36.2	34.9	33.3	32.2	34.1	37.3	37.8	35.4	36.4

