



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS TRINDADE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

Emiliana Rodrigues Costa

Estudo de isolamento sonoro e de ventilação de uma janela acústica ventilada

Florianópolis
2022

Emiliana Rodrigues Costa

Estudo de isolamento sonoro e de ventilação de uma janela acústica ventilada

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina, com requisito para a obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo. Área de Concentração: Projeto e Tecnologia do Ambiente Construído.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Simon Westphal.

Florianópolis

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Costa, Emiliana Rodrigues

Estudo de isolamento sonoro e de ventilação de uma janela acústica ventilada / Emiliana Rodrigues Costa ; orientador, Fernando Simon Westphal, 2022.

126 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Arquitetura e Urbanismo. I. Westphal, Fernando Simon. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Emiliana Rodrigues Costa

Estudo de isolamento sonoro e de ventilação de uma janela acústica ventilada

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Profa. Maria Fernanda de Oliveira, Dra.
Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Prof. Erasmo Felipe Vergara Miranda, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Fernando Simon Westphal, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em arquitetura e urbanismo.

Prof. Paulo Colosso, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação

Prof. Fernando Simon Westphal, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2022.

Dedico aos meus pais, que me apoiam desde o meu primeiro suspiro, ao Samuca, que com isso ele possa entender a minha ausência um dia, e principalmente, a esperança de um futuro melhor para ciência brasileira. Eis aqui a minha contribuição.

AGRADECIMENTOS

Essa pesquisa foi desenvolvida durante um período muito difícil para toda humanidade, possivelmente um marco histórico que será lembrado para sempre nos livros de história – a pandemia de COVID-19, causada pelo vírus SARS-COV-2. Mas ler o acontecido, não é o mesmo que ver e vivenciar os dias com medo, incertezas, reclusão e longe da família. Por isso, primeiramente, gostaria de agradecer a mim mesma, pois se eu não tivesse acreditado e lutado, esse trabalho ainda seria apenas um sonho.

Gostaria de agradecer o apoio dos meus pais, Emidio e Francisca, por terem acreditado e investido nesse sonho. Agradeço aos outros membros da família, que auxiliaram para que eu mantivesse a minha saúde mental durante todo o processo, além de que oraram por mim.

Agradeço aos meus amigos de universidade e de Florianópolis, que foram essenciais para que eu chegasse até essa conquista, também o auxílio de desconhecidos e amigos de vida, obrigada pelos momentos compartilhados e pelo conhecimento adquirido.

Agradeço a todos do Laboratório de Conforto Ambiental (LabCon), do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE), do Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA) e, do Laboratório de Termodinâmica e Tecnologia Supercrítica (LATESC), sem o apoio e compreensão dos alunos e professores desses lugares, essa pesquisa não seria possível, muito obrigada.

Agradeço aos professores que tive a oportunidade de compartilhar conhecimento, em especial ao meu professor orientador Fernando Westphal, que me acompanhou durante essa jornada.

Por fim, agradeço a vida por ter me dado essa oportunidade. Gostaria de encerrar com a frase dita pela minha querida amiga de longa data Bruna Negreiros: “Sempre dá certo para quem se dá às coisas”.

