

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

GABRIEL WITTMANN

**ISOLAMENTO ACÚSTICO AO RUÍDO DA CHUVA:
AVALIAÇÃO EM SISTEMAS DE COBERTURAS COM TELHAS METÁLICAS**

São Leopoldo

2022

GABRIEL WITTMANN

**ISOLAMENTO ACÚSTICO AO RUÍDO DA CHUVA:
AVALIAÇÃO EM SISTEMAS DE COBERTURAS COM TELHAS METÁLICAS**

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

Orientadora: Profa. Dra. Maria Fernanda de Oliveira

Coorientador: Prof. Me. Rafael Ferreira Heissler

São Leopoldo

2022

W832i Wittmann, Gabriel.
Isolamento acústico ao ruído da chuva : avaliação em sistemas de coberturas com telhas metálicas / Gabriel Wittmann. – 2022.
100 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, 2022.

“Orientadora: Profa. Dra. Maria Fernanda de Oliveira
Coorientador: Prof. Me. Rafael Ferreira Heissler.”

1. Ruído da chuva. 2. ISO 10140. 3. Telha metálica.
4. Retrofit de cobertura. 5. Acústica de edifícios. I. Título.

CDU 72

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária: Amanda Schuster – CRB 10/2517)

GABRIEL WITTMANN

**ISOLAMENTO ACÚSTICO AO RUÍDO DA CHUVA:
AVALIAÇÃO EM COBERTURAS COM TELHAS METÁLICAS**

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

Aprovado em (15) (10) (2021)

BANCA EXAMINADORA

Stelamaris Rolla Bertoli – Unicamp

Roberto Christ – Unisinos

André de Souza Silva – Unisinos

A minha mãe, Lili Marlene Wittmann, por toda dedicação, paciência e insistência na fase mais importante da minha trajetória escolar. Sem nossas tardes de estudos o caminho não seria o mesmo. Muito obrigado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a empresa POOLMAK Estruturas Metálicas pela disponibilidade dos materiais, amostras e mão-de-obra, para juntos montarmos a câmara, os dispositivos e o reservatório perfurado;

Ao itt Performance, por disponibilizar uma câmara de impacto por 02 anos para elaboração, modificação e execução dos ensaios;

Os profissionais do laboratório, o analista Lorenzo Azevedo Kerber e os laboratoristas Bianca Walter, Fabrício Cunha e Gabrieli Becker, por participarem ativamente nas medições dos ensaios ao longo deste ano.

Aos meus orientadores, que acreditaram no potencial deste trabalho e contribuíram muito para sua realização e conclusão.

RESUMO

Coberturas em estrutura metálica se tornaram soluções como sistema construtivo rápido e leve, atendendo os mais variados tipos de edificações no campo comercial e industrial. Para a sua vedação, a telha metálica passou a ser a principal solução para o sistema como um todo, uma vez que sua composição de materiais permite a combinação de vida útil extensa, resistência mecânica e baixa espessura que contribui para efeitos de reação, baixa sobrecarga para o sistema estrutural. Contudo, estudos indicam que em estruturas de grandes vãos os ruídos podem ser significativamente amplificados, resultando em prejuízos ao uso da edificação e ao bem-estar dos seus usuários. Dessa forma, este trabalho busca determinar o desempenho acústico ao ruído de impacto de chuva de sistemas de coberturas com telhas metálicas, com diferentes composições. Para estudar esse efeito em coberturas leves, foi desenvolvida uma câmara para gerar chuva artificial e medir o ruído causado pelo impacto em corpo de prova metálicos, conforme parâmetros da ISO 10140: partes 1, 3 e 5. Os resultados das amostras com telha simples formato trapezoidal, confirmam resultados de outros estudos, com ruídos de impacto acima dos 70 dB. Ao acrescentar um novo perfil de telha, espaçado por um elemento estrutural e preenchido com um núcleo fibroso, tem-se a redução dos ruídos causados pelo impacto da chuva, com valores que podem chegar a 52 dB gerado pela chuva artificial, proporcionando uma solução para novos projetos e facilitando a operação de *retrofit* de coberturas existentes.

Palavras-chave: Ruído da chuva. ISO 10140. Telha metálica. Retrofit de cobertura. Acústica de edifícios

ABSTRACT

Steel structure roofs have become solutions as a fast and light construction system, serving the most varied types of buildings in the commercial and industrial field. For its sealing, the metallic tile became the main solution for the system as a whole, since its composition of materials allows the combination of extensive service life, mechanical resistance and low thickness that contributes to reaction effects, low overload for the structural system. However, studies indicate that in structures with large spans the rainfall noise can be significantly amplified, resulting in damage to the use of the building and to the well-being of its users. Thus, this work aims to determine the acoustic performance to rainfall sound of roofing systems with metallic tiles, with different compositions. To study this effect on light roofs, using ISO 10140 parameters: parts 1, 3 and 5, a chamber was developed to generate artificial rain and measure the noise caused by the impact on metallic specimens. The samples tested in a simple way and trapezoidal format, were equivalent to the results already published, with impact noise stands in 70 dB, validating the measurement system. By adding a new tile profile, spaced by a structural element and filled with a fibrous core, has reduce the noise caused by the impact of rain in range of 52 dB, thus providing a satisfactory performance, providing a solution for new projects and facilitating the roof retrofit operation existing.

Keywords: Rainfall sound. ISO 10140. Steel roof. Cover retrofit. Rainfall sound

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Distribuição das Siderúrgicas no Brasil..... | 16 |
| Figura 2 – Estrutura de uma cobertura duas águas com perfis alma cheia..... | 18 |
| Figura 3 – Estrutura de uma de cobertura duas águas com elementos treliçados... .. | 18 |
| Figura 4 – Perspectiva de um galpão com seus principais componentes | 19 |
| Figura 5 – Tipos de perfil..... | 20 |
| Figura 6 – Tipos de apoio de terça..... | 21 |
| Figura 7 – Tipos de apoio de terça..... | 22 |
| Figura 8 – Atmosfera rural..... | 23 |
| Figura 9 – Atmosfera industrial | 24 |
| Figura 10 – Atmosfera marinha | 24 |
| Figura 11 – Atmosfera marinha severa | 24 |
| Figura 12 – Telha ondulada | 25 |
| Figura 13 – Limites superior e inferior da espessura nominal em função da largura útil de telhas onduladas..... | 26 |
| Figura 14 – Cargas admissíveis nas telhas onduladas | 26 |
| Figura 15 – Modelos de elementos de fixação..... | 27 |
| Figura 16 – Localização dos pontos de fixação das telhas..... | 27 |
| Figura 17 – Fixação dos parafusos de transpasse das telhas | 28 |
| Figura 18 – Perspectiva telha trapezoidal | 28 |
| Figura 19 – Elementos de uma telha trapezoidal | 29 |
| Figura 20 – Telha trapezoidal TP-40 | 29 |
| Figura 21 – Cargas admissíveis – Telha TP-40 | 30 |
| Figura 22 – Telha trapezoidal TP-33..... | 31 |
| Figura 23 – Telha Zipada - Perspectiva | 31 |
| Figura 24 – Telha Zipada - Dimensões | 32 |
| Figura 25 – Clip utilizado no sistema de fixação | 32 |
| Figura 26 – Sistema de fixação por zipagem | 33 |
| Figura 27 – Sistema de cobertura com processo de zipagem | 33 |
| Figura 28 – Intensidade da chuva x diâmetro da gota | 38 |
| Figura 29 – Velocidade de impacto x diâmetro da gota | 39 |
| Figura 30 – Classificação de chuvas artificiais..... | 39 |

| | |
|---|----|
| Figura 31 – Precipitação total no território nacional em 2018 | 40 |
| Figura 32 – Intensidade das chuvas em Porto Alegre, em mm/h | 40 |
| Figura 33 – Sistema de cobertura duplo com espessador e lã mineral | 43 |
| Figura 34 – Sistema de cobertura duplo com espaçador, lã mineral e telha perfurada | 44 |
| Figura 35 – Características do tipo de chuva | 49 |
| Figura 36 – Parâmetros para o reservatório | 50 |
| Figura 37 – Dimensões do reservatório ISO 10140:2014 parte 5 | 50 |
| Figura 38 – Perfuração do reservatório proposta por Donohue e Pearse | 51 |
| Figura 39 – Esquema de montagem do ensaio | 52 |
| Figura 40 – Antiga câmara de ruído de impacto do itt Performance da Unisinos | 54 |
| Figura 41 – Marcação de corte na laje superior | 55 |
| Figura 42 – Corte laje superior | 55 |
| Figura 43 – Abertura da laje superior | 56 |
| Figura 44 – Abertura da laje superior finalizada | 56 |
| Figura 45 – Marcação laje inferior | 57 |
| Figura 46 – Abertura da laje inferior | 58 |
| Figura 47 – Abertura e ambas as lajes | 58 |
| Figura 48 – Reboco dos pontos rompidos e aberturas existentes | 59 |
| Figura 49 – Pintura das câmaras | 59 |
| Figura 50 - Nivelamento para o suporte 1 | 60 |
| Figura 51 - Instalação do suporte | 60 |
| Figura 52 – Instalação do suporte 2 | 60 |
| Figura 53 – Detalhe do isolamento | 60 |
| Figura 54 – Fixação do EVA na alvenaria | 61 |
| Figura 55 – Instalação do EVA no perímetro do vão | 61 |
| Figura 56 – Estrutura metálica no vão da câmara | 61 |
| Figura 57 – Fita de isolamento | 62 |
| Figura 58 – Estrutura de sustentação | 63 |
| Figura 59 – Estrutura de sustentação | 64 |
| Figura 60 – Estrutura de sustentação | 64 |
| Figura 61 – Fluxo do rotâmetro | 65 |
| Figura 62 – Direção do fluxo de água na instalação superior | 65 |

| | |
|--|----|
| Figura 63 – Interface da calha metálica com a alvenaria | 66 |
| Figura 64 – Direção do fluxo de água na instalação inferior | 66 |
| Figura 65 – Instalação do EVA na face da calha | 68 |
| Figura 66 – Montagem da amostra zipada simples | 68 |
| Figura 67 – Término da montagem da amostra 01 - Zipada..... | 68 |
| Figura 68 – Isolamento em PU, amostra 01 - Zipada | 69 |
| Figura 69 – EVA dobrado | 69 |
| Figura 70 – Aplicação espuma expansiva..... | 69 |
| Figura 71 – Resultados com a telha zipada simples | 70 |
| Figura 72 – Resultados com a telha ondulada simples..... | 71 |
| Figura 73 – Esquema de montagem da amostra com telha inferior TP-33..... | 73 |
| Figura 74 – Fita de amortecimento / perfil cartola..... | 73 |
| Figura 75 – Instalação dos perfis cartola | 74 |
| Figura 76 – Lã de vidro 50mm | 74 |
| Figura 77 – Instalação da lã de vidro 50 mm | 75 |
| Figura 78 – Lã de vidro sobre os perfis..... | 75 |
| Figura 79 – Instalação da telha zipada - Cobertura | 75 |
| Figura 80 – Amostra 05 – vista do reservatório 01 | 75 |
| Figura 81 – Amostra 06 instalada na câmara | 76 |
| Figura 82 – Instalação dos cartolas na amostra 09 | 77 |
| Figura 83 – Instalação da lã de vidro na amostra 09 | 77 |
| Figura 84 – Resultados de todas as composições..... | 78 |
| Figura 85 – Resultados das amostras simples | 79 |
| Figura 86 – Resultados das amostras duplas com espaçador de 30 mm | 81 |
| Figura 87 – Resultados das amostras duplas com espaçador de 100 mm | 82 |
| Figura 88 – Amostras duplas com espaçador de 30 e 100 mm com fita adesiva..... | 83 |
| Figura 89 – Comparativo entre valores ponderados em A..... | 84 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Amostras de telhas simples | 67 |
| Tabela 2 – Amostras duplas com telhas trapezoidal TP-30 e superior zipada | 72 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1 Tema e delimitação | 12 |
| 1.2 Justificativa..... | 13 |
| 1.3 Problema | 14 |
| 1.4 Objetivos | 14 |
| 1.4.1 Objetivo Geral | 14 |
| 1.4.2 Objetivos Específicos | 14 |
| 2 RUÍDO DA CHUVA EM COBERTURAS | 15 |
| 2.1 Coberturas metálicas | 15 |
| 2.1.1 Telhas Metálicas | 21 |
| 2.1.2 Telhas Onduladas | 25 |
| 2.1.3 Telhas Trapezoidais | 28 |
| 2.1.4 Telhas Zipadas | 31 |
| 2.2 Ruído das chuvas em coberturas | 34 |
| 2.3 Controle do ruído das chuvas em coberturas | 41 |
| 2.4 Variáveis de ensaios em laboratório | 44 |
| 3 METODOLOGIA | 48 |
| 3.1 Objeto de Estudo | 48 |
| 3.2 Procedimento | 49 |
| 3.2.1 Construção da Câmara | 54 |
| 3.2.2 Montagem da estrutura metálica | 59 |
| 3.2.3 Montagem do sistema de chuva artificial | 62 |
| 3.2.4 Montagem das amostras / Ensaios | 66 |
| 4 RESULTADOS | 78 |
| 4.1 Resultados com telhas simples | 79 |
| 4.2 Resultados com telhas duplas | 80 |
| 4.3 Resultados ponderados | 83 |
| CONCLUSÕES | 85 |
| REFERÊNCIAS | 87 |
| APÊNDICE A | 92 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Tema e delimitação

A capacidade de adaptação dos seres humanos à diferentes situações de eventos climatológicos extremos sempre acompanhou o desenvolvimento da própria espécie, a partir da adoção de recursos como a vestimenta e as edificações, que, de certa forma, podem compensar algumas situações de desconforto, insatisfação e outras dificuldades de adaptação ao meio ambiente.

Mesmo apresentando características de resiliência, há limites para os quais tipologias de edificações conseguem oferecer a proteção necessária em climas extremos, além dos quais a sobrevivência humana não seria garantida. Também pode-se afirmar que com projetos inteligentes, os tipos de edificação de qualquer região podem ser modificados e melhorados para serem seguros em uma gama maior de temperaturas. Além de certos limites, contudo, as edificações deixam de ser locais seguros para se ocupar, e a vulnerabilidade depende de sua envoltória, bem como o grau de exposição aos climas extremos (ROAF *et al.*, 2009).

Dentre as alterações climáticas previstas para as próximas décadas, as mudanças nos regimes de chuvas é uma das principais consequências das elevações das temperaturas do ar e dos recursos hídricos (KEELER, 2018). Quando ocorrem eventos de precipitação pluviométrica no meio urbano, os impactos das gotas provocam um ruído contínuo a partir da vibração do conjunto de elementos que compõem os sistemas de coberturas. Especialmente, as construções com coberturas leves, que abrigam grandes vãos, apresentam características que podem amplificar os sons produzidos durante os eventos das chuvas (YAN *et al.*, 2016).

Além das manifestações patológicas decorrentes da ação direta das chuvas, outros efeitos negativos são estudados sob diferentes aspectos, como, por exemplo, o efeito da chuva dirigida no processo de degradação de fachadas (MELO JÚNIOR; CARASEK, 2011; ZANONI *et al.*, 2018) e a influência das chuvas no desgaste de turbinas eólicas (TILG *et al.*, 2020).

As edificações com grandes vãos estão presentes na arquitetura há mais de 2.000 anos, sendo o Panteão de Roma ainda considerado o maior vão livre vencido com cúpula no mundo. Nesse sentido, a utilização de materiais leves gerou um amplo desenvolvimento na qualidade e resistência das estruturas metálicas, e a segurança e a racionalização de custos sempre foram as principais motivações dos avanços na construção civil.

Este trabalho tem como tema o desempenho acústico de sistemas de coberturas, sendo sua delimitação caracterizada na ênfase do isolamento ao ruído da chuva em coberturas com telhas metálicas para grandes vãos.

1.2 Justificativa

Coberturas de edificações industriais e comerciais, compostas por telhas metálicas, possuem baixo desempenho acústico ao ruído em dias de chuva, devido a algumas características como sua elevada velocidade de propagação do som e massa reduzida. Para o uso industrial e comercial, na grande maioria, esse tipo de cobertura é composto pelo sistema convencional sem algum meio de contenção da propagação acústica. As telhas são compostas por chapas metálicas na liga de zinco e alumínio, com espessuras de 0,43 mm a 0,65 mm, e durante o uso acabam gerando desconforto causado pelos sons de impacto que se propagam no ar em ambientes internos.

O ruído causado pelo impacto da chuva em coberturas metálicas pode se tornar prejudicial quando do uso de ambientes internos. Além disso, a reverberação é diretamente afetada pelo volume interno do ambiente e suas superfícies reflexivas, sendo assim, reforçados os níveis sonoros a partir da geração de sons sucessivos que prolongam o tempo em que o som permanece no ambiente (UNIVERSALIS, 2019). Dessa forma, em ambientes com coberturas em grandes vãos e elevado fluxo de pessoas como aeroportos, rodoviárias, ginásios, entre outros, os ruídos podem ser significativamente amplificados, com prejuízos ao bem-estar dos usuários.

A necessidade de implantação de melhorias ou de substituição do sistema de cobertura pode inviabilizar o uso da edificação, e a preocupação com o usuário nesses processos é decorrente dos riscos de queda de materiais como, por exemplo, telhas ou elementos de fixação (parafusos, ganchos). Essa complexidade operacional para substituição do sistema de cobertura apresenta um relevante

impacto no período sem uso, sendo que o fator financeiro costuma ter muito peso pela necessidade de interrupção das atividades.

Para a escolha do modelo de telha, fabricantes fornecem em seus catálogos dados referentes ao modelo e dimensões e, em alguns casos, a informação da condutividade térmica, deixando a informação da eficiência do isolamento acústico fora das especificações. Devido à falta dessas informações, as definições de soluções adotadas por projetistas se fundamentam na adoção de sistemas duplos, com materiais leves introduzidos em seus núcleos como, por exemplo, EPS e PU.

1.3 Problema

O problema definido para este estudo está fundamentado em uma dúvida da prática profissional com o intuito que quantificar o desempenho acústico de coberturas com telhas metálicas, e está definido da seguinte forma:

- Qual a solução mais adequada para o aumento da eficiência do isolamento ao ruído da chuva em coberturas com telhas metálicas?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

Determinar a influência no desempenho acústico ao ruído de impacto de chuva de diferentes elementos utilizados em composições de sistemas de coberturas com telhas metálicas.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar o comportamento típico de sistemas de coberturas frente ao ruído da chuva;

- Analisar a influência da inserção localizada de elementos de amortecimento na irradiação das vibrações em coberturas com telhas metálicas;

- Implantar a câmara para ensaios em laboratório de desempenho acústico ao ruído de chuva, conforme características da norma ISO 10140:1.

2 RUÍDO DA CHUVA EM COBERTURAS

Para analisar o ruído da chuva em coberturas com telhas metálicas, torna-se necessário o entendimento do sistema construtivo em estrutura metálica conforme os tipos de conexões e travamentos, entre as diversas partes que compõem a cobertura, bem como a distribuição dos apoios para as telhas metálicas e seus sistemas de fixação à estrutura, para o efetivo controle da propagação das vibrações.

Conforme Jaramillo e Steel (2015), os sistemas de coberturas de edificações residenciais frequentemente são compostos por elementos de concreto, conjuntos de telhas e outros elementos como forros com câmaras de ar que podem fornecer níveis adequados de controle acústico a ruído aéreo e das chuvas, para a maioria dos tipos de edifícios e situações. Ainda segundo os autores, sistemas de coberturas com telhados metálicos podem ser considerados problemáticos, mas é possível garantir que o ruído seja suficientemente controlado por meio de um projeto com soluções adequadas às características sonoras de cada local.

2.1 Coberturas metálicas

Segundo Bellei e Pinho (2008), as evidências mais seguras da obtenção e utilização de ferro, datam aproximadamente 6 mil anos a.C., em civilizações como as do Egito, Babilônia e Índia. Sua utilização em escala industrial ocorreu somente no século XIX, devido aos processos industriais decorrentes da revolução industrial, com início na Inglaterra, França e Alemanha.

No Brasil, o início da fabricação do ferro se deu por volta de 1812. Estima-se que a primeira obra em ferro pudlado, fundido no Brasil, no estaleiro Mauá, em Niterói, RJ, foi a ponte de Paraíba do Sul, com vãos de 30m, cuja data de construção é de 1857, em uso até os dias de hoje.

A primeira siderúrgica foi implementada em 1921, a Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira, com objetivo de produzir arame farpado, perfis leves e etc. Em 1940, foi instituído no Brasil a Comissão Executiva do Plano Siderúrgico Nacional, e em 1941 foi fundada a Companhia Siderúrgica Nacional, produzindo chapas, trilhos e perfis nas bitolas americanas (BELLEI, 2006).

Em 2020, o parque fabril nacional era de 31 usinas (Figura 1), com capacidade produtiva nacional de 50,3 milhões de toneladas de aço bruto por ano, sendo a produção em 2020 de 31,4 milhões de toneladas de aço bruto, de acordo com o Instituto Aço Brasil (2021).

Figura 1 – Distribuição das Siderúrgicas no Brasil



Fonte: Instituto Aço Brasil (2021)

O campo de aplicação das estruturas metálicas, atualmente, se dá em praticamente todos os segmentos do setor produtivo da construção civil, entre eles o de coberturas metálicas, objeto deste estudo. Conforme a ABNT NBR 15575-5:2021, o sistema de cobertura é conceituado como o conjunto de elementos/componentes, instalados no topo da edificação, tendo como algumas de suas funções garantir da estanqueidade às águas pluviais e contribuir positivamente para o conforto térmico e acústico de edificações. Além disso, os sistemas de coberturas têm ampliado sua importância no atual contexto do aumento da necessidade do uso racional de recursos naturais, com maior atenção ao aproveitamento da água da chuva. Nesse sentido, a NBR 15527:2019 considera a área dos sistemas de cobertura como parte integrante do sistema de aproveitamento sendo a principal área de captação da

água resultante de precipitações atmosféricas. Além disso, é importante salientar a crescente preocupação com o uso de amplas áreas dos sistemas de coberturas para a instalação de sistemas fotovoltaicos (CRUZ *et al.*, 2021).

Para Bellei e Pinho (2008), as coberturas metálicas ganharam espaço na construção civil devido as suas vantagens em relação aos sistemas construtivos em concreto armado. A opção de uso de coberturas metálicas na etapa de projeto de arquitetura permite a condição de trabalhar com grandes vãos livres e uma grande liberdade de formas.

As coberturas metálicas também permitem o uso de elementos estruturais que suportem grandes esforços apesar da área relativamente pequena de suas seções, sendo assim, consideradas estruturas leves, apesar de sua elevada densidade. Por ser um material homogêneo, os elementos de aço oferecem uma elevada margem de segurança, com limite de escoamento, ruptura e módulo de elasticidade bem definidos. Os elementos de aço são fabricados em oficinas, de forma seriada, com montagem mecanizada, permitindo com isso a redução do prazo final da construção (FABRO *et al.*, 2020). Os elementos de aço podem ser desmontados e substituídos com facilidade, o que permite reforços ou substituir facilmente diversos elementos de estrutura. Possibilidade de reaproveitamento do material que não seja mais necessário à construção.

A aplicação em coberturas pode atender inúmeros tipos de sistemas metálicos. Conforme Chamberlain *et al.* (2013), edifícios industriais para uso geral, denominados galpões, apresentam várias concepções para seu sistema estrutural, dentro elas se destacam:

- Cobertura em uma ou duas águas, com vigas de cobertura em alma cheia (Figura 2);
- Cobertura em uma ou duas águas, com sistema treliçado (Figura 3).

As coberturas confeccionadas com elementos em alma cheia, são compostas por perfis laminados (W, HP) e/ou perfis de alma cheia soldados, são eles os perfis do tipo “I”. A vantagem na aplicação é a velocidade de produção e possibilidade de maiores vãos e pé direito livre.

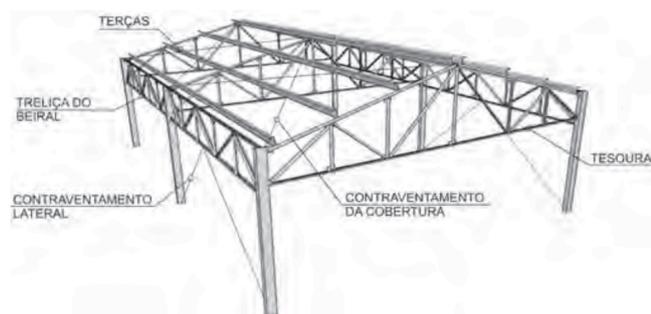
Coberturas do tipo treliçadas, compostas por estruturas reticuladas formadas por triângulos em um mesmo plano, com barras interligadas apresentam menor consumo de aço, em sua concepção são utilizados perfis laminados do tipo W, C, U, L e/ou perfil dobrados a frio do tipo C, U, L. A desvantagem do processo é maior tempo de produção das peças e menor aproveitamento no transporte devido ao maior volume.

Figura 2 – Estrutura de uma cobertura duas águas com perfis alma cheia.



Fonte: Chamberlanin, Ficanha, Fabeane (2013)

Figura 3 – Estrutura de uma de cobertura duas águas com elementos treliçados

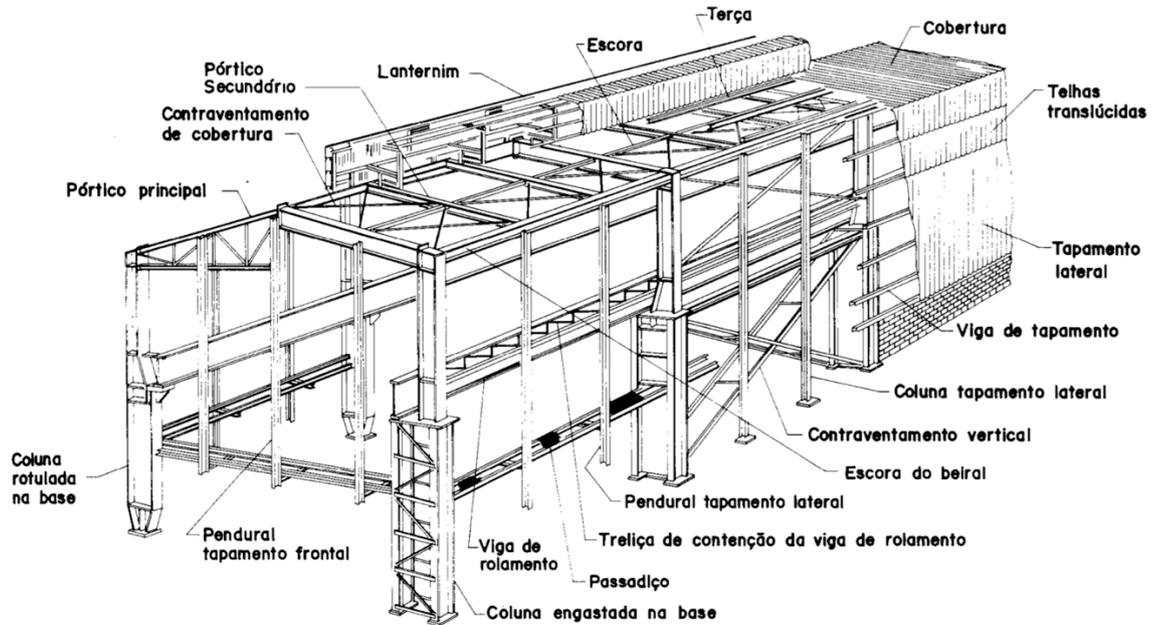


Fonte: Chamberlanin et al. (2013)

Os elementos secundários da estrutura, com finalidade de travamento (vigas entre pórticos), contraventamento (de horizontais e verticais) e sustentação das chapas de cobertura (terças), representados na Figura 3, são elementos leves de inúmeras possibilidades de concepções e tipos de materiais (laminados, dobrados,

perfilados). A Figura 4, representa os elementos com diversas concepções que compõem um galpão.

