RAQUEL ROSSATTO ROCHA

**Análise e caracterização de soluções acústicas para mitigar os ruídos
oriundos de instalações hidrossanitárias prediais**

São Paulo

2018

RAQUEL ROSSATTO ROCHA

**Análise e caracterização de soluções acústicas para mitigar os ruídos
oriundos de instalações hidrossanitárias prediais**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Ciências

Área de concentração: Inovação na Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Racine Tadeu Araújo Prado

São Paulo

2018

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Rocha, Raquel Rossatto

Análise e caracterização de soluções acústicas para mitigar os ruídos oriundos de instalações hidrossanitárias prediais / R. R. Rocha -- versão corr. - São Paulo, 2018.
110 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.Sistemas prediais 2.Acústica 3.Sistemas hidráulicos 4.Construção civil I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

Dedico este trabalho
aos meus pais, Ernani Rocha e Marta Rossatto Rocha, com amor, admiração e gratidão
por proporcionarem o crescimento de minha responsabilidade. E por acreditarem,
incentivarem e apoiarem as minhas decisões, sempre.
Ao meu irmão, João Rocha, com amor e gratidão, pela ajuda quando solicitada desde os
primeiros ensaios acústicos durante a graduação.
Ao meu amor, Rodrigo Coutinho, com amor, admiração e gratidão por sua compreensão,
carinho, presença e incansável apoio. Por escutar e acreditar nos meus sonhos, sempre.

AGRADECIMENTOS

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pela oportunidade de realização do curso de Mestrado.

Ao Professor Dr. Racine Tadeu Araújo Prado, por acreditar e aceitar a orientação deste trabalho, pela condução sempre presente e atenciosa.

Aos fornecedores dos materiais de envelopamento de tubulações por aceitarem participar da minha pesquisa, por acreditarem e compreenderem a necessidade de realizar os ensaios dos produtos para caracterizações técnicas. Sem a participação de vocês, este trabalho não seria concretizado.

À equipe do Laboratório de Conforto do IPT (Instituto de Pesquisa Tecnológica) pela paciência e dedicação, na realização dos ensaios e pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho, principalmente à Cristina Yukari Kawakita Ikeda e Marcelo de Mello Aquilino.

Aos professores do curso de Mestrado Profissional em Inovação na Construção Civil, que nos anos de convivência, muito me ensinaram, contribuindo para meu crescimento científico e intelectual.

Aos funcionários da Escola Politécnica que desde o início auxiliaram e dedicaram seu tempo para a minha formação, principalmente à Eliany Funari.

Aos colegas do curso, pela amizade e companheirismo.

Ao meu instrutor de acústica, José Carlos Giner, pelo seu incentivo e compreensão.

À toda equipe Giner desde 2015, por apoiar meu tempo dedicado ao mestrado, pela compreensão e incentivo.

À eterna professora e conselheira, Dra. Dinara X. da Paixão, pelo apoio no tema do mestrado e por incentivar e acreditar, sempre.

Aos antigos colegas da primeira turma de engenharia acústica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), por sempre estarem presentes e por poder compartilhar dúvidas, angústias e decisões.

*“Você pode encarar um erro como uma besteira a ser esquecida, ou como um resultado que
aponta uma nova direção.”
(Steve Jobs)*

RESUMO

ROCHA, Raquel Rossatto. **Análise e caracterização de soluções acústicas para mitigar os ruídos oriundos de instalações hidrossanitárias prediais** 2018. 110 f. (Mestrado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

O ruído excessivo é considerado problema de saúde pública devido ao seu impacto a saúde humana. Nas edificações residenciais, os ruídos emitidos por instalações hidrossanitárias são maioria nas reclamações dos usuários. Neste contexto, destaca-se a necessidade do controle acústico em edificações residenciais, em específico deste estudo, para o controle do ruído hidrossanitário em instalações prediais. A norma NBR 15575: 2013 estabelece parâmetros para que os ruídos gerados por instalações hidrossanitárias não produzam níveis de pressão sonora elevados no interior dos dormitórios. Os níveis elevados provocam uma percepção auditiva desagradável e podem gerar constrangimentos entre vizinhos, devido à falta de privacidade. O objetivo deste artigo é avaliar e comparar os resultados de possíveis soluções acústicas para mitigar os níveis de pressão sonora gerados pelas instalações hidrossanitárias prediais, devido o acionamento de descargas de vasos sanitários e abertura de torneiras. Foram realizadas medições de níveis de pressão sonora conforme a norma ISO 16032: 2004 adaptada para laboratório em câmara de ensaios acústicos hidrossanitários do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) para nove amostras de envelopamento acústico. Os resultados técnicos encontrados através das grandezas $L_{Zeq,nT}$, $L_{Aeq,nT}$ e $L_{ASmax,nT}$ foram analisados e comparados para cada amostra medida no tubo envelopado e no tubo aparente. Para as amostras analisadas, a maioria das amostras apresenta $\Delta L \geq 20$ dB no acionamento da descarga do vaso sanitário e $\Delta L \geq 10$ dB para o ruído oriundo da abertura da torneira. Através da estimativa custo-benefício, verificou-se que a amostra C possui a melhor relação entre as amostras estimadas.

Palavras-chaves: Acústica em edificações. Controle de ruído. Ruído hidrossanitário. Instalações hidrossanitárias.

ABSTRACT

ROCHA, Raquel Rossatto. **Analysis and characterization of acoustical solutions to mitigate the noise from hydrosanitary systems in buildings**. 2018. 110 p. (Master) Polytechnic, University of São Paulo, São Paulo, 2018.

Excessive noise is considered a public health problem due to its impact on human health. In residential buildings, the noises emitted by hydrosanitary are the source of most complaints from users. In this context, we highlight the need for acoustic control in residential buildings, in the specific case of this work, for the control of hydrosanitary systems noise in building. The standard NBR 15575: 2013 establishes parameters for the noises generated by hydrosanitary systems do not produce high sound pressure levels inside the bedroom. When these levels are high, they cause a nasty hearing perception and can generate constraints between neighbors, due to the lack of privacy. The goal of this dissertation is to evaluate and analyze the results of possible acoustic solutions to mitigate the sound pressure levels generated by hydrosanitary systems, due to the triggering of discharge activation of toilets and tap opening. For this, measurements of sound pressure levels as ISO 16032: 2004 adapted to laboratory in acoustic testing environment hydrosanitary Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) to nine samples. Evaluated and compared the technical results found through the variable, $L_{Zeq,nT}$, $L_{Aeq,nT}$ e $L_{ASmax,nT}$, for each sample as the tube enveloped and apparent tube. The results for the samples analysed are satisfactory, since most samples reduce more than 20 dB for noise generated due to the discharge activation and 10 dB for noise from the tap opening. Through the cost-benefit analysis, it was found that the sample C has the best relation between estimated samples.

Keywords: Acoustics in buildings. Noise control. Hydrosanitary noise. Hydrosanitary systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação do escoamento dos fluídos nas conexões curvas.	25
Figura 2 – Propagação do ruído por via aérea e por via estrutural.	25
Figura 3 – Representação desacoplamento da tubulação.	31
Figura 4 – <i>Kit</i> de desacoplamento e PVC mineralizado.	32
Figura 5 – Caixa sifonada com prolongador e amortecedor acústico.	33
Figura 6 – Defletor para caixa sifonada.	33
Figura 7 – Abraçadeira anti vibrática.	34
Figura 8 – Imagem da Amostra B instalada.	40
Figura 9 – Imagem da Amostra C instalada.	41
Figura 10 – Imagem da Amostra D instalada.	42
Figura 11 – Instalação da Amostra E.	43
Figura 12 – Processo de instalação da Amostra F.	44
Figura 13 – Processo de instalação da Amostra G.	45
Figura 14 – Processo de instalação da Amostra H.	46
Figura 15 – Amostra I instalada.	47
Figura 16 – Pavimento inferior da câmara de ensaios hidrossnaitários do IPT. . . .	48
Figura 17 – Tempo de reverberação da câmara de ensaios do IPT, para cada forne- cedor e a sua média.	49
Figura 18 – Ruído de fundo da câmara de ensaios do IPT, para as medições devido o acionamento da descarga do vaso sanitário.	50
Figura 19 – Ruído de fundo da câmara de ensaios do IPT, para as medições devido o acionamento da torneira.	50
Figura 20 – Ruído de fundo da câmara de ensaios para ruído hidrossanitário do IPT.	51
Figura 21 – Posições dos microfones e das fontes sonoras, em centímetros.	55
Figura 22 – Tubulação aparente instalada no IPT - São Paulo/SP.	60
Figura 23 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra A, para o ruído gerado por descarga.	62
Figura 24 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra A, para o ruído gerado por abertura da torneira.	63
Figura 25 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra B, para o ruído gerado por descarga.	64

Figura 26 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra B, para o ruído gerado por abertura da torneira.	65
Figura 27 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($LZ_{eq,nT}$) para a Amostra C, para o ruído gerado por descarga.	67
Figura 28 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($LZ_{eq,nT}$) para a Amostra C, para o ruído gerado por abertura da torneira.	68
Figura 29 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra D, para o ruído gerado por descarga.	70
Figura 30 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra D, para o ruído gerado por abertura da torneira.	71
Figura 31 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra E, para o ruído gerado por descarga.	72
Figura 32 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra E, para o ruído gerado por abertura da torneira.	73
Figura 33 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra F, para o ruído gerado por descarga.	75
Figura 34 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra F, para o ruído gerado por abertura da torneira.	76
Figura 35 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra G, para o ruído gerado por descarga.	77
Figura 36 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra G, para o ruído gerado por abertura da torneira.	78
Figura 37 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra H, para o ruído gerado por descarga.	80
Figura 38 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra H, para o ruído gerado por abertura da torneira.	81
Figura 39 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra I, para o ruído gerado por descarga.	82
Figura 40 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra I, para o ruído gerado por abertura da torneira.	83
Figura 41 – Comparação do $L_{Zeq,nT}$ entre as amostras ensaiadas devido o aciona- mento da descarga do vaso sanitário.	84

Figura 42 – Comparação do $L_{Z_{eq,n}T}$ entre as amostras ensaiadas devido a abertura da torneira.	86
Figura 43 – Holografia acústica na frequência de 160 Hz.	96
Figura 44 – Holografia acústica nas frequências entre 125 a 500 Hz.	97
Figura 45 – Holografia acústica na frequência de 1600 Hz.	97
Figura 46 – Holografia acústica nas frequências entre 1250 a 2500 Hz.	98
Figura 47 – Fonte pontual com superfície de controle esférica.	104
Figura 48 – Mecanismos de geração mecânica de som em três grandes categorias. .	106
Figura 49 – Mecanismo físico da audição.	109
Figura 50 – Sistema de coordenadas relacionados a cabeça.	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de referência no interior de residências.	20
Tabela 2 – Limites para ruído de instalações hidrossanitárias.	21
Tabela 3 – Fontes de ruídos gerados por turbulência.	28
Tabela 4 – Possíveis materiais para envelopamento acústico disponíveis no mercado brasileiro.	35
Tabela 5 – Amostras ensaiadas em ambiente idêntico e controlado.	38
Tabela 6 – Exemplo de disposição dos resultados técnicos para cada amostra ensaiada.	55
Tabela 7 – Exemplo genérico para o tratamento dos dados medidos para cada amostra, tubo aparente e tubo envelopado.	59
Tabela 8 – Limites para ruído de instalações hidrossanitárias.	60
Tabela 9 – Resumo dos resultados medidos para a Amostra A, para descarga e torneira, em dB.	61
Tabela 10 – Resumo dos resultados medidos para a Amostra B, para descarga e torneira, em dB.	63
Tabela 11 – Resumo dos resultados medidos para a Amostra C, para descarga e torneira, em dB.	66
Tabela 12 – Resumo dos resultados medidos para a Amostra D, para descarga e torneira, em dB.	68
Tabela 13 – Resumo dos resultados medidos para a Amostra E, para descarga e torneira, em dB.	71
Tabela 14 – Resumo dos resultados medidos para a Amostra F, para descarga e torneira, em dB.	73
Tabela 15 – Resumo dos resultados medidos para a Amostra G, para descarga e torneira, em dB.	76
Tabela 16 – Resumo dos resultados medidos para a Amostra H, para descarga e torneira, em dB.	79
Tabela 17 – Resumo dos resultados medidos para a Amostra I, para descarga e torneira, em dB.	81
Tabela 18 – Valores de $L_{Zeq,nT}$ devido o acionamento da descarga do vaso sanitário.	84
Tabela 19 – Comparação do $L_{Zeq,nT}$ devido a abertura da torneira.	86

Tabela 20 – ΔL e a correspondente alteração da sensação de volume sonoro considerando espectro e históricos no tempo iguais ou pelo menos similares. 110

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa	16
1.2	Objetivo geral	17
1.3	Objetivos específicos	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Legislações	19
2.1.1	Comentários sobre normas nacionais	19
2.1.2	Comentários sobre normas internacionais	23
2.2	Ruído em tubulações	24
2.2.1	Geração do ruído e vibrações	26
2.2.2	Controle de ruído e vibrações	29
2.2.3	Soluções disponíveis no mercado brasileiro	32
3	MÉTODO	36
3.1	Amostras selecionadas	37
3.1.1	Amostra A	39
3.1.2	Amostra B	39
3.1.3	Amostra C	40
3.1.4	Amostra D	41
3.1.5	Amostra E	42
3.1.6	Amostra F	43
3.1.7	Amostra G	44
3.1.8	Amostra H	45
3.1.9	Amostra I	46
3.2	A câmara	47
3.3	Método das medições	51
3.3.1	A ISO 16032: 2004	51
3.3.2	Método utilizado para a medição das amostras	54
3.3.3	Tratamento dos dados	56

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.1	Resultados individuais	60
4.1.1	Amostra A	61
4.1.2	Amostra B	63
4.1.3	Amostra C	66
4.1.4	Amostra D	68
4.1.5	Amostra E	71
4.1.6	Amostra F	73
4.1.7	Amostra G	76
4.1.8	Amostra H	78
4.1.9	Amostra I	81
4.2	Comparação dos resultados	83
4.3	Relação custo-benefício	87
5	CONCLUSÕES	90
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	91
	REFERÊNCIAS	92
	ANEXOS	95
	Anexo A – Holografia acústica	96
	Anexo B – Conceitos básicos de acústica	99
	Anexo C – Tipos de fonte sonora	103
	Anexo D – Psicoacústica	108

1 INTRODUÇÃO

Para conseguir que o preço do empreendimento seja compatível com as condições do mercado e para atender a grande procura por imóveis entre todas as classes sociais, grande parte das construtoras buscam realizar suas obras no menor tempo possível e com o menor custo (PAVANELLO; PAIXÃO, 2014).

Consequentemente, reduzem as espessuras das paredes e lajes, tem-se cômodos cada vez menores para otimizar os espaços e unidades autônomas cada vez mais próximas umas das outras, inclusive com paredes geminadas entre dormitórios de unidades distintas. Devido a esses fatores, tem-se cada vez mais edificações sem conforto acústico (PIERRARD; AKKERMAN, 2015).

Em edifícios residenciais, existem inúmeras fontes de ruídos. Esses ruídos são transmitidos via estrutural e via aérea (VIGRAN, 2008; LONG, 2005). Ruídos de impacto através de sistemas de pisos e ruídos aéreos através de divisórias internas de unidades distintas são exemplos de transmissão de ruído em edificações.

Nas edificações residenciais sem projeto acústico adequado, os ruídos emitidos por instalações hidrossanitárias são sempre notados, independentemente do número de pavimentos e de apartamentos ou da classe social a que se destina a edificação. Devido a racionalização, as construtoras tem substituído as tubulações de ferro por PVC (*Polyvinyl chloride*), além disso passaram a ser instaladas entre forros, ao invés de instalar embutidas nas lajes. Essas instalações devem ser adequadas ao projeto acústico para não gerarem desconforto para os usuários das edificações (CORRÊA; NIEMEYER, 2009). Quando não se tem um projeto seguindo as diretrizes acústicas, o ruído oriundo dessas instalações é a origem da maior parte das reclamações dos usuários, principalmente entre unidades distintas (ABNT, 2013; CORRÊA; NIEMEYER, 2009).

As diretrizes de projeto e execução para instalações prediais residenciais referentes a água fria, água quente, água pluvial e esgoto sanitário dadas pelas normas brasileiras NBR 5626 (ABNT, 1998), NBR 7198 (ABNT, 1993), NBR 10844 (ABNT, 1989) e NBR 8160 (ABNT, 1999), informam que as tubulações e aparelhos hidrossanitários não devem provocar ruídos excessivos, mas essas normas apenas indicam os valores máximos de velocidade e pressão do escoamento do fluido, o que não é suficiente para elaborar um projeto acústico adequado para mitigar os ruídos e vibrações de instalações hidrossanitárias. Em contra partida, a recente norma de desempenho de edificações, NBR 15575 (ABNT,

2013), recomenda que as instalações hidrossanitárias não produzam níveis de pressão sonora elevados no interior dos dormitórios. A norma estabelece os limites de ruído em dormitórios gerados pelo uso de instalações hidrossanitárias, conforme o ciclo de operação do equipamento.

Em vista disso, mitigar os níveis de pressão sonora gerados pelas instalações hidrossanitárias é fundamental para garantir o conforto acústico dos moradores de edificações. Existem estudos no Brasil para descobrir quais são os mecanismos responsáveis pela emissão de ruídos em instalações hidrossanitárias (QUERIDO, 1993), e sobre métodos de medição apropriados ou quais grandezas devem ser medidas para melhor quantificar o ruído proveniente desse tipo de equipamento (PAVANELLO; PAIXÃO, 2014). Porém, não existem estudos para comparar o desempenho acústico entre possíveis soluções disponíveis no mercado nacional para atenuar os níveis de pressão sonora oriundos das instalações hidrossanitárias, no caso, acionamento de descargas de vasos sanitários e abertura de torneiras, através de medições em ambiente controlado e idêntico.

1.1 JUSTIFICATIVA

O ruído excessivo no nosso dia a dia é um perigo que passa despercebido, pois convivemos diariamente com ele sem percebermos os seus efeitos maléficos na saúde como: o aumento da pressão sanguínea, zumbido (chiado), contração muscular, ansiedade, estreitamento dos vasos sanguíneos, insônia, depressão, dificuldade de concentração, alterações gástricas e intestinais, entre outros (NEPOMUCENO, 1994; LONG, 2005; HOWARD; ANGUS, 2009). Por isso, a poluição sonora é considerada um problema de saúde pública mundial¹ (SINGH; DAVAR, 2004).

Tendo em vista os efeitos maléficos do ruído excessivo na saúde humana, alguns países decretaram que o desempenho acústico adequado nas edificações é condição prioritária para usuários e órgãos promotores (LAGES, 2008; SINGH; DAVAR, 2004).