RESUMO

O sistema de controle de ruído em fachadas através das janelas acústicas ventiladas permite a passagem do fluxo de ar ao mesmo tempo em que impede a entrada do ruído externo para o ambiente interno. Esses elementos de fachada estão sendo amplamente estudados na Ásia e Europa nos últimos 50 anos, porém no Brasil ainda é uma ideia nova, dos últimos 15 anos, que vem sendo introduzida ao mercado de construção civil. Com base nesse cenário, esta pesquisa objetiva identificar uma solução que reduza internamente os ruídos provindos do exterior ao passo que permite a passagem de ventilação natural, com um equilíbrio entre ambas as variáveis, de maneira a satisfazer o usuário. Para tanto, foi realizado uma conceituação dos termos utilizados na pesquisa sobre os assuntos abordados expostos no referencial teórico e, posteriormente, uma revisão de literatura sobre tipologias de janelas acústicas ventiladas existentes no mercado atual. Ao fim da revisão de literatura foi escolhida uma tipologia de janela acústica ventilada, a janela plenum, para realizar os ensaios em campo, variando a disposição de suas aberturas entre 50 cm, 40 cm, 30 cm, 20 cm, 10 cm e aberturas alinhadas. Estes experimentos, com o protótipo de janela plenum, foram divididos em duas etapas, o teste de isolamento sonoro na sala de reunião do Laboratório de Conforto Ambiental (LabCon), e o teste de ventilação na sala de reunião do Laboratório de Termodinâmica e Tecnologia Supercrítica (LATESC). O ensaio acústico foi realizado conforme ABNT NBR ISO 16283-3. O ensaio de ventilação natural foi realizado segundo o teste com gás traçador descrito por Sherman (1990), utilizando o método de decaimento simples do gás escolhido, dióxido de carbono (CO₂). Os resultados de ambos os ensaios de campo mostraram que o protótipo de janela plenum fabricado em MDF pode reduzir até 8,5 dB de $D_{1s,2m}$ a mais, em comparação com a janela maxim-ar aberta, e no comportamento de ventilação, todas as aberturas apresentaram índice de trocas de ar (AER) suficiente para manter a salubridade da sala de reunião, entre máxima 2,50 h⁻¹ de AER e mínima 0,89 h⁻¹ de AER. Quanto ao comportamento das configurações de aberturas, há destaque para as aberturas a 30 cm e a 20 cm do protótipo de janela plenum que apresentaram o equilíbrio entre o isolamento sonoro (7,6 dB e 8,0 dB de atenuação a mais que a janela aberta) e a ventilação natural (1,19 h⁻¹ e 1,0 h⁻¹ troca de ar contra 1,22 h⁻¹ troca da janela com 50 cm de aberturas) sendo as disposições de aberturas recomendadas para uso na janela plenum e futuros estudos.

Palavras-chave: Desempenho acústico. Ventilação natural. Janelas acústicas ventiladas. Desempenho de esquadrias. Janela plenum. Decaimento de CO₂.

ABSTRACT

The noise control system on facades through the ventilated acoustic windows allows the passage of air flow while preventing the entrance of external noise to the internal environment. These facade elements have been widely studied in Asia and Europe in the last 50 years, but in Brazil it is still a new idea, from the last 15 years, that has been introduced to the civil construction market. Based on this scenario, this research aims to identify a solution that internally reduces the noise coming from the outside while allowing the passage of natural ventilation, with a balance between both variables, in order to satisfy the user. For that, a conceptualization of the terms used in the research on the approached subjects exposed in the theoretical framework was carried out and, later, a literature review on typologies of ventilated acoustic windows existing in the current market. At the end of the literature review, a typology of ventilated acoustic window was chosen, the plenum window, to carry out the field tests, varying the arrangement of its openings between 50 cm, 40 cm, 30 cm, 20 cm, 10 cm and aligned openings. These experiments, with the plenum window prototype, were divided into two stages, the sound insulation test in the meeting room of the Laboratory of Environmental Comfort (LabCon), and the ventilation test in the meeting room of the Laboratory of Thermodynamics and Supercritical Technology. (LATESC). The acoustic test was performed according to ABNT NBR ISO 16283-3. The natural ventilation test was performed according to the tracer gas test described by Sherman (1990), using the simple decay method of the chosen gas, carbon dioxide (CO₂). The results of both field trials showed that the prototype plenum window made of MDF can reduce up to 8.5 dB of $D_{1s,2m}$ more, compared to the open maxim-air window, and in the ventilation behavior, all openings showed sufficient air exchange rate (AER) to maintain the salubrity of the meeting room, between a maximum of 2.50 h⁻¹ of AER and a minimum of 0.89 h⁻¹ of AER. As for the behavior of the opening configurations, the openings at 30 cm and 20 cm of the plenum window prototype are highlighted, which presented the balance between sound insulation (7.6 dB and 8.0 dB of attenuation more than the open) and natural ventilation (1.19 h⁻¹ and 1.0 h⁻¹ air change versus 1.22 h⁻¹ window change with 50 cm openings) with opening arrangements recommended for use in the plenum window and future studies.