Figura 4 – Perspectiva de um galpão com seus principais componentes



Fonte: Bellei (2004)

O telhado de uma edificação é composto pela estrutura principal, conjunto resistente apoiado diretamente na estrutura da edificação, e pela trama, estrutura secundária integrada pelas terças, caibros e ripas dispostos em diferentes camadas (ABNT NBR 15575-5:2013). Conforme a ABNT NBR 16841:2020, as camadas de um telhado podem ser compostas por barreiras de isolamento térmica e de vapor, além de adesivos, parafusos e outros componentes de fixação mecânica para suporte e fixação dos diferentes elementos, conforme requisitos e critérios adotados no projeto estrutural.

Em um telhado, as terças são os elementos que transmitem as solicitações estruturais para a estrutura principal. De acordo com Bellei (2006), as solicitações comumente são de flexão dupla e excepcionalmente a flexão simples (caso de telhado plano), provocadas por cargas do tipo:

- Cargas acidentais (chuva, poeira, pessoas na cobertura);
- Cargas de vento (sendo elas de pressão ou sucção).

Suas hipóteses de carregamento são 3:

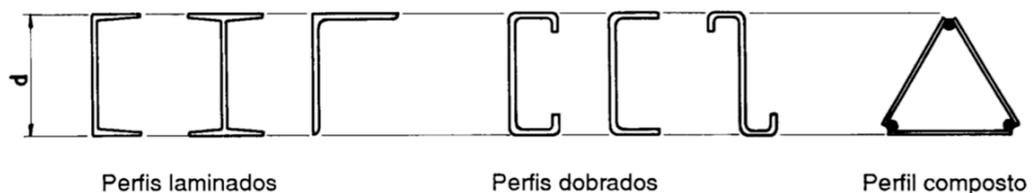
1. CP + CA
2. CP + CV (sucção)
3. CP + CA + CV (pressão).

Sendo que: CP: carga permanente; CA: carga accidental; CV: carga de vento.

Para o isolamento ao ruído da chuva, as terças são os elementos de maior importância, devido a sua função estrutural de sustentação das chapas de cobertura e possuem contato direto com as telhas, propagando a vibração para os demais elementos estruturais de uma cobertura metálica. No entanto, também é possível observar que devido a combinação de diferentes peças metálicas entrelaçadas, a propagação do som é consideravelmente elevada nesse tipo de sistema de cobertura.

A definição dos materiais a serem empregados em uma cobertura se dá de acordo com as necessidades do cálculo estrutural e a disponibilidade dos materiais e/ou processos do fabricante. Os tipos de perfil mais empregados são, perfis laminados, dobrado, soldado ou compostos, conforme a Figura 5.

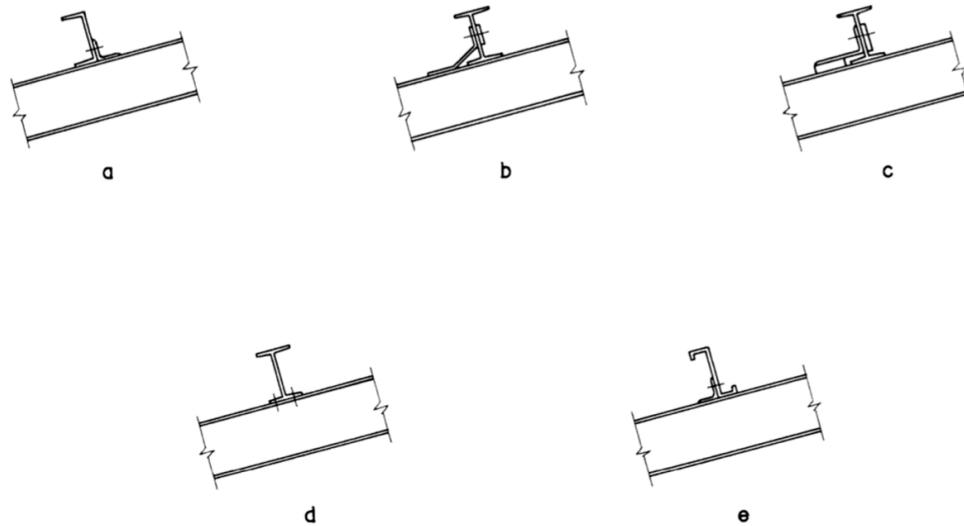
Figura 5 – Tipos de perfil



Fonte: Bellei (2006)

Os tipos de fixação mais usuais são por meio de parafusos, sendo que as terças são parafusadas a elementos de escora soldados ou também parafusados junto as vigas (pórticos) de cobertura, conforme a Figura 6.

Figura 6 – Tipos de apoio de terça

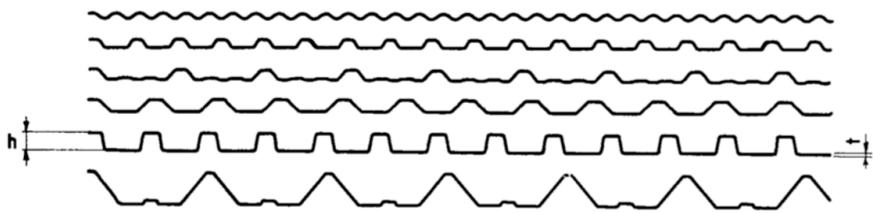


Fonte: Bellei (2006)

2.1.1 Telhas Metálicas

Segundo Bellei (2006), telhas metálicas são chapas aplicadas sobre as terças de uma cobertura ou fechamento; basicamente as chapas que envolvem e “vestem” as edificações. São responsáveis por garantir a estanqueidade da edificação e proteger o interior das intempéries externas. Devido ao fato de existir uma gama muito grande de perfis no mercado, cada fabricante possui características geométricas em seu perfil que se diferenciam dos demais. Bellei ilustra, conforme a Figura 7, os tipos de perfis mais comuns, suas características de altura dos perfis, espessura das chapas e vãos máximos (os vãos devem ser consultados mediante a cada tipo de perfil e fabricante), e recomenda a inclinação como mínima para estes de 5%, com uma sobreposição de 200 mm. Para inclinações menores que 5%, é recomendado o uso de fita ou massa de vedação para garantir a estanqueidade do sistema.

Figura 7 – Tipos de apoio de terça



| Tipo | Alt. h | Esp. (t) | Vão máx. | Peso |
|-------------|----------|-------------|----------|--------------|
| | mm | | | |
| ondulada | 17 | 0,43 a 1,25 | até 3,00 | 4,17 a 12,12 |
| trapezoidal | 25 a 100 | 0,43 a 1,25 | até 7,50 | 4,00 a 12,63 |

Fonte: Bellei – 2006

Segundo a ABCEM – Associação Brasileira da Construção Metálica (2009), as últimas décadas foram revolucionadas pelo amplo uso de telhas fabricadas a partir de bobinas de aço zincado e revestidas de material sintético (pré-pintadas) na construção civil brasileira. Essa solução representa um aumento nas opções para as coberturas e fechamentos laterais das mais variadas edificações.

A Composição do material e revestimento se divide em dois grupos (ABCEN 2009):

- Zincado por imersão a quente;
- Liga de alumínio-zinco por imersão a quente;
- Zincado por imersão a quente e pintado;
- Liga de alumínio-zinco por imersão a quente e pintado.

Com a utilização dos elementos metálicos, vem a preocupação com a vida útil dos materiais. Para isso, um dos principais fornecedores nacionais da matéria-prima para a conformação das telhas metálica, a CSN – Companhia Siderúrgica Nacional, disponibiliza em seu catálogo, os dados técnicos do produto e resultados de ensaios à corrosão, considerando-se o período de 16 anos para os revestimentos em zinco e em liga de alumínio-zinco.

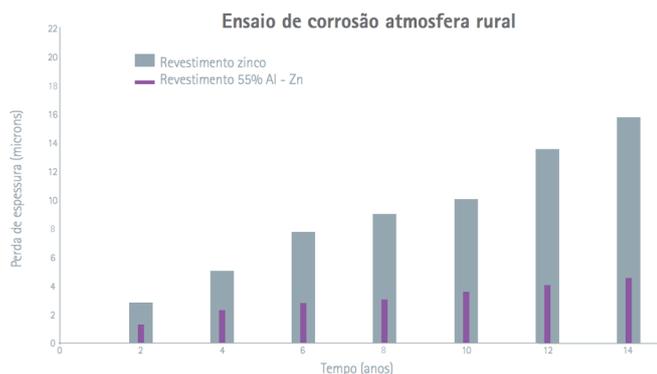
Os ensaios expressam a influência de 4 atmosferas diferentes, para assim o projetista determinar o emprego do material (revestimento de zinco ou zinco e alumínio) mais adequado em casa projeto. Esses quatro tipos de atmosfera

representam as diferentes interações dos componentes da camada de ar com um determinado material. De acordo com Bolina et al. (2019), as características gerais de cada uma delas são:

- Atmosfera rural (Figura 8): sem a presença significativa de contaminantes químicos;
- Atmosfera industrial (Figura 9): elevado grau de poluição com a presença de gases e particulados extremamente agressivos;
- Atmosfera marinha (Figura 10): presença de cloretos de sódio e magnésio;
- Atmosfera marinha severa (Figura 11): maior concentração de cloretos de sódio e magnésio.

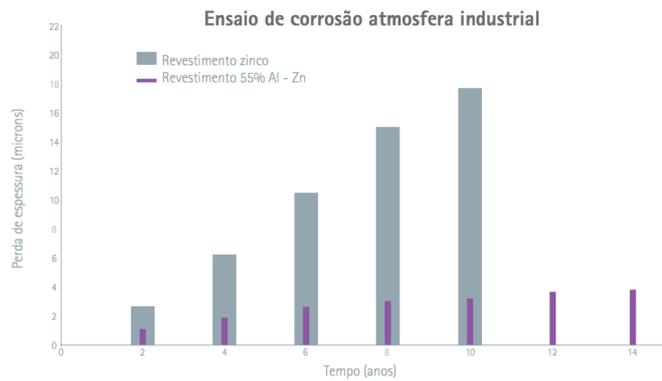
As Figuras 8 a 11, apresentam resultados de perda de espessura do material em determinadas atmosferas. Em cinza, a barra do material revestido de zinco e em roxo, a barra com o material revestido na liga Al e Zn. Pode-se observar a baixa perda gradual da liga com alumínio (nos quatro casos), confirmando assim a maior vida útil do produto com este revestimento.

Figura 8 – Atmosfera rural



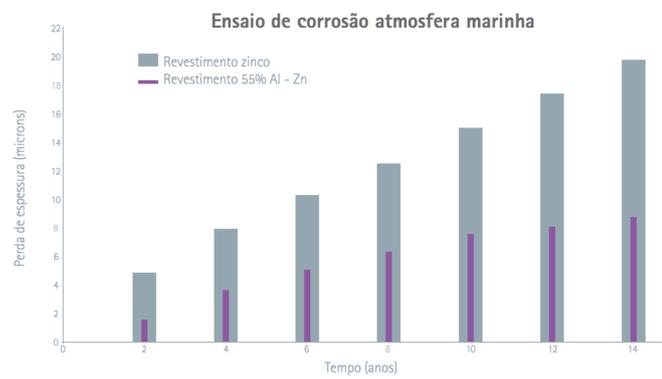
Fonte: Catálogo virtual CSC (2020)

Figura 9 – Atmosfera industrial



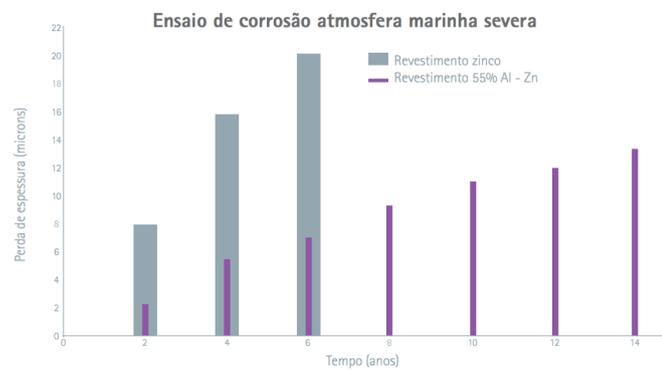
Fonte: Catálogo virtual CSC (2020)

Figura 10 – Atmosfera marinha



Fonte: Catálogo virtual CSC (2020)

Figura 11 – Atmosfera marinha severa



Fonte: Catálogo virtual CSC (2020)

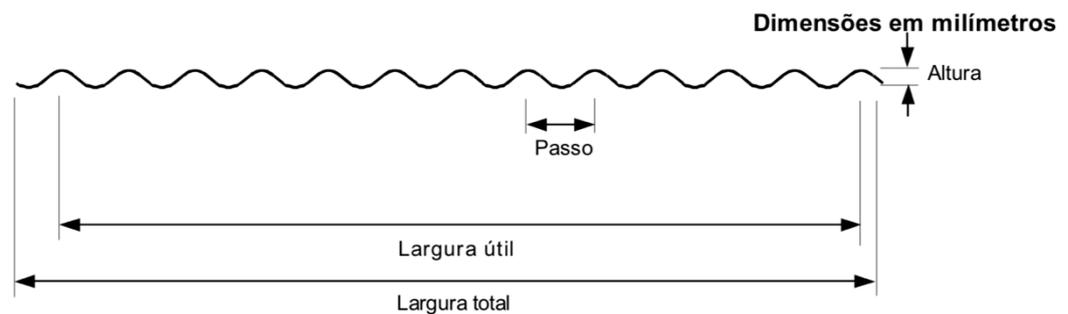
Hoje, no mercado nacional, as telhas metálicas possuem dois perfis básicos, especificados pela ABNT, que são:

- Onduladas (ABNT NBR 14513:2008): possuem um formato senoidal constante, sem linhas retas;
- Trapezoidais (ABNT NBR 14514:2008): formadas por trapézios com espaçamentos e alturas diferentes para cada modelo.

2.1.2 Telhas Onduladas

A ABNT NBR 14513:2008 indica a padronização dos requisitos mínimos dos perfis formados a frio para telhas onduladas, com a identificação das dos itens de medição do perfil e as nomenclaturas conforme a Figura 12:

Figura 12 – Telha ondulada



Fonte: ABNT (2008)

A Norma indica a tolerância da espessura da chapa contemplando seu revestimento, conforme Figura 13.

Figura 13 – Limites superior e inferior da espessura nominal em função da largura útil de telhas onduladas

| Espessura nominal mm | Espessuras limite | |
|-------------------------|-------------------|--------------|
| | mínima mm | máxima mm |
| 0,32 | 0,30 | 0,34 |
| 0,38 | 0,35 | 0,39 |
| 0,43 | 0,40 | 0,46 |
| 0,50 | 0,47 | 0,54 |
| 0,65 | 0,60 | 0,70 |
| 0,80 | 0,75 | 0,85 |
| 0,95 | 0,89 | 1,01 |
| 1,25 | 1,19 | 1,31 |

Fonte: ABNT (2008)

Conforme indicado na Figura 7, telhas onduladas podem atender vãos máximos entre terças de até 3,00m. Estes espaçamentos são a caráter de orientação quanto ao uso e a resistência da carga no vão (o dimensionamento estrutural do sistema de cobertura cabe ao engenheiro calculista do projeto). A Figura 14, apresenta as cargas admissíveis relacionadas a espessura do material de liga zinco e alumínio, seus respectivos vãos (distância entre apoios) e o número de apoios que a telha se encontrará segundo a ABCEM (2009).

Figura 14 – Cargas admissíveis nas telhas onduladas

| TELHA ONDULADA 17 | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----------------------------|--------------|------------------------|------------------------|--------------|-----------------------------|-----|------|-----|------|-----|------|----|------|----|
| Tabela de Cargas Admissíveis (kgf/m ²) - Telhas revestidas com Zn-Al | | | | | | | | | | | | | | | |
| Esp. (mm) | Peso* (kg/m ²) | Peso (kg/ml) | l (cm ² /m) | W (cm ² /m) | Nº de apoios | Distância entre Apoios (mm) | | | | | | | | | |
| | | | | | | 1500 | | 1750 | | 2000 | | 2250 | | 2500 | |
| | | | | | | F | C | F | C | F | C | F | C | F | C |
| 0,43 | 4,36 | 3,86 | 1,7236 | 1,970 | 2 | 66 | 41 | 41 | 26 | 28 | 17 | 20 | 12 | 14 | 9 |
| | | | | | 3 | 126 | 99 | 93 | 62 | 67 | 42 | 47 | 29 | 34 | 21 |
| | | | | | 4 | 124 | 78 | 78 | 49 | 52 | 33 | 37 | 23 | 27 | 17 |
| 0,50 | 5,10 | 4,52 | 1,9881 | 2,272 | 2 | 76 | 48 | 48 | 30 | 32 | 20 | 23 | 14 | 16 | 10 |
| | | | | | 3 | 145 | 114 | 107 | 72 | 77 | 48 | 54 | 34 | 40 | 25 |
| | | | | | 4 | 143 | 90 | 90 | 56 | 61 | 38 | 43 | 27 | 31 | 19 |
| 0,65 | 6,71 | 5,94 | 2,5400 | 2,903 | 2 | 97 | 61 | 61 | 38 | 41 | 26 | 29 | 18 | 21 | 13 |
| | | | | | 3 | 186 | 146 | 137 | 92 | 99 | 62 | 69 | 43 | 51 | 32 |
| | | | | | 4 | 183 | 115 | 115 | 72 | 77 | 48 | 54 | 34 | 40 | 25 |
| 0,80 | 8,31 | 7,36 | 3,0725 | 3,511 | 2 | 117 | 73 | 74 | 46 | 50 | 31 | 35 | 22 | 25 | 16 |
| | | | | | 3 | 225 | 177 | 165 | 111 | 119 | 75 | 84 | 52 | 61 | 38 |
| | | | | | 4 | 222 | 139 | 140 | 87 | 94 | 58 | 66 | 41 | 48 | 30 |
| 0,95 | 9,90 | 8,77 | 3,5857 | 4,098 | 2 | 137 | 86 | 86 | 54 | 58 | 36 | 41 | 25 | 30 | 19 |
| | | | | | 3 | 262 | 206 | 193 | 130 | 139 | 87 | 98 | 61 | 71 | 45 |
| | | | | | 4 | 259 | 162 | 163 | 102 | 109 | 68 | 77 | 48 | 56 | 35 |
| 1,25 | 13,08 | 11,58 | 4,5564 | 5,207 | 2 | 174 | 109 | 110 | 69 | 73 | 46 | 52 | 32 | 38 | 24 |
| | | | | | 3 | 333 | 262 | 245 | 165 | 177 | 111 | 124 | 78 | 91 | 57 |
| | | | | | 4 | 329 | 206 | 207 | 129 | 139 | 87 | 97 | 61 | 71 | 44 |

* = Incluindo sobreposição (Larg. útil de 912 mm)

NOTA: A flecha máxima admissível é de 300 mm.

Valores obtidos para cobertura e fechamento obedecendo ao menor valor nos seguintes critérios:

- Flecha máxima L/200 para cobertura e L/125 para fechamento (L - vão entre terças) ou tensão máxima admissível de 1400 kgf/cm².

OBS: Nas combinações com vento de sucção, o peso próprio da telha deverá ser subtraído da pressão do vento atuante.

F - Fechamento C - Cobertura

Fonte: Manual técnico ABCEM (2009)

A fixação das telhas em estruturas metálicas e/ou de madeira se dá através de parafusos autoperfurantes. Sua finalidade é fixar a telha no elemento da estrutura através de uma ancoragem mecânica. A Figura 15, indica o modelo de parafuso, especificações de dimensionamento e modelo de cobertura relacionado ao tipo de terço a serem aplicadas.

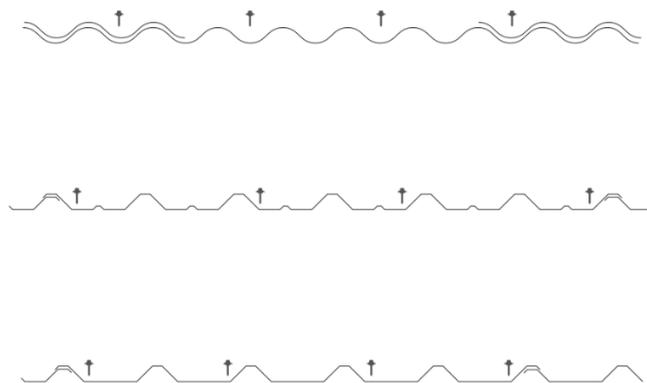
Figura 15 – Modelos de elementos de fixação

| MODELOS | ESPECIFICAÇÕES | | | CABEÇA | PONTA | UTILIZADO |
|---|----------------|-------------------------|-------------|--------|-------|---|
| | Bitola | Nº Fios p/ Polegadas | Comprimento | | | |
|  | 10 | 16 | 3/4 | 5/16 | 3 | Telha Ondulada Telha x Terço Metálica |
|  | 12 | 14 | 3/4 | 5/16 | 3 | Telhas Trapezoidais Telha x Terço Metálica |
|  | 1/4 | 14 | 7/8 | 5/16 | 3 | Telha x Telha (Costura) |
|  | 12 | 14 | 2 3/8 | 5/16 | 3 | Telhas Termoscósticas (Revestimento 30 mm) Telha x Terço Metálica |
|  | 10 | 14 | 1 1/2 | 1/4 | AB | Telha x Terço Madeira |

Fonte: Catálogo de fabricante (2020)

Para a montagem das telhas, fabricantes recomendam a utilização de pelo menos 4 parafusos de fixação por telha em cada linha de terças, conforme ilustrada na Figura 16, essa indicação se dá para todos os modelos de telhas.

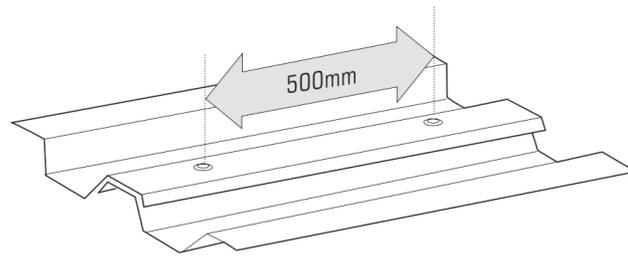
Figura 16 – Localização dos pontos de fixação das telhas



Fonte: Catálogo de fabricante (2020)

No sentido longitudinal do encaixe das telhas, recomenda-se a fixação de parafusos espaçados com 500mm, evitando frestas e contribuindo para a estanqueidade do sistema, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 – Fixação dos parafusos de transpasse das telhas

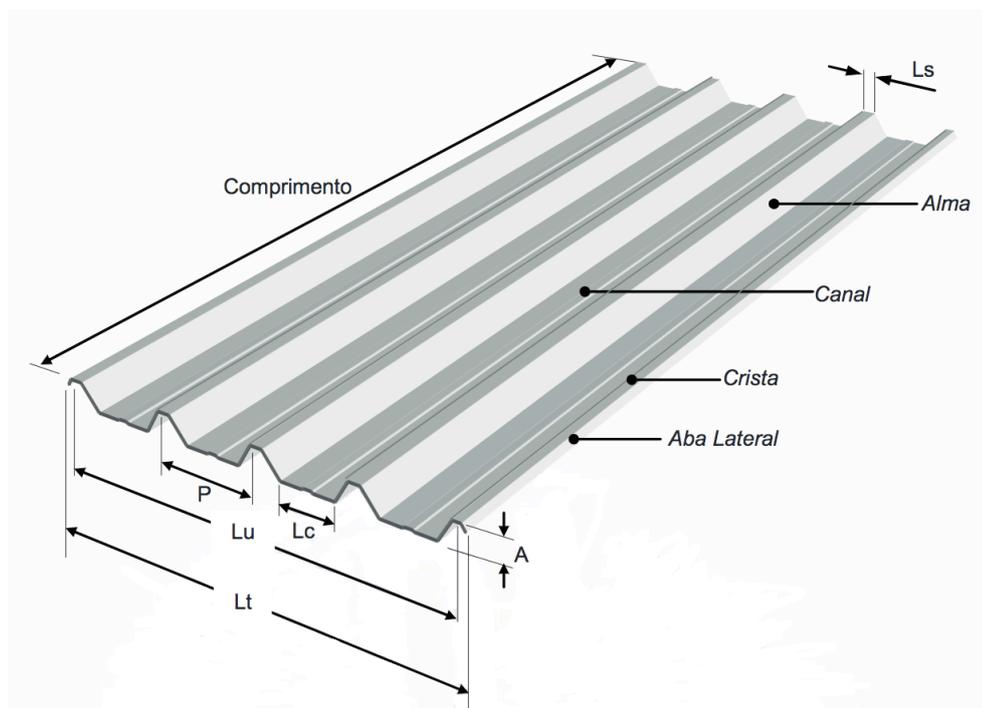


Fonte: Catálogo de fabricante (2020)

2.1.3 Telhas Trapezoidais

Para as telhas trapezoidais, a NBR 14514:2008 indica as dimensões geométricas do perfil, nomenclatura e tolerâncias, conforme Figuras 18 e 19:

Figura 18 – Perspectiva telha trapezoidal

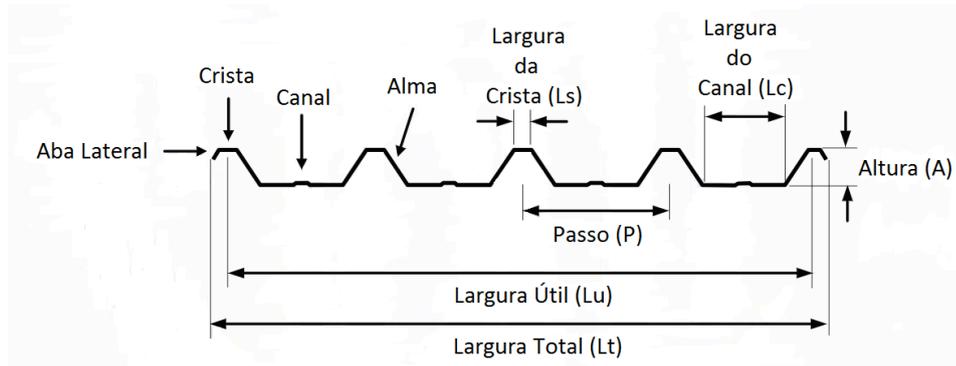


Fonte: ABNT NBR 14514:2008

Diferentemente das telhas onduladas, as telhas em formato trapezoidal apresentam uma variedade maior em suas alturas, passo, canal, entre outras características. Devido a sua maior inércia que as telhas onduladas, permitem maior

espaçamento entre vigas de apoio (terças), possuem o mesmo custo de material, pois a matéria prima é a mesma, sendo disponibilizada em bobinas de 1200 mm de largura, tornando-se mais econômica devido a sua largura útil (BELLEI, 2004). A Figura 19 apresenta a nomenclatura de norma dos elementos que compõem a telha trapezoidal.