Países como Alemanha e Áustria possuem normas específicas para definir a qualidade acústica mínima exigida nas edificações (PATRÍCIO, 2009). Para os ruídos gerados por instalações, equipamentos prediais e sistemas hidrossanitários, a norma brasileira NBR 15575-1:2013 (ABNT, 2013) recomenda que esses sistemas não produzam níveis de

¹ A WHO reconhece que o ruído em comunidade é um problema para a saúde.

pressão sonora elevados no interior dos dormitórios, entretanto esses requisitos são apenas informativos, isto é, ainda não são obrigatórios. Apesar da não obrigatoriedade, a própria norma recomenda que estes requisitos de desempenho, mesmo que informativos, sejam observados, pois os ruídos gerados por equipamentos prediais e de sistemas hidrossanitários são a origem da maior parte das reclamações dos moradores de edifícios residenciais. Esse ruído provoca uma sensação auditiva desagradável e por vezes pode gerar constrangimentos entre vizinhos ocasionando uma possível situação embaraçosa (CORRÊA; NIEMEYER, 2009; QUERIDO, 1993).

Devido a isso, destaca-se a importância do controle do ruído hidrossanitário em instalações prediais. Como a norma em vigor no Brasil é nova e o conhecimento específico em acústica de edificações é escasso, as construtoras e projetistas estão investindo em pesquisas e exigindo dos seus fornecedores possíveis inovações tecnológicas para atender ao desempenho acústico recomendado pela NBR 15575 (ABNT, 2013).

Além da perceptível necessidade de mais estudos no Brasil, dada a incipiência do tema, ainda existem diversas dúvidas referentes ao controle do ruído hidrossanitário, como por exemplo:

- Quais são as possíveis soluções acústicas para atenuar os níveis de pressão sonora?
- Qual o desempenho acústico das possíveis soluções do mercado brasileiro?
- As soluções disponíveis no mercado brasileiro atendem aos limites da norma NBR 15575:2013 (ABNT, 2013)?

Estas questões ainda não foram estudadas no Brasil com ensaios acústicos padronizados pela norma ISO 16032: 2004 (ISO, 2004b) em ambiente controlado e idêntico.

O escopo desse trabalho pretende responder a essas perguntas.

1.2 OBJETIVO GERAL

Validar o desempenho de soluções acústicas disponíveis no mercado brasileiro para atenuar os níveis de pressão sonora gerados pelas instalações hidrossanitárias prediais, no caso, acionamento das descargas de vasos sanitários e abertura de torneiras.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Em relação ao controle dos níveis de pressão sonora gerados pelas tubulações das instalações hidrossanitárias em edificações, no caso, descarga de vasos sanitários e de abertura de torneiras, os objetivos específicos desse trabalho são:

- Levantar quais são as soluções acústicas comumente utilizadas no mercado brasileiro;
- Avaliar o desempenho acústico entre as amostras ensaiadas, em ambiente controlado e idêntico;
- Levantar a relação custo-benefício entre as amostras ensaiadas.
- Verificar se os resultados ensaiados atendem os requisitos mínimos da norma brasileira NBR 15575:2013 (ABNT, 2013).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Pretende-se neste capítulo realizar uma revisão bibliográfica dos estudos já realizados nacionalmente e internacionalmente sobre soluções acústicas para mitigar os ruídos e vibrações oriundos de instalações hidrossanitárias. Conceitos básicos de acústica podem ser revisados no Anexo B, conceitos sobre tipologia da fonte sonora no Anexo C e conceitos básicos de Psicoacústica podem ser revisados no Anexo D.

2.1 LEGISLAÇÕES

Uma norma técnica é um documento, normalmente produzido por um órgão oficial acreditado para tal, que estabelece regras, diretrizes, ou características acerca de um material, produto, processo ou serviço (FERREIRA, 2004).

A seguir, encontra-se os comentários sobre as normas nacionais e internacionais relacionadas com o tema em estudo.

2.1.1 Comentários sobre normas nacionais

No Brasil, existem normas para sobre acústica, tais como:

A. NBR 10151:2000 - Avaliação do ruído em áreas habitadas visando o conforto da comunidade - procedimento:

O objetivo da norma é fixar as condições exigíveis para avaliação da aceitabilidade do ruído em comunidade, além disso especifica um método de medição de ruído (ABNT, 2000).

B. NBR 10152:2017 - Acústica – Níveis de Pressão Sonora em Ambientes Internos a Edificações:

A norma foi atualizada recentemente e estabelece os procedimentos técnicos a serem adotados na execução de medições de níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações, bem como os valores de referência para avaliação dos resultados em função da finalidade de uso do ambiente, visando a preservação da saúde e do bem-estar humano.

Os valores de referência para avaliação, estudo e projeto acústico são dados através das grandezas:

- RL_{Aeq} : nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderada em A e integrado em um intervalo de tempo T ;
- RL_{ASmax} : nível máximo de pressão sonora ponderado em A e ponderado em S (*slow*);
- RL_{NC} : curva de avaliação de ruído. O nível NC representativo de um ambiente interno de uma edificação é determinado pela comparação, para cada banda de frequência de 1/1 de oitava, dos níveis de pressão sonora em banda de frequência de 1/1 de oitava representativos de um ambiente, com os níveis de pressão sonora correspondentes às curvas NC.

Essas grandezas são apresentadas na Tabela 1 para ambientes residenciais. Lembrar que admite-se uma tolerância de até 5 dB para RL_{Aeq} e RL_{ASmax} e até 5 para RL_{NC} , por exemplo, no interior dos dormitórios o valor de referência para RL_{Aeq} poderá variar entre 35 dB até 40 dB.

Quando as medições forem realizadas pelo método simplificado ou detalhado, a avaliação é realizada pela comparação dos níveis de pressão sonora, equivalente L_{Aeq} e máximo L_{ASmax} , representativos do ambiente, respectivamente para RL_{Aeq} e RL_{ASmax} . O método simplificado apresenta limitações, pois não possibilita a identificação de sons tonais, de sons com frequências abaixo de 250 Hz, e a identificação do L_{NC} . Quando as medições forem realizadas pelo método detalhado, a avaliação é realizada pela comparação do nível L_{NC} , representativos do ambiente, respectivamente para RL_{NC} .

Tabela 1 – Valores de referência no interior de residências.

Finalidade de uso	Valores de referência		
	RL_{Aeq} dB	RL_{ASmax} dB	RL_{NC}
Dormitórios	35	40	30
Sala de estar	40	45	35
Salas de cinema em casa <i>Home Theater</i>	40	45	35

Fonte: NBR 10152: 2017 (ABNT, 2017) - adaptado.

Os valores superiores aos estabelecidos na Tabela 1 são considerados de desconforto acústico, sem necessariamente implicar em riscos à saúde.

C. NBR 15575:2013 - Edificações habitacionais - Desempenho:

O ponto central desta norma está nas exigências dos usuários para o edifício habitacional e seus sistemas, quanto ao seu comportamento em uso e não na prescrição de como os sistemas são construídos.

A forma de estabelecimento do desempenho é comum e internacionalmente pensada por meio da definição de requisitos (qualitativos), critérios (quantitativos ou premissas) e métodos de avaliação, os quais sempre permitem a mensuração clara do seu cumprimento.

A norma de desempenho traduz as exigências dos usuários em requisitos e critérios, e são consideradas como complementares às normas prescritivas, sem substituí-las. A utilização simultânea delas visa atender às exigências do usuário com soluções tecnicamente adequadas.

De forma não obrigatória, a norma NBR 15575 (ABNT, 2013), Parte 6: Requisitos para os sistemas hidrossanitários (Anexo B1), estabelece parâmetros para que os ruídos gerados por instalações hidrossanitários não produzam níveis de pressão sonora elevados no interior dos dormitórios.

Os requisitos técnicos podem ser observados na Tabela 8. Para determinar essas grandezas, a norma cita dois métodos diferentes:

- método de precisão de engenharia conforme a norma ISO 16032 (ISO, 2004b);
- método de controle conforme a norma ISO 10052 (ISO, 2004a).

Tabela 2 – Limites para ruído de instalações hidrossanitárias.

	Mínimo	Intermediário	Superior
$L_{Aeq,nT}$	37 dB	34 dB	30 dB
$L_{ASmax,nT}$	42 dB	39 dB	36 dB

Fonte: NBR15575-6:2013 (ABNT, 2013) - adaptado.

A medição deve ser realizada durante um ciclo completo de funcionamento, por exemplo, durante todo o ciclo da descarga. Durante a medição, deverá ser medido o nível de pressão sonora equivalente ponderado A (LA_{eq}) e o nível de pressão sonora máximo

ponderado A ($LAS_{\max}$). Na Seção 3.3 será descrito como realizar as medições conforme a norma ISO 16032 (ISO, 2004b).

Existem também normas específicas para projeto e execução de tubulações de água fria, água quente, esgoto e águas pluviais, na qual, fazem orientações para evitar os ruídos e vibrações em tubulações. Seguem comentários:

A. NBR 8160:1999 - Sistemas prediais de esgoto sanitário - projeto e execução:

A norma orienta para serem evitadas passagens das tubulações de esgoto em paredes, rebaixos, forros falsos, etc. de ambientes de permanência prolongada. Caso não seja possível atender essas premissas em projeto, devem ser adotadas soluções acústicas para atenuar os níveis de pressão sonora para os referidos ambientes (ABNT, 1999).

B. NBR 5626:1998 - Instalações predial de água fria:

A norma em questão comenta que as instalações prediais de água fria devem ser projetadas para evitar os níveis de pressão sonora inadequados à ocupação do ambiente.

Informa também que no projeto do alimentador predial deve-se considerar o valor máximo de pressão da água proveniente da fonte de abastecimento. Os componentes devem apresentar funcionamento adequado em pressões altas, principalmente no que se refere a ruídos e vibrações, por exemplo, torneira de bóia.

Deve-se prever soluções para reduzir os efeitos de ruídos e vibrações na localização e na forma de instalação de elevatórias. Estas consistem no bombeamento de água de um reservatório inferior para o superior.

O Anexo C da norma NBR 5626: 1998 (ABNT, 1998) trás uma série de informações para controle de ruído e vibrações em instalações prediais de água fria. Dentre elas, as principais recomendações são:

- dimensionar as tubulações para assumir um limite máximo de velocidade da água de 3 m/s;
- utilização de suportes ou braçadeiras flexíveis capazes de isolar as vibrações;
- utilização de junta de expansão e isolador de vibração tipo mangote de borracha;
- se houver a possibilidade de escolha, utilizar tubos de diâmetros menores e tubos flexíveis para reduzir a transferência de energia sonora da tubulação para a estrutura;

- utilização de apoios anti vibráticos para as bombas e/ou motores do reservatório;
- evitar o fechamento brusco de válvulas, absorver os picos de pressão, projetando as tubulações para evitar trechos muito longos, conduzindo para válvulas e torneiras, e reduzindo as velocidades da água.

C. NBR 7198: 1993 - Projeto e execução de instalações prediais de água quente

Informa que a velocidade das águas nas tubulações não podem ultrapassar 3 m/s (ABNT, 1993), mesmo valor informado na norma NBR 5626 (ABNT, 1998).

D. NBR 10844:1989 - Instalações prediais de águas pluviais:

As instalações de águas pluviais devem ser projetadas para não provocar ruídos excessivos (ABNT, 1989).

2.1.2 Comentários sobre normas internacionais

Em meados dos anos 80, com a publicação da norma ISO 6241 - *Performance standards and factors to be considered preparation and factors to be considered* (ISO, 1984), estabeleceram-se os requisitos de segurança, habitabilidade e sustentabilidade em edificações (PATRÍCIO, 2009). Por conseguinte, em vários países, o desempenho acústico em edificações tornou-se exigências em leis e códigos de obras.

Em Portugal, por exemplo, existe um regulamento com índices de isolamento aos sons aéreos e de impacto, tempo de reverberação e ruído de equipamentos (PATRÍCIO, 2009). Os requisitos exigidos para uma habitação em Portugal são mais rigorosos do que as habitações brasileiras. Além disso, tem-se índices de $D_{nT,w}$ (Diferença Padronizada de Nível Ponderada)¹ para habitações comerciais, enquanto a norma NBR 15575 apresenta índices apenas para edificações residenciais.

No Brasil, por exemplo, o índice mínimo de ruído de impacto para sistemas de pisos separando unidades habitacionais autônomas ($L'_{nT,w}$ - Nível de Pressão Sonora de Impacto

¹ O índice $D_{nT,w}$ representa a Diferença padronizada de nível ponderada, medido em campo, para ruído aéreo, oriundo da transmissão da fonte dodecaédrica omnidirecional no ambiente adjacente ao receptor. Quanto maior o seu valor, menor será a percepção auditiva do ruído aéreo no ambiente receptor, ou seja, menor será o incômodo.

Padrão Ponderado²), em pavimentos distintos, é menor ou igual a 80 dB. Enquanto isso, em Portugal, o mesmo índice é menor ou igual a 60 dB (PATRÍCIO, 2009). Na Áustria, é 50 dB e na Espanha é de 65 dB (JAUREGUI, 2011).

Na Alemanha, existem as premissas da norma DIN 4109 1: 2016-7 (DIN, 2016) e da diretiva VDI 4100: 2012-10 (ASSOCIATION OF GERMAN ENGINEERS, 2010). A DIN 4109 especifica os requisitos mínimos de isolamento acústico para proteger as pessoas da poluição sonora através dos níveis de pressão sonora máximo, ponderado em A e *fast*, $L_{AFmax, n}$, onde considera esse parâmetro acústico decisivo para o ruído causado por instalações hidrossanitárias prediais.

Para a DIN 4109 o $L_{AFmax, n}$ em salas de estar e dormitórios deve ser menor do que 30 dB e para salas de trabalhos deve ser menor do que 35 dB.

Enquanto isso, a diretiva VDI 4100 contém sugestões para aumentar o isolamento acústico em edificações residenciais e, este depende do volume da sala que precisa de proteção, no caso, especifica as grandezas $L_{AFmax, nT}$ ou $L_{Aeq, n}$ menor do que 24 dB para o nível de pressão sonora mais elevado em edificações.

Através desses dados, é possível analisar que os limites mínimos exigidos no Brasil ainda são brandos. E, mesmo assim, existem relutâncias por parte das construtoras para executarem projetos acústicos. Atualmente, atender a norma de desempenho acústico NBR 15575 (ABNT, 2013) não significa garantir o conforto acústico dos usuários.

2.2 RUÍDO EM TUBULAÇÕES

Dentre os possíveis motivos para a geração de ruídos hidrossanitários em instalações prediais, tem-se o escoamento dos fluídos nas tubulações, escoamento nas conexões curvas (representado na Figura 1), escoamento nas louças dos banheiros, vibrações das bombas (recalque, reservatórios inferiores e superiores, salas de reuso, casa bombas de piscina, ...) e vibrações dos motores das banheiras de hidromassagem.

² O índice $L'_{nT,w}$ representa o Nível de pressão sonora de impacto padrão ponderado, medido em campo, oriundo da transmissão decorrente da impactação normalizada pela *Tapping Machine* no piso acima do ambiente receptor. Quanto menor o seu valor, menor será a percepção auditiva do ruído de impacto no ambiente receptor, ou seja, menor será o incômodo.

Figura 1 – Representação do escoamento dos fluídos nas conexões curvas.

Fonte: não identificado - adaptado pela autora.

Ainda, existem as características da edificação como causadoras dos ruídos oriundos nas instalações prediais, como as tubulações instaladas entre forros, fechamento dos shafts sem isolamento acústico, tubulações conectadas rigidamente à estrutura da edificação, entre outros motivos.

De forma geral, o ruído gerado devido a passagem dos fluídos nas tubulações são propagados por duas vias, aérea e estrutural. Segue na Figura 2 a ilustração da propagação sonora via aérea e estrutural.

A propagação via aérea surge como consequência da vibração provocada pelo fluído ao passar pelo interior do tubo, isso faz a parede do tubo vibrar e irradiar energia sonora ao ar. A propagação via estrutural é gerada devido os impactos do fluído contra as paredes internas do tubo, principalmente em tubulações verticais, que se propagam desde a zona de choque para toda a tubulação. Estes golpes se transmitem através da tubulação para a estrutura da edificação, que atua como amplificadora do ruído.

Figura 2 – Propagação do ruído por via aérea e por via estrutural.

Fonte: Catálogo linha PAM - adaptada pela autora.

Em alguns casos, principalmente em edificações de alto padrão, o desempenho acústico de instalações hidrossanitárias prediais é condição para compradores. Sendo, na maioria das vezes, o maior índice de reclamações dos usuários quando não é previsto ações para mitigar esses ruídos e vibrações.

Segue na Seção 2.2.1 a análise sobre a geração dos ruídos e vibrações nas instalações sanitárias prediais e na Seção 2.2.2 as possíveis soluções acústicas para controle dos ruídos e vibrações.

2.2.1 Geração do ruído e vibrações

O ruído de instalações sanitárias prediais é gerado devido o fluxo instável em vários tipos de equipamentos de estrangulamento (constrições ou obstáculos). Em vista disso, para iniciar essa revisão bibliográfica, segue a descrição da dinâmica dos fluídos de tais fluxos, que são dados por parâmetros não-dimensionais (FUCHS, 1983).

A pressão estática (p_w), na tubulação, conduz o fluxo através do dispositivo de estrangulamento ou saída de resistência, com, normalmente $0 < \Delta p = p_w - p_0 < 500$ kPa (FUCHS, 1983). A densidade média do fluido, nessa faixa, pode ser $p_w = \text{constante}$. Tem-se então, a média de fluxo Q [litros/minuto].

Entretanto, sabe-se que apesar de todos os processos importantes no fluxo, o parâmetro mais relevante é a velocidade do fluxo, onde a Equação 1 apresenta a velocidade do fluxo no lugar em que o ruído é gerado (FUCHS, 1983):

$$0 < V = f(\Delta p) < 60 \text{ [m/s]}. \quad (1)$$

Nas situações onde não é possível prever detalhes do fluxo analiticamente, é recomendado procurar parâmetros não dimensionais, a fim de conseguir, pelo menos, classificar o tipo de fluxo. O parâmetro clássico para de fluxo é o número de Reynolds (Re) apresentado na Equação 2 (FUCHS, 1983):

$$\text{Re} = \frac{\rho l V}{\eta}, \quad (2)$$

onde,

η é a viscosidade dinâmica do fluido;

V é a velocidade média do fluido;

l é a dimensão característica do fluxo, ou seja, o diâmetro para o fluxo no tubo;
 ρ é a massa específica do fluido.

Em condições atmosféricas normais, tem-se, para água $Re = 10^3 l(\text{mm})V(\text{m/s})$ e para o ar, $Re = 69 l(\text{mm})V(\text{m/s})$ (FUCHS, 1983).

Para o fluxo de suprimento de água, condição de interesse nesse caso, o sistema é turbulento em todo seu percurso, particularmente nas seções transversais mais pequenas dentro de uma torneira, logo tem-se $Re_{\text{água}} > 10^3$.

O número Mach é outro parâmetro conhecido de fluxo não-dimensional, dado conforme Equação 3,

$$Ma = \frac{V}{c}, \quad (3)$$

onde c é a velocidade do som no fluido.