Keywords: Acoustic performance. Natural ventilation. Ventilated acoustic windows. Frame performance. Plenum window. CO₂ decay.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema massa-mola-massa.....	21
Figura 2 – Curva característica de perda de transmissão em função da frequência do som incidente em painéis sólidos e homogêneos.....	22
Figura 3 – Relação entre a espessura e a frequência crítica de painéis de diferentes materiais.....	24
Figura 4 – Frequência crítica de espessuras distintas de vidro simples.....	25
Figura 5 – Janelas comuns: sem e com veneziana.....	28
Figura 6 – Tipologias de janelas acústicas ventiladas.....	31
Figura 7 – Defletores acústicos em janelas.....	32
Figura 8 – Persiana parcialmente fechada e persiana totalmente fechada.....	35
Figura 9 – Ressonadores acústicos em janela.....	40
Figura 10 – Funcionamento da janela plenum.....	42
Figura 11 – Proposta geométricas de cobogós.....	46
Figura 12 – Ventiladores acústicos.....	47
Figura 13 – Testes em peitoris ventilados.....	49
Figura 14 – Peitoril acrescido lã de rocha ou painel ressonador.....	49
Figura 15 – Protótipode janela plenum.....	60
Figura 16 – Implantação doprotótipo na janela maxim-ar.....	61
Figura 17 – Local do experimento.....	67
Figura 18 – Planta baixa sala LabCon e os pontos de medição.....	68
Figura 19 – Corte esquemático sala LabCon.....	68
Figura 20 – Sala LabCon.....	69
Figura 21 – Janela da sala LabCon.....	70
Figura 22 – Acoplagem do protótipo à janela.....	70
Figura 23 – Medição no ambiente externo.....	71
Figura 24 – Recurso utilizado na medição do tempo de reverberação.....	72
Figura 25 – Sonômetro utilizado.....	74
Figura 26 – Materiais utilizados e disposição da instalação para a geração de ruído externo.....	75
Figura 27 – Esquema de conexão dos componentes.....	76
Figura 28 – Localização da sala de reunião.....	77
Figura 29 – Sala utilizada para o ensaio de ventilação – Planta baixa.....	78
Figura 30 – Sala utilizada para o ensaio de ventilação - Corte.....	78
Figura 31 – Sala onde foram realizados os testes (Paredes, piso e teto).....	79
Figura 32 – Janela onde foi acoplado o protótipo.....	80
Figura 33 – Acoplagem do protótipo à janela.....	80
Figura 34 – Medição com o HOB0.....	81
Figura 35 – Aparelho HOB0.....	82
Figura 36 – Cilindros de CO ₂	82
Figura 37 – Influência das dimensões no experimento.....	900

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Esquema de escolha de amostra a partir dos termos pesquisados	30
Quadro 2 – Comportamento acústico dos defletores acústicos	34
Quadro 3 – Comportamento acústico das persianas acopladas	35
Quadro 4 – Tipos de sacadas em fachadas	38
Quadro 5 – Comportamento acústico das sacadas.....	39
Quadro 6 – Comportamento acústico dos ressonadores e refratores acústicos	41
Quadro 7 – Comportamento acústico das janelas plenum.....	45
Quadro 8 – Balanço geral de comportamento ventilação e acústico.....	56
Quadro 9 – Impacto na arquitetura	57
Quadro 10 – Viabilidade técnica	58
Quadro 11 – Balanço geral de índices	58
Quadro 12 – Tabela da Técnica do gás-traçador em uma única área	65
Quadro 13 – Configurações de abertura do protótipo adotadas nas medições.....	73
Quadro 14 – Dados das medições	74
Quadro 15 – Diferença de isolamento entre a janela aberta e o protótipo a 10 cm.....	91
Quadro 16 – Tempo de reverberação (Eyring) sala de reunião LabCon.....	92
Quadro 17 – Índice de renovação do ar ou <i>Air Exchange Rate</i> (AER).....	97
Quadro 18 – Comparativo das posições do protótipo e janela aberta	99