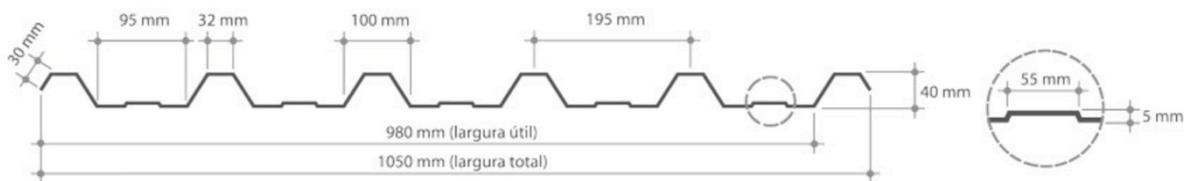
Figura 19 – Elementos de uma telha trapezoidal



Fonte: ABNT (2008)

Com grande disponibilidade entre os fabricantes, a telha trapezoidal com 40 mm de altura, conhecida no mercado brasileiro como TP-40, apresenta o perfil conforme especificado na Figura 20. Ressalta-se que algumas características mínimas em seu formato alteram de fornecedor para fornecedor devido ao seu equipamento de perfilação.

Figura 20 – Telha trapezoidal TP-40



Fonte: Catálogo de fabricante (2020)

A tolerância da espessura da chapa mais seu revestimento, para as telhas de geometria trapezoidal, são as mesmas aplicadas as telhas de perfil ondulado já indicado na Figura 13.

As cargas para uso e características são apresentadas de forma similar as telhas onduladas. A Figura 21, apresenta as vantagens relacionadas a melhor inércia das telhas de formato trapezoidal em relação ao seu vão de apoio (ABNT NBR 14514).

Figura 21 – Cargas admissíveis – Telha TP-40

| TELHA TRAPEZOIDAL 40 - Conforme Norma NBR 14514 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----------------------------|--------------|------------------------|------------------------|--------------|-----------------------------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| Tabela de Cargas Admissíveis (kgf/m ²) - Telhas revestidas com Zn-Al | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Esp. (mm) | Peso* (kg/m ²) | Peso (kg/ml) | I (cm ⁴ /m) | W (cm ² /m) | Nº de apoios | Distância entre Apoios (mm) | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | 1750 | | 2000 | | 2250 | | 2500 | | 2750 | | 3000 | |
| | | | | | | F | C | F | C | F | C | F | C | F | C | F | C |
| 0,43 | 3,90 | 3,86 | 10,4898 | 3,746 | 2 | 176 | 158 | 135 | 106 | 107 | 74 | 86 | 54 | 65 | 41 | 50 | 31 |
| | | | | | 3 | 176 | 176 | 135 | 135 | 107 | 107 | 86 | 86 | 71 | 71 | 60 | 60 |
| | | | | | 4 | 220 | 220 | 169 | 169 | 133 | 133 | 108 | 102 | 89 | 77 | 75 | 59 |
| 0,50 | 4,56 | 4,52 | 12,1631 | 4,344 | 2 | 204 | 183 | 156 | 123 | 124 | 86 | 100 | 63 | 75 | 47 | 58 | 36 |
| | | | | | 3 | 204 | 204 | 156 | 156 | 124 | 124 | 100 | 100 | 83 | 83 | 70 | 70 |
| | | | | | 4 | 255 | 255 | 195 | 195 | 154 | 154 | 125 | 119 | 103 | 89 | 87 | 69 |
| 0,65 | 6,00 | 5,94 | 15,7169 | 5,613 | 2 | 264 | 236 | 202 | 158 | 160 | 111 | 129 | 81 | 98 | 61 | 75 | 47 |
| | | | | | 3 | 264 | 264 | 202 | 202 | 160 | 160 | 129 | 129 | 107 | 107 | 90 | 90 |
| | | | | | 4 | 330 | 330 | 253 | 253 | 200 | 200 | 162 | 153 | 134 | 115 | 112 | 89 |
| 0,80 | 7,43 | 7,36 | 19,2278 | 6,867 | 2 | 323 | 289 | 247 | 194 | 195 | 136 | 158 | 99 | 119 | 75 | 92 | 57 |
| | | | | | 3 | 323 | 323 | 247 | 247 | 195 | 195 | 158 | 158 | 131 | 131 | 110 | 110 |
| | | | | | 4 | 404 | 404 | 309 | 309 | 244 | 244 | 198 | 187 | 163 | 141 | 137 | 108 |
| 0,95 | 8,86 | 8,77 | 22,6961 | 8,106 | 2 | 381 | 341 | 292 | 229 | 231 | 161 | 187 | 117 | 141 | 88 | 108 | 68 |
| | | | | | 3 | 381 | 381 | 292 | 292 | 231 | 231 | 187 | 187 | 154 | 154 | 130 | 130 |
| | | | | | 4 | 476 | 476 | 365 | 365 | 288 | 288 | 233 | 221 | 193 | 166 | 162 | 128 |
| 1,25 | 11,69 | 11,58 | 29,5074 | 10,538 | 2 | 496 | 444 | 379 | 297 | 300 | 209 | 243 | 152 | 183 | 114 | 141 | 88 |
| | | | | | 3 | 496 | 496 | 379 | 379 | 300 | 300 | 243 | 243 | 201 | 201 | 169 | 169 |
| | | | | | 4 | 619 | 619 | 474 | 474 | 375 | 375 | 303 | 288 | 251 | 216 | 211 | 166 |

* = Incluindo sobreposição (Larg. útil de 980 mm)

F - Fechamento C - Cobertura

NOTA: A flecha máxima admissível é de 300 mm.

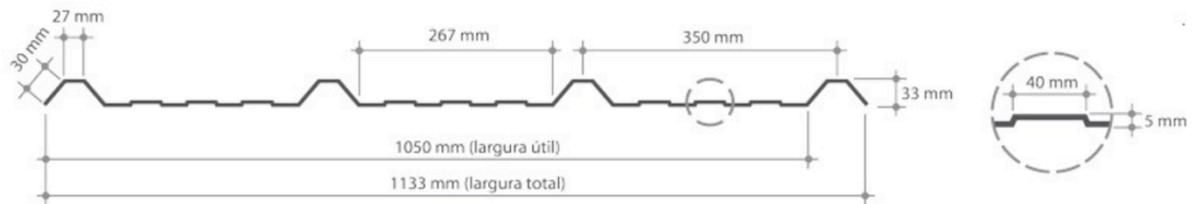
Valores obtidos para cobertura e fechamento obedecendo ao menor valor nos seguintes critérios:

- Flecha máxima L/200 para cobertura e L/125 para fechamento (L - vão entre terças) ou tensão máxima admissível de 1400 kgf/cm².

Fonte: Manual técnico ABCEM (2009)

Perfis com maior passo são comuns no mercado brasileiro, um deles é o perfil TP-33 (Figura 22), uma telha com menor altura do trapézio, porém, maior largura útil. Possui vantagem econômica no uso em larga escala. Sua aplicação se dá principalmente em fachadas, devido a maior largura do seu canal, resultando um aspecto de maior planicidade ao perfil e como telha forro.

Figura 22 – Telha trapezoidal TP-33



Fonte: Catálogo de fabricante (2020)

2.1.4 Telhas Zipadas

As telhas zipadas são compostas por material zincado ou zincoalumínio, nas mesmas espessuras que as telhas onduladas e trapezoidais. Este modelo de perfil não possui uma norma específica e se diferencia das telhas anteriormente mencionadas pelos seguintes itens:

- Sua largura útil inferior a metade das demais telhas;
- Produção do material em obra, possibilitando a cobertura de calha a cumeeira;
- Sistema de fixação através de clip e costura por meio de zipagem;
- Estanqueidade, sem necessidade de uso de fita ou massa;

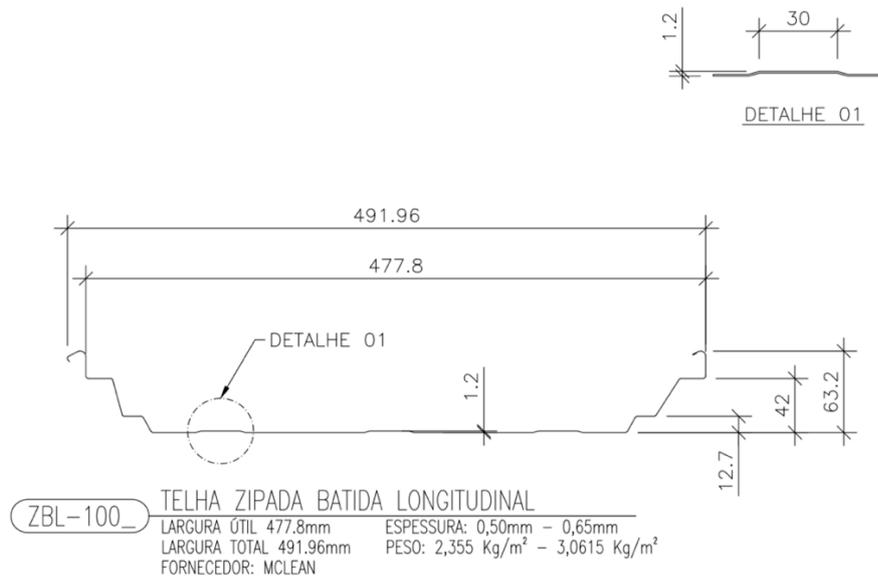
Largura útil: devido a mobilidade de produção em obra e a necessidade de elevar o equipamento de produção na altura da cobertura, a matéria prima de alimentação possui 600mm de largura, diferente dos demais perfis que utilizam matéria prima com largura de 1200mm. Dessa forma a secção da telha é inferior a metade das telhas já demonstradas, conforme as Figuras 22 e 24:

Figura 23 – Telha Zipada - Perspectiva



Fonte: Fabricante POOLMAK Mclean

Figura 24 – Telha Zipada - Dimensões



Fonte: Fabricante POOLMAK Mclean (2020)

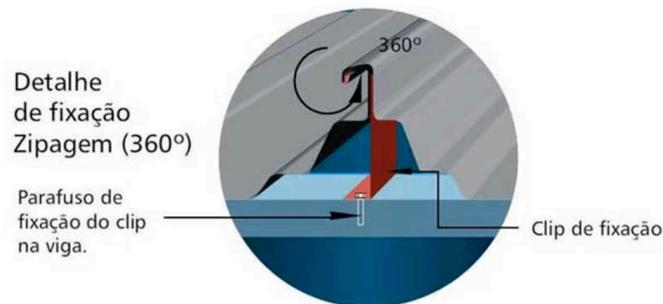
Sistema de fixação: diferente das demais telhas, o sistema de fixação se dá através do “clip”, um elemento secundário, onde sua fixação na telha se dá através do processo de zipagem eliminando a perfuração da telha de cobertura (Figura 25). A sustentação e fixação na estrutura é realizada com parafuso autoperfurante aplicado no clip (Figura 26).

Figura 25 – Clip utilizado no sistema de fixação



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 26 – Sistema de fixação por zipagem



Fonte: Fabricante POOLMAK Mclean (2020)

O processo de zipagem possibilita o uso do sistema de cobertura com inclinação de 3%, conforme ilustrado na Figura 27.

Figura 27 – Sistema de cobertura com processo de zipagem



Fonte: Elaborado pelo autor

As edificações com elementos construtivos metálicos requerem vários cuidados em relação aos aspectos de desempenho térmico e acústico. A elevada condutividade térmica, que pode variar entre 55 e 380 W/mK conforme o tipo de liga metálica, requer detalhamentos que indiquem a execução correta para evitar a ocorrência de pontes térmicas (GUYER, 2021). Além disso, a elevada velocidade de propagação do som nos metais, entre 4.600 e 6.420 m/s, também conforme o tipo de liga, exige a adoção de estratégias de controle do ruído (BIES; HANSEN, 2017), conforme variáveis indicadas nas seções seguintes deste capítulo.

2.2 Ruído das chuvas em coberturas

O controle da transmissão sonora em coberturas obedece aos mesmos princípios encontrados em outros sistemas construtivos.

Os sons produzidos no meio externo podem ser transmitidos para os ambientes internos, essencialmente, por dois caminhos que dependem do comprimento de onda. Os sons de alta frequência com menor comprimento de onda, identificados pelo sistema auditivo humano como sons agudos, são propagados através de frestas e aberturas de tamanho reduzido, sendo transmitidos pelo ar. Os sons de baixa frequência, com maior comprimento de onda, sofrem o fenômeno da difração, podem sofrer alterações de direção e serem transmitidos por vibrações (BIES; HANSEN, 2017; HASSAN, 2009).

Os sistemas construtivos são compostos por diferentes elementos construtivos. Os campos de vibração típicos no meio sólido são classificados como barras e placas e estão representados nos principais componentes estruturais do edifício (PATRÍCIO, 2018). As placas em um edifício são as paredes e pisos que delimitam os ambientes, e desempenham um papel fundamental tanto na radiação sonora quanto na transmissão do para a estrutura (HOPKINS, 2012).

Muitas paredes e pisos, ou suas partes constituintes, podem ser representados como placas sólidas, portanto, as placas formam um elemento de construção fundamental para o entendimento da propagação do em edificações. Na prática, existem placas que são compostas por outros elementos, como paredes de alvenaria com blocos com grandes vazios internos. As vigas e pilares, classificados barras quanto à resposta vibracional, desempenham um papel menor em termos de radiação sonora, mas têm importância na irradiação do som transmitido pela estrutura entre elementos do tipo placa (HASSAN, 2009).

A transmissão sonora em placas ortotrópicas difere da transmissão em placas isotrópicas, pois em placas ortotrópicas as ondas de flexão apresentam variações em sua direção. A diferença na rigidez de flexão em placas planas pode resultar em anisotropia do material da placa como com vigas, ondulações, corte e outros. Painéis com vigas acopladas para aumento da rigidez estrutural, o aumento da rigidez na flexão causada por ondulações, vigas e enrijecedores frequentemente aumentam a perda de transmissão (HASSAN, 2009).

De acordo com Patrício (2018), os sistemas como paredes, pisos e coberturas apresentam comportamento de transmissão laminar do som, ou como placas, sendo predominante a ocorrência de ondas de flexão, sendo que, o comportamento de uma placa frente à incidência do som, tem diferenças relacionadas composição espectral do som incidente. Esse comportamento pode ser analisado em diferentes faixas de frequência. A rigidez de uma placa, ou painel, tem grande influência no controle da transmissão das baixas frequências, visto que, as primeiras ressonâncias podem ser verificadas na transição entre baixas e médias frequências, sendo indicado seu controle através do uso de sistemas de amortecimento que reduzem a amplitude da vibração de ressonância. Os sons em médias frequências têm sua capacidade de transmissão influenciada pela massa, sendo que, o aumento na massa aumenta o isolamento acústico de um painel. Nos intervalos que compreendem as altas frequências podem ser verificadas outras ressonâncias causadas por ondas de flexão, que originam o efeito da coincidência. Assim como a ressonância nas baixas frequências, a coincidência representa perdas no isolamento acústico que podem ser reduzidas com a adoção de elementos que garantam o amortecimento do sistema, para limitar as amplitudes de vibração de ressonância e minimizar a queda do isolamento pela coincidência. (BIES; HANSEN, 2017; HOPKINS, 2012; PATRÍCIO, 2018)

Além dos princípios relacionados ao isolamento da transmissão sonora, o controle do ruído também pode sofrer contribuições de sistemas de absorção sonora, com a redução da parcela reverberante do som. A capacidade de absorção sonora de um material fibroso ou poroso está relacionada às suas propriedades físicas, como, espessura, densidade e porosidade. Egan (2014) indica que, para o mesmo material, o aumento de sua espessura aumentará, também, seus coeficientes de absorção.

Patrício (2018) cita que sistema leves, com duas placas separadas por uma cavidade de ar, pode ter a eficiência no isolamento acústico reduzida por causa da ocorrência de ressonâncias nessa cavidade. Nesse sentido, a instalação de material fonoabsorvente no preenchimento entre as placas contribuirá com a eliminação dessas ressonâncias e o consequente aumento do isolamento acústico. (CONDON, 2011; EGAN, 2014; Patrício, 2018).

Em sistemas de coberturas, a propagação do som pode ocorrer tanto por via aérea, como por sólidos. A variedade de elementos de um sistema de cobertura, em termos de características geométricas individuais, acarreta diferentes respostas vibracionais em cada parte do sistema, no entanto, o tipo de vínculo entre cada elemento pode caracterizar essa transmissão como contínua, independente de alterações nos materiais (PATRÍCIO, 2018).

Hopkins (2012) esclarece que a eficiência da radiação depende do tipo de excitação. Essa eficiência também depende das dimensões da placa e do tipo e distribuição de elementos de reforço. Sendo assim, resultados da resposta vibracional de uma placa, nem sempre são aplicáveis para outros tamanhos de placa.

Assim, o ruído ocasionado pelas chuvas em sistemas de cobertura metálicos apresenta meios de transmissão complexos, decorrentes das características intrínsecas desse sistema.

Donohue e Pearse (2019), definem ruído da chuva como o resultado da vibração da superfície em que a chuva cai, e seu caráter é alterado conforme a massa da estrutura, o amortecimento do material e a perda da energia resultante. A queda das gotas da chuva sobre o telhado de uma edificação, de acordo com Hopkins *et al.* (2020), produz um ruído que pode interferir na inteligibilidade da fala, no conforto acústico e nas condições de audição.

As características e consequências dessa ação dinâmica também são estudadas em outras áreas do conhecimento. A energia cinética da chuva é um indicador importante para avaliações de vários tipos de desgaste. De acordo com Mineo *et al.* (2019) a energia cinética das chuvas provoca o desprendimento de partículas do solo e resulta em um gasto de energia da gota de chuva, com consequente redução dessa energia. Embora seja amplamente reconhecido que o conhecimento da energia cinética da chuva desempenhe um papel fundamental nesse tipo de estudo, sua avaliação direta pode ser imprecisa. No entanto, esse problema pode ser superado em estimativas indiretas com a utilização de dados de intensidade da chuva. Tilg *et al.* (2020) também indicam a energia cinética das chuvas como um parâmetro importante para estimativas do desgaste das bordas das pás de turbinas eólicas, sendo que os elevados índices pluviométricos causam mais danos que o aumento na velocidade do vento. No entanto, dados sobre a

distribuição sazonal do tamanho das gotas e a dependência da velocidade de queda da energia cinética da chuva, são considerados de difícil obtenção (MINEO *et al.*, 2019; TILG *et al.*, 2020).

O ruído da chuva também é considerado um problema no setor produtivo da agropecuária, em edificações agrícolas do tipo galpões, sendo evidenciados problemas de estresse em animais confinados (DEMANET *et al.*, 2017), e possíveis reduções na capacidade de alertas de emergência mesmo em animais silvestres (WU *et al.*, 2020).

A determinação da energia cinética das chuvas naturais, tanto frontais quanto convectivas, demanda o estudo da distribuição das gotas para o desenvolvimento de aparatos destinados à testes experimentais. A energia cinética da gota de chuva é proporcional a sua massa e sua velocidade ao quadrado, resultando em uma energia cinética maior para gotas com maior massa. Sendo assim, as gotas menores possuem menor energia cinética de impacto. Além disso, a variável vento pode alterar a velocidade de impacto da gota, com isso pode haver uma variação da energia cinética em gotas de mesmo diâmetro. As gotas de menor diâmetro são as mais impactadas com a variações de vento e por fim possuem uma energia cinética de maior imprecisão. (MINEO *et al.*, 2019; TILG *et al.*, 2020).

Os ensaios realizados em cobertura metálica em chuvas naturais de maior intensidade, apontaram que a intensidade da chuva é responsável pela proporção de 93% da variação dos ruídos da chuva, enquanto outros fatores como o vento e altura da chuva, representam apenas 7%, confirmando a hipótese de a intensidade ser o fator predominante no ruído das chuvas (XINAG; SHUAI; JUNJIE, 2015).

Segundo Hopkins (2020), alguns países consideram a necessidade de controle do ruído da chuva no interior das suas edificações apenas em localidades com chuvas moderadas, enquanto em outros, o tema é considerado relevante devido as estações chuvosas prolongadas, com chuvas torrenciais. Ainda segundo o autor, para a padronização de uma fonte de impacto de chuvas em coberturas é necessário a consideração de aspectos práticos de um teste em laboratório, pois é preciso estabelecer relações com a chuva natural e gerar elevados níveis sonoros para permitir que as medições não sejam afetadas pelo ruído de fundo.

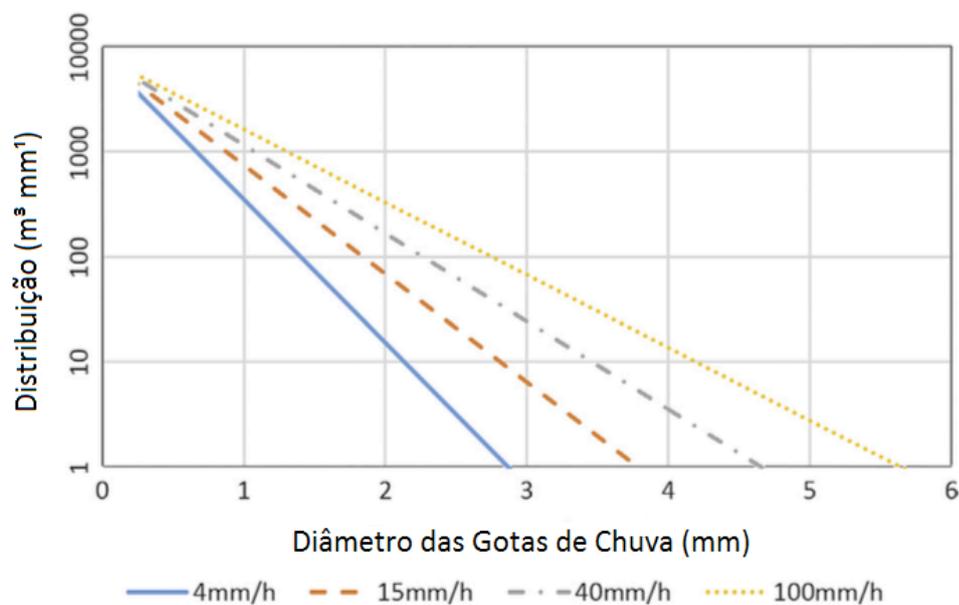
Em dias de chuva, coberturas metálicas, consideradas leves, vibram com mais facilidade do que coberturas com maior massa, com telhas de materiais

cimentícios. Portanto, os sistemas de coberturas com telhas metálicas são entendidos como fonte geradora de maior ruído para o interior de uma edificação (JARAMILLO; STEEL, 2015).

Nesse contexto, a quantidade e intensidade da precipitação da chuva, são importantes variáveis a serem consideradas. Medições meteorológicas utilizam como meio de medição a intensidade da chuva, e sua importância se dá através da relação de milímetros por hora (mm/h). Outro item importante para o dimensionamento das chuvas, são sua distribuição e tamanho de suas gotas, que se relacionam diretamente com o tipo de chuva e a altura de queda, o que dificulta tanto a mensuração quanto processos de estimativas e simulação em laboratório (XINAG; SHUAI; JUNJIE, 2015).

Quanto maior a intensidade da chuva, maior é o diâmetro da gota, conforme a Figura 28.

Figura 28 – Intensidade da chuva x diâmetro da gota

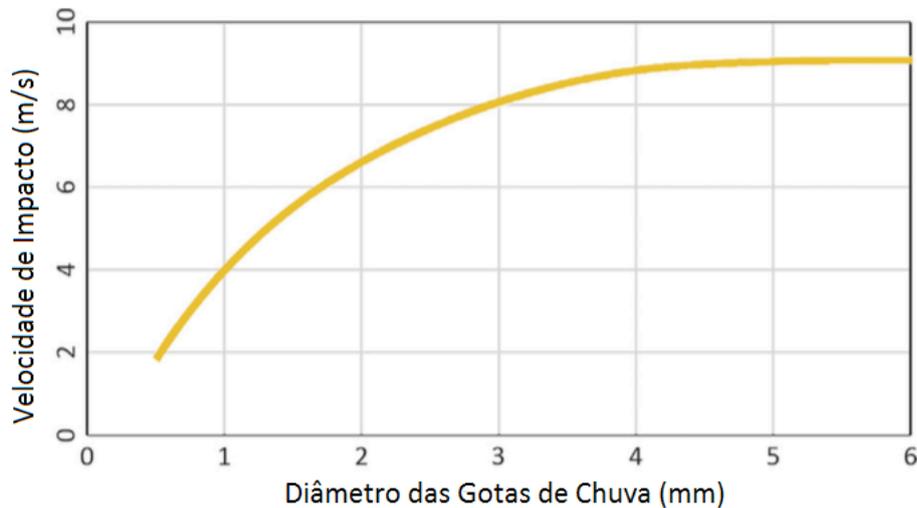


Fonte: Xiang *et al.* (2015)

Velocidade de impacto ou velocidade terminal, é a velocidade que a gota atinge o solo em m/s. A gota ao iniciar sua queda possui uma velocidade crescente devido a gravidade, após a força da resistência do ar igualar sua gravidade a velocidade da gota permanece constante até atingir o solo. Dessa forma a

velocidade de impacto das gotas de maior diâmetro é maior que a velocidade de impacto das gotas menores (XINAG; SHUAI; JUNJIE, 2015), conforme a Figura 29.

Figura 29 – Velocidade de impacto x diâmetro da gota



Fonte: Xiang *et al.* (2015)

Para as chuvas artificiais, no Anexo K da Norma ISO 10140:2014 Parte 1, é apresentada a classificação das chuvas conforme sua intensidade, sendo 40 mm/h considerada a de forte intensidade (Figura 30).