Entretanto, neste caso, o fluido pode ser considerado como não comprimível (FUCHS, 1983). Do ponto de vista de ruído de fluxo, entretanto, o fluxo tem, necessariamente, que ser considerado como se fosse comprimível, pois, de outra forma, não haveria qualquer geração ou propagação de som.

Números Mach pequenos, então, simplesmente indicam que a eficiência com a qual o som é gerado por esse tipo de processo dinâmico de fluido, deve ser, de fato, muito baixa. $Ma_w \ll 1$ pode, também, dizer algo sobre o tipo de fonte de ruído que pode ser esperada.

A partir das relações da hidrodinâmica, é notável que não seja possível traçar informação acústica como uma função de Δp ou Q , pois esses não são os parâmetros de fluxo mais relevantes (FUCHS, 1983).

Em vez disso, as teorias fundamentais da aeroacústica (ver Tabela 3) servem como medidas da energia (P) radiada por diferentes tipos de fonte de ruído de fluxo. Os respectivos mecanismos de transmissão e as eficiências da radiação acústica η para as três tipologias de fontes sonoras são descritos esquematicamente na Tabela 3.

As fontes sonora apresentadas na Tabela 3 são, normalmente, tratadas simultaneamente. Todas são provocadas por turbulência, representados pela fonte sonora devido o “ruído de jato”, fonte sonora devido as vórtices e fonte sonora do tipo massa flutuante que, às vezes, é chamado de “ruído moldado pelo ar”, por exemplo, quando ressonadores Helmholtz são construídos em fuselagens de aviões (FUCHS, 1983).

Tabela 3 – Fontes de ruídos gerados por turbulência.

Fonte sonora	Mecanismo	Eficiência radiação
Turbulência livre (Quadrupolo)	$\eta \approx \text{Ma}^5$ $P \approx \frac{\eta l^2 V^8}{c^5}$
Vórtices (Dipolo)	$\eta \approx \text{Ma}^3$ $P \approx \frac{\eta l^2 V^6}{c^3}$
Esfera Pulsante (Monopolo)	$\eta \approx \text{Ma}$ $P \approx \frac{\eta l^2 V^4}{c}$

Fonte: (FUCHS, 1993a) - adaptada.

Entre os processos de geração de som transmitidos pela tubulação³ apresentados na Tabela 3, apenas o terceiro tipo de fonte de turbulência é relevante no tema em questão (FUCHS, 1993a) .

A fonte sonora de esfera pulsante tem as seguintes origens (FUCHS, 1993a):

- flutuações da massa de fluido (por exemplo, próximo à área de contração da válvula);
- oscilação de bolhas de gás no fluido (por exemplo, processos de cavitação atrás da contração). A cavitação ocorre quando a água passa para o estado de vapor formando cavidades deste no interior da massa líquida. Isso acontece porque a pressão da água se iguala à sua pressão de vapor. Para que ocorra esse fenômeno é necessária uma velocidade média da água em torno de 8 m/s. No entanto, mesmo à baixa velocidade é possível verificar episódios de cavitação nas partes mais altas das instalações prediais, devido às baixas pressões;
- vibrações de contornos de fluxos (por exemplo, válvula de pistão solta).

Em edificações com válvulas (edificações antigas), o ruído também pode ocorrer devido o golpe de aríete. Ele é causado por alteração na velocidade da água ou pressão na tubulação, devido as alterações bruscas da vazão, por exemplo, fechamento de uma válvula ou interrupção do funcionamento de uma bomba.

Em resumo, o ruído oriundo das instalações hidrossanitárias é dado pela turbulência. A turbulência é causada devido o excesso de velocidade do fluido, pelas cavitações, estrangulamentos, variações de seções e desvios abruptos (LEAL, 2003).

³ Detalhes sobre os mecanismos de geração mecânica de som estão explicitados no Anexo C.

Nas instalações hidrossanitárias onde existem contato rígido das tubulações e conectores com as paredes e/ou estruturas da edificação, tem-se a propagação sonora dos ruídos e vibrações destas instalações (LEAL, 2003; BISTAFA, 2008; QUERIDO, 1993).

Para o ruído oriundo de tubulações com transporte de escoamentos instáveis, a geração sonora baseia-se na aplicação de forças variantes sobre o fluido, sem que haja necessariamente deslocamento global do fluido. Nesse caso, qualquer escoamento instável em contato com uma superfície rígida impõem sobre esta superfície forças variantes no tempo. A superfície impõe ao fluido a mesma força em direção contrária (princípio da ação e reação). A força imposta pela superfície provoca uma variação local da densidade que se manifesta na forma de som, ou seja, o som é gerado pelas forças de reação que atuam localmente no fluido (FAHY, 2000). Em outras palavras, a superfície rígida transforma a energia cinética do escoamento em energia sonora.

O ruído gerado em instalações hidrossanitárias não age apenas como elemento de transmissão de vibrações internas induzidas hidrodinamicamente ou mecanicamente, mas também, como emissor genuíno de sons provenientes de estruturas, que podem ser transferidos diretamente para o elemento estrutural, ou indiretamente as tubulações ou estruturas de instalação, como transmissores intermediários (FUCHS, 1983).

2.2.2 Controle de ruído e vibrações

As soluções acústicas para mitigar os ruídos e vibrações gerados pelas instalações hidrossanitárias são baseadas na premissa de isolar as vibrações e amenizar as transmissões sonoras.

Dar descarga em um vaso sanitário e encher novamente sua caixa é um exemplo de como elementos de uma construção podem ser estimulados quando em contato com acessórios comuns. Por exemplo, durante o ciclo completo da descarga, os mecanismos de estímulo podem ser dados por (FAHY; WALKER, 1998):

1. apertar a alavanca para iniciar o processo de descarga (é a única etapa que pode ser influenciada individualmente);
2. jato de água inicial que sai da válvula de escoamento do depósito;
3. espirros de água dentro do vaso sanitário;

4. ruídos de água e de ar nos tubos. A emissão do ruído nas tubulações depende do material do tubo (aço, ferro fundido ou plástico), da espessura das paredes e do cano, do diâmetro dos tubos, da forma de instalação do sistema (dentro ou na frente da parede), das condições de montagem (com material acústico ou não), da montagem ter sido executada próxima ou longe de um forro e do tipo de enchimento do forro;
5. fechamento da válvula. A interrupção súbita no fluxo da água por meio da válvula de descarga pode causar picos de ruído;
6. espirros de água na base interna da caixa do reservatório;
7. espirros de água na superfície da água da caixa do reservatório;
8. ruído do fluxo do enchimento;
9. fechamento automático da torneira.

Para amenizar as turbulências nas tubulações, algumas bibliografias recomendam utilizar tubos com poucas emendas ou reentrâncias internas e reduzir a velocidade do fluido através de tubos com maiores diâmetros (LEAL, 2003; BISTAFA, 2008; FAHY, 2000).

Entre as principais recomendações para o controle de ruído e vibrações nas tubulações, destacaram-se (FUCHS, 1993b; LEAL, 2003):

- envelopar a tubulação com material poroso e/ou resiliente, onde deve-se abraçar a tubulação por inteiro. O resultado é válido na prática apenas se o contato de quaisquer montagens rígidas ou da tubulação com as estruturas da edificação for totalmente evitado;
- instalar câmaras de ar para amortecer as excitações do fluido na tubulação;
- instalar difusores para evitar o surgimento de bolhas causadas pela alteração de pressão. Essa instalação suaviza a mudança de pressão;
- optar por articulações flexíveis entre a bomba e a tubulação;
- reduzir a cavitação. Para isso, deve-se instalar mecanismo que suavize os estrangulamentos e redutores de pressão;
- utilizar isolantes ou molas para amenizar a conexão rígida entre a tubulação e a estrutura. A Figura 3 apresenta um exemplo de dispositivo para desacoplamento acústico de tubulações .

Figura 3 – Representação desacoplamento da tubulação.

Fonte: Catálogo do fornecedor - Holdrite Silencer Standard Clamps.

Algumas premissas também deveriam ser consideradas em projetos de edificações, e que, normalmente, não são realizadas, como projetar as instalações para que as prumadas não passem por paredes de ambientes com maiores exigências acústicas, por exemplo, dormitórios (FUCHS, 1993b; LEAL, 2003).

Os projetistas deveriam ser instruídos para não cortar as paredes para instalar as tubulações, nem diminuir a espessura das paredes dos shafts. Adicionalmente, a existência de *kits* de isolamento para aparelhos e acessórios que, por sua vez, só terão seus ruídos diminuídos de fato se todo encanamento tiver sido cuidadosamente isolado (FUCHS, 1993b).

Para (LEAL, 2003), as novas tecnologias devem retirar o contato da tubulação com a parede ou a estrutura, apoiando-os em materiais resilientes ou molas.

Já existem, atualmente, uma grande variedade de medidas de controle de ruído disponíveis no mercado. Entretanto, todos os esforços feitos em isolamento, envelopamento e retardadores em uma parte do sistema de instalação, são inválidos ou até mesmo transformados em seu oposto por pontes sólidas em outras partes (FUCHS, 1993b).

Em vista disso, é necessário instruir adequadamente os gerentes de obras e os pedreiros para aplicar as soluções acústicas corretamente. Além disso, os fornecedores dos materiais acústicos devem testar os seus produtos de forma adequada e conveniente para que seja possível comparar os produtos disponíveis no mercado atual. É válido lembrar, que esses terão que estar de acordo com os regulamentos de incêndio.

2.2.3 Soluções disponíveis no mercado brasileiro

Atualmente no Brasil, mesmo com as orientações das normas brasileiras, raramente as construtoras preocupam-se com os ruídos oriundos de instalações hidrossanitárias.

Como consequência disso, os fornecedores de possíveis soluções acústicas de controle de ruído e vibrações não possuem laudos técnicos de desempenho acústico dos materiais ofertados no Brasil até o momento. Em paralelo, as construtoras não exigem dos fornecedores os laudos técnicos, devido a falta de conhecimento e/ou devido a falta de obrigatoriedade da norma NBR 15575 (ABNT, 2013).

Através da revisão bibliográfica realizada sobre as possíveis soluções acústicas para o controle de ruído e vibrações em instalações hidrossanitárias, destacaram-se ⁴ os materiais descritos na Tabela 4 que são fornecidos no Brasil como solução acústica para a técnica de envelopamento. Os nomes dos produtos não são citados na Tabela 4 para não associar com as amostras ensaiadas nesse estudo.

Além dos materiais de envelopamento, o mercado brasileiro conta com possíveis soluções na própria tubulação, como:

- Linha Amanco Silentium com *kit* para desacoplamento e controle do ruído aéreo com tubulações de PVC mineralizado (densidade mais elevada do que o PVC comum) conforme mostra a Figura 4.

Figura 4 – *Kit* de desacoplamento e PVC mineralizado.

Fonte: Catálogo da Linha Amanco Silentium.

⁴ O critério de seleção baseou-se nos materiais acústicos de conhecimento da autora, comumente indicados por projetistas acústicos.

A linha possui junta elástica bilabial integrada, caixa sifonada com prolongador e amortecedor apresentados na Figura 5, defletor acústico para caixa sifonada, suporte para caixa sifonada, amortecedor para vaso sanitário, abraçadeira com borracha, entre outras vantagens do *kit* de desacoplamento.

Figura 5 – Caixa sifonada com prolongador e amortecedor acústico.

Fonte: Catálogo da Linha Amanco Silentium.

- Linha Tigre Redux em PVC com carga mineral, com maior espessura de parede que a Linha Série Normal e a Linha Série Reforçada, com o objetivo de serem utilizadas em condução de efluentes, como trechos de queda, sub-coletores, ramais de despejo e condutores de águas de chuva em obras verticais, afim de reduzir o ruído originados neste fluxo. A linha conta com fixador, abraçadeiras metálicas com borracha, borracha de vedações, anel de borracha e defletor para caixa sifonada conforme é possível analisar na Figura 6, entre outras vantagens do *kit* de desacoplamento. A caixa sifonada com defletor acústico reduz o ruído gerado por escoamento.

Figura 6 – Defletor para caixa sifonada.

Fonte: Catálogo da Linha Tigre Redux.

- Linhas de ferro fundido com junta de materiais resiliente e abraçadeiras anti vibráticas (ver Figura 7), como a Linha PAM Saint-Gobain.

Figura 7 – Abraçadeira anti vibrática.

Fonte: <www.sgpam.com.br> - acessado Novembro/2017.

Tabela 4 – Possíveis materiais para envolvimento acústico disponíveis no mercado brasileiro.

Descrição	Densidades	Espessuras	Reação ao fogo do produto
Tudo bi partido Lã de vidro	60 kg/m ³ 100 kg/m ³	25, 40, 50, 75 e 100 mm	Incombustível
Resíduos de borracha virgem EPDM aglomerado com poliuretano	1100 kg/m ³	2,6 e 3,6 mm	Estudo em desenvolvimento
Camada de feltro acoplada por <i>Heavy-Layer</i> , que é composto por lâminas flexíveis de borracha sintética	6,3 kg/m ²	13 mm	Estudo em desenvolvimento
Manta asfáltica estruturada em não tecido de fibra de vidro, produzida com asfalto especial, acoplada à geotêxtil de alta gramatura	800 kg/m ³ 900 kg/m ³	3 mm 5 mm	Estudo em desenvolvimento
Resíduos de borracha virgem EPDM acoplado com lã de pet	1100 kg/m ³	12,6 mm	Estudo em desenvolvimento
Tubo em espuma elastométrica de células fechadas à base de borracha sintética	50 kg/m ³	20 mm	Estudo em desenvolvimento
Absorvedor acústico flexível de células abertas composto à base de espuma elastomérica processada	110 kg/m ³ 220 kg/m ³	10, 15, 20, 25 e 50 mm	Não inflamável <i>British Standard Class 1</i> UL94-V-0

Fonte: conforme dados disponíveis no *site* dos fornecedores.

3 MÉTODO

É possível verificar neste capítulo o método de trabalho para conseguir analisar e comparar o desempenho acústico entre as possíveis soluções para os ruídos gerados por instalações hidrossanitárias prediais.

O método desse trabalho considera as seguintes etapas, em ordem cronológica:

1. Revisão bibliográfica sobre o tema conforme Capítulo 2;
2. Pesquisa das possíveis soluções acústicas disponíveis no mercado brasileiro conforme descrito no Item 2.2.3;
3. Verificação da disponibilidade e aceitação para participar dos ensaios com os possíveis fornecedores dos produtos para isolamento acústico em tubulações, conforme apresenta a Seção 3.1;
4. Realização da parceria com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) para a realização dos ensaios acústicos na sua câmara de ensaios de ruído hidrossanitário. Na Seção 3.2 é possível verificar as características da câmara de ensaios;
5. Ensaio dos níveis de pressão sonora gerados por instalações hidrossanitárias, no caso em estudo, devido o acionamento da descarga de vaso sanitário e a abertura da torneira, para tubulações aparentes conforme Seção 3.3;
6. Ensaio acústico dos níveis de pressão sonora gerados por instalações hidrossanitárias, no caso em estudo, devido o acionamento da descarga de vaso sanitário e a abertura da torneira, para tubulações com envelopamento acústico conforme Seção 3.3. Utilizou-se a técnica de envelopamento da tubulação com materiais existentes no mercado brasileiro;
7. Tratamento dos dados ensaiados conforme descreve a Seção 3.3.3;
8. Caracterização e análise dos ensaios acústicos para tubo aparente e tubo envelopado conforme apresenta o Capítulo 4;
9. Comparação dos níveis de pressão sonora medidos entre as amostras ensaiadas conforme resultados apresentados no Capítulo 4.2;
10. Determinação da relação custo-benefício entre as amostras conforme apresenta o Capítulo 4.3.

3.1 AMOSTRAS SELECIONADAS

Através da revisão bibliográfica realizada no Item 2.2.3, foram levantadas as possíveis soluções acústicas geralmente utilizadas no Brasil. Com base nisso, foram solicitadas autorizações com os fornecedores para a realização dos ensaios de desempenho acústico em ambiente controlado, no caso, na câmara de ensaios de ruídos hidrossanitários no laboratório do IPT.

Segue na Tabela 5 a descrição da composição de cada amostra ensaiada, suas espessuras e densidades. No total, nove amostras foram ensaiadas e analisadas, sendo os principais produtos disponíveis no mercado brasileiro atualmente.

Os relatórios de ensaios acústicos através do Laboratório de Conforto e Sustentabilidade dos Edifícios - CETAC - IPT foram emitidos para cada fornecedor envolvido, não necessariamente para cada amostra. O trabalho dispõe com a participação de cinco fornecedores, sendo nove amostras ensaiadas e seis relatórios emitidos para cada amostra.

Tabela 5 – Amostras ensaiadas em ambiente idêntico e controlado.

Amostras	Descrição	Espessura	Densidade
A	Resíduo de borracha virgem EPDM e grânulos de pneu reciclado, aglomerado com poliuretano	Manta: 2,6 mm Curva e caixa sifonada: 100 mm	1100 kg/m ³
B	Espuma elastomérica de células fechadas	Mantas e tubos: 10 mm	50 kg/m ³
C	Espuma elastomérica de células fechadas	Mantas e tubos: 20 mm	50 kg/m ³
D	Espuma elastomérica de células abertas	Manta: 15 mm	120 kg/m ³
E	Lã de vidro	Tubos: 25 mm	75 kg/m ³
F	Manta de não tecido (feltro), recoberta com placa de compósito elastomérico (manta de borracha sintética de alta densidade - Heavy-layer) e uma folha de material aluminizado autocolante	Total: 13 mm	Densidade superficial: 6,3 kg/m ²
G	Polietileno e massa verde	Total: 5 mm	Sem informação
H	Polietileno, massa verde e espuma elastomérica de células fechadas	Total: 7,5 mm	Sem informação
I	Manta asfáltica estruturada em não tecido de fibra de vidro, produzida com asfalto especial, acoplada à geotêxtil de alta gramatura	Total: 3mm	800 kg/m ³

Fonte: conforme dados informados pelos fornecedores das amostras ensaiadas.

3.1.1 Amostra A

As medições foram realizadas no dia 03 de julho de 2017, para os tubos envelopados e no dia 06 de julho de 2017, para os tubos aparentes¹. A amostra em questão é composta por resíduo de EPDM, aglomerado com poliuretano. A espessura da manta no entorno dos tubos é 2,6 mm e para a curva e a caixa sifonada é 100 mm.

A instalação da amostra A é simples e rápida, não causa alergia e é atóxica². Durante a sua instalação, deve-se envelopar a tubulação de forma que a manta fique sobreposta nas emendas e sua fixação é realizada com a ajuda de braçadeiras plásticas.

Para evitar o problema de vibrações, deve-se instalar o suporte metálico de fixação do sistema sobre a manta acústica. Item válido para todas as amostras.