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Medições iniciais da fachada com a janela aberta e fechada por banda de um terço de oitava das faixas de frequência.....	86
Gráfico 2 - Média energética dos NPS medidos (L_2) por banda de um terço de oitava das faixas de frequência.....	87
Gráfico 3 – Diferença de nível ($D_{ls,2m}$) por banda de um terço de oitava das faixas de frequência.....	88
Gráfico 4 – Curva modelo de decaimento de CO_2 na situação: protótipo aberturas alinhadas	94
Gráfico 5 – Curva de decaimento de CO_2 geral	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ACH – *Air Changes Per Hour* (troca de ar por hora^{*})
AER – *Air exchange rate* (índice de troca de ar^{*})
CO₂ – Dióxido de carbono
D_{n,e,w} - Índice de avaliação de isolamento acústico padrão
D_{nt} – Diferença padronizada de nível ponderada
D_{ls,2m} – Diferença de nível
D_{ls,2m,nT} – Diferença de nível padronizada
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IL- *Insersion loss* (perda de inserção^{*})
ISO – *International Organization for Standardization* (Organização Internacional para a Padronização^{*})
L₁₀ – Média de perda de medições internas
L₂ - Média energética
L_{1,2m} – Nível de pressão sonora médio em ambiente externo
LabCon – Laboratório de Conforto Ambiental
LabEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
LVA – Laboratório de Vibrações e Acústica
LATESC – Laboratório de Termodinâmica e Tecnologia Supercrítica
M - Massa
MDF – *Medium Density Fiberboard* (Placa de fibra de media densidade^{*})
NPS – Nível de Pressão Sonora
O₂ – Oxigênio
OMS – Organização Mundial da Saúde
P - Pressão
PAF – Percentual de Abertura de Fachada
PET – Polietileno Tereftalato
PPM – Partes por milhão
PVC – Policloreto de vinil
RH – Umidade relativa
R_w – Índice de redução sonora
SPL – *Sound pressure level* (nível de pressão sonora^{*})
SRI – *Sound Reduction Index* (índice de redução de som^{*})
WWR – *Window to wall ratio* (Relação de proporção entre parede e janela^{*})

* Tradução livre

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA	15
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo geral	17
1.2.2	Objetivos específicos	17
2	REFERÊNCIAL TEÓRICO	19
2.1	JANELA	19
2.2	ISOLAMENTO SONORO	20
2.3	VENTILAÇÃO NATURAL	27
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	28
3.1	TIPOLOGIAS DE JANELAS VENTILADAS ACÚSTICA	29
3.1.1	Defletores acústicos	31
3.1.2	Persianas acopladas (janelas integradas)	34
3.1.3	Sacadas	36
3.1.4	Ressonadores e refratores acústicos	40
3.1.5	Janelas plenum	42
3.2	ADEQUAÇÃO DA ARQUITETURA AO CLIMA: OUTROS ELEMENTOS DE FACHADA.....	45
3.3	COMPORTAMENTO DAS JANELAS VENTILADAS ACÚSTICAS	50
3.3.1	Conforto acústico e térmico	50
3.3.2	Impacto estético na arquitetura	55
3.3.3	Viabilidade técnica	56
3.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE AS JANELAS VENTILADAS ACÚSTICAS	57
4	MÉTODOS	59
4.1	OBJETO DE ESTUDO: PROTÓTIPO DE JANELA PLENUM	59
4.2	VARIÁVEIS DO PROTÓTIPO DE JANELA PLENUM	61
4.3	NORMAS ADOTADAS	61
4.3.1	ABNT NBR ISO 16283-3	62
4.3.2	ABNT NBR ISO 3382-2	64
4.3.3	Técnica de gás traçador	65
4.4	ESTUDO ACÚSTICO.....	66
4.4.1	Local do experimento	66
4.4.2	Implantação do objeto de estudo a janela existente	70
4.4.3	Medições	71
4.4.4	Procedimentos de medição	72
4.4.5	Equipamentos utilizados	74
4.5	ESTUDO DE VENTILAÇÃO	76
4.5.1	Local do experimento	77
4.5.2	Implantação do objeto de estudo a janela existente	80
4.5.3	Medições	81
4.5.4	Equipamentos utilizados	81
4.5.5	Procedimentos de medição	83
4.6	LIMITAÇÕES EXPERIMENTAIS	83
5	RESULTADOS E ANÁLISES.....	85
5.1	COMPORTAMENTO ACÚSTICO DA JANELA PLENUM.....	85
5.1.1	Média energética dos NPS medidos ($L_{1,2m}$ e L_2)	85
5.1.2	Diferença de nível dos NPS medidos ($D_{1s,2m}$)	88
5.1.3	Diferença de nível padronizado dos NPS medidos ($D_{1s,2m,nT}$)	91