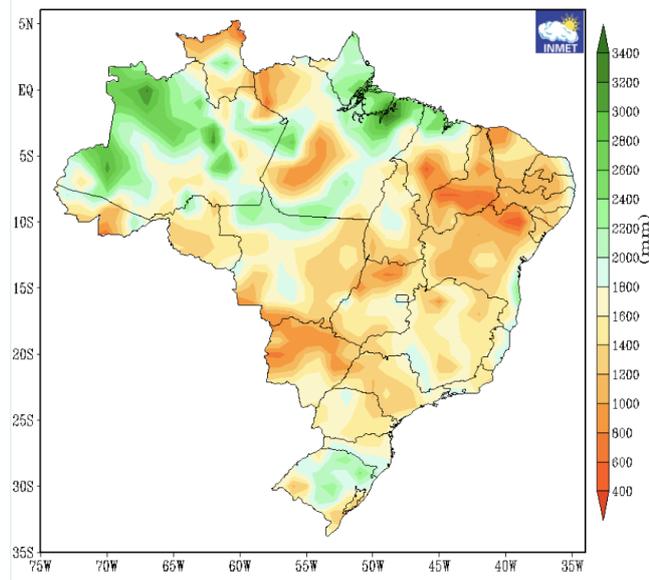
Figura 30 – Classificação de chuvas artificiais

| Tipo de chuva | Taxa de precipitação mm/h | Diâmetro da gota mm | Velocidade m/s |
|---------------|---------------------------|---------------------|----------------|
| Moderada | ≤ 4 | 0,5 a 1,0 | 1 a 2 |
| Intensa | ≤ 15 | 1 a 2 | 2 a 4 |
| Forte | ≤ 40 | 2 a 5 | 5 a 7 |
| Muito Forte | > 100 | > 3 | > 6 |

Fonte: ISO 10140:1 anexo K (2014)

O Brasil, devido ao seu extenso território, possui diferentes regiões climáticas, com níveis anuais de precipitações variáveis, resultando acúmulos de chuva entre 400 e 3.400 mm (Figura 31).

Figura 31 – Precipitação total no território nacional em 2018



Fonte: Inmet (2018)

Dessa forma, o ruído da chuva é um problema presente nas diferentes regiões do Brasil, ocasionado por chuvas torrenciais com maior ou menor intensidade.

As medições de intensidade da chuva na capital do estado do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, estão listadas em intervalos de 5 min a 24 h, e com período de retorno de 2 a 100 anos, conforme Figura 32 do Atlas Pluviométrico do Brasil (2015) emitido pelo CPRM (Serviço Geológico do Brasil).

Figura 32 – Intensidade das chuvas em Porto Alegre, em mm/h

| Duração da chuva | Tempo de Retorno, T (anos) | | | | | | | | | | | | |
|------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 2 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | 60 | 75 | 90 | 100 |
| 5 Minutos | 108,1 | 131,0 | 151,5 | 164,9 | 175,2 | 183,6 | 190,8 | 202,6 | 212,3 | 220,6 | 231,2 | 240,2 | 245,5 |
| 10 Minutos | 91,1 | 110,4 | 127,6 | 138,9 | 147,6 | 154,6 | 160,7 | 170,7 | 178,8 | 185,8 | 194,7 | 202,3 | 206,8 |
| 15 Minutos | 78,5 | 95,1 | 110,0 | 119,7 | 127,2 | 133,3 | 138,5 | 147,1 | 154,1 | 160,1 | 167,8 | 174,3 | 178,2 |
| 20 Minutos | 68,8 | 83,4 | 96,4 | 105,0 | 111,5 | 116,9 | 121,4 | 129,0 | 135,2 | 140,4 | 147,2 | 152,9 | 156,3 |
| 30 Minutos | 55,0 | 66,7 | 77,1 | 83,9 | 89,2 | 93,4 | 97,1 | 103,1 | 108,1 | 112,3 | 117,6 | 122,2 | 125,0 |
| 45 Minutos | 42,0 | 50,9 | 58,9 | 64,1 | 68,1 | 71,4 | 74,2 | 78,8 | 82,6 | 85,8 | 89,9 | 93,4 | 95,5 |
| 1 HORA | 33,8 | 41,0 | 47,4 | 51,6 | 54,8 | 57,5 | 59,7 | 63,4 | 66,5 | 69,0 | 72,4 | 75,2 | 76,9 |
| 2 HORAS | 20,3 | 24,1 | 27,4 | 29,6 | 31,3 | 32,6 | 33,8 | 35,7 | 37,2 | 38,5 | 40,2 | 41,6 | 42,4 |
| 3 HORAS | 15,1 | 17,9 | 20,5 | 22,1 | 23,3 | 24,3 | 25,2 | 26,6 | 27,7 | 28,7 | 29,9 | 31,0 | 31,6 |
| 4 HORAS | 12,2 | 14,6 | 16,6 | 17,9 | 18,9 | 19,7 | 20,4 | 21,6 | 22,5 | 23,3 | 24,3 | 25,1 | 25,6 |
| 5 HORAS | 10,4 | 12,4 | 14,1 | 15,2 | 16,1 | 16,8 | 17,4 | 18,3 | 19,1 | 19,8 | 20,7 | 21,4 | 21,8 |
| 6 HORAS | 9,1 | 10,8 | 12,4 | 13,4 | 14,1 | 14,7 | 15,2 | 16,1 | 16,8 | 17,3 | 18,1 | 18,7 | 19,1 |
| 7 HORAS | 8,2 | 9,7 | 11,1 | 11,9 | 12,6 | 13,1 | 13,6 | 14,4 | 15,0 | 15,5 | 16,2 | 16,7 | 17,1 |
| 8 HORAS | 7,4 | 8,8 | 10,0 | 10,8 | 11,4 | 11,9 | 12,4 | 13,0 | 13,6 | 14,1 | 14,7 | 15,2 | 15,5 |
| 12 HORAS | 5,5 | 6,6 | 7,5 | 8,1 | 8,5 | 8,9 | 9,2 | 9,7 | 10,1 | 10,5 | 10,9 | 11,3 | 11,6 |
| 14 HORAS | 4,9 | 5,9 | 6,7 | 7,2 | 7,6 | 8,0 | 8,2 | 8,7 | 9,1 | 9,4 | 9,8 | 10,1 | 10,3 |
| 20 HORAS | 3,8 | 4,5 | 5,2 | 5,6 | 5,9 | 6,1 | 6,4 | 6,7 | 7,0 | 7,2 | 7,6 | 7,8 | 8,0 |
| 24 HORAS | 3,3 | 4,0 | 4,5 | 4,9 | 5,2 | 5,4 | 5,6 | 5,9 | 6,1 | 6,3 | 6,6 | 6,8 | 7,0 |

Fonte: CPRM (2015)

A Figura 32, lista a intensidade das chuvas na cidade de Porto Alegre, em 1h de chuva a intensidade para 2 anos de retorno, é de 33,8 mm e em 5 anos 41 mm. Dessa forma, pode-se considerar que a intensidade das chuvas em Porto Alegre, em comparação a classificação da Norma ISO 10140, é classificada como de forte intensidade.

Os estudos comparativos realizados em Pequim, por Xiang, Shuai e Junjie (2015), concluíram sobre a necessidade do acréscimo de 5,3 dB, no nível de pressão sonora ponderado em A, aos resultados em chuvas de laboratório quando comparadas as chuvas naturais. Ressalta-se que esse valor de acréscimo só é válido para Pequim ou um local com condições climáticas semelhantes. Contudo, os ensaios realizados por Xiang, Shuai e Junjie (2015) foram submetidos a uma altura de queda de 3 m, diferentemente dos ensaios que seguem as recomendações da norma ISO 10140, com altura de queda de 3,5 m, o que reduziria a diferença para um valor menor que 5,3 dB.

2.3 Controle do ruído das chuvas em coberturas

O projeto do sistema de um sistema de cobertura composto por telhas metálicas deve incorporar materiais para aumento da atenuação acústica, especialmente para o isolamento do ruído das chuvas irradiado pela estrutura e transmitido para ambientes internos de um edifício. Segundo Idris *et al.* (2012) os sistemas de coberturas com telhas metálicas amplificam o ruído e aumentam significativamente as manifestações de incômodo e desconforto dos usuários.

De modo geral, a adição de camadas fonoabsorventes ou de amortecimento da excitação mecânica das gotas de chuva aumentam a capacidade de isolamento acústico em sistemas de coberturas (TOYODA; TAKAHASHI, 2013).

As características gerais de sistemas de coberturas eficientes no isolamento ao ruído de chuvas, de acordo com Jaramilo e Steel (2015), contam com membranas sintéticas multicamadas, sendo que as membranas betuminosas podem fornecer adequado controle ao ruído da chuva, mesmo quando usadas em painéis de isolamento rígidos. Os autores salientam que sistemas de coberturas metálicos que usam materiais de isolamento de fibra mineral tendem a fornecer maiores níveis de controle acústico comparados aos sistemas compostos por painéis de isolamento

rígidos. Complementarmente, Hopkins (2012) indica que as camadas de amortecimento aplicadas a telhados metálicos, aumentam o fator de perda interna e, portanto, o fator de perda total, a fim de reduzir a potência irradiada no sistema de cobertura, sendo que se as condições de montagem mudarem o fator de perda total, isso também mudará a potência sonora irradiada.

A utilização de um material de amortecimento entre elementos metálicos, duas telhas por exemplo, tem como finalidade criar o sistema massa-mola-massa, em que as telhas contribuem como as massas para aumentar a rigidez do sistema, e o núcleo como mola, para amortecer e absorver as ondas sonoras estacionárias entre as duas telhas, reduzindo a transmissão dos ruídos (PATRÍCIO, 2018; EGAN, 2014; BISTAFA, 2012). Nesse sentido, Lopes e Rigau (2008) indicam a utilização de material com elevada densidade e baixa espessura para proporcionar o aumento da massa do sistema sem incrementar a espessura. Além da eficiência no isolamento acústico, os autores destacam ainda que na escolha do material a ser utilizado, deve-se ter o cuidado em não aumentar a complexidade de sua instalação na cobertura.

Massaglia (2017) destaca o uso dos materiais como elementos de preenchimento entre telhas, ou cavidades, nos sistemas de cobertura, normalmente são fibras minerais, fibra de vidro ou fibra de rocha. O autor conclui com a indicação de que esses materiais apresentam variação de densidade entre 10 e 200 kg/m³, sendo os de baixa densidade entre 10 e 50 kg/m³, enquanto sistemas de alto desempenho adotam materiais de densidade acima de 50 kg/m³.

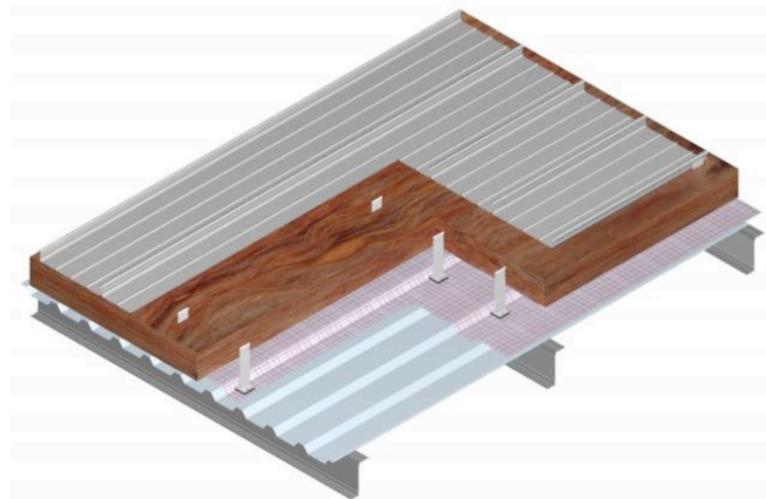
Baruffa (2016) comparou 13 composições de sistemas de cobertura com a finalidade de verificar o isolamento do ruído de chuvas para os descritores acústicos L_{IA} e R_w . Os resultados obtidos em laboratório indicaram que as composições com camadas de maior densidade e maior espessura total do sistema apresentaram maior eficiência para ambos os descritores.

A necessidade de isolamento ao ruído das chuvas pode variar conforme as condições climáticas de cada região. A Nova Zelândia tem problemas com ruído de chuvas em edifícios devido aos elevados índices pluviométricos e ao estilo de construção leve, com uma variação significativa na geração de ruído por diferentes perfis que compõem o sistema de cobertura. Assim como em outras pesquisas, Ballagh (1990) concluiu que camadas com materiais mais pesados e massa

adicional na estrutura do telhado geralmente reduzem o ruído, com alguma contribuição de preenchimentos de material fonoabsorvente.

Um exemplo da aplicação do princípio do fator de perda é o MCRMA Roof System Specification 1 (Figura 33), que, segundo Massaglia (2017) consiste em uma composição com dois painéis (telhas superior e inferior), com o núcleo com espaçador e camada única de lã mineral. O espaçamento típico das terças (purlins ou vigas de apoio), é de 1 a 2,4 m.

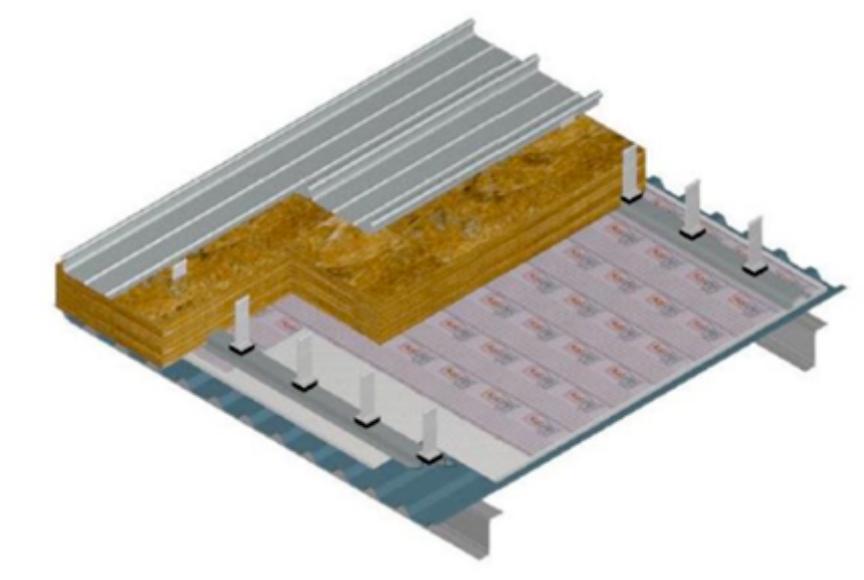
Figura 33 – Sistema de cobertura duplo com espaçador e lã mineral



Fonte: Massaglia (2017)

Para melhorar o desempenho Massaglia adicionou entre a telha inferior e o espaçador um material de alta densidade, onde podem ser compostos com mais de uma manta e até combinados com o uso de uma telha inferior de modelo perfurado, a exemplo da Figura 34. Cabe ressaltar que o estudo realizado por Massaglia desconsiderou o uso de vigas/ terças no apoio dos modelos.

Figura 34 – Sistema de cobertura duplo com espaçador, lã mineral e telha perfurada



Fonte: Massaglia, 2017

Massaglia (2017) conclui que a perda de transmissão através de núcleos fibrosos depende diretamente das conexões estruturais (ligações com parafusos de fixação), além de uma frequência de transmissão maior que a energia absorvida pela lã, ou seja, os elementos que estão interligados entre as chapas metálicas.

No mercado brasileiro, os materiais mais utilizados para a finalidade de preenchimento de núcleo, para sistemas de cobertura montados *in loco*, são:

- Lã de Vidro: composto de fibra cerâmica de vidro
- Lã de Rocha: composto de fibras basálticas e minerais
- Lã de Pet: Composto de fibra polimérica à base de poliéster.

2.4 Variáveis de ensaios em laboratório

Estudos sobre as variáveis a serem consideradas sobre a influência da excitação mecânica causada pela queda de gotas de chuva na erosão do solo, demonstram que os parâmetros mais representativos associados à distribuição de tamanho de gotas de chuva são a energia cinética e a refletividade da superfície (ANTONIO, 2009). Além disso, alguns estudos também desenvolvem questões

sobre detalhes relacionados ao aparo responsável pela produção das gotas em testes experimentais de laboratório (CARVALHO et al., 2012).

Para validação dos resultados em laboratório e a possibilidade de comparação desses resultados entre diferentes laboratórios, a fonte da excitação mecânica nas telhas deve ser padronizada. Apesar da energia cinética da chuva ser o principal indicador da energia das precipitações pluviométricas, os experimentos conduzidos com a padronização das variáveis indiretas demonstraram maior precisão, a partir do controle das características dos componentes dessa precipitação (MINEO et al., 2019; TILG et al., 2020).

Griffin (2016) considera que a base dos modelos de previsão de ruído da chuva é definida a partir da excitação por força pontual de ondas duplicadas em uma placa fina. A placa quando atingida pela força de impacto, irradia o som derivado da velocidade de vibração através da cobertura. A velocidade de vibração da cobertura é tomada como velocidade média do campo de vibração ressonante. Outro ponto considerado importante é a relação entre a forma dos pingos de chuva. Griffin (2016) descreve que mesmo a gota assumindo a forma esférica no início de sua descida ela se deforma à medida que cai, tornando um formato mais plano. Ao entrar em contato com a superfície da cobertura ela desacelera durante o impacto transmitindo a energia à cobertura. Em precipitações naturais, diferentemente da artificial, há maior variedade de tamanhos de gotas, e cada gota terá sua determinada massa que resultará em velocidades de impacto diferentes. Nesse sentido, cabe destacar que estudos sobre a influência do tamanho das gotas iniciam ainda na década de 1970, com a discussão sobre o diâmetro crítico das gotas antes de atingir o rompimento na relação com a instabilidade aerodinâmica (LIST; GILLESPIE, 1976).

Yan et al. (2016) consideram que as pesquisas existentes são todas baseadas em chuvas artificiais em laboratório, enquanto as características do ruído natural da chuva, bem como a relação entre o ruído real da chuva e o laboratório as medições ainda precisam ser exploradas para atender às demandas práticas. Os autores destacam que a intensidade da chuva é o fator decisivo do ruído natural da chuva para chuvas fortes, e o nível de pressão sonora ponderado em A do ruído da chuva causado por chuvas fortes é proporcional ao logaritmo da intensidade da chuva. Além disso, as diferenças nas intensidades das chuvas, alturas de queda e

distribuição do tamanho das gotas de chuva são os fatores que causam desvios significativos entre o ruído real da chuva e as medições de laboratório.

Yu e Hopkins (2018) entendem que para velocidades relativamente altas, incluindo a velocidade terminal, o pico de força medido do impacto inicial das gotas é significativamente maior do que o previsto por modelos de forma de gota idealizados como padrões. Portanto, os autores desenvolveram fórmulas empíricas para a força de impacto dependente do tempo inicial de queda das gotas em velocidades diferentes incluindo a velocidade terminal em uma superfície de vidro seco; em velocidade terminal em vidro seco ou vidro com uma camada de água; e diferentes velocidades abaixo da velocidade terminal em vidro seco ou vidro com uma camada de água. Nesse estudo, constatou-se que para gotas em vidro seco, as fórmulas empíricas são aplicáveis a uma placa de vidro ou uma placa composta em camadas com uma superfície de vidro, embora se apliquem a outras espessuras de placa e sejam aplicáveis a qualquer material com características superficiais de molhabilidade semelhantes. As medições também indicam que após o impacto inicial podem ocorrer forças de alto nível quando as bolhas são arrastadas para a camada de água, e ocasionar maiores níveis sonoros.

Chéné et al. (2010) desenvolveram estudos para proposta de um modelo de previsão do nível de ruído da chuva em elementos de multicamadas, pois modelos existentes consideram com relativa precisão o efeito de somente uma camada de material.

Vermeir e Mees (2000) fizeram comparações com a utilização de fontes de impacto secas, com um martelo de impacto, e úmidas para determinar o isolamento ao ruído de chuva em sistemas de coberturas. Os autores concluíram que o método seco é um bom substituto para o método úmido em estudos paramétricos, dentro de uma determinada categoria de estruturas. No entanto, alertam que o método seco não deve ser utilizado em comparações entre composições de sistemas de coberturas diferentes.

De acordo com Hopkins *et al.* (2020) as medições em laboratório com chuva artificial podem ser usadas para comparar elementos individuais, mas não há uma relação estabelecida com a chuva natural que precise ser avaliada na prática. Isso requer modelos de previsão validados para a entrada de energia sonora proveniente da estrutura proveniente de chuvas artificiais e naturais. Os autores desenvolveram

modelos empíricos para determinar a força dependente do tempo em placas horizontais e inclinadas com chuva artificial e natural.

Chéné *et al.* (2010) afirmam que a partir da década de 1990, a forma de lidar com o ruído das chuvas em sistemas de cobertura teve uma grande evolução a partir de normas que estipulam padronizações da fonte de impacto para ensaios em laboratório, e garantem a reprodutibilidade de procedimentos experimentais.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada é experimental, em que foram testadas diferentes composições de corpos de prova em ensaios não destrutivos em laboratório, seguindo os parâmetros normativos internacionais.

Ao realizar o experimento em laboratório, são utilizadas chuvas artificiais em substituição a natural, sendo então medido o som gerado pelo impacto da precipitação em contato com a amostra em uma câmara de recepção.

A composição das telhas ensaiadas foi definida com base nos princípios que determinam a eficiência acústica do sistema e a disponibilidade dos materiais para os ensaios em laboratório, sendo eles:

- a) Diferentes tipos de telhas inferiores;
- b) Espaçamento entre telhas com diferentes alturas do perfil cartola;
- c) Instalação de material fibroso no preenchimento de sistemas duplos;
- d) Utilização de elemento de amortecimento com fitas auto-adesivas;
- e) Instalação de camada adicional de telha superior.

3.1 Objeto de Estudo

O material das telhas utilizadas nesta pesquisa é em chapa metálica revestida com alumínio e zinco em razão do melhor desempenho à corrosão e maior vida útil. A espessura definida para os painéis superior e inferior foi de 0,50 mm, devido a sua maior disponibilidade no mercado e maior aplicabilidade em obras.

Foram ensaiados os dois tipos de telhas indicados na revisão bibliográfica deste trabalho: ondulada e trapezoidal. Para o tipo trapezoidal, foram utilizadas duas alturas, designadas por TP-40 e TP-30. As composições também contemplam a adição de camadas de lã de vidro, como elemento de atenuador de ruído, em dois espaçamentos: 30 mm e 100 mm de altura.

Acima do material fibroso será instalada uma segunda telha trapezoidal, do tipo zipada, formando o sistema massa-mola-massa. Essas camadas são estudadas a fim de verificar a redução do ruído das chuvas em coberturas metálicas, novas e como solução de melhoria em coberturas existentes.

Além do material fibroso, será instalada uma fita auto-adesiva entre o perfil espaçador, perfil cartola, e a telha inferior.

3.2 Procedimento

O procedimento experimental se deu através do ensaio em laboratório segundo a ISO 10140:2021 *Acoustics – Laboratory measurement of sound insulations of building elements – parte 5 Requirements for test facilities and equipment – anexo H*.

Foi utilizado o tipo de chuva proposto pela ISO 10140-5 como intensidade forte (*Heavy*), com vazão de 40 mm/h e velocidade de queda de 7,0 m/s, conforme, Figura 35.

Figura 35 – Características do tipo de chuva

| Tipo de chuva | Taxa de precipitação mm/h | Diâmetro da gota mm | Velocidade m/s |
|---------------|------------------------------|------------------------|-------------------|
| Intensa | 15 | 2,0 | 4,0 |
| Forte | 40 | 5,0 | 7,0 |

Fonte: ISO 10140-5

Conforme proposto por CPRM (2015), a intensidade de chuva na cidade de Porto Alegre, considerando-se o período de 5 anos, é de 41 mm/h, que se aproxima da intensidade adotada neste trabalho.

A Figura 36, determina as características para o reservatório e dados para a queda d'água. O reservatório utilizado apresenta uma furação com diâmetros de 1 mm feitos com corte a laser em uma placa de acrílico.

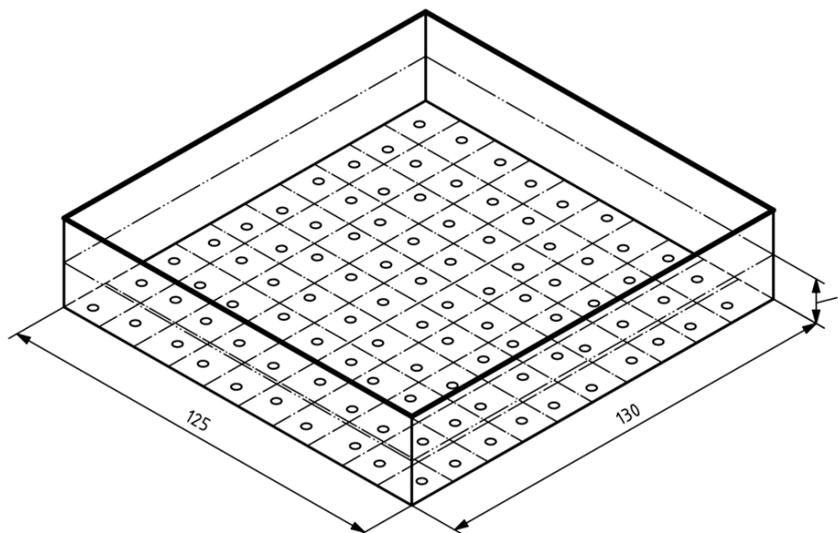
Figura 36 – Parâmetros para o reservatório

| Parâmetros do tanque com base perfurada | | Intensa | Pesada |
|---|------------------------|--|--------------------------|
| 1 | Diâmetro dos Furos | 0,3 a 0,5 mm | 1 mm |
| 2 | Número de furo | Aprox. 25 m ² | Aprox. 60 m ² |
| 3 | Altura de queda | Aprox. 1 m | Aprox. 3,5 m |
| 4 | Volume médio de queda | 2 mm | 5,0 mm |
| 5 | Distribuição tam. gota | Max. Uniforme | Max. Uniforme |
| 6 | Velocidade de impacto | 4 m/s | 7 m/s |
| 7 | Taxa de precipitação | 15 mm/h | 40 mm/ |
| 8 | Abastecimento de água | Permitir uma altura constante de água no tanque. | |

Fonte: ISO 10140:2021 parte 5 anexo H

Com os parâmetros de volume, velocidade, diâmetro do furo para geração da gota e altura do reservatório, foram determinadas as dimensões que o reservatório deve seguir e o tipo de material, sendo adotado o policarbonato com 10 mm de espessura. Na Figura 37 está apresentado o reservatório definido na ISO 10140-5:2014.