3.1.2 Amostra B

A Amostra B é composta por espuma elastomérica de células fechadas com espessura de 10 mm no formato de tubos e mantas, instalado com cinta auto adesiva de espuma elastomérica. Pode-se visualizar na Figura 3.1.2 a Amostra B instalada no IPT. Os ensaios foram realizados no dia 02 de agosto de 2017, para a tubulação envelopada e no dia 01 de novembro de 2017, para a tubulação aparente³.

¹ Resultados conforme relatório de medição do IPT números: 20664-204, 20665-204, 20666-204 e 20680-204.

² Dados extraídos do catálogo do produto disponível no *site* do fornecedor.

³ Resultados conforme os relatórios de medições do IPT números: 20861-204, 20862-204, 20865-204 e 20866-204.

Figura 8 – Imagem da Amostra B instalada.

Fonte: arquivo pessoal da autora.

O produto é flexível, impermeável e não causa alergia. Possui rápida e fácil instalação. É fornecido em tubos pré fabricados conforme as tubulações da obra em questão. Para sua instalação, deve-se encamisar o tubo em todo o seu comprimento e após realizar a fixação das tubulações. Se as tubulações já estiverem instaladas, o produto será cortado *in loco*, transformando-o em calha, assim sendo, deve-se colar suas faces ou utilizar a cinta auto adesiva de espuma elastomérica, sem deixar frestas. Os abafadores são específicos para cada caixa sifonada.

3.1.3 Amostra C

A Figura 9 apresenta a Amostra C instalada no IPT. Os ensaios foram realizados no dia 07 de agosto de 2017, para a tubulação envelopada e no dia 01 de novembro de 2017, para a tubulação aparente⁴. A amostra em questão é igual a Amostra B, composta por espuma elastomérica de células fechadas, porém na espessura de 20 mm para a manta e caixa sifonada.

⁴ Resultados conforme relatórios de medições do IPT, números: 20863-204, 20864-204, 20865-204 e 20866-204.

Figura 9 – Imagem da Amostra C instalada.

Fonte: arquivo pessoal da autora.

3.1.4 Amostra D

A Amostra D é composta por espuma elastomérica de células abertas, densidade nominal 120 k/m^3 , espessura de 15 mm, para a manta e caixa sifonada instalado com adesivo específico do produto. A Figura 10 apresenta a Amostra D instalada no IPT. Os ensaios foram realizados no dia 22 de agosto de 2017, para a tubulação envelopada e no dia 01 de novembro de 2017, para a tubulação aparente ⁵.

⁵ O fornecedor do material optou por não elaborar o relatório de medição para a amostra envelopada. Para os resultados sem envelopamento utilizaram-se os relatórios de medições do IPT números: 20865-204 e 20866-204.

Figura 10 – Imagem da Amostra D instalada.

Fonte: arquivo pessoal da autora.

O produto é flexível e não causa alergia. Possui rápida e fácil instalação. É fornecido em mantas. Para sua instalação, deve-se enrolar o tubo em todo o seu comprimento e colar as suas faces, sem deixar frestas. O material é não inflamável - British Standard Class 1, UL 94-V-0, em caso de incêndio seu comportamento é autoextinguível, não goteja e não propaga chamas. Possui absorção da água, aproximadamente, 1,1% volume - AGI Q 136⁶.

3.1.5 Amostra E

A Figura 11 apresenta a Amostra E instalada no IPT. Os ensaios foram realizados no dia 06 de setembro de 2017, para a tubulação envelopada e no dia 11 de outubro de 2017, para a tubulação sem envelopamento⁷. A amostra em questão é composta por calha bi-partida, com massa específica média dos corpos de prova igual a 75 kg/m³, para 25 mm de espessura.

⁶ Dados extraídos do catálogo do produto disponível no *site* do fornecedor.

⁷ Resultados conforme relatórios de medições do IPT, números: 20917-204, 20918-204, 20919-204 e 20920-204.

Figura 11 – Instalação da Amostra E.

Fonte: arquivo pessoal da autora.

A amostra é fornecida em elementos bi-partidos cilíndricos, para isolamento térmico em baixas e altas temperaturas e para isolamento acústico. Por serem produtos constituídos de lã de vidro, são resistentes ao fogo (incombustível), não absorvem umidade, não sofrem danos estruturais, podem causar irritação temporária na pele, podem causar irritação ocular, podem causar irritação no sistema respiratório, não são atacados por roedores ou insetos, não atacam as superfícies com as quais estão em contato e possuem ausência de partículas não fibradas⁸.

3.1.6 Amostra F

Os ensaios da Amostra F foram realizados no dia 15 de setembro de 2017, para a tubulação envelopada e no dia 01 de dezembro de 2017, para a tubulação sem envelopamento⁹. A amostra em questão é composta por feltro de 10 mm de espessura e 1,55 kg/m², recoberta por placa de compósito elastomérico de alta densidade, 2,7 mm de espessura e

⁸ Dados extraídos do catálogo do produto disponível no *site* do fornecedor.

⁹ Resultados conforme relatórios de medições do IPT, números: 20954-204, 20955-204, 20956-204 e 20957-204

4,6 kg/m² e, recoberta por folha de alumínio autocolante de espessura, aproximadamente de 0,4 mm . A Figura 12 apresenta a Amostra F instalada no IPT.

O produto é fornecido em manta com única camada composta por feltro recoberto por compósito elastomérico de alta densidade (*heavy-layer*), assim, durante a instalação, deve-se envolver toda a tubulação de forma que a manta fique sobreposta nas emendas. Sua instalação é de fácil manuseio e não causa alergia.

Figura 12 – Processo de instalação da Amostra F.

Fonte: arquivo pessoal da autora.

3.1.7 Amostra G

A amostra em questão é composta por camada interna de polietileno e camada externa por massa verde, espessura total do sistema é 5 mm. A Figura 13 apresenta a Amostra G sendo instalada no IPT. Os ensaios da Amostra G foram realizados no dia 20 de setembro de 2017, para a tubulação envelopada e no dia 01 de novembro de 2017, para a tubulação sem envelopamento¹⁰.

¹⁰ O fornecedor do material optou por não elaborar o relatório de medição para a amostra envelopada. Para os resultados sem envelopamento utilizaram-se os relatórios de medições do IPT números: 20865-204 e 20866-204.

O produto é fornecido em rolos separados para cada camada. Assim, durante a instalação, deve-se envolver toda a tubulação de forma que a manta fique sobreposta nas emendas para as duas repetições (camada interna e após para camada externa).

Figura 13 – Processo de instalação da Amostra G.

Fonte: arquivo pessoal da autora.

3.1.8 Amostra H

A amostra H é composta por camada interna de polietileno, camada mediana por massa verde e camada externa por espuma elastomérica de células fechadas, espessura total do sistema é, aproximadamente, 7,5 mm. A Figura 14 apresenta a primeira camada da Amostra H sendo instalada no IPT. Os ensaios da Amostra H foram realizados no dia 29 de setembro de 2017, para a tubulação envelopada e no dia 01 de novembro de 2017, para a tubulação sem envelopamento¹¹.

O produto é fornecido em rolos e mantas para cada camada. Assim, durante a instalação, deve-se envolver toda a tubulação de forma que a manta fique sobreposta nas emendas para três repetições (camada interna, mediana e camada externa).

¹¹ O fornecedor do material optou por não elaborar o relatório de medição para a amostra envelopada. Para os resultados sem envelopamento utilizaram-se os relatórios de medições do IPT números: 20865-204 e 20866-204.

Figura 14 – Processo de instalação da Amostra H.

Fonte: arquivo pessoal da autora.

3.1.9 Amostra I

A Amostra I é composta por manta asfáltica estruturada em não tecido de fibra de vidro, produzida com asfalto especial, acoplada à geotêxtil de alta gramatura, em espessura de 3 mm, densidade 800 kg/m^3 , com uma manta de material aluminizado autocolante nas emendas. Os ensaios da Amostra I foram realizados no dia 16 de novembro de 2017, para a tubulação envelopada e no dia 19 de dezembro de 2017, para a tubulação sem envelopamento¹². A Figura 15 apresenta a amostra I instalada no IPT.

O produto é fornecido em rolos com camada única, apresenta rápida e fácil instalação. No caso, a instalação deve manter a parte asfáltica para o lado externo ¹³.

¹² Os resultados com e sem envelopamento são baseados nos relatórios de medições do IPT números: 21029-204, 21030-204, 21031-204 e 21032-204.

¹³ Informações extraídas do *site* do fornecedor.

Figura 15 – Amostra I instalada.

Fonte: arquivo pessoal da autora.

3.2 A CÂMARA

Para verificar e comparar o desempenho acústico das amostras ensaiadas, foram realizados ensaios acústicos em ambiente controlado e idêntico, no caso, na câmara de ensaios para ruídos hidrossanitários do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

Assim sendo, para realização das medições acústicas, firmou-se uma parceria entre os fornecedores dos materiais acústicos, com a autora e com o IPT. A instalação das amostras na câmara concedeu-se pelos próprios fornecedores e as medições pela própria equipe do IPT, ambas etapas acompanhadas pela autora.

A câmara para ensaios hidrossanitários possui seção horizontal da ordem de 4,3 m x 4,8 m e pé-direito aproximado de 2,6 m. Logo, seu volume é, aproximadamente, 54 m³. Segue na Figura 16 a imagem da câmara no pavimento inferior. O pavimento superior conta com um banheiro experimental com chuveiro, torneira marca Esteves e vaso sanitário com caixa acoplada, marca DECA 6,0 Lpf.

Figura 16 – Pavimento inferior da câmara de ensaios hidrossnaitários do IPT.

Fonte: <http://www.ipt.br/noticias_interna.php?id_noticia=1140> - Outubro 2017.

A laje é desvinculada da estrutura, havendo material resiliente em sua base de contato com a viga e nas suas bordas laterais. É composta por estrutura metálica e laje de concreto convencional com espessura da ordem de 16 cm. Os fechamentos verticais internos são feitos de placas duplas de gesso acartonado com interior preenchido com lã de rocha, espessura total de 12 cm. A porta dupla é corta-fogo.

Segue o quantitativo para as tubulações instaladas na câmara:

- Para diâmetro nominal (DN): 40 mm, tem-se:
 - 1 Cotovelo 90°¹⁴ ;
 - 1 Cotovelo 45°;
 - 1,2 metro de tubo.
- Para diâmetro nominal (DN): 50 mm, tem-se:
 - 2 Cotovelos de 45°;
 - 1 metro de tubo.
- Para diâmetro nominal (DN): 100 mm, tem-se:
 - 1 luva¹⁵;
 - 1 Junção invertida 100 x 50 (“Y” de DN100 com redução para DN50);

¹⁴ Cotovelo: Mudança de direção à 45 graus ou 90 graus, na mesma bitola.

¹⁵ Luva: Serve para conectar dois elementos de rosca macho. Para emendar dois tubos, por exemplo.

- 1 Cotovelo de 90°;
- 1 metro de tubo.

O tempo de reverberação da sala inferior, onde são realizadas as medições, em 500 Hz é, aproximadamente, 2,38 s. O gráfico apresentado na Figura 17 mostra o tempo de reverberação medido para cada fornecedor e a média entre eles, em bandas de frequência de 1/3 de oitava.

Figura 17 – Tempo de reverberação da câmara de ensaios do IPT, para cada fornecedor e a sua média.

Fonte: autora, conforme medições realizadas.

A localização¹⁶ da câmara contribui com o baixo ruído de fundo. Para as medições desse estudo, realizaram-se as medições de ruído de fundo para cada fornecedor e em cada situação devido o acionamento da descarga e devido a abertura da torneira.

Segue na Figura 18 a caracterização do ruído de fundo da câmara medido para cada fornecedor devido o acionamento da descarga e a sua média, em bandas de frequência de 1/3 de oitava. Na Figura 19 segue o ruído de fundo para as medições realizadas devido a abertura da torneira. Por fim, na Figura 20 a comparação da média do ruído de fundo para as medições devido o acionamento da descarga do vaso sanitário e a abertura de torneira.

¹⁶ Localizada na Cidade Universitária da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP

Figura 18 – Ruído de fundo da câmara de ensaios do IPT, para as medições devido o acionamento da descarga do vaso sanitário.

Fonte: autora, conforme medições realizadas.

Figura 19 – Ruído de fundo da câmara de ensaios do IPT, para as medições devido o acionamento da torneira.

Fonte: autora, conforme medições realizadas.

Figura 20 – Ruído de fundo da câmara de ensaios para ruído hidrossanitário do IPT.

Fonte: autora, conforme medições realizadas.

3.3 MÉTODO DAS MEDIÇÕES

As medições para quantificar os níveis de pressão sonora, $L_{Aeq, nT}$ e $L_{ASmax, nT}$, são baseadas nas normas internacionais, nas quais, fornecem as diretrizes e métodos de medições (PAVANELLO; PAIXÃO, 2014). Não existem normas brasileiras sobre medições de ruídos de instalações hidrossanitárias.

Há duas normas internacionais que descrevem o procedimento de medição do ruído hidrossanitário em edificações, a ISO 16032 (ISO, 2004b) e a ISO 10052 (ISO, 2004a), que correspondem, respectivamente, ao método de engenharia e ao método de controle (descrito na Seção C).

A precisão do método de controle é inferior, isto é, seus resultados apresentam maior incerteza. Por isso, o método de engenharia será aplicado.

3.3.1 A ISO 16032: 2004

O método de medição acústica especificada na ISO 16032 (ISO, 2004b) baseia-se na medição do nível de pressão sonora no interior do ambiente adjacente durante um ciclo

completo de funcionamento para equipamentos que geram ruídos descontínuos como as descargas hidráulicas.

Durante o ensaio, as portas e janelas dos cômodos envolvidos devem permanecer fechadas. O equipamento de medição, sonômetro, deve ser calibrado antes e depois das medições. A ISO 16032 (ISO, 2004b) recomenda a medição das seguintes grandezas:

- Nível de pressão sonora máximo $L_{\max}$, em bandas de frequência de oitava, na ponderação A, medido em bandas de frequência de oitava em uma faixa de frequência de 63 Hz a 8000 Hz. Pode ser usado como tempo de integração S (*slow*) ou F (*fast*);
- Nível de pressão sonora máximo $L_{\max}$, em bandas de frequência de oitava, na ponderação C, medido em bandas de frequência de oitava em uma faixa de frequência de 31,5 Hz a 8000 Hz. Pode ser usado como tempo de integração S (*slow*) ou F (*fast*);
- Nível de pressão sonora equivalente contínuo L_{eq} , em bandas de frequência de oitava, na ponderação A ou C;
- Nível de pressão sonora equivalente residual (com os equipamentos desligados, ou seja, ruído de fundo) L_{eq} em bandas de frequência;
- Tempo de reverberação (T_{60}) da sala receptora em bandas de frequência, realizada conforme a ISO 3382-2 (ISO, 2012).

Sabendo que a grandeza que melhor expressa a sensação sonora do ruído provocada no ouvinte é o $L_{\text{eq},nT}$ (PAVANELLO; PAIXÃO, 2014; PAUL, 2013), foi medido o nível de pressão sonora equivalente em ponderação A (L_{Aeq}) e o nível de pressão sonora máximo em ponderação A (L_{ASmax}).

Além dessas medições, também foi medido o nível de pressão sonora equivalente residual em ponderação A.

Assim, os resultados das medições L_{Aeq} e L_{ASmax} do ciclo de operação dos equipamentos são corrigidos conforme os resultados do L_{Aeq} residual. E, uma segunda correção é realizada conforme as condições acústicas da sala receptora, ou seja, conforme a reverberação da sala. Esses valores corrigidos, podem ser comparados com as recomendações da norma NBR 15575 (ABNT, 2013).

Porém, não se deve descartar as medições das outras grandezas, visto que para detalhar o ruído dessas instalações hidrossanitárias e tomar medidas em relação ao seu

isolamento, o $L_{F_{\max}, nT}$ é uma grandeza útil de ser conhecida e analisada (PAVANELLO; PAIXÃO, 2014).

É importante ressaltar que a medição utilizando a ponderação C também é importante, pois ela proporciona uma identificação mais detalhada em baixas frequências.

Pode-se separar a norma ISO 16032: 2004 em 4 etapas:

1. Determinação do canto a ser utilizado - Ponto P1:

O microfone, para as medições do canto, deve estar a uma distância de, no mínimo, 0,50 m das paredes e 0,20 m de quaisquer obstáculos. Em relação à altura, o ideal é que esteja a 0,50 m ou até no máximo 1,50 m acima do piso. A altura adotada deve ser a mesma em todos os cantos. Se algum dos cantos estiver dentro do campo direto de alguma fonte sonora da sala, ele deve ser desprezado.

Deve-se realizar medições do nível de pressão sonora máximo, ponderado em C, $L_{C_{\max}}$ em todos os cantos da sala. No final das medições, deve-se selecionar como Ponto P1 de medição o canto que apresentar maior valor de $L_{C_{\max}}$;

2. Determinação dos pontos no campo reverberante - Pontos P2 e P3:

Deve-se manter 1,5 m de distância mínima entre os pontos selecionados e 0,75 m de distância mínima das paredes. Em ambientes pequenos, esta distância pode ser de 0,5 m. Altura do microfone pode variar entre 0,5 m à 1,5 m. Porém, todas as medições devem ser realizadas na mesma altura.

3. Determinação do número de repetições em cada ponto:

Deve-se realizar duas medições consecutivas do nível de pressão sonora da grandeza desejada ($L_{A_{eq}, nT}$ e/ou $L_{AS_{\max}, nT}$), no ponto P1. Após, calcula-se a diferença (D) entre as duas medições, onde:

$D \leq 1$ dB: realiza-se apenas 1 medição em cada ponto;

$D > 1$ dB: o número de repetições em cada ponto será igual ao D , sempre arredon-

dado para cima.

Lembrar que a norma indica a medição do nível de pressão sonora sem ponderação em banda de oitava para as três posições (P1, P2 e P3). Após, deve-se realizar a média entre as posições medidas e arredondar os níveis com uma casa decimal.

4. Determinação do ruído de fundo:

Realizam-se medições sem o ruído do equipamento nos mesmos pontos P1, P2 e P3, durante 30 segundos.

A norma ressalta que no caso das instalações hidrossanitárias, estas devem ser medidas em cômodos vizinhos ou adjacentes onde estão instaladas.

3.3.2 Método utilizado para a medição das amostras

O procedimento de medição foi baseado na norma ISO 16032: 2004 (ISO, 2004b) para determinar os seguintes parâmetros acústicos:

- nível padronizado de pressão sonora equivalente, em banda de frequência 1/1 oitava, $L_{eq, nT}$;
- nível padronizado de pressão sonora equivalente ponderado em A, $L_{Aeq, nT}$;
- nível padronizado de pressão sonora máximo, com ponderações temporal S e ponderado em A, $L_{ASmax, nT}$;
- tempo de reverberação (T_{60}) da sala receptora em bandas de frequência, realizada conforme a ISO 3382-2 (ISO, 2012).

Para isso, foram realizadas medições na câmara de ruído hidrossanitário do IPT nas seguintes posições conforme planta apresentada na Figura 21, sendo:

- Ponto P1 dado pelo maior valor de L_{Cmax} entre os pontos C1, C2, C3 e C4;
- Pontos P2 e P3 que correspondem as duas posições no campo reverberante;
- 03 posições diferentes para a fonte sonora omnidirecional para obter o tempo de reverberação para cada amostra.

Figura 21 – Posições dos microfones e das fontes sonoras, em centímetros.

Fonte: autora, conforme medições realizadas.

Na Tabela 6 é possível verificar como os dados foram organizados para as medições devido o acionamento da descarga de vaso sanitário e devido a abertura da torneira.

Tabela 6 – Exemplo de disposição dos resultados técnicos para cada amostra ensaiada.

Frequência Hz	Descarga ou Torneira						Ruído de fundo		
	L_{Zeq}			L_{Zmax}			L_{Zeq}		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
63									
125									
250									
500									
1000									
2000									
4000									
8000									
Global (A)									

Fonte: desenvolvido pela autora.

O ciclo de operação padrão do sistema consiste no acionamento da descarga e enchimento da caixa de descarga, sendo no total 30 segundos. Para a torneira, consiste no acionamento da torneira temporizada, sendo 5 segundos.

Os instrumentos utilizados para a realização das medições, foram:

- Sonômetro 01 dB Blue Solo, MNS-03, calibração IPT número 152 131-101 com validade em 07/2018;
- Sonômetro filtro 01 dB Blue Solo, MNS-03, calibração IPT número 153 035-101 com validade em 08/2018;
- Calibrador acústico 01 dB CAL 21, CNS-09, calibração IPT número 152 155-101 com validade em 06/2018;
- Fonte sonora omnidirecional Brüel & Kjær - OmniPower 4292.

3.3.3 Tratamento dos dados

Para obter o nível de pressão sonora equivalente ponderado em A, $L_{Aeq, nT}$ e o nível de pressão sonora máximo, *slow*, ponderado em A, L_{ASmax} , devido o acionamento da descarga de vaso sanitário ou devido a abertura da torneira, realizaram-se os seguintes quesitos:

1. realizar a média entre os resultados medidos nos três pontos de medições para cada grandeza, por frequência, através da Equação 4:

$$L_{Zeq}média = 10 \log_{10} \left(\frac{L_{Zeq}(P1) + L_{Zeq}(P2) + L_{Zeq}(P3)}{3} \right); \quad (4)$$

onde,

$L_{Zeq}média$, é a média dos níveis de pressão sonora equivalente entre os pontos P1 $L_{Zeq}(P1)$, P2 $L_{Zeq}(P2)$ e P3 $L_{Zeq}(P3)$ em dB;

2. realizar o mesmo procedimento para obter a média entre as três medições de níveis de pressão sonora, *slow*, máximo L_{Smax} e para as três medições de ruído de fundo L_{Zeq} ;

3. realizar a correção do ruído de fundo:

- se o nível de pressão sonora do ruído de fundo for 10 dB ou mais abaixo do nível de pressão sonora do equipamento de serviço, não será feita nenhuma correção, ou seja:

$$L_{Z \text{ eq corrigido}} = L_1; \quad (5)$$

onde,

$L_{Z \text{ eq corrigido}}$ é o nível de pressão sonora corrigido, em dB;

L_1 é o nível de pressão sonora medido em bandas de frequência de oitava do equipamento de serviço incluindo o ruído de fundo, em dB.

- se o nível de pressão sonora do ruído de fundo for de 4 dB a 10 dB abaixo do nível de pressão sonora do equipamento de serviço, o nível de pressão sonora medido deve ser corrigido conforme a Equação 6:

$$L_{Z \text{ eq corrigido}} = L_1 - \left(-10 \log \left(1 - 10^{-0,1 \times (L_1 - L_2)} \right) \right); \quad (6)$$

onde, L_2 é o nível de pressão sonora do ruído de fundo, em bandas de frequência de oitava, em dB.

- se o nível de pressão sonora do ruído de fundo for menor do que 4 dB abaixo do nível de pressão sonora do equipamento de serviço, o nível de pressão sonora medido deve ser corrigido conforme a Equação 7:

$$L_{Z \text{ eq corrigido}} = L_1 - 2, 2. \quad (7)$$

Neste caso, o relatório deve informar que o resultado da medição é influenciado pelo ruído de fundo.

4. realizar a padronização dos resultados conforme a Equação 8:

$$L_{Z \text{ eq, nT}} = L_{Z \text{ eq corrigido}} - 10 \log_{10} \left(\frac{T_{60}}{0,5} \right); \quad (8)$$

onde, $L_{Z \text{ eq, nT}}$ é o nível de pressão sonora padronizado;

T_{60} é o tempo de reverberação medido na sala receptora conforme a norma ISO 3382 (ISO, 2012).

5. realizar a ponderação A dos resultados em bandas de frequência de oitava para obter o nível de pressão sonora equivalente padronizado, ponderado em A, $L_{Aeq, nT}$.
6. o mesmo procedimento é realizado para obter o $L_{ASmax, nT}$.

Em vista disso, pode-se analisar na Tabela 7 o exemplo genérico da disposição dos resultados medidos para cada amostra, tubo aparente e tubo envelopado, para ruído oriundo devido o acionamento da descarga de vaso sanitário e devido a abertura da torneira.

Tabela 7 – Exemplo genérico para o tratamento dos dados medidos para cada amostra, tubo aparente e tubo envelopado.

Frequência Hz	Descarga ou descarga							L _{Smax} Corrigido	L _{Zeq} Corrigido	L _{Smax} Corrigido	T ₆₀	L _{Zeq,nT}	L _{Smax,nT}	
	Com ou sem envelopamento				Ruído de fundo									
	L _{Zeq}		L _{Smax}		L _{Zeq}									
	P1	P2	P3	Média	P1	P2	P3	Média	P1	P2	P3	Média		
63														
125														
250														
500														
1000														
2000														
4000														
8000														
Global (A)														

Fonte: desenvolvido pela autora.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segue no Capítulo 4 os resultados das medições realizadas para investigação dos materiais de envelopamento acústico, os quais foram disponibilizados para esse estudo. Primeiramente, tem-se na Seção 4.1 a análise individual para cada amostra, na Seção 4.2 a comparação dos resultados e, por fim, na Seção 4.3 a relação custo-benefício.

Os resultados apresentados nesse capítulo já possuem as devidas correções em função do ruído de fundo e do tempo de reverberação. Logo, podem ser comparados com as recomendações da norma de desempenho¹ (ABNT, 2013) conforme valores apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Limites para ruído de instalações hidros-sanitárias.

	Mínimo	Intermediário	Superior
$L_{Aeq,nT}$	37 dB	34 dB	30 dB
$L_{ASmax,nT}$	42 dB	39 dB	36 dB

Fonte: NBR15575-6:2013 (ABNT, 2013) - adaptado.

4.1 RESULTADOS INDIVIDUAIS

Para melhor efeito de comparação dos resultados, todos os ensaios utilizaram a mesma tubulação, composta por PVC. É possível observar na Figura 4.1 a tubulação aparente instalada no IPT.

Figura 22 – Tubulação aparente instalada no IPT - São Paulo/SP.

Fonte: arquivo pessoal da autora.

¹ Lembrar que os resultados apresentados são medidos em ambiente idêntico e controlado, sem a presença de forro entre os pontos de medição e a tubulação.

4.1.1 Amostra A

Segue na Tabela 9 os resultados medidos para a Amostra A, para as grandezas acústicas $L_{Zeq,nT}$, $L_{Aeq,nT}$ e $L_{ASmax,nT}$, em decibel (dB).

Tabela 9 – Resumo dos resultados medidos para a Amostra A, para descarga e torneira, em dB.

	Grandeza	Tubulação aparente	Tubulação com envelopamento
Descarga	$L_{Zeq,nT}$	52	51
	$L_{Aeq,nT}$	53	52
	$L_{ASmax,nT}$	56	55
Torneira	$L_{Zeq,nT}$	34	30
	$L_{Aeq,nT}$	34	30
	$L_{ASmax,nT}$	39	33

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

Comparando os resultados apresentados na Tabela 9 com os valores recomendados pela norma NBR 15575 (ABNT, 2013), somente os valores de $L_{Aeq,nT}$ e $L_{ASmax,nT}$ devido a abertura da torneira atendem os critérios da norma. Os valores devido o acionamento da descarga do vaso sanitário não atendem o desempenho mínimo, mesmo com o envelopamento das tubulações.

Os resultados devido a abertura da torneira sem envelopamento na tubulação atende o desempenho intermediário da norma, para $L_{Aeq,nT}$ e $L_{ASmax,nT}$, e para as tubulações com envelopamento, atende o desempenho superior da norma.

Na Figura 23 é possível observar os resultados da Amostra A com e sem envelopamento para o ruído gerado devido o acionamento da descarga do vaso sanitário. É notável uma pequena redução nos níveis de pressão sonora com o envelopamento acústico, no caso, tem-se 1 dB para a diferença global entre os níveis com e sem o envelopamento. Para a frequência de 63 Hz, pode-se notar uma pequena amplificação do resultado com o envelopamento. Entretanto, para as demais frequências, notou-se uma redução dos níveis, principalmente entre 500 Hz a 1000 Hz, na qual engloba a faixa de frequência em que a audição humana é mais sensível ².

² Audição humana é mais sensível entre 500 Hz a 8000 Hz - Ver Anexo D.

Figura 23 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra A, para o ruído gerado por descarga.

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

A Figura 24 apresenta os resultados da Amostra A para o ruído gerado devido a abertura da torneira. Neste caso, percebe-se uma redução dos níveis de pressão sonora com o envelopamento acústico de 4 dB para a diferença global entre os níveis com e sem envelopamento. É visível a redução sonora para as frequências entre 250 Hz a 8000 Hz, principalmente em 1000 Hz.

Figura 24 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra A, para o ruído gerado por abertura da torneira.

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

4.1.2 Amostra B

Segue na Tabela 10 o resumo dos resultados medidos para a Amostra B, para $L_{Zeq,nT}$, $L_{Aeq,nT}$ e $L_{ASmax,nT}$, em decibel (dB).

Tabela 10 – Resumo dos resultados medidos para a Amostra B, para descarga e torneira, em dB.

	Grandeza	Tubulação aparente	Tubulação com envelopamento
Descarga	$L_{Zeq,nT}$	49	48
	$L_{Aeq,nT}$	50	48
	$L_{ASmax,nT}$	53	56
Torneira	$L_{Zeq,nT}$	32	32
	$L_{Aeq,nT}$	32	31
	$L_{ASmax,nT}$	36	36

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

Comparando os resultados apresentados na Tabela 10 com os valores recomendados pela norma NBR 15575 (ABNT, 2013), somente os valores de $L_{Aeq,nT}$ e $L_{ASmax,nT}$ devido a abertura da torneira atendem os critérios da norma.

Os valores devido o acionamento da descarga não atendem o desempenho mínimo, mesmo com o envelopamento das tubulações.

Os resultados devido a abertura da torneira, $L_{Aeq,nT}$, sem e com envelopamento atendem o desempenho intermediário da norma. Para a abertura da torneira, sem e com envelopamento, para $L_{ASmax,nT}$, atendem o desempenho superior da norma.

Na Figura 25 é possível observar os resultados da Amostra B para o ruído gerado devido o acionamento da descarga do vaso sanitário.

Pode-se notar uma pequena redução para a diferença dos níveis globais de pressão sonora, menor do que 1 dB, com o envelopamento acústico. Entre as frequências 63 Hz a 1000 Hz, pode-se notar a amplificação dos resultados com o envelopamento acústico. Entretanto, para 4000 Hz e 8000 Hz, notou-se uma redução significativa dos níveis.

Devido à pequena diferença entre o ruído com o acionamento da descarga e o ruído de fundo para a frequência de 63 Hz, o nível presente nessa frequência representa o limite superior do ruído para tubulação aparente. Fato que pode justificar a amplificação dos resultados com envelopamento acústico para 63 Hz.

Figura 25 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra B, para o ruído gerado por descarga.

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

Nos resultados apresentados na Figura 26 para o ruído gerado devido a abertura da torneira, é notável uma redução dos níveis de pressão sonora com o envelopamento acústico, no caso, 1 dB para a diferença global entre os níveis, com e sem envelopamento

acústico. A maior diferença é verificada na frequência de 8000 Hz. Entre as frequências 63 Hz a 2000 Hz, é notável a amplificação dos níveis de pressão sonora.

Devido à pequena diferença entre o ruído com o acionamento da torneira e o ruído de fundo para a frequência de 250 Hz, o nível presente nessa frequência representa o limite superior do ruído para tubulação envelopada.

Adicionalmente, devido à pequena diferença entre o ruído com o acionamento da torneira e o ruído de fundo para as frequências de 63 Hz e 125 Hz, os níveis presentes nessas frequências representam os limites superiores do ruído para tubulação aparente. Isto pode justificar a amplificação dos níveis para 63 Hz, 125 Hz e 250 Hz.

Figura 26 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra B, para o ruído gerado por abertura da torneira.

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

4.1.3 Amostra C

Segue na Tabela 11 os resultados medidos para a Amostra C, para $L_{Zeq,nT}$, $L_{Aeq,nT}$ e $L_{ASmax,nT}$, em decibel (dB).

Tabela 11 – Resumo dos resultados medidos para a Amostra C, para descarga e torneira, em dB.

	Grandeza	Tubulação aparente	Tubulação com envelopamento
Descarga	$L_{Zeq,nT}$	49	21
	$L_{Aeq,nT}$	50	14
	$L_{ASmax,nT}$	53	50
Torneira	$L_{Zeq,nT}$	32	21
	$L_{Aeq,nT}$	32	12
	$L_{ASmax,nT}$	36	35

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

Comparando os resultados apresentados na Tabela 11 com os valores recomendados pela norma NBR 15575 (ABNT, 2013), temos:

- $L_{Aeq,nT}$ não atende o desempenho mínimo para as tubulações sem envelopamento acústico, devido o acionamento da descarga;
- $L_{Aeq,nT}$ atende o desempenho superior para as tubulações com envelopamento acústico, devido o acionamento da descarga e da abertura da torneira;
- $L_{Aeq,nT}$ atende o desempenho intermediário para as tubulações sem envelopamento acústico, para abertura da torneira;
- $L_{ASmax,nT}$ não atende o desempenho mínimo para as tubulações com e sem envelopamento acústico, devido o acionamento da descarga;
- $L_{ASmax,nT}$ atende o desempenho superior para as tubulações com e sem envelopamento acústico, devido a abertura da torneira.

Pode-se notar na Figura 27 os resultados da Amostra C devido o acionamento da descarga do vaso sanitário, na qual é possível observar a redução dos níveis de pressão sonora com o envelopamento acústico em todas as frequências. Tem-se 28 dB para a diferença global entre os níveis.

Devido à pequena diferença entre o ruído com o acionamento da descarga e o ruído de fundo para as frequências de 2000 Hz, 4000 Hz e 8000 Hz, os níveis presentes nessas frequências representam o limite superior do ruído do sistema de descarga, para tubulação envelopada. Adicionalmente, devido à pequena diferença entre o ruído com o acionamento

da descarga e o ruído de fundo para a frequência de 63 Hz, o nível presente nessa frequência representa o limite superior do ruído do sistema de descarga, para tubulação aparente.

Figura 27 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($LZ_{eq,nT}$) para a Amostra C, para o ruído gerado por descarga.

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

Na Figura 28 pode-se verificar os resultados devido a abertura da torneira, no caso, 11 dB para a diferença global entre os níveis. Para as frequências 63 Hz e 125 Hz, à uma pequena amplificação dos resultados, porém existe uma redução sonora entre as frequências 250 Hz a 8000 Hz com as tubulações envelopadas.

Devido à pequena diferença entre o ruído com o acionamento da torneira e o ruído de fundo para as frequências de 63 Hz e 125 Hz, os níveis presentes nessas frequências representam os limites superiores do ruído para a abertura da torneira, com tubulação aparente. Isto pode justificar a amplificação dos níveis para 63 Hz e 125 Hz.

Figura 28 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($LZ_{eq,nT}$) para a Amostra C, para o ruído gerado por abertura da torneira.

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

Excepcionalmente, para estudo específico do desempenho acústico dessa amostra, foi realizada a holografia acústica para o acionamento da descarga. Os resultados mostram que a amostra comporta-se de forma homogênea. Ver estudo no Anexo A.

4.1.4 Amostra D

Segue na Tabela 12 os resultados medidos para a Amostra D, para $LZ_{eq,nT}$, $LA_{eq,nT}$ e $LA_{Smax,nT}$, em decibel (dB).

Tabela 12 – Resumo dos resultados medidos para a Amostra D, para descarga e torneira, em dB.

	Grandeza	Tubulação aparente	Tubulação com envelopamento
Descarga	$LZ_{eq,nT}$	49	24
	$LA_{eq,nT}$	50	13
	$LA_{Smax,nT}$	53	51
Torneira	$LZ_{eq,nT}$	32	23
	$LA_{eq,nT}$	32	15
	$LA_{Smax,nT}$	36	32

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

Comparando os resultados apresentados na Tabela 12 com os valores recomendados pela norma NBR 15575 (ABNT, 2013), temos:

- $L_{Aeq,nT}$ não atende o desempenho mínimo para as tubulações sem envelopamento acústico, devido o acionamento da descarga;
- $L_{Aeq,nT}$ atende o desempenho superior para as tubulações com envelopamento acústico, devido o acionamento da descarga e da abertura da torneira;
- $L_{Aeq,nT}$ atende o desempenho intermediário para as tubulações sem envelopamento acústico, para abertura da torneira;
- $L_{ASmax,nT}$ não atende o desempenho mínimo para as tubulações com e sem envelopamento acústico, devido o acionamento da descarga;
- $L_{ASmax,nT}$ atende o desempenho superior para as tubulações com e sem envelopamento acústico, devido a abertura da torneira.

Na Figura 29 é possível observar os resultados da Amostra D para o ruído gerado devido o acionamento da descarga do vaso sanitário. Pode-se notar uma redução dos níveis globais de pressão sonora, no caso, 25 dB entre os níveis para tubo aparente e envelopado. Entre as frequências 125 Hz a 8000 Hz, é possível visualizar a redução dos níveis com o envelopamento acústico. Entretanto, uma pequena amplificação do resultado é notável em 63 Hz.

Devido à pequena diferença entre o ruído com o acionamento da descarga e o ruído de fundo para a frequência de 63 Hz, o nível presente nessa frequência representa o limite superior do ruído do sistema de descarga, para tubulação aparente. Isto pode justificar a amplificação do resultado para o tubo envelopado na frequência de 63 Hz.

Figura 29 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra D, para o ruído gerado por descarga.

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

Nos resultados apresentados na Figura 30 para o ruído gerado devido a abertura da torneira, ocorre a redução dos níveis de pressão sonora com o envelopamento acústico, no caso, 9 dB para a diferença global dos níveis. É verificado a redução sonora nas frequências entre 250 Hz a 8000 Hz. Entre as frequências 63 Hz a 125 Hz, tem-se amplificação dos níveis de pressão sonora.