Figura 37 – Dimensões do reservatório ISO 10140:2014 parte 5

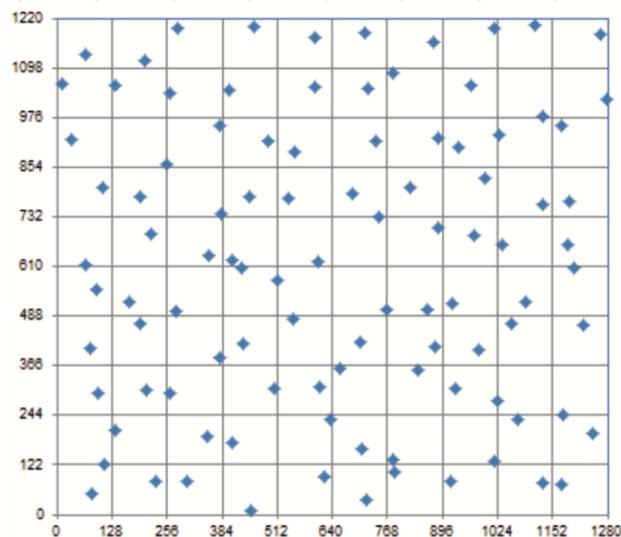


Fonte: ISO 10140:2015 parte 5 anexo H

Apesar das definições das dimensões externas, para a execução da perfuração em relação ao espaçamento e orientação dos furos, a ISO não determina um padrão de divisão e/ou espaçamento, condição de entrada e saída, apenas a

orientação de aproximadamente 60 furos por m^2 com um diâmetro de 1 mm. Dessa forma, optou-se por adotar o padrão de furação e divisão desenvolvidos por Donohue e Pearse (2019) (Figura 38).

Figura 38 – Perfuração do reservatório proposta por Donohue e Pearse



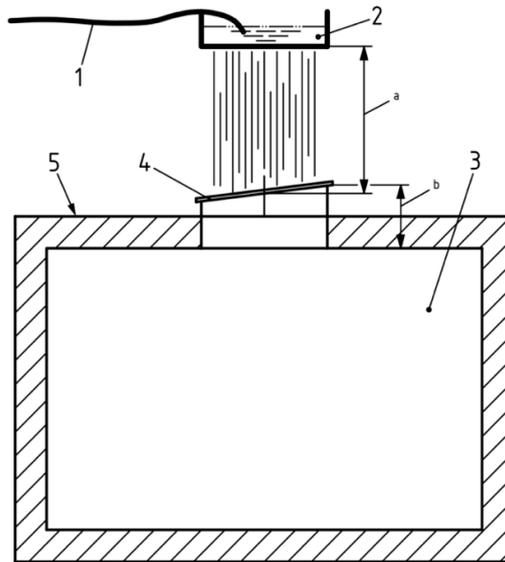
Fonte: Donohue e Pearse (2019)

Algumas considerações adotadas por Donohue e Pearse (2019) foram utilizadas neste trabalho, como o afastamento de 10 mm dos furos para as paredes do reservatório, de modo que a área sobre os orifícios sejam $1,56 m^2$ e o número de orifícios por m^2 seja 64. A calibração foi feita através de coleta sobre a amostra em um tempo determinado, pois a quantidade de água pelo tempo determina a vazão do sistema de chuva.

O esquema geral de montagem na câmara para os ensaios ocorreu conforme ilustrado na Figura 39, sendo:

1. Sistema de abastecimento (retorno);
2. Reservatório (Figura 37);
3. Volume da câmara (maior igual a $50m^3$);
4. Corpo de prova (cobertura);
5. Câmara acústica.

Figura 39 – Esquema de montagem do ensaio



Fonte: ISO 10140:2015 parte 5 anexo H

O procedimento de medição foi realizado conforme o proposto pela ISO 10140-3:2021, com o nível de intensidade sonora determinada conforme o nível de pressão sonora, a área de excitação do telhado, tempo de reverberação e volume, conforme Equação 01:

$$L_I = L_{pr} - 10 \lg(T/T_0) + 10 \lg(V/V_0) - 14 - 10 \lg(S_e/S_0) \quad \text{Eq. 01}$$

Sendo:

L_I o nível intensidade sonora, em dB;

L_{pr} a média nível de pressão sonora na câmara de recepção, em dB;

T o tempo de reverberação na câmara receptora, em s;

T_0 o tempo de reverberação referênciã, em 1s;

V o volume da câmara receptora, em m^3 ;

V_0 o volume referênciã, em $1m^3$;

S_e a área da amostra diretamente excitada pela gota d'água, em m^2 ; e

S_0 a área referênciã, em $1m^2$

Obs.: Valores medidos em função de frequência com banda de 1/3 de oitava - frequência de 100 a 5.000 Hz.

Foram feitos 12 pontos de medição do nível de pressão sonora na câmara de recepção, sendo 4 pontos de microfone e 3 pontos de impacto. Para mudar os pontos de impacto de chuva, o reservatório foi construído sobre uma estrutura metálica com trilhos, que permitem seu deslocamento longitudinal (Ver seção 3.2.3).

O tempo de reverberação medido pelo método de precisão proposto pela ISO 3382-2, sendo realizado 12 pontos de medição com 3 taxas de decaimento em cada ponto. Utilizou-se o indicador T_{20} para este estudo.

Já o nível de potência sonora devido a excitação da partícula de água na superfície da telha foi determinado conforme o nível de intensidade sonora, proposta na Equação 01, e a área total da amostra, conforme Equação 02.

$$L_w = L_i + 10 \lg (S/S_0) \quad \text{Eq. 02}$$

Sendo:

L_w o nível de potência sonora, em dB;

S a área total da amostra, em m^2

Para a avaliação entre os sistemas, foi adotado o nível de intensidade sonora ponderado em A, dado pela Equação 03, o qual resulta em um valor único, permitindo uma comparação entre os tipos de amostras.

$$L_{IA} = 10 \lg \sum_{j=1}^{j_{max}} 10^{0,1(L_{ij}+C_j)} \quad \text{Eq. 03}$$

Sendo:

L_{IA} o nível de intensidade sonora ponderado em A, em dB;

j_{max} o número de bandas de um terço de oitavas considerado ($j_{max} = 18$);

L_{ij} o nível na j -ésima banda de um terço de oitava, em dB;

C_j o valor para a banda de um terço de oitava central nas frequências entre 100 e 5000Hz, apresentados na Tabela K2 da ISO 10140-1:2021 Anexo K.

3.2.1 Construção da Câmara

A construção da câmara foi realizada no itt Performance da Unisinos, com a reforma da antiga câmara de ensaio de ruído de impacto F06 109a.

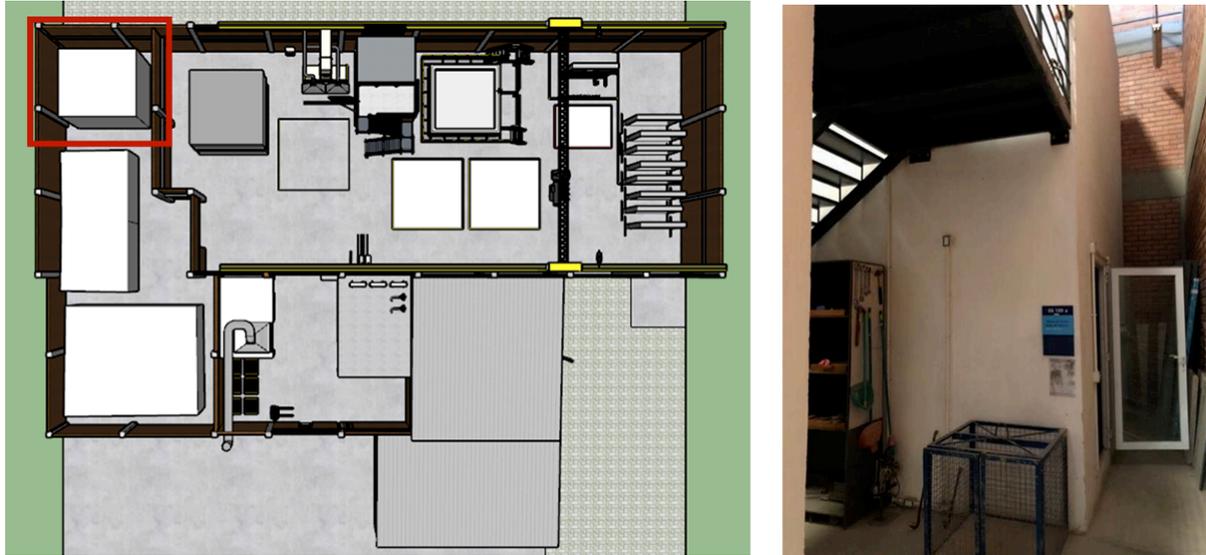


Figura 40 – Antiga câmara de ruído de impacto do itt Performance da Unisinos

Fonte: Elaborado pelo autor

A câmara possui duas salas sobrepostas, sendo construída com tijolo maciço cerâmico em parede dupla e revestimento argamassado de 2cm em ambas as faces, suas dimensões internas são:

1. Câmara superior: 4,40 x 3,73 m e pé direito de 2,99m, com volume de 49,07 m³;
2. Câmara inferior: 4,40 x 3,73 m e pé direito de 3,00m, com volume de 49,23 m³.

As câmaras não possuem um volume igual ou superior aos 50 m³, dessa forma se optou por romper a laje entre os dois pavimentos para suspender a altura da amostra e suprir o volume mínimo de 50 m³, e o tamanho mínimo da amostra de 10 m², conforme indicado na ISO 10140.

Para atender a altura de queda das gotas, foi necessário romper a laje de cobertura do segundo pavimento para garantir os 3,5 m de altura do reservatório perfurado até o centro da amostra.

O processo de ruptura das lajes, iniciou-se com a marcação do ponto onde foi instalado o reservatório de queda d'água, conforme indicado na Figura 41. Com os pontos identificados, foram utilizados serra de corte com disco diamantado (Figura 42), e um martelete (Figura 43), para executar os cortes e sucessivamente a ruptura do concreto.

Figura 41 – Marcação de corte na laje superior



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 42 – Corte laje superior



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 43 – Abertura da laje superior



Fonte: Elaborado pelo autor

Com a remoção do concreto com o martelo, foram cortadas as barras de ferro da laje existente com serra corte utilizando disco para aço. O acabamento da abertura foi feito com argamassa e passada uma camada de selante nas paredes (Figura 44).

Figura 44 – Abertura da laje superior finalizada



Fonte: Elaborado pelo autor

A abertura realizada foi de 1,50 m x 2,00 m, uma vez que o reservatório indicado por norma possui dimensões de 1,25 m x 1,30 m, possibilitando o deslocamento do reservatório sob a amostra para as medições com diferentes

posições da fonte. O corte foi posicionado estrategicamente fora do centro da amostra, respeitando a indicação normativa.

Para a validação da amostra, deve-se respeitar a largura mínima de 2,30 m e a área de superfície maior ou igual a 10 m². Dessa forma, a marcação e ruptura da laje inferior, existente da câmara, para amostra foi determinada em 2,35 m de comprimento de amostra e 4,40 m como largura da amostra e dimensão total interna da câmara. A área resultante da superfície da amostra ficou em 10,34 m².

As Figuras 45 e 46 ilustram o processo de marcação e ruptura da laje, com a repetição dos mesmos processos antes já executados na laje superior da câmara.

Figura 45 – Marcação laje inferior



Fonte: autor

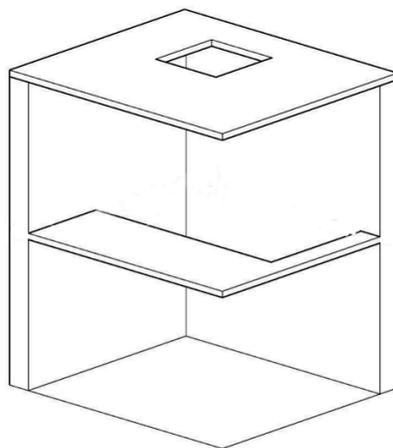
Figura 46 – Abertura da laje inferior



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 47 apresenta a perspectiva da câmara com os cortes das duas aberturas das lajes. Pode-se observar os ambientes distintos em que as amostras foram montadas para a realização das medições.

Figura 47 – Abertura e ambas as lajes



Fonte: Elaborado pelo autor

Com o término do rompimento das lajes, foi iniciado o processo de acabamento das câmaras, limpeza das caliças, execução do reboco das aberturas anteriores e pontos rompidos, construção da mureta de contenção frontal da amostra (altura de elevação da amostra para complemento do volume), e por fim,

pintura dos ambientes, separando em “preto” a câmara de recepção e em “branco” a câmara de montagem de amostra.

Figura 48 – Reboco dos pontos rompidos e aberturas existentes



Figura 49 – Pintura das câmaras



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.2 Montagem da estrutura metálica

A estrutura de apoio foi montada com perfis de terças do tipo “Z” com dimensões de 270 mm de altura, 60mm de base do perfil, 20 mm de enrijecedor e espessura de 1,95 mm. O material dos perfis de terça e elemento de travamento é em aço com revestimento de zinco.

Os cuidados tomados para montagem dos elementos metálicos (estruturais e amostras), juntos aos limites da câmara, foi através da introdução de barreiras antivibráticas em EVA de 10mm. Este cuidado se deu em todo perímetro em que a amostra tem contato com as paredes da câmara e em pontos de fixação de suportes de terças (elementos responsáveis por sustentar o perfil de apoio).

Os primeiros passos para montagem dos elementos foram a marcação dos níveis, uma vez que se deve seguir a inclinação de 5° para amostras de cobertura. A diferença entre os níveis dos suportes 1 e 2 e seus afastamentos dos limites da câmara. Para garantir o nível e o posicionamento adequado, foi utilizado um nível laser em todo o processo de montagem, conforme as Figuras 50 e 51.

Figura 50 - Nivelamento para o suporte 1



Figura 51 - Instalação do suporte



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 56 mostra o detalhe da instalação do suporte 2, junto ao alinhamento do nível com laser. A fixação realizada, foi através do elemento mecânico parabolt, sendo um tipo de chumbagem comum em montagens de estruturas metálicas.

O isolamento do suporte de terça em EVA 10 mm, se deu na base de contato com a câmara acústica e entre o parafuso de fixação (parabolt) e o suporte. Rompendo, assim, o vínculo direto do elemento com a câmara e evitando transmissão marginal de vibração. Esse detalhe pode ser observado na Figura 57.

Figura 52 – Instalação do suporte 2

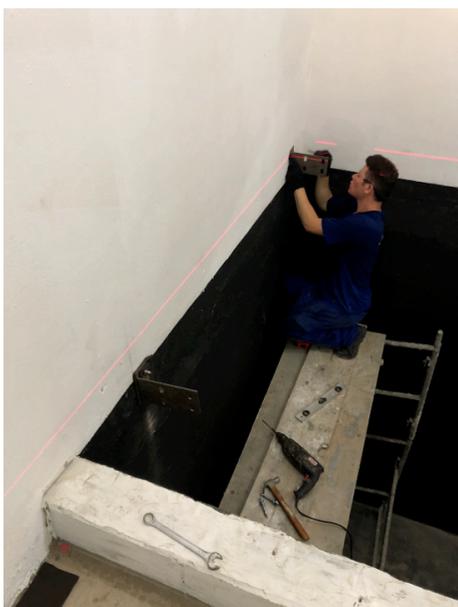


Figura 53 – Detalhe do isolamento



Fonte: Elaborado pelo autor

Com os níveis de instalação das amostras marcados, e os suportes já instalados, foi introduzido ao perímetro da câmara o EVA de contenção de topo oposto a calha e lateral das amostras. Sua fixação se deu através de parafusos e buchas com arruela média para aumentar a superfície de contato no EVA (Figura 54).

Na Figura 55, pode-se observar o EVA instalado no perímetro de contato da amostra com a câmara.

Figura 54 – Fixação do EVA na alvenaria



Figura 55 – Instalação do EVA no perímetro do vão



Fonte: Elaborado pelo autor

Com o perímetro de EVA concluído e os suportes das terças isolados, foram montadas as duas terças para sustentação das amostras e seu travamento intermediário (corrente rígida), Figura 56.

Figura 56 – Estrutura metálica no vão da câmara

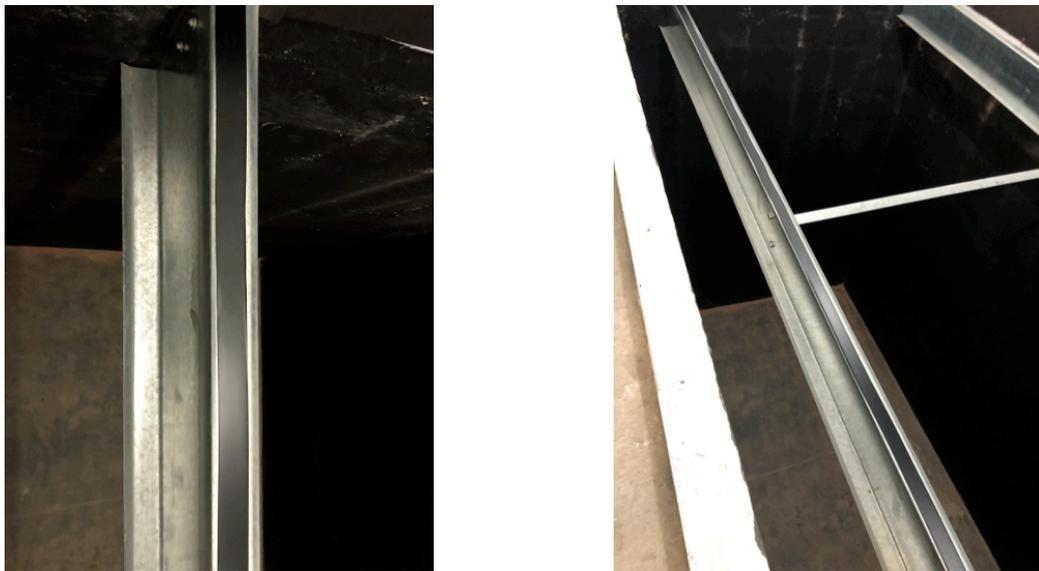


Fonte: Elaborado pelo autor

As terças foram montadas com o espaçamento de 1,75 m, considerada uma medida comum em montagens de coberturas metálicas, deixando um recuo de 0,30 m em ambos os lados.

A última etapa de montagem, foi a introdução da fita de isolamento, que tem como finalidade evitar o contato entre os diferentes tipos de metais (aço estrutural e de vedação). Esse isolamento é fundamental na instalação de telhas sob estruturas metálica para conter a corrosão formada por pilha galvânica (Figura 57).

Figura 57 – Fita de isolamento



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.3 Montagem do sistema de chuva artificial

Para o reservatório do sistema de chuva especificado na ISO 10140:2021, foi necessário o desenvolvimento de uma estrutura metálica em todo seu perímetro e um reforço no trecho de maior comprimento (1,30 m), com intuito de reduzir a flecha do material e um maior acúmulo de água no ponto central do reservatório.

A estrutura de sustentação foi acoplada a quatro barras roscadas com a finalidade de ajustar altura do reservatório em relação a amostra. Por fim, na extremidade inferior da barra foram introduzidos roletes para seu deslocamento, permitindo que o reservatório pudesse ser movimentado lateralmente. O sistema completo está ilustrado na Figura 58.

Figura 58 – Estrutura de sustentação



Fonte: Elaborado pelo autor

A estrutura de sustentação se divide em dois sistemas:

- Base: com função de estrutural e trilhos de deslocamento do reservatório, fixada na laje da câmara acústica;
- Sustentação do reservatório: função de estruturar o reservatório em acrílico e regular o nível do reservatório.

Após a instalação da base junto a laje da câmara, foi posicionada a estrutura de sustentação e em seu interior o reservatório perfurado, cujo qual é responsável pela distribuição e gotejamento da água sobre as amostras (Figura 59).

Figura 59 – Estrutura de sustentação



Fonte: Elaborado pelo autor

Com a instalação do reservatório de chuva (reservatório 1), acrescentou-se um segundo reservatório para alimentar o sistema do reservatório de chuva. A ponte entre os dois reservatórios é realizada com um sistema de mangueira plástica, com reduzida geração do ruído de queda d'água entre os reservatórios (Figura 60).

Figura 60 – Estrutura de sustentação



Fonte: Elaborado pelo autor

Para se ter um controle da vazão da água, foi adotado um sistema para medir o fluxo de entrada no reservatório perfurado. Este processo se deu através de um rotâmetro com escala de 10 a 100 l/h.

O rotâmetro foi acoplado na mangueira plástica que conduzia a água ao reservatório perfurado. Uma vez liberada a água pelo registro de esfera, ajusta-se a vazão por meio da torneira (ajuste fino) aos 65 litros/h na escala do rotâmetro (Figura 61).

Com o fluxo da água de entrada controlado, é necessário controlar a pressão de saída d'água do reservatório 2, para se ter uma estabilidade no fluxo de água registrado pelo rotâmetro. A solução adotada foi o acréscimo de um terceiro reservatório, que através de uma boia mecânica mantém o nível d'água do reservatório 2 (Figura 62).

Figura 61 – Fluxo do rotâmetro



Figura 62 – Direção do fluxo de água na instalação superior



Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, a coleta da água ao longo de cada ensaio é feita com um quarto reservatório, posicionado ao nível do solo. Os reservatórios utilizados no sistema foram:

- Reservatório 1: perfurado e responsável por gerar a chuva artificial;
- Reservatório 2: alimenta o reservatório 1 com volume e pressão constante;

- Reservatório 3: garante o volume de água constante no reservatório 2 / possui uma autonomia de 2 horas de ensaio;
- Reservatório 4: armazena a água do ensaio e através de uma bomba elétrica de acionamento manual, conduz a água ao reservatório 3 em períodos sem ensaio (para evitar interferência nas medições com ruído da bomba elétrica).

A coleta da água da precipitação é realizada através de uma calha metálica (Figura 63), instalada na face frontal da amostra (fora da câmara inferior de medição). A água é conduzida por um tubo de PVC de diâmetro de 100 mm por fora da câmara até o reservatório 4 (Figura 64) e depois bombeada para o reservatório 3 através da bomba elétrica, posicionada ao lado do reservatório.

Figura 63 – Interface da calha metálica com a alvenaria



Figura 64 – Direção do fluxo de água na instalação inferior



Fonte: Elaborado pelo autor

Com o sistema em operação, foram repetidos os testes de vazão com os mesmos recipientes de coleta e vazão. Todos os testes em posições diferentes resultaram na vazão de 40 mm\h, em atendimento a especificação da ISO 10140-5 :2021. A lâmina d'água resultante com o controle de entrada foi de aproximadamente 5 mm.

3.2.4 Montagem das amostras / Ensaios

Com a estrutura metálica montada e o sistema de chuva testado, prosseguiu-se com a etapa de instalação das amostras e realização dos ensaios.

A primeira etapa dos ensaios consiste em testar as telhas simples de forma, sem elemento acústico de fita ou manta.

As amostras iniciais foram:

- 01 - Zipada (espessura 0,5mm, acabamento natural);
- 02 - Ondulada (espessura 0,5mm, acabamento natural);
- 03 - Trapezoidal TP-40 (espessura 0,5mm, acabamento branco);
- 04 - Trapezoidal TP-33 (espessura 0,5mm, acabamento branco).

Tabela 1 – Amostras de telhas simples

| Identificação | Tipo de telha |
|---------------|-------------------|
| 1 | Zipada |
| 2 | Ondulada |
| 3 | Trapezoidal TP-40 |
| 4 | Trapezoidal TP-30 |

O procedimento de montagem da Telha 1, do tipo zipada, consistiu em fixar a telha através do clip de dilatação (Figura 65), pressionando a telha contra o EVA das laterais da câmara. Na parte frontal da amostra, lado da calha, se fez necessária a introdução de camada de EVA para preencher o espaço entre a telha e a mureta de contenção, conforme inclinação da telha o EVA foi dobrado para seguir a inclinação da telha e garantir uma barreira de contenção vertical e horizontal (Figura 69). Os pontos trapezoidais das amostras foram preenchidos com espuma expansiva (Figura 70) contendo, assim, a transmissão do ruído pelos vazios da amostra.

O processo de isolamento das amostras se repetiu para todas as composições, usando o EVA de perímetro como primeiro elemento e adicionando uma camada de PU em todo o contorno da amostra em contato com as laterais e fundo da câmara.

As Figuras 66 a 68, representam os processos de montagem e isolamento da Telha 1 Zipada.

Figura 65 – Instalação do EVA na face da calha

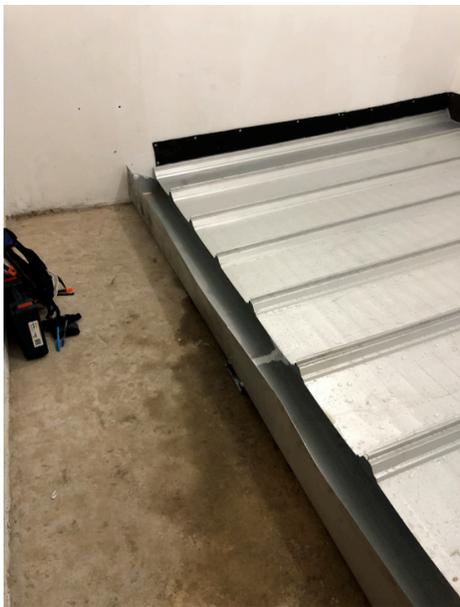


Figura 66 – Montagem da amostra zipada simples



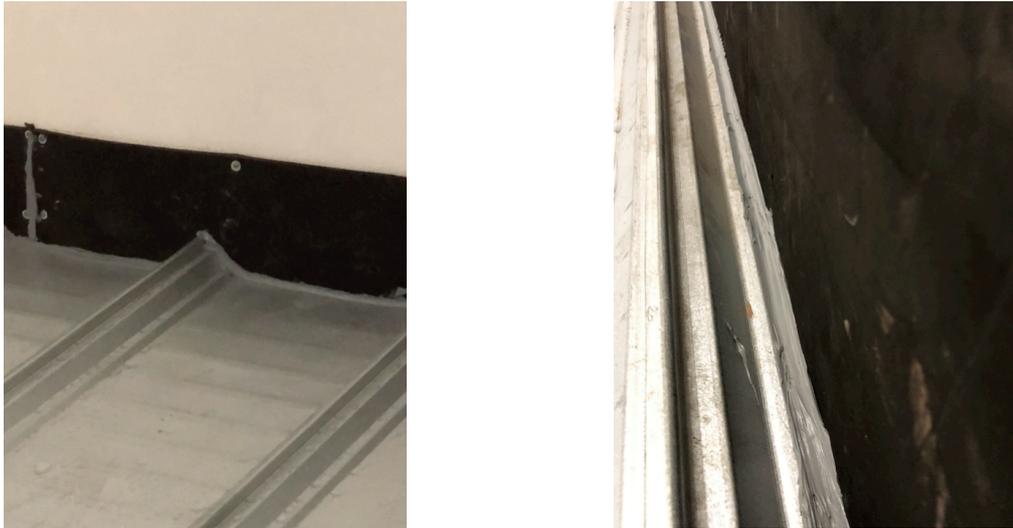
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 67 – Término da montagem da amostra 01 - Zipada



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 68 – Isolamento em PU, amostra 01 - Zipada



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 69 – EVA dobrado



Figura 70 – Aplicação espuma expansiva



Fonte: Elaborado pelo autor

Finalizado o processo de montagem e isolamento da amostra 01, são verificadas as condições do reservatório 01, o qual deve permanecer nivelado (para manter a distribuição homogênea da lâmina d'água) e a distância do eixo central em relação a superfície da amostra (3,5 m especificado na Tabela H.2, do anexo H da ISO 10140-5:2021).