Devido à pequena diferença entre o ruído com o acionamento da torneira e o ruído de fundo para as frequências de 63 Hz e 125 Hz, os níveis presentes nessas frequências representam os limites superiores do ruído para a abertura da torneira, com tubo aparente. Isto pode justificar a amplificação dos níveis para 63 Hz e 125 Hz.

Além disso, devido à pequena diferença do ruído com o acionamento da torneira e o ruído residual nas bandas de 125 Hz, 250 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz e 8000 Hz, os níveis para essas frequências com a tubulação envelopada representam o limite superior do ruído da torneira.

Figura 30 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra D, para o ruído gerado por abertura da torneira.

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

4.1.5 Amostra E

Segue na Tabela 13 os resultados medidos para a Amostra E, para $L_{Zeq,nT}$, $L_{Aeq,nT}$ e $L_{ASmax,nT}$, em decibel (dB).

Tabela 13 – Resumo dos resultados medidos para a Amostra E, para descarga e torneira, em dB.

	Grandeza	Tubulação aparente	Tubulação com envelopamento
Descarga	$L_{Zeq,nT}$	49	38
	$L_{Aeq,nT}$	49	18
	$L_{ASmax,nT}$	53	47
Torneira	$LZ_{Zeq,nT}$	36	25
	$L_{Aeq,nT}$	31	13
	$L_{ASmax,nT}$	37	33

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

Comparando os resultados apresentados na Tabela 13 com os valores recomendados pela norma NBR 15575 (ABNT, 2013), temos:

- $L_{Aeq,nT}$ não atende o desempenho mínimo para as tubulações sem envelopamento acústico, devido o acionamento da descarga;

- $L_{Aeq,nT}$ atende o desempenho superior para as tubulações com envelopamento acústico, devido o acionamento da descarga e da abertura da torneira;
- $L_{Aeq,nT}$ atende o desempenho intermediário para as tubulações sem envelopamento acústico, para abertura da torneira;
- $L_{ASmax,nT}$ não atende o desempenho mínimo para as tubulações com e sem envelopamento acústico, devido o acionamento da descarga;
- $L_{ASmax,nT}$ atende o desempenho superior para as tubulações com envelopamento acústico, devido a abertura da torneira;
- $L_{ASmax,nT}$ atende o desempenho intermediário para as tubulações sem envelopamento acústico, devido a abertura da torneira.

Pode-se notar na Figura 31 uma redução dos níveis de pressão sonora com o envelopamento acústico em todas as frequências. Tem-se 11 dB para a diferença global entre os níveis.

Devido à pequena diferença entre o ruído com o acionamento da descarga e o ruído de fundo nas bandas de 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz e 8000 Hz, os níveis representam os limites superiores do ruído da descarga, para tubulação envelopada.

Figura 31 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra E, para o ruído gerado por descarga.

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

Na Figura 32 pode-se verificar a redução dos níveis de pressão sonora com o envelopamento acústico em todas as frequências devido a abertura da torneira, no caso, 10 dB para a diferença global entre os níveis com e sem envelopamento acústico.

Devido à pequena diferença entre o ruído com o acionamento da torneira e o ruído de fundo nas bandas de 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz e 8000 Hz, os níveis representam os limites superiores do ruído da torneira para tubulação envelopada.

Figura 32 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra E, para o ruído gerado por abertura da torneira.

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

4.1.6 Amostra F

Segue na Tabela 14 os resultados medidos para a Amostra F, para $L_{Zeq,nT}$, $L_{Aeq,nT}$ e $L_{ASmax,nT}$, em decibel (dB).

Tabela 14 – Resumo dos resultados medidos para a Amostra F, para descarga e torneira, em dB.

	Grandeza	Tubulação aparente	Tubulação com envelopamento
Descarga	$L_{Zeq,nT}$	49	19
	$L_{Aeq,nT}$	49	13
	$L_{ASmax,nT}$	52	40
Torneira	$L_{Zeq,nT}$	37	21
	$L_{Aeq,nT}$	29	14
	$L_{ASmax,nT}$	36	26

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

Comparando os resultados apresentados na Tabela 14 com os valores recomendados pela norma NBR 15575 (ABNT, 2013), temos:

- $L_{Aeq,nT}$ não atende o desempenho mínimo para as tubulações sem envelopamento acústico, devido o acionamento da descarga;
- $L_{Aeq,nT}$ atende o desempenho superior para as tubulações com envelopamento acústico, devido o acionamento da descarga e da abertura da torneira;
- $L_{Aeq,nT}$ atende o desempenho superior para as tubulações sem envelopamento acústico, para abertura da torneira;
- $L_{ASmax,nT}$ não atende o desempenho mínimo para as tubulações sem envelopamento acústico, devido o acionamento da descarga;
- $L_{ASmax,nT}$ atende o desempenho mínimo para as tubulações com envelopamento acústico, devido o acionamento da descarga;
- $L_{ASmax,nT}$ atende o desempenho superior para as tubulações com e sem envelopamento acústico, devido a abertura da torneira.

Pode-se notar na Figura 33 uma redução dos níveis de pressão sonora com o envelopamento acústico em todas as frequências. Tem-se 30 dB para a diferença global entre os níveis com e sem envelopamento acústico para o acionamento da descarga em vasos sanitários.

Devido à pequena diferença entre o ruído com o acionamento da descarga e o ruído de fundo nas bandas de 125 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz e 8000 Hz, os níveis representam os limites superiores do ruído da descarga, para tubulação envelopada.

Figura 33 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra F, para o ruído gerado por descarga.

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

Na Figura 34 pode-se verificar a redução dos níveis de pressão sonora com o envelopamento acústico em todas as frequências, no caso, 16 dB para a diferença global entre os níveis com e sem envelopamento acústico para a abertura da torneira.

Devido à pequena diferença entre o ruído com o acionamento da torneira e o ruído de fundo nas bandas de 63 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz e 8000 Hz, os níveis representam os limites superiores do ruído da torneira, para tubulação envelopada.

Além disso, devido à pequena diferença entre o ruído com o acionamento da torneira e o ruído de fundo nas bandas de 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz e 8000 Hz, os níveis representam os limites superiores do ruído da torneira, para tubulação aparente.

Figura 34 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra F, para o ruído gerado por abertura da torneira.

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

4.1.7 Amostra G

Segue na Tabela 15 os resultados medidos para a Amostra G, para $L_{Zeq,nT}$, $L_{Aeq,nT}$ e $L_{ASmax,nT}$, em decibel (dB).

Tabela 15 – Resumo dos resultados medidos para a Amostra G, para descarga e torneira, em dB.

	Grandeza	Tubulação aparente	Tubulação com envelopamento
Descarga	$L_{Zeq,nT}$	49	17
	$L_{Aeq,nT}$	50	11
	$L_{ASmax,nT}$	53	54
Torneira	$L_{Zeq,nT}$	32	23
	$L_{Aeq,nT}$	32	21
	$L_{ASmax,nT}$	39	36

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

Comparando os resultados apresentados na Tabela 15 com os valores recomendados pela norma NBR 15575 (ABNT, 2013), temos:

- $L_{Aeq,nT}$ não atende o desempenho mínimo para as tubulações sem envelopamento acústico, devido o acionamento da descarga;

- $L_{Aeq,nT}$ atende o desempenho superior para as tubulações com envelopamento acústico, devido o acionamento da descarga e da abertura da torneira;
- $L_{Aeq,nT}$ atende o desempenho intermediário para as tubulações sem envelopamento acústico, para abertura da torneira;
- $L_{ASmax,nT}$ não atende o desempenho mínimo para as tubulações sem e com envelopamento acústico, devido o acionamento da descarga;
- $L_{ASmax,nT}$ atende o desempenho superior para as tubulações com envelopamento acústico, devido a abertura da torneira;
- $L_{ASmax,nT}$ atende o desempenho intermediário para as tubulações sem envelopamento acústico, devido a abertura da torneira.

Pode-se notar na Figura 35 uma redução dos níveis de pressão sonora com o envelopamento acústico em todas as frequências, para o acionamento da descarga. Tem-se 32 dB para a diferença global entre os níveis com e sem envelopamento.

Devido à pequena diferença entre o ruído com o acionamento da descarga e o ruído de fundo para a frequência de 63 Hz, o nível presente para essa frequência representa o limite superior do ruído para tubulação aparente.

Figura 35 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra G, para o ruído gerado por descarga.

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

Na Figura 36 pode-se verificar a redução dos níveis de pressão sonora com o envelopamento acústico em todas as frequências para a abertura da torneira, no caso, 9 dB para a diferença global entre os níveis com e sem envelopamento. A redução é mais significativa para a faixa de frequência entre 1000 Hz a 8000 Hz.

Devido à pequena diferença entre o ruído com o acionamento da torneira e o ruído de fundo para as frequências de 63 Hz e 125 Hz, os níveis presentes para essas frequências representam os limites superiores do ruído para tubulação aparente.

Figura 36 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra G, para o ruído gerado por abertura da torneira.

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

4.1.8 Amostra H

Segue na Tabela 16 os resultados medidos para a Amostra H, para $L_{Zeq,nT}$, $L_{Aeq,nT}$ e $L_{ASmax,nT}$, em decibel (dB).

Tabela 16 – Resumo dos resultados medidos para a Amostra H, para descarga e torneira, em dB.

	Grandeza	Tubulação aparente	Tubulação com envelopamento
Descarga	$L_{Zeq,nT}$	49	26
	$L_{Aeq,nT}$	50	25
	$L_{ASmax,nT}$	53	50
Torneira	$L_{Zeq,nT}$	32	22
	$L_{Aeq,nT}$	32	16
	$L_{ASmax,nT}$	36	35

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

Comparando os resultados apresentados na Tabela 16 com os valores recomendados pela norma NBR 15575 (ABNT, 2013), temos:

- $L_{Aeq,nT}$ não atende o desempenho mínimo para as tubulações sem envelopamento acústico, devido o acionamento da descarga;
- $L_{Aeq,nT}$ atende o desempenho superior para as tubulações com envelopamento acústico, devido o acionamento da descarga e da abertura da torneira;
- $L_{Aeq,nT}$ atende o desempenho intermediário para as tubulações sem envelopamento acústico, para abertura da torneira;
- $L_{ASmax,nT}$ não atende o desempenho mínimo para as tubulações sem e com envelopamento acústico, devido o acionamento da descarga;
- $L_{ASmax,nT}$ atende o desempenho superior para as tubulações com e sem envelopamento acústico, devido a abertura da torneira.

Pode-se notar na Figura 37 uma redução dos níveis de pressão sonora com o envelopamento acústico em todas as frequências devido o acionamento da descarga. Tem-se 23 dB para a diferença global entre os níveis com e sem envelopamento.

Devido à pequena diferença entre o ruído com o acionamento da descarga e o ruído de fundo para a frequência de 63 Hz, o nível presente para essa frequência representa o limite superior do ruído para tubulação aparente.

Figura 37 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra H, para o ruído gerado por descarga.

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

Na Figura 38 pode-se verificar a redução dos níveis de pressão sonora com o envelopamento acústico para 63 Hz e entre a faixa de frequência de 500 Hz a 8000 Hz, no caso, tem-se 10 dB para a diferença global entre os níveis com e sem envelopamento devido a abertura da torneira.

Devido à pequena diferença entre o ruído com o acionamento da torneira e o ruído de fundo para as frequências 63 Hz e 125 Hz, os níveis presentes para essas frequências representam os limites superiores do ruído para tubulação aparente.

Além disso, devido à pequena diferença entre o ruído com o acionamento da torneira e o ruído de fundo nas bandas de 63 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz e 8000 Hz, os níveis representam os limites superiores, para tubulação envelopada.

Figura 38 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra H, para o ruído gerado por abertura da torneira.

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

4.1.9 Amostra I

Segue na Tabela 16 os resultados medidos para a Amostra I, para $L_{Zeq,nT}$, $L_{Aeq,nT}$ e $L_{ASmax,nT}$, em decibel (dB).

Tabela 17 – Resumo dos resultados medidos para a Amostra I, para descarga e torneira, em dB.

	Grandeza	Tubulação aparente	Tubulação com envelopamento
Descarga	$L_{Zeq,nT}$	44	36
	$L_{Aeq,nT}$	43	23
	$L_{ASmax,nT}$	55	45
Torneira	$L_{Zeq,nT}$	40	35
	$L_{Aeq,nT}$	33	24
	$L_{ASmax,nT}$	39	29

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

Comparando os resultados apresentados na Tabela 17 com os valores recomendados pela norma NBR 15575 (ABNT, 2013), temos:

- $L_{Aeq,nT}$ não atende o desempenho mínimo para as tubulações sem envelopamento acústico, devido o acionamento da descarga;

- $L_{Aeq,nT}$ atende o desempenho superior para as tubulações com envelopamento acústico, devido o acionamento da descarga e da abertura da torneira;
- $L_{Aeq,nT}$ atende o desempenho intermediário para as tubulações sem envelopamento acústico, para abertura da torneira;
- $L_{ASmax,nT}$ não atende o desempenho mínimo para as tubulações sem e com envelopamento acústico, devido o acionamento da descarga;
- $L_{ASmax,nT}$ atende o desempenho superior para as tubulações com envelopamento acústico, devido a abertura da torneira;
- $L_{ASmax,nT}$ atende o desempenho intermediário para as tubulações sem envelopamento acústico, devido a abertura da torneira.

Pode-se notar na Figura 39 uma redução dos níveis de pressão sonora com o envelopamento acústico para 63 Hz e entre a faixa de frequência de 250 Hz a 8000 Hz, no caso, tem-se 8 dB para a diferença global entre os níveis com e sem envelopamento, devido o acionamento da descarga.

Devido à pequena diferença entre o ruído com o acionamento da descarga e o ruído de fundo na banda de 8000 Hz, o nível representa o limite superior do ruído da descarga, para tubulação envelopada e aparente.

Figura 39 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra I, para o ruído gerado por descarga.

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

Na Figura 40 pode-se verificar a redução dos níveis de pressão sonora com o envelopamento acústico para todas as frequências, no caso, tem-se 6 dB para a diferença global entre os níveis com e sem envelopamento para a abertura da torneira.

Devido à pequena diferença entre o ruído com o acionamento da torneira e o ruído de fundo nas bandas de 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz e 8000 Hz, os níveis representam os limites superiores do ruído da torneira, para tubulação envelopada.

Figura 40 – Resultados dos níveis de pressão sonora ($L_{Zeq,nT}$) para a Amostra I, para o ruído gerado por abertura da torneira.

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

4.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Através dos resultados apresentado na Seção 4.1, foi possível verificar que as amostras ensaiadas possuem os mais diversos comportamentos, algumas não influenciam na redução sonora e outras reduzem significativamente os níveis de pressão sonora oriundos das instalações hidrossanitárias prediais.

Para efeito de comparação, foi realizada a média logarítmica entre os cinco³ ensaios com tubulação aparente. Todos os ensaios foram realizados com a mesma tubulação composta por PVC.

³ Lembrar que temos cinco fornecedores e nove amostras ensaiadas. E os ensaios com tubo aparente foram realizadas para cada fornecedor.

É possível analisar e comparar os resultados ($L_{Zeq,nT}$) para as nove amostras ensaiadas através da Figura 41 e da Tabela 18 devido o acionamento da descarga do vaso sanitário⁴.

Figura 41 – Comparação do $L_{Zeq,nT}$ entre as amostras ensaiadas devido o acionamento da descarga do vaso sanitário.

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

Tabela 18 – Valores de $L_{Zeq,nT}$ devido o acionamento da descarga do vaso sanitário.

Frequência Hz	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Aparente
63	26,1	24,8	17,5	22,8	36,6	16,5	14,2	18,5	34,2	33,5
125	24,7	25,1	15,6	14,4	30,0	11,2	7,1	10,7	39,8	28,8
250	31,8	31,8	9,4	9,0	16,0	6,6	5,5	17,5	27,7	32,8
500	35,6	37,9	9,9	5,3	10,6	7,3	3,3	14,7	17,9	35
1000	42,2	41,7	8,4	5,8	4,0	6,4	4,2	17,9	12,6	40,4
2000	46,2	44,6	7,3	6,3	7,0	3,7	3,6	21,0	12,7	43,8
4000	47,1	40,3	3,9	4,1	7,6	4,8	3,3	16,6	13,4	44,2
8000	39,0	26,8	3,2	5,1	9,5	7,0	3,5	7,3	8,0	38,4
Global (A)	52	48	14	13	18	13	11	25	23	49

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

Os resultados $L_{Zeq,nT}$ reduzem os níveis de pressão sonora principalmente entre as frequências de 500 Hz a 8000 Hz (faixa onde a audição humana é mais sensível), exceto para os resultados das Amostras A e B.

⁴ A norma ISO 16032, solicita a apresentação dos resultados em banda de oitava com uma casa decimal e os resultados ponderados em A, arredondados para o valor inteiro.

Tem-se destaque especial para as Amostras G, F e C, em ordem de melhor desempenho acústico, respectivamente. A diferença global entre os níveis de pressão sonora, $L_{Zeq,nT}$, para a média do tubo aparente e o tubo envelopado é $\Delta L \geq 32$ dB para a Amostra G, $\Delta L \geq 30$ dB para a Amostra F e $\Delta L \geq 28$ dB para a Amostra C.

As Amostras D e H também reduzem os níveis de pressão sonora, $L_{Zeq,nT}$, dado que a diferença global entre os níveis de pressão sonora para a média do tubo aparente e o tubo envelopado é $\Delta L \geq 23$ dB.

Em vista disso, as Amostras C, D, F, G e H conseguem uma diferença de níveis de pressão sonora global, $L_{Zeq,nT}$, entre a média do tubo aparente e o tubo com envelopamento, maior do que 20 dB. Isto pode representar, aproximadamente, um quarto da mudança de sensação sonora conforme valores apresentados na Tabela 20.

As Amostras E e I também apresentam uma redução sonora significativa, a diferença global entre os níveis de pressão sonora para a média do tubo aparente e o tubo envelopado é maior do que 10 dB, valor este que pode representar, aproximadamente, metade da mudança da sensação sonora.

Neste caso, a Amostra E não atenua para as frequências 63 Hz e 125 Hz. Porém, para as frequências entre 500 Hz a 8000 Hz, existe uma diferença entre os níveis de pressão sonora para a média do tubo aparente e tubo envelopado maior do que 20 dB para cada frequência.

Nessa situação, a Amostra I também não atenua para as frequências 63 Hz e 125 Hz. Entretanto, para as frequências entre 1000 Hz a 8000 Hz, existe uma diferença entre os níveis de pressão sonora para a média do tubo aparente e tubo envelopado maior do que 20 dB para cada frequência.

Ao comparar os resultados globais da grandeza $L_{Aeq,nT}$ apresentados na Tabela 18 com os limites recomendados pela norma NBR 15575:2013 (ABNT, 2013), é possível analisar que todas as amostras, com exceção das Amostras A e B, atendem o desempenho superior. Os resultados para o tubo aparente e para as Amostras A e B não atendem os valores recomendados pela norma.