O processo de nivelamento é realizado através das 4 barras roscadas nas extremidades da estrutura de sustentação do reservatório 1. O nível é verificado

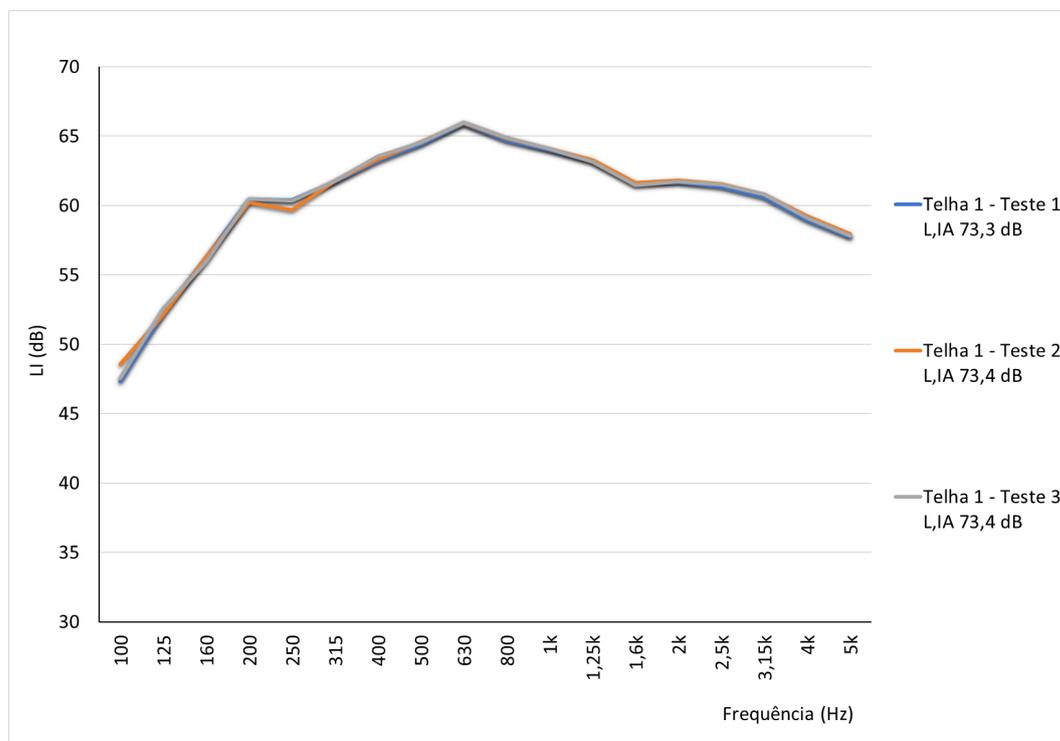
transversal e longitudinalmente com nível bolha, e na altura, com trena laser. A verificação da altura foi feita sempre que alterado o tipo de amostra.

Com todos os parâmetros acima verificados, pode-se iniciar as verificações do tempo de reverberação da câmara receptora e os ruídos aéreos através da fonte nas câmaras emissora e receptora.

O ensaio da primeira amostra foi repetido três vezes, com intuito de verificar a repetitividade dos dados de medição.

Os resultados da análise de repetitividade apresentaram variação de 0,1 dB em relação ao nível de intensidade sonora ponderado em A. Quando verificado os valores por bandas de terço de oitava, a similaridade nos resultados fica evidente. As maiores diferenças foram registradas nas bandas de 100Hz e 250Hz, com um desvio padrão de 0,7dB e 0,4dB, respectivamente (Figura 71). A validação da proximidade destes resultados, confirmaram que os procedimentos de preparação da chuva artificial e o processo de medição foram coerentes.

Figura 71 – Resultados com a telha zipada simples



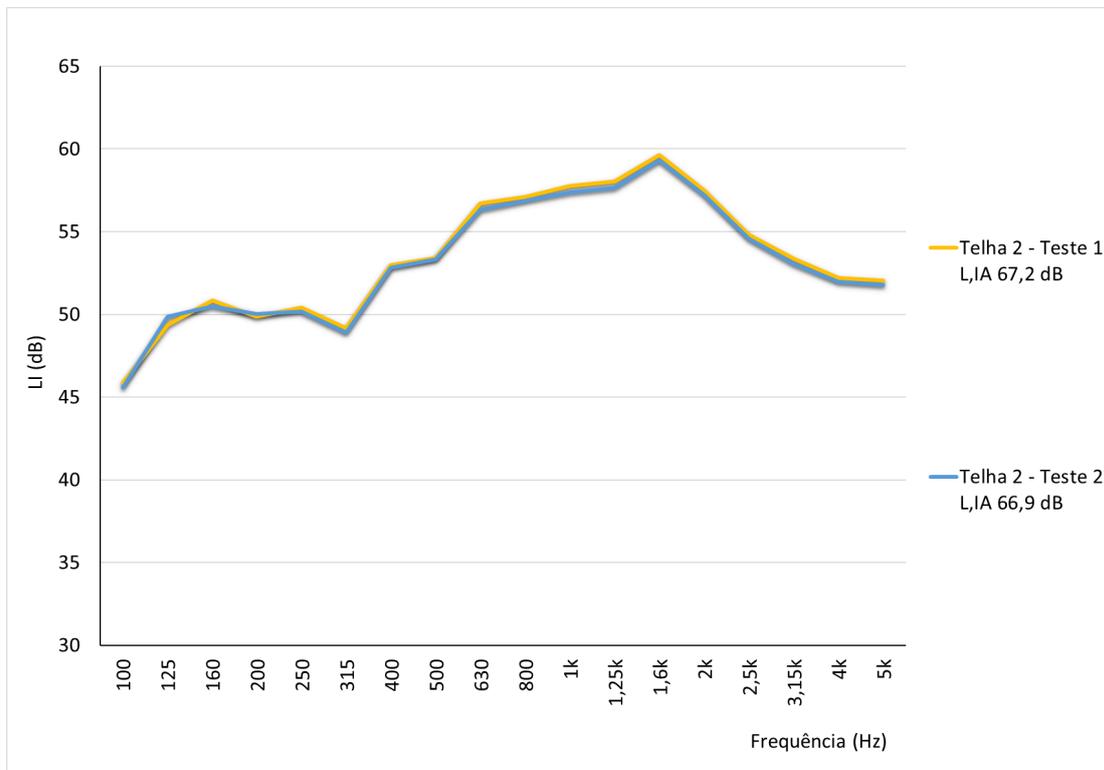
Fonte: Elaborado pelo autor

Após aprovados os dados da amostra 01, todo o processo de montagem de amostra, verificação da vedação, altura e nível do reservatório 01, teste da vazão em recipiente padrão e realização dos ensaios se repetiram para as amostras dos tipos Ondulada, Trapezoidal TP-40 e Trapezoidal TP-33.

O ensaio da amostra 2 foi realizado duas vezes para verificação da interferência da queda da água da amostra na calha metálica que conduz a água ao reservatório 4. Foram ensaiados com e sem a barreira em EVA, depositado sobre o fundo da calha.

Com os ensaios realizados, a Figura 72 apresenta a sobreposição das curvas e os resultados de 67,2 dB com o EVA (Teste 1) e 66,9 dB sem o EVA (Teste 2), com uma diferença de 0,3 dB. Como essa diferença ficou muito próxima da variação apresentada pela validação de repetitividade, e ainda abaixo da incerteza de medição, entendeu-se que o ruído gerado pela calha não interfere no resultado do ensaio. O restante dos resultados, foram ensaiados com o EVA ao fundo da calha.

Figura 72 – Resultados com a telha ondulada simples



Fonte: ensaio itt Performance 2021

Com a fase das amostras simples finalizada, as camadas das amostras compostas foram instaladas sobre a amostra que apresentou maior nível de intensidade sonora ponderado em A, cuja montagem é feita com o acréscimo de um perfil espaçador de 30 mm e 100 mm, com e sem núcleo fibroso em lã de vidro e com e sem fita de amortecimento no perfil espaçador.

Cada bateria de ensaio, com cada um dos espaçadores, contou com quatro montagens distintas (Tabela 2):

- Telha forro + espaçador + fita de amortecimento + núcleo fibroso + telha de cobertura;
- Telha forro + espaçador + fita de amortecimento + telha de cobertura;
- Telha forro + espaçador + núcleo fibroso + telha de cobertura;
- Telha forro + espaçador + telha de cobertura;

A telha definida como forro, foi a Telha 4 – Trapezoidal TP-33, devido ao seu baixo desempenho nos ensaios da fase inicial de 74,2dB (Figura 73). Os ensaios a seguir estarão de acordo com o pior caso neste trabalho ensaiados.

Tabela 2 – Amostras duplas com telhas trapezoidal TP-30 e superior zipada

| Identificação | Altura cartola (mm) | Amortecimento no perfil | Núcleo fibroso |
|----------------------|----------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| 5 | 30 | Sim | Sim |
| 6 | 30 | Sim | Não |
| 7 | 30 | Não | Sim |
| 8 | 30 | Não | Não |
| 9 | 100 | Sim | Sim |
| 10 | 100 | Sim | Não |
| 11 | 100 | Não | Sim |
| 12 | 100 | Não | Não |

Figura 73 – Esquema de montagem da amostra com telha inferior TP-33



Fonte: Elaborado pelo autor

O primeiro passo para a montagem da amostra composta é a instalação da fita de amortecimento nos perfis cartola (Figura 74), após é fixado o perfil cartola (Figura 75) no mesmo alinhamento das terças que fixam a telha forro. Esse procedimento se justifica ponto de fixação estrutural e manter o espaçamento entre apoios para a telha superior.

Figura 74 – Fita de amortecimento / perfil cartola



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 75 – Instalação dos perfis cartola



Fonte: Elaborado pelo autor

O terceiro passo, consiste na instalação do núcleo fibroso, que neste trabalho é a lã de vidro de espessura de 50 mm (Figura 76). Foi adotado o núcleo fibroso de 50 mm de espessura por ser o material mais rotineiramente encontrado, cabe salientar que esse material fica comprimido quando feita a montagem com o espaçador 30 mm e com um espaço de ar quando montado com espaçador 10 mm.

Figura 76 – Lã de vidro 50mm



Fonte: Elaborado pelo autor

Devido à altura do perfil cartola (30 mm) ser inferior a espessura da lã de vidro, ela é instalada de forma contínua, com transpasse por cima do perfil metálico, esse processo acaba dificultando as ações do operador no processo de fixação do clip da telha superior, porém mantém uma cobertura de manta homogênea sobre a telha de forro (Figura 77 a 80).

Figura 77 – Instalação da lã de vidro
50 mm



Figura 78 – Lã de vidro sobre os perfis



Figura 79 – Instalação da telha zipada -
Cobertura



Figura 80 – Amostra 05 – vista
do reservatório 01



O processo de montagem e ensaio se repetiu para as composições com o mesmo perfil cartola, sem manta e permanecendo a fita de amortecimento (Figura 81).

Figura 81 – Amostra 06 instalada na câmara



Fonte: Elaborado pelo autor

Os dois ensaios anteriores, com e sem manta se repetiram com o espaçador de 30 mm, porém sem a fita de amortecimento, nas amostras 07 e 08.

A segunda bateria de ensaios com telhas compostas, substitui o perfil espaçador de 30 mm de altura por um perfil de 100 mm de altura. Os passos de montagem se repetiram, iniciando com a instalação da fita de amortecimento, instalação do cartola, instalação da manta e por fim instalação da telha de cobertura zipada. Contudo, nessas amostras o perfil cartola é maior que a espessura da lã de vidro, isso gera uma quebra de continuidade da lã, gerando intervalos de acordo com a posição dos perfis, conforme Figura 82 e 83.

Figura 82 – Instalação dos cartolas na amostra 09



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 83 – Instalação da lâã de vidro na amostra 09



Fonte: Elaborado pelo autor

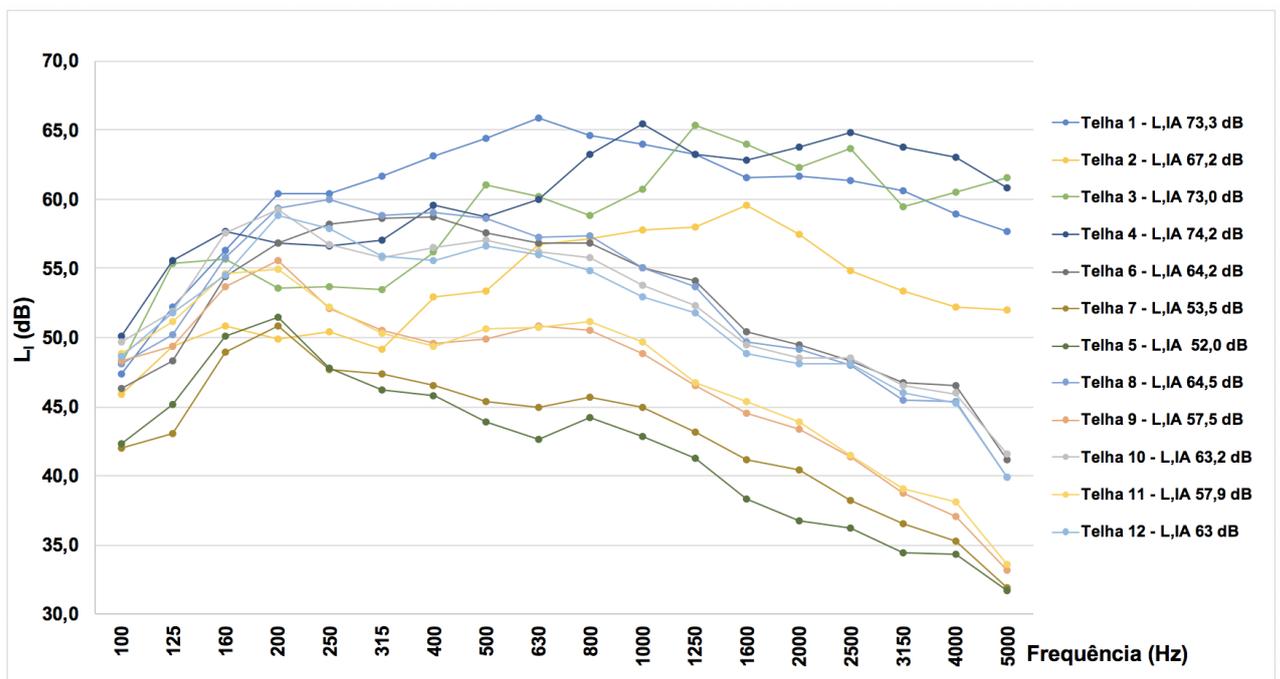
Amostra 10 repetiu os parâmetros da amostra 09, porém sem a lâã de vidro. Amostras 11 e 12, seguiram com espaçador de 100mm, com e sem lâã de vidro e em ambas sem fita de amortecimento.

4 RESULTADOS

Para a análise dos resultados deste trabalho, foram calculados os valores de L_1 (nível de intensidade sonora de impacto de chuva em 1/3 de oitava) e o L_w (nível de potência sonora de impacto de chuva em 1/3 de oitava), com os valores de entrada para os ensaios, já apresentados na seção 3.2.4, e as medições do tempo de reverberação, ruído de fundo, e ruído de impacto, conforme composições descritas na seção 3.2.

A Figura 84 representa os resultados dos 12 ensaios realizados ao longo deste trabalho. A variação da intensidade sonora ponderada foi do resultado com maior intensidade, sendo 74,2 dB ao de menor intensidade, sendo 52 dB, nas telhas 4 e 5 respectivamente. Esta variação no sistema construtivo resulta numa diferença de 22,2 dB. Além disso, é possível verificar diferenças marcantes na composição espectral de medição, a partir do L_1 com diferentes conformações nas linhas que expressam os resultados.

Figura 84 – Resultados de todas as composições

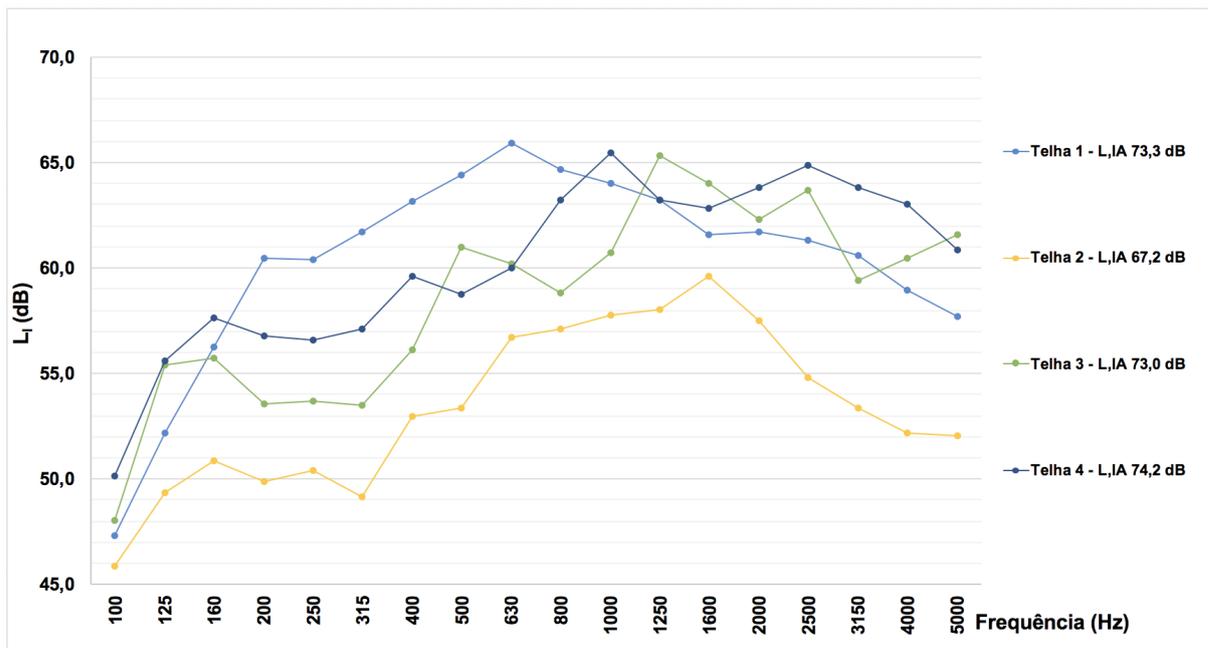


Fonte: Elaborado pelo autor

4.1 Resultados com telhas simples

Na Figura 85 são apresentados os resultados das amostras testadas na fase 1, quando foram ensaiadas as 4 amostras simples, sem adição de fita, núcleo fibroso e/ou telha composta.

Figura 85 – Resultados das amostras simples



Fonte: Elaborado pelo autor

Pode-se observar comportamento semelhante em termos de frequência entre os resultados das Telhas 3 e 4, sendo ambas com perfis trapezoidais com o mesmo sistema de fixação, porém os espaços entre os trapézios, considerados como enrijecedores da placa da telha, são diferentes. O resultado apontou uma leve melhora de desempenho no perfil trapezoidal TP-40 (Telha 3) com 1,2 dB abaixo em relação a Telha 4.

O ensaio da Telha 1, telha zipada com enrijecedor trapezoidal, apresentou um comportamento da curva distinto das Telhas antes comentadas, com maiores valores na banda de 63 Hz, que pode ser atribuído ao sistema de fixação diferente entre as telhas e o montante metálico. A amostra fica suspensa em relação a estrutura de fixação e sua ponte a ela é dada pelo clip com dilatador, esse sistema

de fixação permite a telha trabalhar independente do sistema estrutural, possibilitando que sua superfície plana fique livre em relação a estrutura de fixação.

A amostra possui a maior área plana dos ensaios de primeira fase, contribuindo para o impacto a 90° da gota com a amostra. A contribuição do clip como elemento-mola do sistema não foi testada neste trabalho, mas pelas características da amostra em planicidade e baixa rigidez no sistema de fixação, pode-se concluir que o clip trabalhou como amortecimento da amostra, assim contribuindo no resultado do ensaio.

Quando verificado o resultado por bandas de terço de oitava, percebe-se que a Telha 1 (telha zipada) apresentou uma intensidade sonora maior em baixas frequências quando comparada com os demais sistemas. Isto pode ser devido a uma baixa rigidez que a telha apresenta por ter uma parte plana da telha com maior área que as outras.

Entretanto, nas medias e altas frequências a Telha 1 apresentou um valor menor que as Telhas 3 e 4. Como a ponderação em A suprime as baixas frequências, o valor de L_{IA} da Telha 1 ficou abaixo das demais.

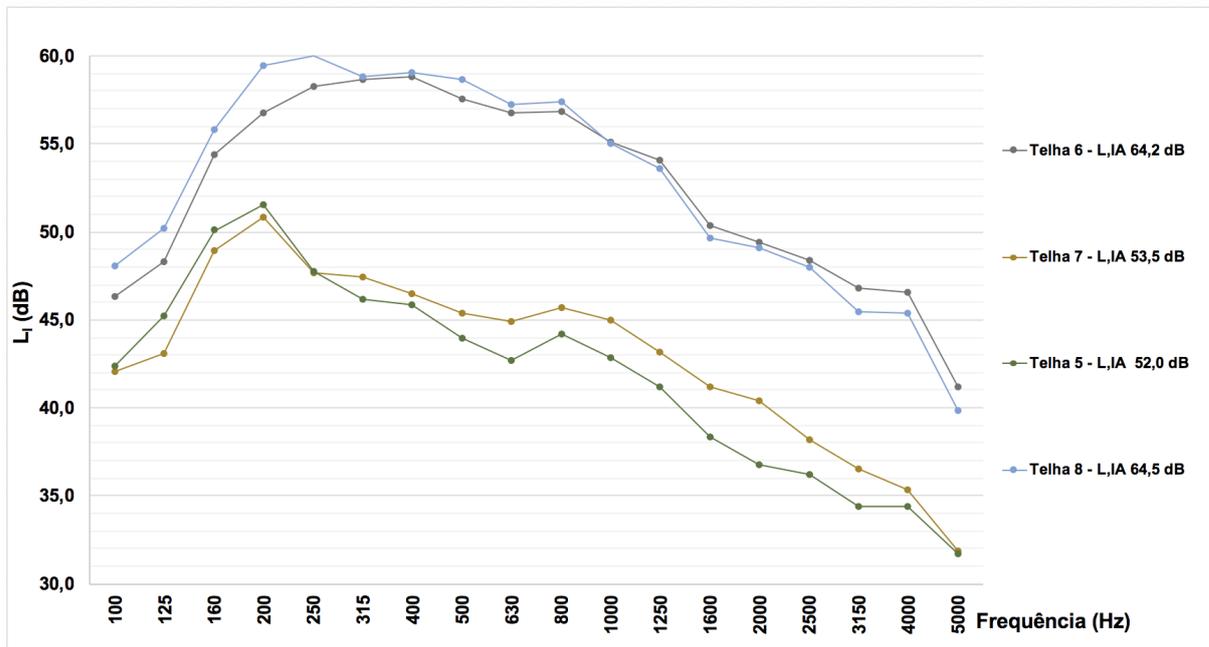
4.2 Resultados com telhas duplas

A Figura 86 representa a sobreposição dos ensaios com amostras compostas de duas telhas (inferior TP-33 e superior zipada), com um mesmo espaçador de 30mm, com e sem material fibroso entre telhas.

As composições 5 e 7, possuem núcleo fibroso em lã de vidro, sendo a composição 5 com fita de amortecimento e a composição 7 sem fita de amortecimento. Pode-se observar que o comportamento das amostras é similar em baixas frequências, enquanto nas altas frequências (acima de 500Hz), se separam e distanciam, tendo a Telha 5 com um desempenho melhor.

Já os resultados das composições 6 e 8, que não contam com núcleo preenchido com material fibroso, diferenciam-se entre composição 6 com fita de amortecimento para a composição 8 sem fita de amortecimento. Pode-se observar comportamentos opostos nos resultados das duas primeiras amostras, com maiores diferenças em baixas frequências.

Figura 86 – Resultados das amostras duplas com espaçador de 30 mm

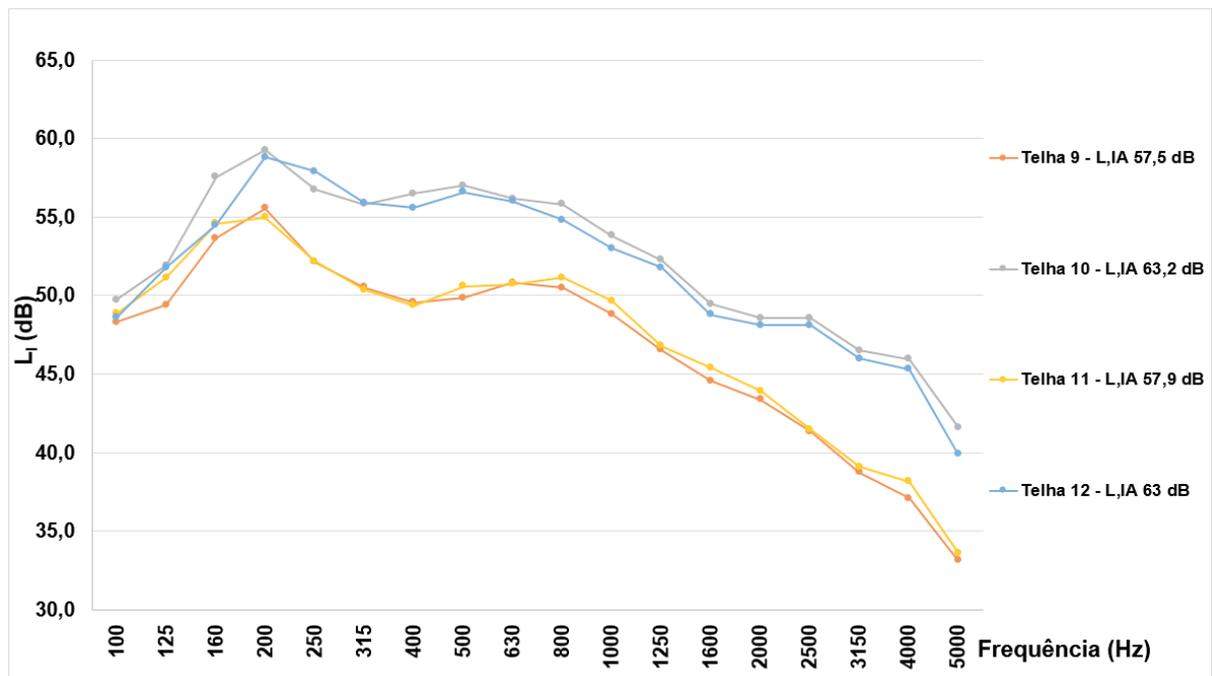


Fonte: Elaborado pelo autor

Os ensaios das composições 5 e 6, apresentam de forma direta a eficiência do núcleo fibroso em telhas compostas, em ambas foi instalada a fita de amortecimento entre a telha inferior e o perfil espaçador de 30 mm. A adição de um material fibroso entre as telhas impôs uma redução na transmissão do som da chuva em 12,2 dB. Já os ensaios das composições 7 e 8, apresentam uma redução na transmissão do som da chuva em 11 dB. Este resultado expõe a influência do material fibroso.

A Figura 87 apresenta os resultados das composições de telha dupla com espaçador de 100 mm e a fita de amortecimento (composições 9 e 10) e sem a fita de amortecimento (composição 12), sendo que a diferença é a presença ou não de material fibroso no miolo.

Figura 87 – Resultados das amostras duplas com espaçador de 100 mm



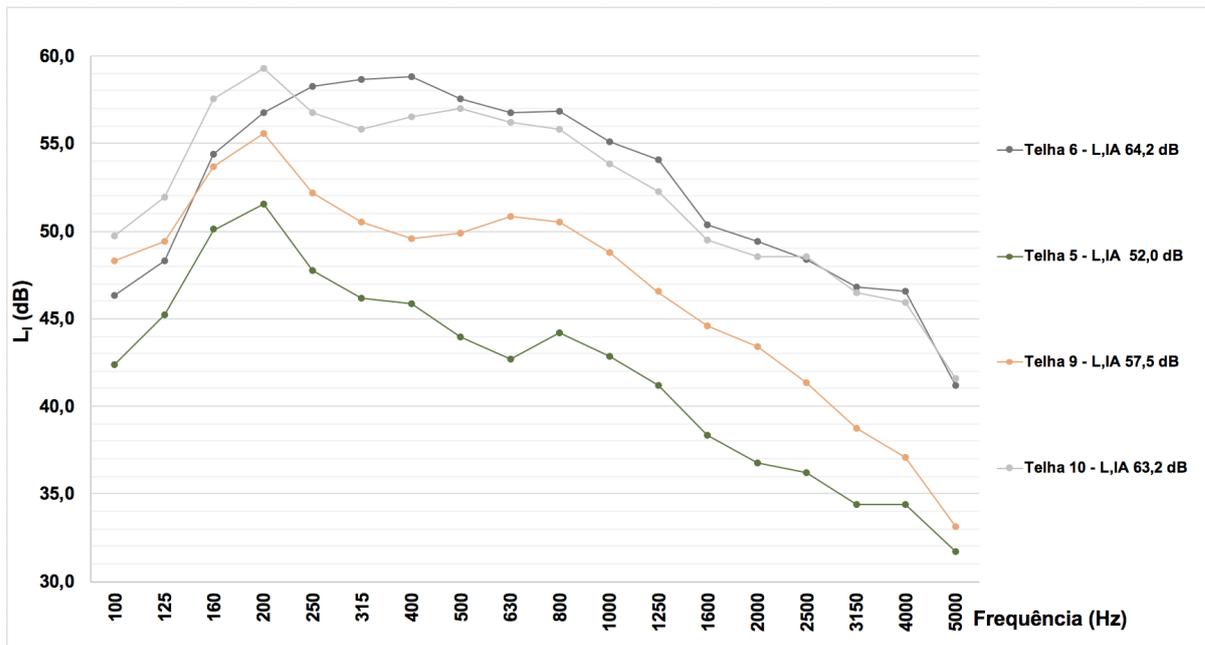
Fonte: Elaborado pelo autor

Comparando o perfil gráfico das composições 9 a 12, percebe-se uma similaridade de forma no perfil gráfico por bandas de terço de oitava, tendo uma translação no eixo da intensidade. As composições 10 e 12, que não apresentam material fibroso no seu interior, tiveram valores similares em todas as bandas de frequências analisadas.

Ao comparar os resultados dos sistemas duplos com espaçadores diferentes, pode-se observar uma similaridade nos resultados das composições 6 e 10, ambas sem o núcleo fibroso, e um afastamento nas curvas das composições 5 e 9, ambas com núcleo fibroso.

Para simular melhor uma aplicação in loco, em todos os ensaios foram mantidos a face paralela a calha metálica, face frontal da amostra em relação ao operador, sem uma vedação entre as telhas (forro e cobertura). No entanto, nos ensaios com espaçador de 30 mm a própria lã de vidro de espessura de 50 mm executa uma barreira de entrada entre as amostras, contudo ao alterar o espaçador para 100 mm, ficou um vazio entre as amostras de 50 mm nas altura dos trapézios, possibilitando assim a interferência dos ruídos aéreos ao longo dos ensaios.

Figura 88 – Amostras duplas com espaçador de 30 e 100 mm com fita adesiva



Fonte: Elaborado pelo autor

Comparando somente os valores ponderados, apresentados na Figura 88, os resultados com menor intensidade sonora foram com o espaçador de 30 mm e manta fibrosa no seu interior com a fita de amortecimento na composição 5, e sem a fita de amortecimento na composição 7.

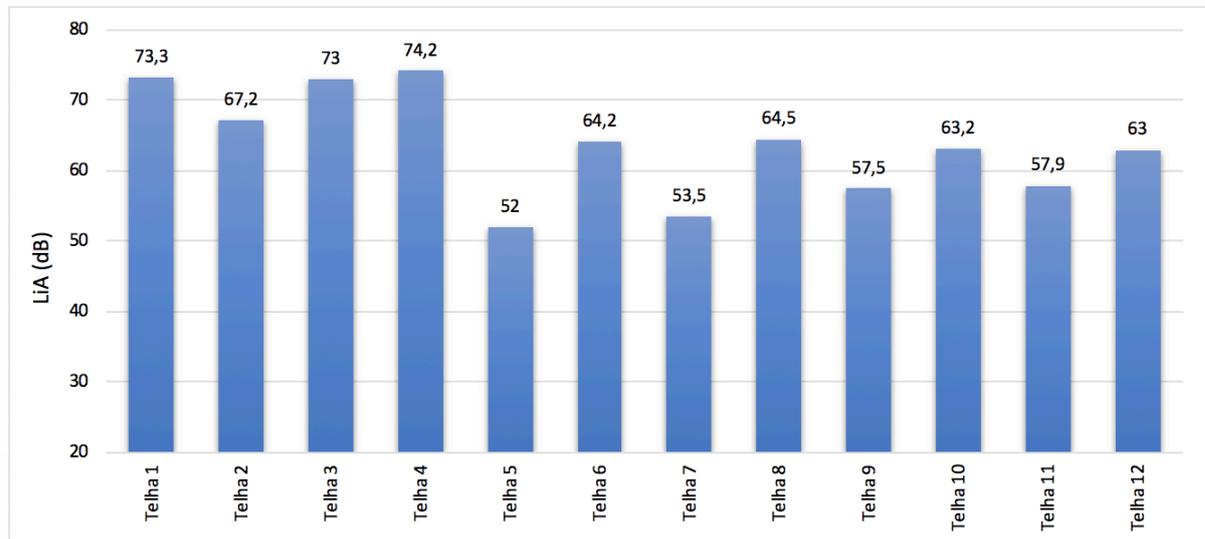
Já os resultados com espaçamento de 100 mm apresentaram valores maiores que os de 30 mm. Isto pode ser devido a borda da telha não ter sido fechada, permitindo parte de o som ingressar na forma de fresta.

4.3 Resultados ponderados

A comparação entre os valores ponderados em A, pode ser analisada no gráfico da Figura 89, sendo marcante a influência do preenchimento entre as telhas com material fibroso na redução do ruído das chuvas, especificamente para as composições 5 e 7. Os resultados encontrados neste trabalho para as composições com telhas simples estão coerentes com outros estudos em laboratório que indicam valores de L_{iA} acima de 70 dB para coberturas com chapa metálica (CHÉNÉ et al., 2010).

Deve-se salientar que os sistemas de coberturas simples ensaios neste trabalho não fornecem isolamento acústico adequado ao ruído das chuvas.

Figura 89 – Comparativo entre valores ponderados em A



Fonte: Elaborado pelo autor

CONCLUSÕES

A definição de soluções para o adequado isolamento de sistemas de coberturas a ruído das chuvas pode apresentar alguma complexidade quando são comparadas as situações de chuvas reais e chuvas artificiais produzidas em laboratório, especificamente para ensaios experimentais. A produção da chuva artificial padronizada envolve o controle de muitas variáveis, que se faz necessário para a validação de resultados de diferentes laboratórios.

Este trabalho abordou uma situação específica de sistemas utilizados em *retrofit* de coberturas, com a instalação de camadas sobrepostas à telha existente. Esse tipo de instalação possibilita a não interrupção das atividades internas da edificação a ser reformada, e tem elevado potencial para a redução do ruído das chuvas quando adotadas soluções que garantam aumento da perda de transmissão sonora.

Neste trabalho, foram analisados sistemas de coberturas simples e sistemas duplos, com variações no preenchimento de material fibroso entre as telhas e no uso de fitas auto-adesivas. Os sistemas de coberturas compostos somente por uma telha apresentaram níveis sonoros elevados que indicam uma contribuição significativa para a degradação das condições acústicas em ambientes com grandes vãos. Essa situação pode ser encontrada em diferentes tipologias arquitetônicas como aeroportos, estações rodoviárias e locais para eventos, que requerem condições apropriadas para o entendimento da comunicação verbal.

Os sistemas testados neste trabalho, a partir de composições com telha duplas, apresentaram eficiência na redução do som das chuvas, quando comparados aos sistemas com telhas simples. Nesse sentido, foi possível concluir que o amortecimento com material elastomérico em pontos isolados das telhas pouco contribui para aumentar o isolamento ao som das chuvas, e a maior eficiência está no preenchimento dos vazios entre as telhas com material fibroso. Destaca-se que o aumento do perfil espaçador e o conseqüente aumento da camada de ar entre as telhas não aumenta o isolamento acústico do sistema de cobertura. Além disso, o amortecimento não faz efeito significativo quando instalado em pequenos trechos das telhas.

Os resultados apresentados poderão servir de base para novos projetos de arquitetura e engenharia, qualificando a informação para o desenvolvimento de projetos que visam o desempenho acústico. Também podem ser utilizados para projetos em *retrofit* de edificações existentes.

REFERÊNCIAS

ABCEM. **Manual Técnico Telhas de Aço**. 2009. Disponível em: www.abcem.org.br
Acesso em: nov. 2019.

ANTONIO, M. A. Energia cinética da precipitação estimada pelo radar de tempo de Bauru-SP: estudo de casos com medidas disdrométricas. XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. **Anais...**, 2009. Belo Horizonte.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 14513**: Telhas de aço revestido de seção ondulada – Requisitos. Rio de Janeiro. 2008

_____ **ABNT NBR 14514**: Telhas de aço revestido de seção trapezoidal – Requisitos. Rio de Janeiro. 2008

_____ **ABNT NBR 15527**: Aproveitamento de água de chuva de coberturas para fins não potáveis – Requisitos. Rio de Janeiro. 2019

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

BALLAGH, K. O. Noise of Simulated Rainfall on Roofs. **Applied Acoustics**, v. 31, p. 245–264, 1990.

BARUFFA, R. Correlation between airborne sound insulation and heavy rain noise on coverings with metallic finishing. **Rivista Italiana di Acustica**, v. 40, n. 4, p. 32–42, 2016.

BELLEI, Ildony H.; PINHO, Fernando O.; PINHO, Mauro O. **Edifícios de Múltiplos Andares em Aço**. 2. Ed. São Paulo: Pini, 2008.

BELLEI, Ildony H. **Edifícios Industriais em Aço**. 5. Ed. São Paulo: Pini, 2006.

BIES, D. A.; HANSEN, C. H. **Engineering Noise Control: Theory and Practice, Fourth Edition**. 4^o ed. New York: CRC Press, 2017.

BOLINA, F. L.; TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. **Patologia de estruturas**. São Paulo:

Oficina de Textos, 2019.

CARVALHO, M.; TARQUI, J.; SILVA, V.; LOBO, B. Avaliação do funcionamento de um simulador de chuva pelo método da farinha. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 3, p. 115–124, 2012.

CHAMBERLAN, Zacarias; FICANHA, Ricardo; FABEANE, Ricardo. **Projeto e Cálculo de Estruturas de Aço**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

CHÉNÉ, J.; GUIGOU-CARTER, C.; FORET, R.; LANGAGER, M. Measure et prédiction du bruit de pluie sur des systèmes multicouches. 10ème Congrès Français d'Acoustique. **Anais...**, 2010. Lion.

CONDON, R. **Sound insulation of a lightweight partition wall**. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co., 2011.

COSSOLINO, LC; PEREIRA, AHA. **Amortecimento: Classificação e Método de Determinação**. ATCP Engenharia Física. São Carlos, 2010.

CPRM. **Atlas Pluviométrico do Brasil**. 2015. Disponível em: http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/18700/1/Relatorio_idf_pa.pdf. Acesso em 04 jan. 2020.

CRUZ, R. G. DA; ARCIPRESTE, C. M.; PINHEIRO, R. L.; RIBAS, R. A. DE J. Generative design: information flow between genetic algorithm and parametric design in a steel structure construction. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 4, p. 271–289, 2021.

DEMANET, C.; DUBOIS, A.; FEHR, B.; MOORE, J.; DE SMEDT, J. Rain noise from agricultural roofing. **24th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2017**, p. 8222262, 2017.

DONOHUE, B.; PEARSE, J. Rain noise. Proceedings of the International Congress on Acoustics. **Anais...** . v. 2019-Sept, p.5050–5056, 2019. Aachen.

EGAN, D. **Architectural Acoustics**. New York: McGraw-Hill, 2014.

FABRO, F.; BULHÕES, I. R.; FORMOSO, C. T.; FIREMAN, M. C. T. Diretrizes para

planejar e controlar o processo de montagem de sistemas construtivos pré-fabricados de aço. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 2, p. 505–524, 2020.

GRIFFIN, D. Accuracy of prediction methods for rain noise levels. Inter-noise 2016. **Anais...** . p.3762–3771, 2016. Hamburgo.

GUYER, J. P. **An introduction to metal building, exterior insulation and roofing systems**. Davis: Independently Published, 2021.

HASSAN, O. A. B. **Building Acoustics and Vibration: Theory and Practice**. London: World Scientific Publishing Company, Incorporated, 2009.

HOPKINS, CARL; YU, Y. Empirical models for artificial and natural rainfall to assess rain noise inside buildings and cars. Inter-noise 2020. **Anais...** , 2020. Seul: International Institute of Noise Control Engineering.

HOPKINS, C. **Sound Insulation**. Burlington: Elsevier Ltd., 2012.

IDRIS, M. F. M.; HAMZAH, A. I. N.; AYOP, S. M. Occupants' responses on rain noise underneath metal deck roof system. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 35, n. July, p. 404–411, 2012.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Industria do Aço no Brasil**. Brasilia. 2017. Disponível em: https://bucket-gw-cni-static-cms-si.s3.amazonaws.com/media/filer_public/04/a2/04a2a7ac-4a9f-4505-84a5-f4c54242ead7/aco_brasil.pdf. Acesso em: 04 jan. 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10140: Acoustics – Laboratory Measurement of sound Insulation of Building Elements. Part 1: Application rules for specific products**. Geneva, 2021.

_____ **ISO 10140: Acoustics – Laboratory Measurement of sound Insulation of Building Elements. Part 3: Measurement of impact sound insulation**. Geneva, 2021.

_____ **ISO 10140: Acoustics – Laboratory Measurement of sound Insulation of Building Elements. Part 5: Requirements for test facilities and equipment**. Geneva, 2021.

JARAMILLO, A. M.; STEEL, C. **Architectural Acoustics**. Londres: Taylor & Francis, 2015.

KEELER, M. **Fundamentos de projeto de edificações sustentáveis**. Porto Alegre: Bookman, 2018.

LIST, R.; GILLESPIE, J. R. Evolution of raindrop spectra with collision-induced breakup. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 33, p. 2007–2013, 1976.

LOPES, M. M.; RIGAU, L. UTILIZAÇÃO DE MEMBRANA INSONORIZANTE NO ISOLAMENTO ACÚSTICO EM COBERTURA METÁLICA. *Acústica 2008. Anais...*, 2008. Coimbra: Sociedade Portuguesa de Acústica.

MASSABLIA, James. **Modelling the Sound Insulation of Corrugated Roof Structures: An Extended Transfer Matrix Approach**. Tese (PhD Thesis Acoustics Research Centre) – University of Salford, Salford, UK, 2017.

MELO JÚNIOR, C. M.; CARASEK, H. Índices de chuva dirigida direcional e análise do nível de umedecimento em fachadas de edifício multipavimentos em Goiânia, GO. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 3, p. 23–37, 2011.

MINEO, C.; RIDOLFI, E.; MOCCIA, B.; RUSSO, F.; NAPOLITANO, F. Assessment of rainfall kinetic-energy-intensity relationships. **Water**, v. 11, n. 10, 2019.

PATRÍCIO, J. V. **Acústica nos edifícios**. 6^o ed. Lisboa: Verlag Dashöfer, 2018.

ROAF, S.; CRICHTON, D.; NICOL, F. A adaptação de edificações e cidades às mudanças climáticas: um guia de sobrevivência para o século XXI. , 2009. Porto Alegre: Bookman.

TILG, A. M.; VEJEN, F.; HASAGER, C. B.; NIELSEN, M. Rainfall kinetic energy in denmark: Relationship with drop size, wind speed, and rain rate. **Journal of Hydrometeorology**, v. 21, n. 7, p. 1621–1637, 2020.

TOYODA, M.; TAKAHASHI, D. Reduction of rain noise from Ethylene/TetraFluoroEthylene membrane structures. **Applied Acoustics**, v. 74, n. 12, p. 1309–1314, 2013. Elsevier Ltd.

UNIVERSALIS, ENCYCLOPAEDIA. **Acoustique architecturale**: Les Grands Articles d'Universalis. Bélgica: Encyclopaedia Universalis, 2019.

VERMEIR, G.; MEES, P. Laboratory test set-up for the evaluation of rainfall-noise. Inter-noise 2000. **Anais...**, 2000. Nice: European Acoustics Association.

WU, X.; LUO, B.; WANG, W.; et al. The effect of rain noise on emergence behavior in least horseshoe bats. **Acta Theriologica Sinica**, v. 40, n. 2, p. 129–134, 2020.

XIANG, Yan; SHUAI, Lu; JUNJIE, Li. **Experimental Studies on the Rain Noise of Lightweight Roofs: Natural Rains vs Artificial Rains**. Elsevier. 2015. Disponível em: www.elsevier.com/locate/apacoust. Acesso em: 23 nov. 2019

YAN, X.; LU, S.; LI, J. Experimental studies on the rain noise of lightweight roofs: Natural rains vs artificial rains. **Applied Acoustics**, v. 106, p. 63–76, 2016. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.12.022>>. .

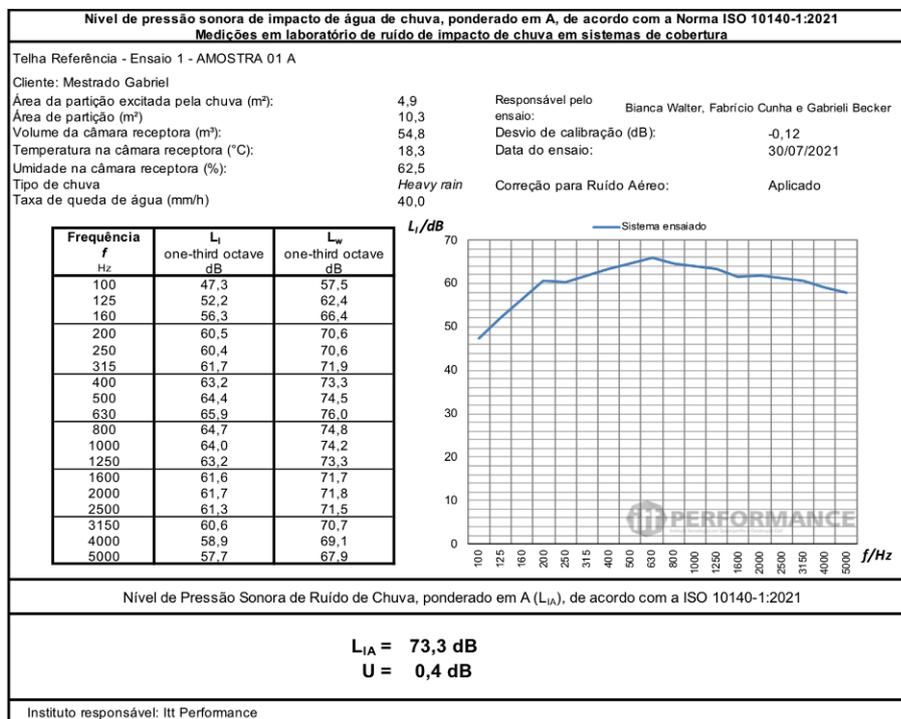
YU, Y.; HOPKINS, C. Experimental determination of forces applied by liquid water drops at high drop velocities impacting a glass plate with and without a shallow water layer using wavelet deconvolution. **Experiments in Fluids**, v. 59, n. 5, p. 1–23, 2018.

ZANONI, V. A. G.; SANCHEZ, J. M. M.; BAUER, E. Avaliação de métodos para quantificação de chuva dirigida nas fachadas das edificações. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 9, n. 2, p. 122–132, 2018. Disponível em: <<https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8650260/18179>>.

APÊNDICE A

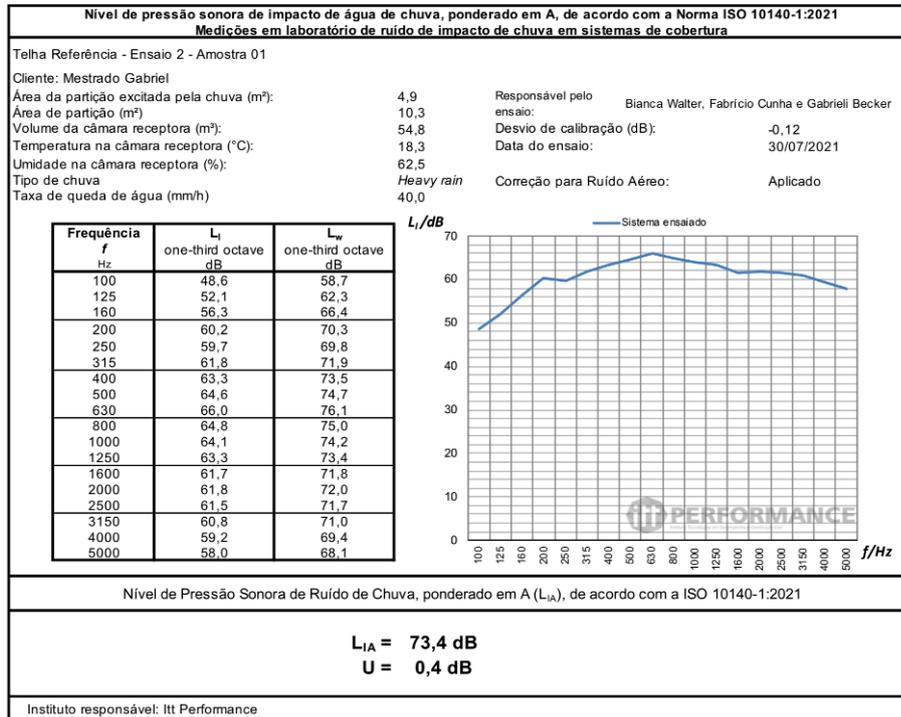
As Figuras A.1 a A.16, representam os resultados individuais de cada ensaio, sem a sobreposição dos resultados. As Figuras apresentam dados de entrada e informações referentes as condições de temperatura e umidade no momento de cada ensaio. Por fim, nível de intensidade sonora ponderada em A (L_{iA}), como resultado para comparação direta no desempenho de cada amostra.