É possível analisar e comparar os resultados ($L_{Zeq,nT}$) para as nove amostras ensaiadas através da Figura 42 e da Tabela 19 devido a abertura da torneira.

Figura 42 – Comparação do $L_{Zeq,nT}$ entre as amostras ensaiadas devido a abertura da torneira.

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

Tabela 19 – Comparação do $L_{Zeq,nT}$ devido a abertura da torneira.

Frequência Hz	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Aparente
63	20,4	22,8	18,3	20,5	23,7	18,8	16,7	16,6	33,2	32,5
125	17,3	20,1	16,1	15,9	19,3	10,0	11,9	15,8	26,9	24,6
250	15,6	20,3	7,6	7,3	11,0	7,9	12,0	12,7	17,9	23,0
500	14,2	19,3	8,5	6,5	7,3	8,7	10,7	9,4	12,2	16,3
1000	15,7	24,9	6,0	9,4	5,3	8,7	16,6	10,8	16,1	22,0
2000	22,4	26,2	4,7	7,9	4,0	5,0	15,1	10,7	19,6	24,8
4000	26,0	24,5	2,0	6,8	4,6	4,7	10,1	6,3	15,5	26,4
8000	24,0	15,7	3,0	6,1	7,0	7,1	9,6	4,3	12,5	26,2
Global (A)	30	31	12	15	13	14	21	16	24	32

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

Os resultados $L_{Zeq,nT}$ reduzem os níveis de pressão sonora principalmente entre as frequências de 500 Hz a 8000 Hz (faixa onde a audição humana é mais sensível), exceto para os resultados da Amostras B.

As Amostras F, C e H apresentam os melhores resultados devido a abertura da torneira, possuem redução sonora considerável em todas as frequências analisadas. A diferença global entre os níveis de pressão sonora, $L_{Zeq,nT}$, entre a média do tubo aparente e o tubo envelopado é $\Delta L \geq 14$ dB.

Destacaram-se também as Amostras D, E e G, pois apresentam uma diferença global entre os níveis de pressão sonora $L_{Zeq,nT}$, para média do tubo aparente e envelopado maior do que 10 dB, ou seja, essa diferença pode representar, aproximadamente, a metade da sensação do volume sonora (Ver Tabela 20).

Neste caso, para abertura da torneira, as Amostras A e B apresentaram resultados melhores do que comparados com os resultado devido o acionamento da descarga. Porém, não possuem o mesmo desempenho comparados com os resultados das demais amostras devido a abertura da torneira.

No caso da Amostra A, a diferença global $L_{Zeq,nT}$ entre o tubo envelopado e a média do tubo aparente é $\Delta L \geq 5$ dB, ou seja, pode representar a metade da mudança de sensação sonora. Apresenta uma boa redução sonora, principalmente na faixa de frequência entre 63 a 250 Hz.

Para a Amostra B, a diferença global $L_{Zeq,nT}$ entre os níveis de pressão sonora entre a média do tubo aparente e o tubo envelopado é $\Delta L \geq 4$ dB.

Nesse caso, a Amostra I não atenua para as frequências 63 Hz e 125 Hz. Porém, para as frequências entre 250 Hz a 2000 Hz, possui $\Delta L \geq 4$ dB para cada frequência. E, entre as frequências 4000 Hz a 8000 Hz, $\Delta L \geq 10$ dB para cada frequência.

Ao comparar os resultados globais da grandeza $L_{Aeq,nT}$ apresentados na Tabela ?? com os limites recomendados pela norma NBR 15575:2013 (ABNT, 2013), é possível analisar que todas as amostras, com exceção da Amostras B, atendem o desempenho superior. Os resultados para o tubo aparente e para a Amostras B atendem o desempenho intermediário.

4.3 RELAÇÃO CUSTO-BENEFÍCIO

Através da apresentação dos resultados nas Seções 4.1 e 4.2 é possível perceber que o melhor desempenho acústico dependerá da fonte de ruído, no caso, acionamento da descarga do vaso sanitário ou devido a abertura da torneira, e da faixa de frequência na qual se deseja isolar.

Após verificação com os fornecedores, foram analisadas as estimativas dos custos para algumas amostras ensaiadas. Deve-se salientar que os valores apresentados a seguir

correspondem ao valor estimado no final de 2017 e início de 2018, sem considerar os impostos, ICMS de acordo com o estado e IPI.

A Amostra C apresenta os seguintes valores para fornecimento do material, aproximadamente:

- R\$10,00 por metro, para tubos de PVC com diâmetro 40 mm;
- R\$12,00 por metro, para tubos de PVC com diâmetro 50 mm;
- R\$18,00 por metro, para tubos de PVC com diâmetro 75 mm;
- R\$24,00 por metro, para tubos de PVC com diâmetro 100 mm;
- R\$30,00 por metro, para tubos de PVC com diâmetro 150 mm.

A Amostra C apresenta $\Delta L = 28$ dB devido o acionamento da descarga do vaso sanitário e $\Delta L = 14$ dB para a abertura da torneira.

Não foi possível encontrar os preços estimados para a Amostra B, pois o fornecedor retirou o produto do mercado devido o seu comportamento nos ensaios acústicos realizados, optando por comercializar somente a Amostra C. Lembrar que a Amostra C possui a mesma composição da Amostra B, porém uma possui 20 mm de espessura e a outra 10 mm de espessura, respectivamente.

A Amostra D apresenta os seguintes valores para fornecimento do material, aproximadamente⁵

- R\$27,00 por metro, para tubos de PVC com diâmetro 40 mm;
- R\$34,00 por metro, para tubos de PVC com diâmetro 50 mm;
- R\$52,00 por metro, para tubos de PVC com diâmetro 75 mm;
- R\$69,00 por metro, para tubos de PVC com diâmetro 100 mm;
- R\$104,00 por metro, para tubos de PVC com diâmetro 150 mm.

A Amostra D apresenta $\Delta L = 25$ dB para o acionamento da descarga do vaso sanitário e $\Delta L = 13$ dB para a abertura da torneira. Entretanto, a estimativa do seu custo é alto e seu desempenho é um pouco inferior ao da Amostra C.

Para a Amostra A, seguem as estimativas do custo do produto, aproximadamente:

- R\$10,00 por metro, para tubos de PVC com diâmetro 50 mm;
- R\$10,00 por metro, para tubos de PVC com diâmetro 75 mm;

⁵ Realizou-se uma estimativa baseada no valor por metro quadrado do produto para cada diâmetro da tubulação.

- R\$14,00 por metro, para tubos de PVC com diâmetro 100 mm.

Essa estimativa é inferior do que os custos da Amostra C e da Amostra D, porém o desempenho acústico das amostras C e D são superiores ao da Amostra A. Após os ensaios acústicos realizados nesse trabalho, o fornecedor da Amostra A está buscando possíveis soluções para aperfeiçoar o seu produto, sempre em busca da melhor eficiência.

As Amostras G e H não são comercializadas ainda no mercado brasileiro até o presente momento, pois ainda sofrem processos de aperfeiçoamento tecnológico.

Desta forma, a Amostra C apresenta a melhor relação custo-benefício até a data de elaboração deste trabalho entre as amostras analisadas⁶. Esta amostra é composta por espuma elastomérica de células fechadas, espessura igual à 20 mm e densidade 50 kg/m³.

⁶ Lembrar que os fornecedores das Amostras E, F e I não retornaram com a estimativa de custos ou não aceitaram a divulgação.

5 CONCLUSÕES

Através dos resultados apresentados nesse trabalho, é possível concluir que as soluções acústicas analisadas, exceto as Amostras A e B, reduzem os ruídos emitidos devido o acionamento da descarga de vaso sanitário e conseguem atender o desempenho superior da norma NBR 15575: 2013 (ABNT, 2013) para a grandeza $L_{Aeq,nT}$. Entretanto, para $L_{ASmax,nT}$, nenhuma amostra consegue atender o desempenho exigido pela norma NBR 15575: 2013 para o ruído gerado pela descarga.

No caso do ruído gerado devido o acionamento da torneira, todas as soluções acústicas analisadas atendem os critérios da norma NBR 15575: 2013 (ABNT, 2013) para a grandeza $L_{Aeq,nT}$ e $L_{ASmax,nT}$, com e sem envelopamento na tubulação.

As Amostras C, D, F, G e H conseguem uma diferença de níveis de pressão sonora global, $L_{Zeq,nT}$, entre a média do tubo aparente e o tubo com envelopamento, igual a $\Delta L \geq 20$ dB para o ruído oriundo devido o acionamento da descarga do vaso sanitário. Isto pode representar, aproximadamente, um quarto da mudança de sensação sonora.

As Amostras F, C e H apresentam os melhores resultados devido a abertura da torneira, possuem redução sonora considerável em todas as frequências analisadas. A diferença global entre os níveis de pressão sonora, $L_{Zeq,nT}$, entre a média do tubo aparente e o tubo envelopado é $\Delta L \geq 14$ dB. Destacaram-se também as Amostras D, E e G, pois apresentam $\Delta L \geq 10$ dB, ou seja, essa diferença pode representar, aproximadamente, a metade da sensação do volume sonoro.

Adicionalmente, através da verificação do custo de algumas amostras, é notável que nem sempre soluções mais caras garantem um melhor desempenho. Para a estimativa de preços realizada até o momento da elaboração desse trabalho e conforme os dados recebidos dos fornecedores, a Amostra C apresenta a melhor relação custo-benefício. Esta amostra é composta por espuma elastomérica de células fechadas, 20 mm espessura e densidade 50 kg/m³.

As principais recomendações para o controle de ruído e vibrações nas tubulações, são: envelopar a tubulação com material poroso e/ou resiliente, instalar articulações flexíveis, utilizar isolantes ou molas para amenizar a conexão rígida entre a tubulação e a estrutura, instalar difusores para evitar o surgimento de bolhas causadas pela alteração de pressão e instalar mecanismo que suavize os estrangulamentos. A determinação da melhor

solução acústica depende da fonte sonora que deseja-se atenuar e a faixa de frequência predominante da fonte.

Em vista disso, o presente trabalho conseguiu analisar e comparar os resultados acústicos para nove amostras, onde foi nítida a preocupação dos fornecedores sobre o desempenho acústico dos seus produtos, aceitando participar da pesquisa sem hesitar e com a presente preocupação por aperfeiçoar cada vez mais o desempenho do seu produto.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Seguem abaixo possíveis linhas de pesquisas complementares ao estudo aqui realizado:

- Avaliação da influência da propagação estrutural devido a conexão rígida da tubulação na estrutura da edificação;
- Aperfeiçoamento tecnológico para soluções acústicas devido o ruído hidrossanitário em todas as frequências, visto que algumas amostras apresentam melhor desempenho em baixas ou em altas frequências;
- Pesquisa quantitativa entre as amostras ensaiadas para verificar qual amostra possui a menor relação homens/hora durante a instalação dos produtos na obra;
- Estudo da flamabilidade das soluções acústicas para ruído hidrossanitário, dado que até o momento poucas amostras possuem esse estudo.

REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 10844 - Instalações prediais de águas pluviais - Procedimento. 1989.
- ABNT. NBR 12179 - Tratamento acústico em recintos fechados. 1992.
- ABNT. NBR 7198 - Projeto e execução de instalações prediais de água quente. 1993.
- ABNT. NBR 5626 - Instalação predial de água fria. 1998.
- ABNT. NBR 8160 - Sistemas prediais de esgoto sanitário. 1999.
- ABNT. NBR 10151 - Acústica - Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade - Procedimento. 2000.
- ABNT. NBR 15575 - Edificações habitacionais - Desempenho Parte 1 a 6. 2013.
- ABNT. NBR 10152 - Acústica - Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações. 2017.
- ASSOCIATION OF GERMAN ENGINEERS. VDI 4100 - Noise control in dwellings - Criteria for planning and assessment. 2010.
- BERANEK, L. L.; VER, I. L. Noise and vibration control engineering-principles and applications. **Noise and vibration control engineering-Principles and applications John Wiley & Sons, Inc., 814 p., v. 1, 1992.**
- BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle do ruído.** [S.l.]: Edgard Blücher, 2008.
- CORRÊA, A. P.; NIEMEYER, M. L. A. Ruído de tubulação como fator de desconforto em salas de reunião em edifício institucional: Um estudo de caso. **Simpósio Brasileiro de Qualidade de Projeto na Construção de Edifícios – SBQP, São Carlos, SP - USP. 12p, 2009.**
- DIN. DIN 4109-1 - Sound insulation in buildings - Part 1: Minimum requirements. 2016.
- FAHY, F.; WALKER, J. **Fundamentals of noise and vibration.** [S.l.]: CRC Press, 1998.
- FAHY, F. J. **Foundations of engineering acoustics.** [S.l.]: Academic press, 2000.
- FERREIRA, A. d. H. **Novo dicionário Aurélio da língua portuguesa.** [S.l.]: Editora Positivo, 2004.
- FUCHS, H. Generation and control of noise in water supply installations: Part 1: Fundamental aspects. **Applied Acoustics**, Elsevier, v. 16, n. 5, p. 325–346, 1983.
- FUCHS, H. Generation and control of noise in water supply installations. part 2: Sound source mechanisms. **Applied Acoustics**, Elsevier, v. 38, n. 1, p. 59–85, 1993.
- FUCHS, H. Generation and control of noise in water supply installations part 3: Rating and abating procedures. **Applied Acoustics**, Elsevier, v. 39, n. 3, p. 165–190, 1993.

- HOWARD, D. M.; ANGUS, J. **Acoustics and psychoacoustics**. [S.l.]: Taylor & Francis, 2009.
- IEC. **IEC 61672-1 - Electroacoustics - Sound Level Meters**. 2002.
- ISO. **ISO 6241 - Performance standards in building - Principles for their preparation and factors to be considered**. 1984.
- ISO. **ISO 10052 - Acoustics – Field measurements of airborne and impact sound insulation and of service equipment sound – Survey method**. 2004.
- ISO. **ISO 16032 Acoustics – Measurement of sound pressure level from service equipment in buildings - Engineering method**. 2004.
- ISO. **ISO 3382-3 Acoustics - Measurement of room acoustic parameters**. 2012.
- JAUREGUI, F. S. Padrão acústico europeu. In: . [S.l.: s.n.], 2011.
- LAGES, C. e. a. Impacte do novo dl 96/2008 nas condições acústicas da construção em portugal. **Universidade de Coimbra**, p. 12, 2008.
- LEAL, U. Ruídos em tubulações podem ter várias causas. **Revista Técnica**, n. 72, 2003.
- LONG, M. **Architectural Acoustics**. [S.l.]: Elsevier, 2005.
- NEPOMUCENO, L. de A. **Elementos de acústica física e psicoacústica**. [S.l.]: Edgard Blücher, 1994.
- PATRÍCIO, J. Situação actual da acústica ambiental e da edificação acusticamente sustentável, em portugal. In: **Tecniacústica 2009**. [S.l.: s.n.], 2009.
- PAUL, S. **Material didático da disciplina de O Ruído, Vibrações e o Ser Humano - EAC 1001 - Universidade Federal de Santa Maria Curso de Engenharia Acústica**. [S.l.: s.n.], 2010.
- PAUL, S. **Material didático da disciplina de Psicoacústica - EAC 1019 - Universidade Federal de Santa Maria Curso de Engenharia Acústica**. [S.l.: s.n.], 2012.
- PAUL, S. **Material didático da disciplina de Acústica Ambiental - EAC 1012 - Universidade Federal de Santa Maria Curso de Engenharia Acústica**. [S.l.: s.n.], 2013.
- PAVANELLO, L.; PAIXÃO, D. Investigação do ruído gerado por instalações hidrossanitárias em uma edificação multifamiliar. **Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS)**, 2014.
- PIERRARD, J. F.; AKKERMAN, D. Manual proacústica sobre a norma de desempenho. guia prático sobre cada uma das partes relacionadas à área de acústica nas edificações da norma nbr 1555:2013 edificações habitacionais - edificações. **ProAcústica**, 2015.
- QUERIDO, J. Instalações prediais hidráulico sanitárias: prognóstico de ruídos. **Tese de Doutorado inédita em Engenharia de Construção Civil – Universidade Federal de São Paulo, São Paulo**, 1993.

- ROCHA, R.; SILVA, A. D. Caracterização in loco da qualidade acústica das salas de aula das escolas de ensino fundamental na cidade de santa maria, rs - brasil. **VIII Congresso Ibero-Americano de Acústica - Évora Portugal**, 2012.
- SINGH, N.; DAVAR, S. Noise pollution-sources, effects and control. **J. Hum. Ecol**, v. 16, n. 3, p. 181–187, 2004.
- TALBOTT, E.; THOMPSON, S. J. Health effects from environmental noise. **An Introduction to Environmental Epidemiology**, CRC Press, p. 209, 1995.
- VIGRAN, T. E. **Building acoustics**. [S.l.]: CRC Press, 2008.
- VORLÄNDER, M. **Auralization: fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality**. [S.l.]: Springer, 2007.

Anexos

Anexo A – HOLOGRAFIA ACÚSTICA

Excepcionalmente, para estudo específico do desempenho acústico da Amostra C, foi realizada a técnica de localização de fontes sonoras através da criação das imagens acústicas. No estudo em questão, apenas foi acionada a descarga do vaso sanitário.

Foi utilizado o equipamento da Brüel & Kjær, composto de um dispositivo metálico de cerca de 1,5 metro de diâmetro com 36 microfones acoplados, além de uma câmera digital central, onde atribui-se cores para os níveis de pressão sonora das fontes de ruído, que são projetadas sobre a imagem fotográfica.

Na Figura 43, é possível observar a distribuição do som na frequência de 160 Hz. A distribuição do som é homogênea e dentre as duas cores¹ a diferença é de somente 0,3 dB.

Figura 43 – Holografia acústica na frequência de 160 Hz.

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

Na Figura 44, mesmo expandindo a faixa até 500 Hz a distribuição de som continua homogênea e dentre as duas cores que aparecem² a diferença é somente 0,1 dB. Dessa forma, na faixa de frequência onde é a maior emissão de ruído ele se distribui por igual pela montagem.

¹ Difícil de visualizar as cores na escala devido a pequena diferença de valores.

² Difícil de visualizar as cores na escala devido a pequena diferença de valores.

Figura 44 – Holografia acústica nas frequências entre 125 a 500 Hz.

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

A Figura 45 apresenta a distribuição do som com predominância na frequência de 1600 Hz. A distribuição do som não é homogênea e dentre as cores amarelo claro e verde claro a diferença é de até 4 dB. Dessa forma configura-se um vazamento de ruído nesta área.

Figura 45 – Holografia acústica na frequência de 1600 Hz.

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

Expandindo a faixa para 1250 a 2500 Hz, surgem dois indicativos de emissão sonora nos dois cotovelos conforme mostra a Figura 46. A distribuição de som não é homogênea e dentre as cores amarelo claro e verde claro a diferença é de até 4 dB. Dessa forma configura-se um vazamento de ruído nestas áreas.

Figura 46 – Holografia acústica nas frequências entre 1250 a 2500 Hz.

Fonte: conforme relatórios dos ensaios acústicos.

Entretanto, é notável que no cotolevo de 90°, onde teoricamente deveria ocorrer vazamento, teve-se uma distribuição homogênea, fator positivo para a amostra ensaiada.

Anexo B – CONCEITOS BÁSICOS DE ACÚSTICA

No Anexo B, temos a revisão bibliográfica de conceitos básicos de acústica, necessários para a perfeita compreensão do estudo realizado.

1 CAMINHOS DE ATUAÇÃO

As estratégias de controle de ruído e vibrações possuem três pontos de atuação (FAHY, 2000; BERANEK; VER, 1992):

- **1ª Opção - Na fonte:** refere-se as alterações no mecanismo de geração do som, alterações nas características do som ou da radiação da fonte. Pode-se substituir os equipamentos ruidosos, modificar o processo de produção e manutenção;
- **2ª Opção - No caminho de transmissão:** alterações na propagação sonora ou as características do som. Por exemplo, afastamento das fontes.
No ar livre, resultará na redução do nível de pressão sonora em 6 dB ou 3 dB por cada duplicação de distância.
- **3ª Opção - No receptor:** utilizado quando não existem possibilidades de atuar nas outras opções de atuação. Refere-se as alterações da irradiação no receptor. Por exemplo, utilizar protetores auditivos (EPI's).

2 GRANDEZAS ACÚSTICAS APLICADAS AO TEMA

O campo sonoro, a região de espaço onde várias ondas sonoras estão presentes, pode ser representado por várias grandezas de estado, a grandeza mais útil é a pressão sonora (FAHY, 2000; PAUL, 2012).

A pressão sonora é a pressão causada pela oscilação das partículas no meio devido a onda sonora. Como as partículas “oscilam”, a pressão sonora também oscila (BERANEK; VER, 1992).

A faixa dinâmica na qual sons são audíveis para seres humanos compreende pressão sonora entre $\approx 2 \cdot 10^{-5}$ Pa e 200 Pa. Como a faixa dinâmica é grande e a sensação de volume é não linear (log), usa-se o nível de pressão sonora para descrever a “intensidade”

de sons (PAUL, 2010). Níveis são grandezas logarítmicas, na qual o decibel (dB) é um indicador do uso de uma escala log (PAUL, 2010).

O nível de pressão sonora é a grandeza mais importante de acústica, dado conforme mostram as Equações 9 e 10 (FAHY, 2000; PAUL, 2010; BERANEK; VER, 1992):

$$\text{NPS} = 10 \log \left(\frac{P}{P_0} \right)^2, \quad (9)$$

$$\text{NPS} = 20 \log \left(\frac{P}{P_0} \right), \quad (10)$$

onde,

NPS é o nível de pressão sonora, representado pela pseudounidade [dB];

P_0 é a pressão sonora de referência, $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ [Pa] para propagação no ar.

2.1 Curvas de ponderação

Com o intuito de melhorar a correlação entre os níveis de pressão sonora e a sensação de volume sonoro foram introduzidas as curvas de ponderação. Seguem algumas curvas de ponderação, comumente utilizadas (PAUL, 2010; BISTAFA, 2008):

- Curva A: inversão da curva isofônica de 40 phons. Adequado para descrever o potencial de dano ao sistema periférico de audição;
- Curva C: inversão da curva isofônica de 100 phons;
- Curva Z: nenhuma ponderação.

As curvas isofônicas representam as curvas de igual sensação de volume sonoro para tons puros. Os valores de ponderação das curvas A e C, para frequências centrais das bandas de oitava são definidas conforme a norma IEC 61672-1: 2002 (IEC, 2002).

2.2 Tempo de integração

O tempo de integração é o tempo de resposta a uma “inércia”. Este pode ser (PAUL, 2012; BISTAFA, 2008):

- *Slow*: deve ser utilizado apenas com sinais estacionários, contínuos. Fornece um valor efetivo com poucas oscilações, igual a 1 segundo;

- *Fast*: possibilita a qualificação da amplitude de sinais que mudam rapidamente, 0,125 segundos;
- *Impulse*: deve ser utilizado para sons impulsivos (0,035 segundos).

2.3 Nível de pressão sonora e suas derivações

O medidor de nível de pressão sonora (sonômetro) é um instrumento para ter uma resposta ao som aproximadamente da mesma forma que o ouvido humano, e objetivamente reproduzir dados de nível de pressão sonora. O nível de pressão sonora possui derivações, seguem algumas:

- O nível de pressão sonora máximo ($L_{\max}$), é o maior dos níveis de pressão sonora equivalentes durante todo o período de medição;
- O nível de pressão sonora mínimo ($L_{\min}$), é o menor dos níveis de pressão sonora equivalentes durante todo o período de medição;
- O nível de pressão sonora pico ($L_{x\text{peak}}$), é o maior nível de pressão sonora atingido durante o intervalo de medição, sem uso dos tempos padronizados de integração;
- O sonômetro mede o nível de pressão sonora conforme a Equação 11, na qual integra a energia sonora durante o período de medição:

$$L = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^t 10^{\frac{L(t)}{10}} dt \right) . \quad (11)$$

- O nível de pressão sonora percentil é o nível de pressão sonora atingido ou excedido durante k% do tempo. Por exemplo, L_{90} é, aproximadamente, o ruído de fundo.

Além das grandezas citadas acima, existem curvas de avaliação para quantificar o seu sinal e avaliar se é adequado ou não o ruído dentro de edificações. As *Noise Rating Curves* (NC) são adequadas para sinais estacionários e ruídos contínuos. Determinam o máximo LZS_{eq} em cada banda para diferentes critérios NC (PAUL, 2012).

A norma brasileira NBR 10152:2000 (ABNT, 2017) utiliza a combinação das grandezas e curvas de avaliação para estabelecer níveis de ruído para conforto acústico.

2.4 Tempo de reverberação

A reverberação ocorre em espaços fechados, como no caso dos dormitórios, esse fenômeno acústico acontece quando o som persiste nesse espaço devido às reflexões repetitivas ou devido o espalhamento nas superfícies da sala (ROCHA; SILVA, 2012).

Assim sendo, o tempo de reverberação (T60) é o intervalo de tempo necessário para o som decair 60 dB após a interrupção da fonte de interesse (LONG, 2005; ROCHA; SILVA, 2012).

Para cada ambiente existe um Tempo de Reverberação considerado ótimo e que varia conforme o volume e o seu uso. A norma (ABNT, 1992) apresenta um gráfico com tempos ótimos de reverberação para diferentes ambientes.

Anexo C – TIPOS DE FONTE SONORA

A propagação sonora depende do tipo de fonte sonora e das condições como, condições atmosférica, existência de elementos construtivos de isolamento, absorção, difração e/ou reflexão (FAHY, 2000).

Para acústica ambiental, a distância (r) entre a fonte sonora e o receptor normalmente é $r \gg \lambda$, onde λ é o comprimento de onda em metros [m] (PAUL, 2012). Considera-se que l é a maior dimensão da fonte sonora, logo, tem-se:

- Se $r > l/2$, tem-se fonte sonora pontual. As fontes sonoras pontuais produzem uma série de frentes de onda esféricas.
- Se $r < l/2$, tem-se fonte sonora em linha. As fontes sonoras em linha produzem uma série de frentes de onda cilíndricas. Por exemplo, tubulações por onde escoam gases de altas velocidades.
- Para distâncias elevadas da fonte sonora, a frente de onda será plana, independentemente do modelo da fonte sonora. Para ondas planas, o nível de pressão sonora será uniforme em qualquer secção transversal e constante ao longo do tubo de propagação sonora. Por exemplo, um tubo de impedância.

2.1 Lei da distância

A potência (W) ou energia (E) da fonte sonora pontual omnidirecional é radiada de forma uniforme em todas as direções. A energia atravessa uma área cada vez maior ao afastar-se da fonte, entretanto, desconsiderando a dissipação de energia no meio, a área superficial é constante conforme a Equação 12.

$$\int_S E = \text{constante} . \quad (12)$$

É possível observar na Figura 47, a fonte sonora pontual com superfície de controle esférica (S) com raio r .

Figura 47 – Fonte pontual com superfície de controle esférica.

Fonte: desenvolvido pela autora.

A relação entre a potência sonora W e intensidade sonora I é dada pela Equação 13,

$$W = I_{\max} S , \quad (13)$$

onde a Intensidade sonora máxima ($I_{\max}$) relaciona-se com a impedância através da Equação 14,

$$I_{\max} = \frac{1}{\rho c} p_{\text{ef}}^2 , \quad (14)$$

logo, tem-se a Equação 15:

$$W = \frac{1}{\rho c} p_{\text{ef}}^2 S . \quad (15)$$

Dividindo-se pela potência sonora de referência e com $S_0 = 1m^2$, tem-se a seguinte Equação 16:

$$\frac{W}{W_0} = \frac{\rho c p_{\text{ef}}^2 S}{\rho c p_0^2 S_0} . \quad (16)$$

Para obter-se uma relação logarítmica, tem-se a Equação 17:

$$10 \log \left(\frac{W}{W_0} \right) = 10 \log \left(\frac{p_{\text{ef}}^2}{p_0^2} \right) + 10 \log \left(\frac{S}{S_0} \right) , \quad (17)$$

em vista disso, tem-se a Lei da distância dada pela Equação 18 (PAUL, 2012):

$$L_w = L_p + 10 \log S . \quad (18)$$

Para uma fonte em linha livre, tem-se $S = 2\pi r l$. Onde, l é o maior comprimento da fonte. Assim, a Lei da distância para a fonte em linha livre é dado pelas Equação 19 e 20:

$$L_p(r) = L_w - 10 \log(2\pi r l) , \quad (19)$$

$$L_p(r) = L_w - 10 \log r - 10 \log l - 8 \text{ [dB]} . \quad (20)$$

Em vista disso, para a fonte em linha livre, o nível de pressão sonora diminui 3 dB a cada duplicação da distância. Para a fonte sonora pontual, o nível de pressão sonora diminui 6 dB a cada duplicação da distância da fonte (BISTAFA, 2008; FAHY, 2000; PAUL, 2012).

2.2 Onda sonora plana

A onda sonora plana possui a mesma direção de propagação em qualquer ponto de interesse no espaço e pode ser encontrada no interior de guias de onda (dutos, cilindros, etc.) (FAHY, 2000).

As premissas citadas abaixo, são relacionadas ao meio fluido através do qual a onda se propaga (FAHY, 2000):

- O fluido é homogêneo;
- O fluido é isotrópico;
- O fluido é inviscido;
- O fluido encontra-se em repouso e equilíbrio termodinâmico (exceto pelo movimento causado pela onda acústica);
- A magnitude do deslocamento das partículas do fluido causado pela perturbação acústica é tão pequeno que efeitos não lineares podem ser desprezados;

Desta forma, as únicas forças restantes no interior do duto capazes de acelerar as partículas do fluido resultam de variações espaciais de pressão. Assim, a pressão sonora é proporcional à deformação volumétrica sofrida por uma determinada massa de fluido, por consequência, a variação espacial da deformação volumétrica é um atributo essencial para a existência da onda sonora. A equação da onda plana expressa em termos de pressão sonora é (FAHY, 2000):

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \left(\frac{\rho_0}{\lambda P_o} \right) \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}. \quad (21)$$

2.3 Classificação das fontes sonoras

Para controle de ruído, pode-se dividir os mecanismos de geração mecânica de som em três grandes categorias, como ilustra a Figura 48.

Figura 48 – Mecanismos de geração mecânica de som em três grandes categorias.

1 Volume flutuante /Deslocamento em massa

2 Aceleração/ forças no fluido

3 Tensões de cisalhamento

Fonte: (FAHY; WALKER, 1998).

1. Fonte tipo 1 - Monopolo (esfera pulsante):

São as que possuem maior eficiência definida pela razão entre potência radiada e potência mecânica, elétrica ou química gerada ou absorvida pelo sistema. A principal característica deste tipo de fonte sonora é a geração de som pelo deslocamento transiente de fluido. Por exemplo, alto-falantes, sistema de exaustão automotiva e sirenes. (FAHY; WALKER, 1998)

O som é gerado a partir da variação do volume de fluido que atravessa uma dada área por unidade de tempo. Ou seja, o som é gerado a partir da aceleração do fluido.

Neste caso, a eficiência acústica é alta e possui baixa dependência da velocidade do fluxo. Pode-se observar na Equação 22 a eficiência acústica (η), onde c_0 é a velocidade do som [m/s], U é a velocidade do fluxo [m/s] e M é o número Mach:

$$\eta \sim \frac{U}{c_0} = M(M < 1). \quad (22)$$

2. Fonte tipo 2 - Dipolo (dois monopolos fora de fase):

O som é gerado a partir de forças que atuam no fluido devido ao fluxo do mesmo sobre superfícies e/ou corpos rígidos. Neste tipo de fonte embora sejam aplicadas forças (que variam com o tempo) no fluido, não há um deslocamento líquido global do volume de fluido (FAHY, 2000). Por exemplo, ruído dos pantógrafos de trens de alta velocidade, ruído de válvulas de controle de fluxo em tubulações e dutos de ventilação, ruído de pás de ventiladores e turbinas.

Neste caso, a eficiência acústica é média e possui média dependência da velocidade do fluxo. Pode-se observar na Equação 24 a eficiência acústica (η):

$$\eta \sim \left(\frac{U}{c_0}\right)^3 = M^3(M < 1). \quad (23)$$

3. Fonte tipo 3 - Quadrupolo (dois dipolos fora de fase):

O som é gerado a partir da variação das tensões de cisalhamento associadas com a mistura turbulenta de elementos/regiões de fluido que possuem diferentes velocidades (FAHY, 2000). Neste tipo de fonte, tanto o volume global de fluido deslocado, como a força resultante sobre o fluido são nulas. Este tipo de fonte é altamente ineficiente. Por exemplo, ruído de jato de aeronaves e ruído da camada limite turbulenta.

Neste caso, a eficiência acústica é baixa e possui alta dependência da velocidade do fluxo. Pode-se observar na Equação 24 a eficiência acústica (η):

$$\eta \sim \left(\frac{U}{c_0}\right)^5 = M^5(M < 1). \quad (24)$$

Anexo D – PSICOACÚSTICA

A psicoacústica trata da sensação auditiva e da percepção auditiva, ou seja, os efeitos subjetivos que o som impõe ao sistema auditivo (VORLÄNDER, 2007). A psicoacústica estuda a quantificação das sensações auditivas e estabelece relações matemáticas entre os estímulos acústicos e as sensações auditivas (PAUL, 2013).

O evento sonoro é produzido no córtex auditivo, em função dos impulsos nervosos que são gerados no sistema periférico, caracterizado pelas sensações auditivas. Para haver sensações sonoras perceptíveis pelo ser humano, essas vibrações devem estar em uma faixa de frequência definida entre 16 Hz a 20 kHz, e também deve estar dentro de uma faixa dinâmica entre 20 μ Pa a 200 Pa para que esteja dentro de limites compatíveis com a fisiologia humana e, então, o ouvido humano consiga traduzir esse estímulo sonoro em evento auditivo (PAUL, 2013).

As sensações auditivas dependem das propriedades físicas do som e da fisiologia do sistema auditivo, mas não dependem da psicologia humana. Desta forma, pode-se tratar sensações auditivas como: sensação volume sonoro, de agudeza do som, de flutuação sonora, de *roughness*, e da altura do som (*pitch*) para sons musicais (PAUL, 2013).

Entretanto a psicoacústica não pode prever a percepção sonora, como por exemplo o incômodo gerado por um som pois ela não pode prever a interpretação das sensações auditivas por processos cognitivos (PAUL, 2013).

Tanto a exposição ao som, quanto a percepção sonora, podem ter consequências negativas, como as perdas auditivas devido ao elevado nível de pressão sonora (PAINPSE¹), zumbido, problemas de comunicação e os efeitos extra-auditivos como: biológicos, fisiológicas e psicológicos (SINGH; DAVAR, 2004; BISTAFÁ, 2008; HOWARD; ANGUS, 2009).

Os efeitos negativos extra-auditivos são: sono, dificuldade de comunicação, prejuízo na capacidade de leitura e memória, problemas na saúde mental, possível incidência da doença cardiovascular devido a elevação da pressão arterial e reações fisiológicas envolvendo o sistema endócrino e cardiovascular. (TALBOTT; THOMPSON, 1995)

¹ A perda auditiva induzida por elevados níveis de pressão sonora (PAINPSE) depende do tempo de exposição.

A psicoacústica estuda também a parte da transformação do evento sonoro em estímulo sonoro, através do mecanismo físico da audição biauricular conforme mostra a Figura 49 (PAUL, 2013; BISTAFA, 2008).

Figura 49 – Mecanismo físico da audição.

Fonte: (PAUL, 2013).

É possível analisar através da Figura 49 que o evento auditivo é caracterizado por sensações auditivas e é transformado em percepções sonora no cérebro através de processos psicológicos (cognitivos e afetivos). As percepções sonoras são individuais e podem ser originadas de diferentes sensações auditivas (PAUL, 2013).

Existem duas maneiras pelas quais nosso aparelho auditivo percebe a informação sonora espacial: a diferença de intensidade do som que chega as orelhas e a diferença de fase entre as ondas que chegam as orelhas (tempo de chegada). Ambas as diferenças são causadas pela distância diferente entre fonte e cada uma das orelhas e também porque a cabeça funciona como anteparo (VORLÄNDER, 2007). Um sistema de referências relacionado a cabeça do receptor é representado pela Figura 50.

Figura 50 – Sistema de coordenadas relacionados a cabeça.

Fonte: (VORLÄNDER, 2007).

Uma das premissas da psicoacústica é que uma pequena variação na magnitude do estímulo não necessariamente leva a uma variação na magnitude da sensação. Isso ocorre porque é necessário que haja uma variação mínima no estímulo para que se tenha uma variação na sensação que pode ser diferenciada (PAUL, 2013).

A diferença na magnitude do estímulo que causa uma variação que pode ser justamente percebida é conhecida como diferença no limite do observável (*Just Noticeable Difference* = jnd), limiar diferencial (*Difference Threshold*) ou diferença no limiar (*Difference Limen*) (PAUL, 2013). Na Tabela 20 pode-se observar a diferença de nível de pressão sonora (ΔL) e a correspondente alteração da sensação de volume sonoro considerando espectro e históricos no tempo iguais ou pelo menos similares.

Tabela 20 – ΔL e a correspondente alteração da sensação de volume sonoro considerando espectro e históricos no tempo iguais ou pelo menos similares.

ΔL	Mudança na sensação de volume sonoro
1 dB	jnd para tons puros é menor do que jnd para outros sons
3 dB	jnd para outros sons que tons puros
5 - 6 dB	clara mudança
10 dB	aproximadamente a duplicação (2x) ou metade (1/2)
20 dB	aproximadamente quadruplo (4x) ou um quarto (1/4)

Fonte: (PAUL, 2013).