Figura A.1 – Resultados Amostra 01 – Ensaio 1



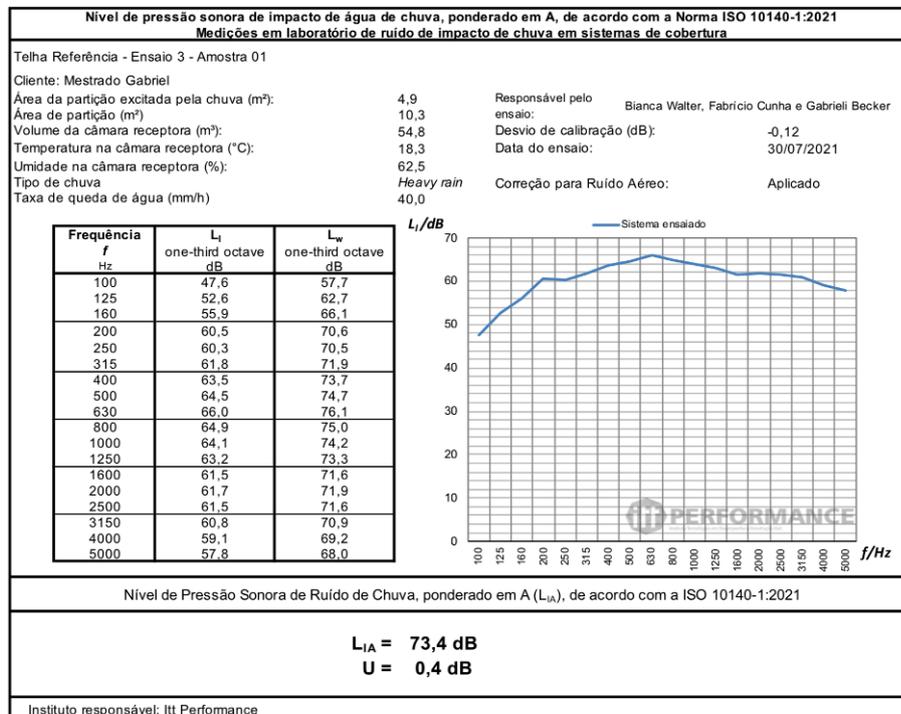
Fonte: ensaio itt Performance 2021

Figura A.2 – Resultados Amostra 01 – Ensaio 2



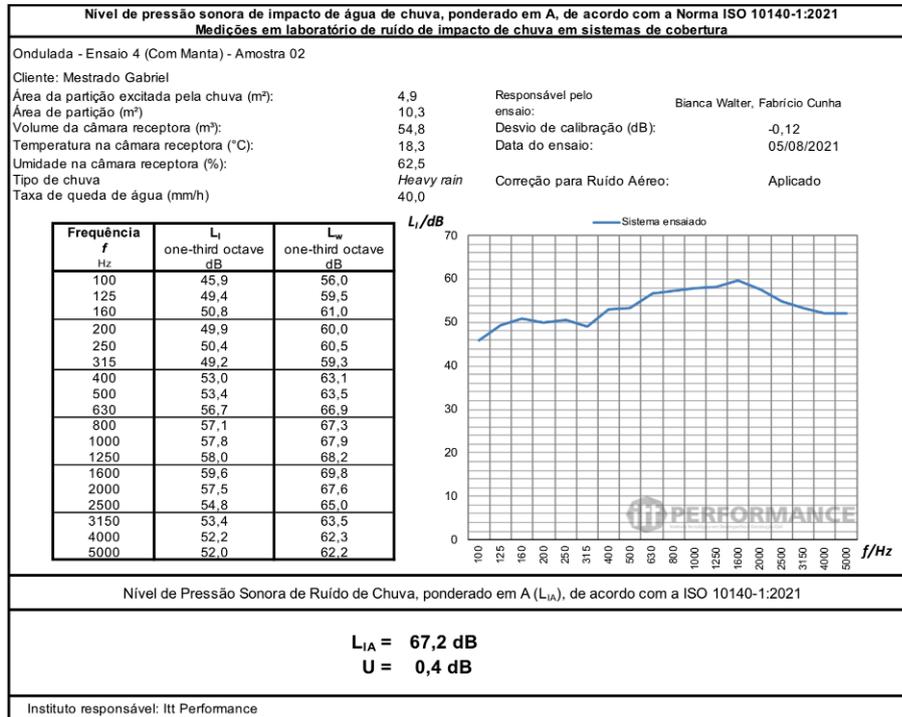
Fonte: ensaio itt Performance 2021

Figura A.3 – Resultados Amostra 01 – Ensaio 3



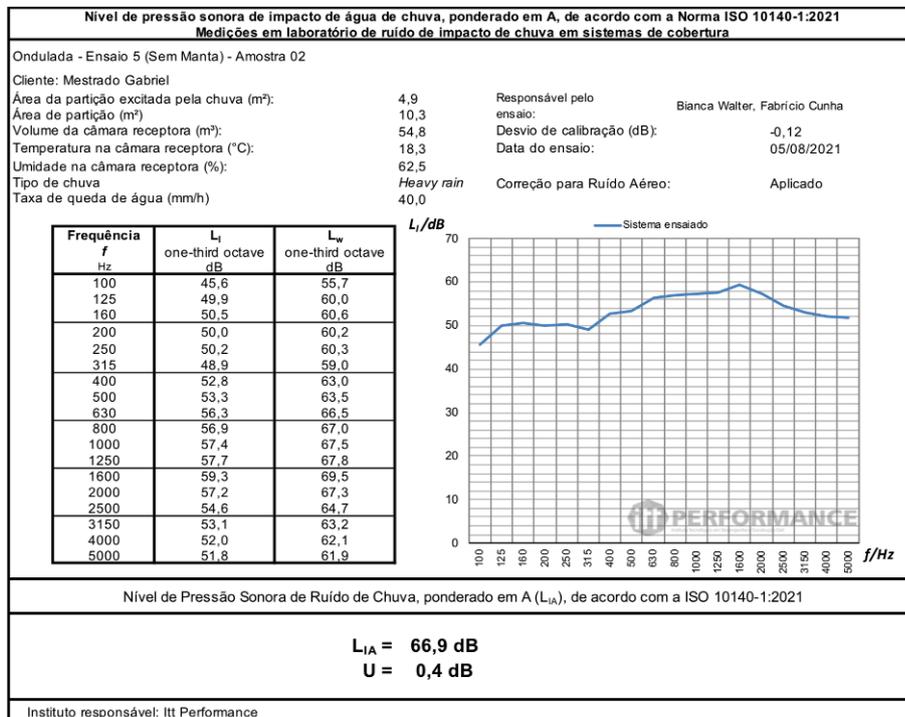
Fonte: ensaio itt Performance 2021

Figura A.4 – Resultados Amostra 02 – Ensaio 4



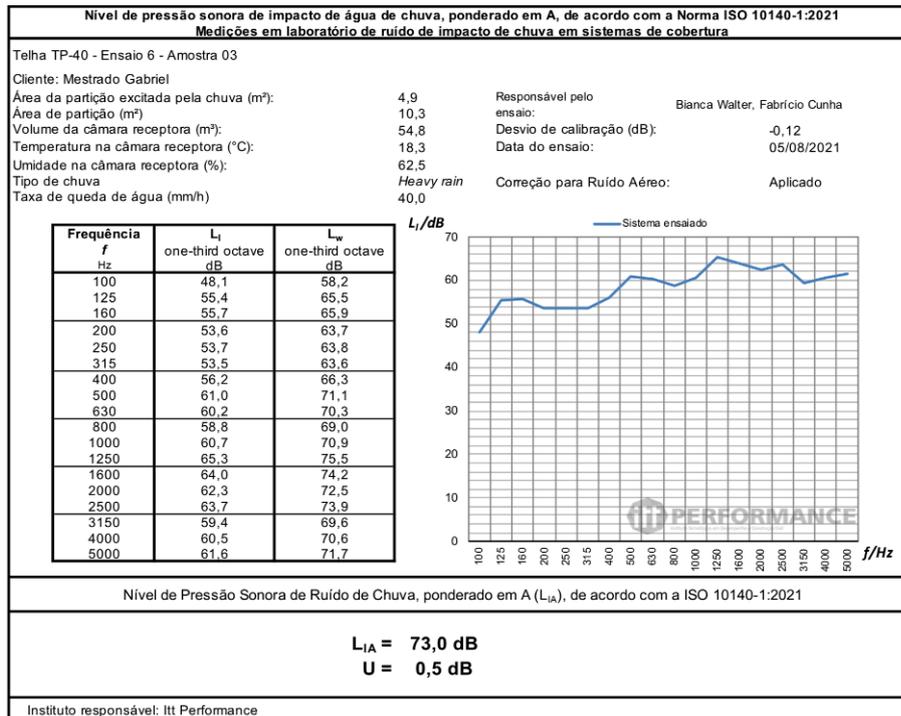
Fonte: ensaio itt Performance 2021

Figura A.5 – Resultados Amostra 02 – Ensaio 5



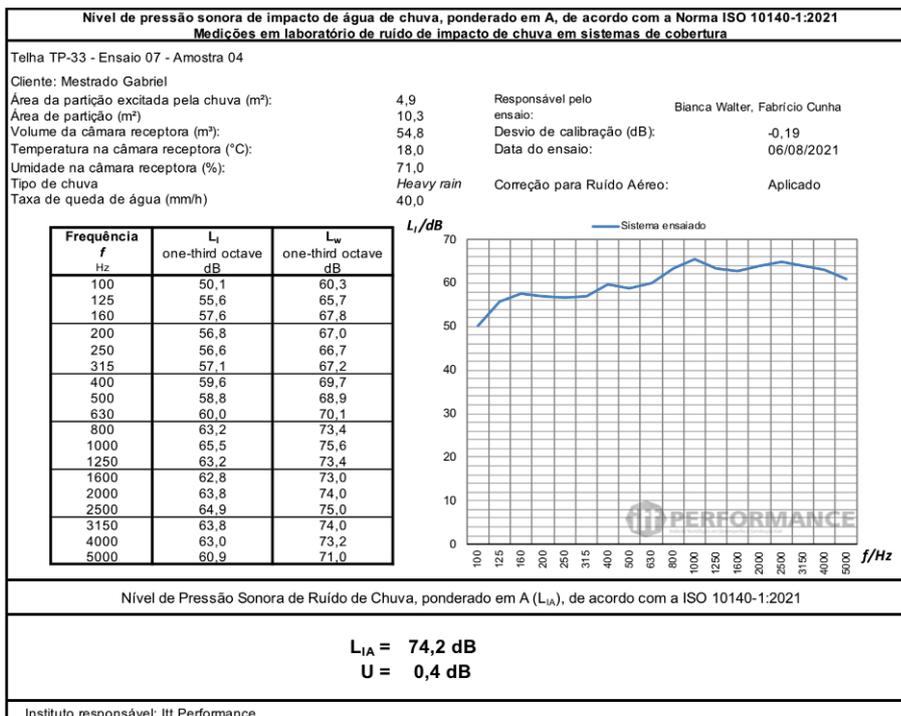
Fonte: ensaio itt Performance 2021

Figura A.6 – Resultados Amostra 03 – Ensaio 6



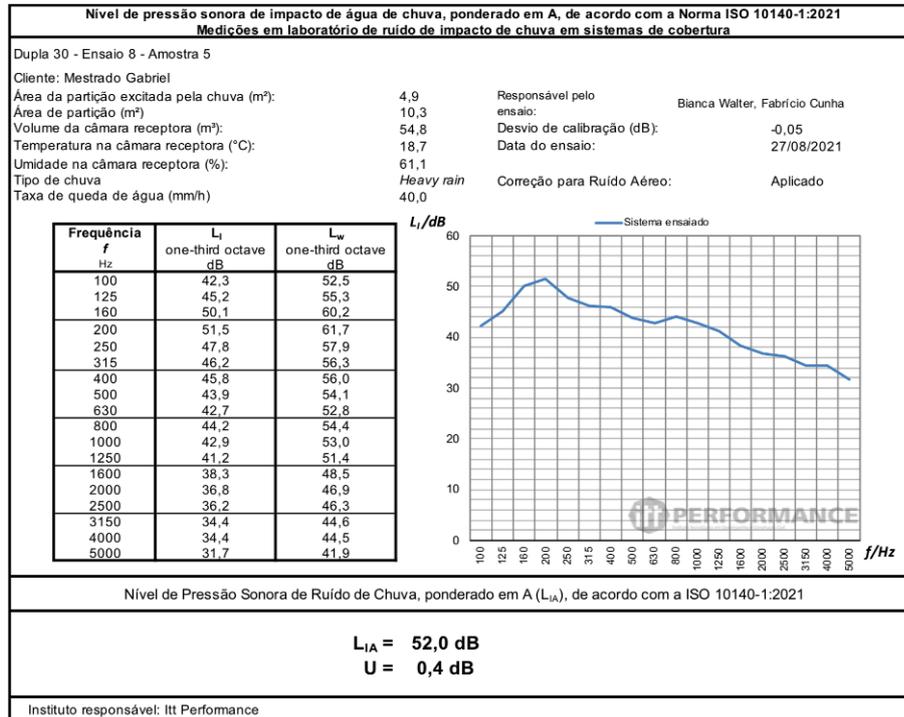
Fonte: ensaio itt Performance 2021

Figura A.7 – Resultados Amostra 04 – Ensaio 7



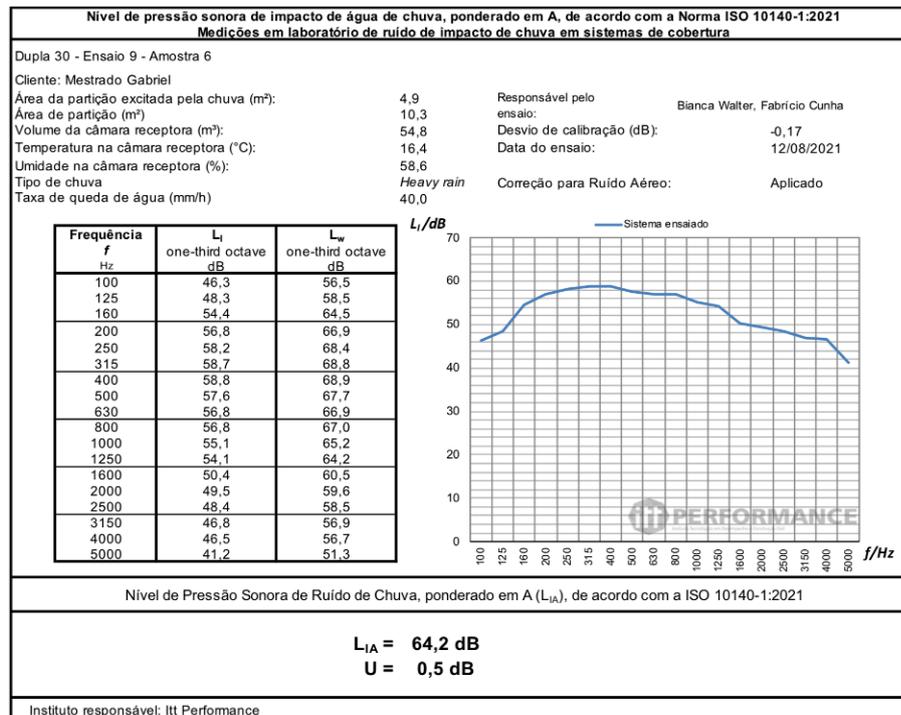
Fonte: ensaio itt Performance 2021

Figura A.8 – Resultados Amostra 05 – Ensaio 8



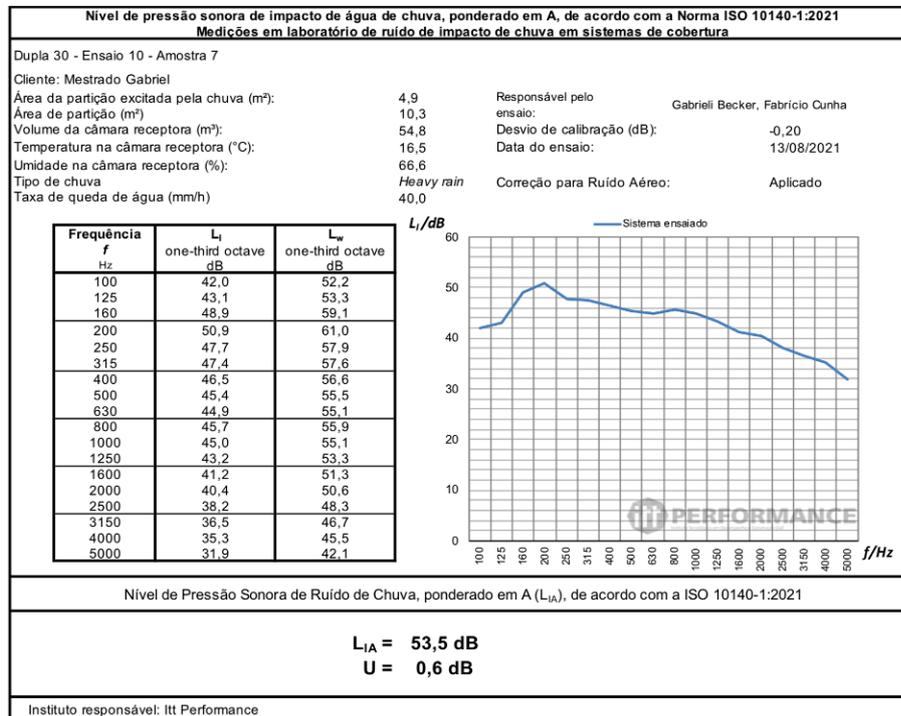
Fonte: ensaio itt Performance 2021

Figura A.9 – Resultados Amostra 06 – Ensaio 9



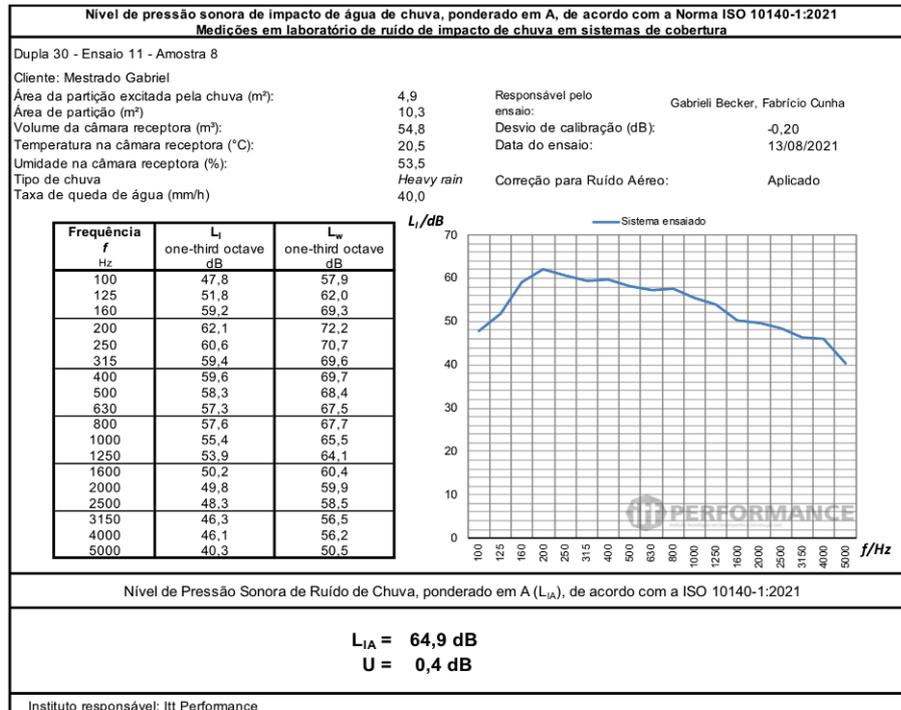
Fonte: ensaio itt Performance 2021

Figura A.10 – Resultados Amostra 07 – Ensaio 10



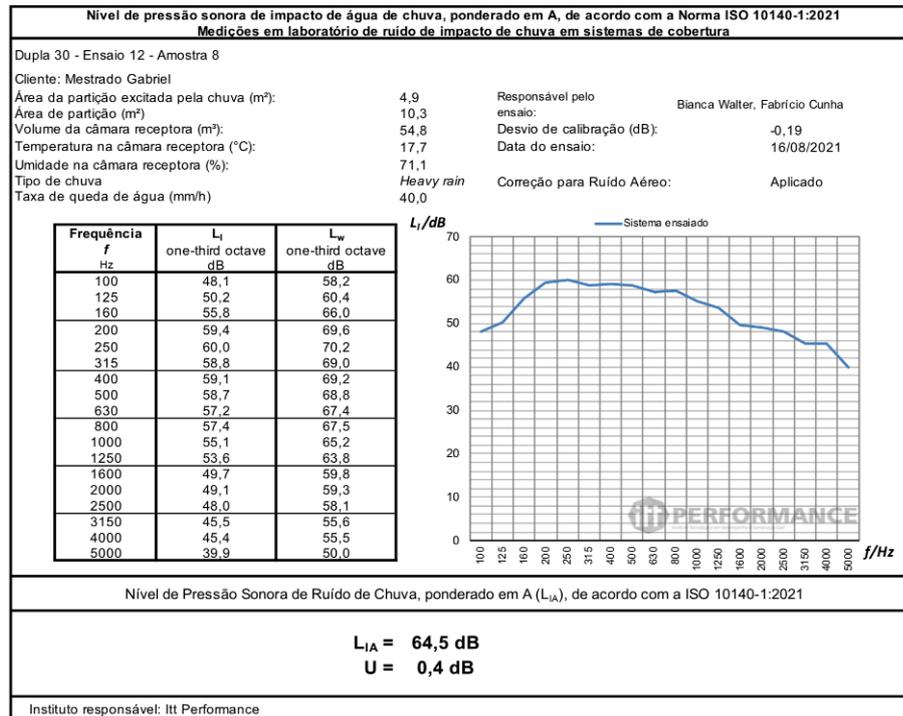
Fonte: ensaio itt Performance 2021

Figura A.11 – Resultados Amostra 08 – Ensaio 11



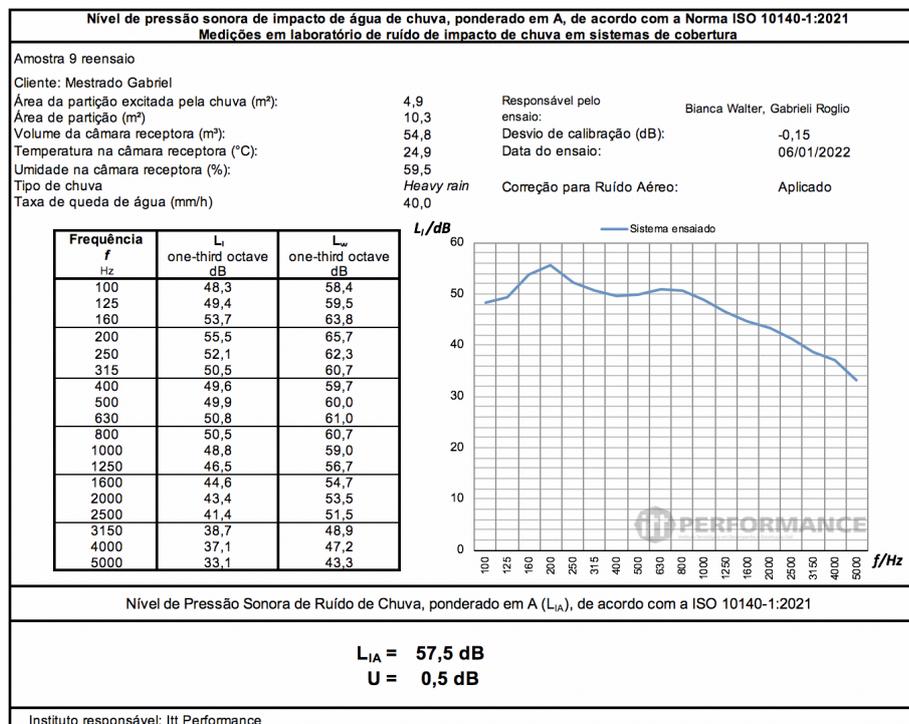
Fonte: ensaio itt Performance 2021

Figura A.12 – Resultados Amostra 08 – Ensaio 12



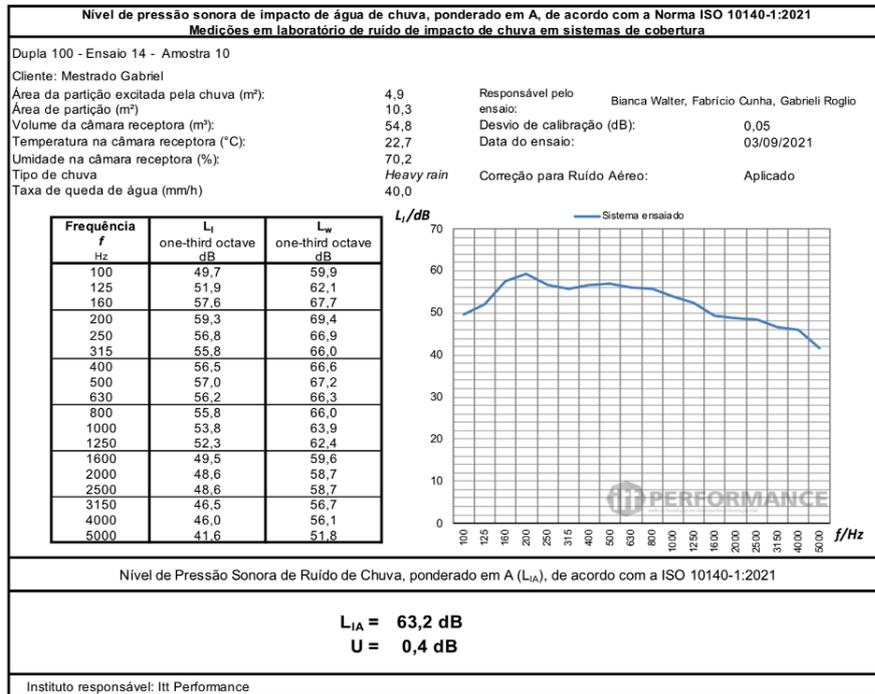
Fonte: ensaio itt Performance 2021

Figura A.13 – Resultados Amostra 09 – Ensaio 13



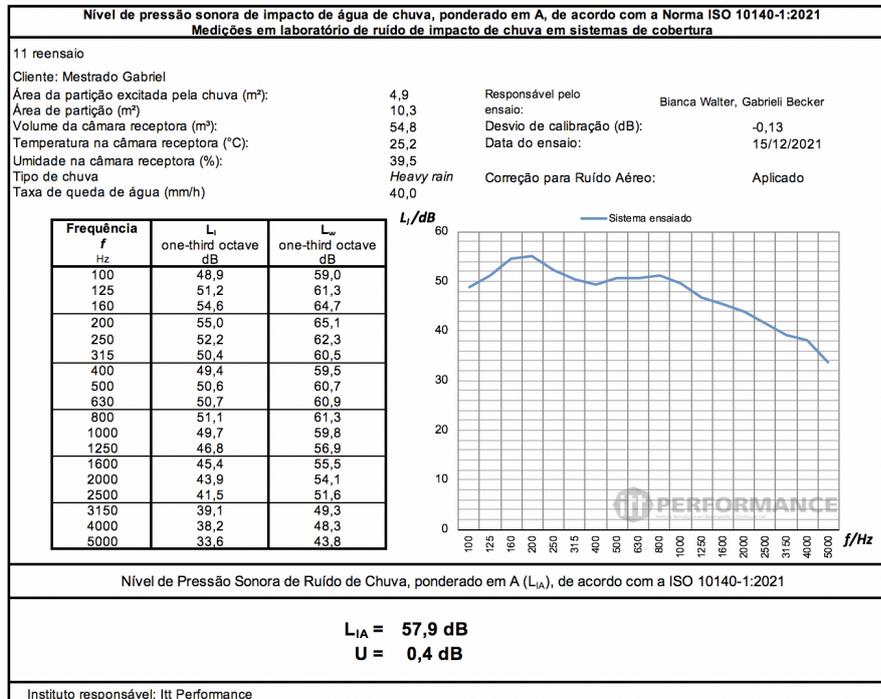
Fonte: ensaio itt Performance 2022

Figura A.14 – Resultados Amostra 10 – Ensaio 14



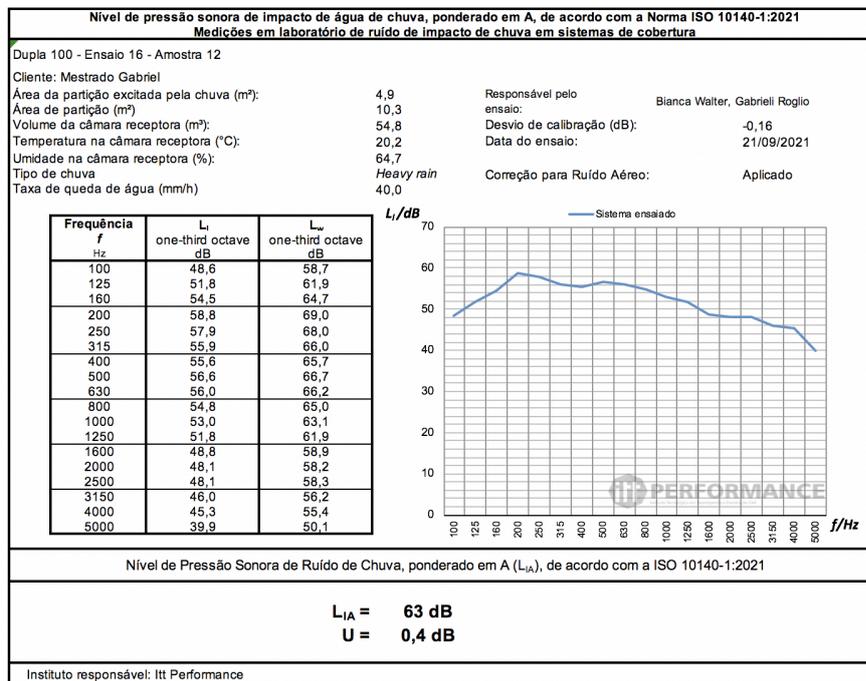
Fonte: ensaio itt Performance 2021

Figura A.15 – Resultados Amostra 11 – Ensaio 15



Fonte: ensaio itt Performance 2021

Figura A.16 – Resultados Amostra 12 – Ensaio 16



Fonte: ensaio itt Performance 2021