5.2	COMPORTAMENTO DA VENTILAÇÃO PELA JANELA PLENUM.....	93
5.2.1	Decaimento de CO₂ por minutos	93
5.3	ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS	98
6	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	101
6.1	CONCLUSÕES	101
6.1.1	Comportamento das esquadrias ventiladas acústicas	101
6.1.2	A eficiência do protótipo de janela plenum.....	102
6.1.3	Conclusões gerais	104
6.2	CONSIDERAÇÕES FINAIS	104
6.2.1	Limitações da pesquisa.....	104
6.2.2	Sugestões para trabalhos futuros	105
	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	106
	APÊNDICE A – Planilha de cálculos acústicos.....	111
	APÊNDICE B – Planilha de cálculos de ventilação.....	118

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA

O ruído proporcionado pelo tráfego veicular urbano é um dos principais poluentes sonoros a afetar a população em cidades densamente povoadas. Essa situação é potencialmente mais grave em cidades que, para satisfazer as demandas habitacionais da população, possuem grande número de edificações residenciais construídas próximas ou ao lado das principais redes de tráfego. Nesses casos, quando os edifícios estão situados perto de estradas de tráfego intenso, o ruído ambiental do sistema de transporte se torna uma fonte de tormento à população local (TONG, 2017).

O ruído de tráfego constante tem impactos adversos na saúde humana. A exposição excessiva pode representar uma ameaça, pois o ruído interfere na qualidade do descanso e no sono, podendo despertar emoções negativas, reduzir a eficiência no trabalho etc (LI, 2020). Segundo estatísticas da Organização Mundial da Saúde (OMS) em 2020, pelo menos um milhão de pessoas são afetadas por causa do ruído relacionado com o tráfego na Europa Ocidental todos os anos. O ruído do tráfego também foi classificado, logo atrás da poluição do ar, como a segunda maior fonte de estresse ambiental apta a prejudicar a saúde humana (LI, 2020). Assim, percebe-se uma necessidade urgente de dispositivos de isolamento acústico para aliviar o desconforto causado pelo ruído.

O controle do ruído a partir da fonte sonora, além de ser uma solução onerosa, requer iniciativa governamental promovendo mudanças legislativas e adaptação do setor tráfego veicular urbano, bem como construção de mecanismos antirruídos e utilização de tecnologias que podem demorar anos até que possam ser executadas em larga escala. Isso faz com que o controle do ruído pela transmissão seja o mais recomendado atualmente, procurando soluções rápidas e eficazes para melhorar o conforto das pessoas residentes nas proximidades de fontes externas de ruído de tráfego veicular rodoviário (DU *et al.*, 2020).

Soluções como as barreiras acústicas nas laterais de rodovias são estruturas comumente usadas em áreas urbanas e rurais para reduzir a exposição do ser humano ao ruído de tráfego proporcionado pela malha rodoviária nas proximidades de áreas residenciais. Esforços têm sido feitos para alterar geometrias e materiais das barreiras a fim diminuir o impacto dos ruídos de tráfego veicular na beira de estradas (Du *et al.*, 2020)

No entanto, não é uma medida economicamente viável, além de existirem muitos casos em que tais estruturas maciças não podem ser construídas devido às restrições

geométricas que se impõem e outros parâmetros locais. Existem pesquisas citando o uso de vegetação para reduzir o ruído, contudo os resultados mostram um comportamento acústico menos eficiente (TONG, 2017).

Por sua vez, a solução de aumento da estanqueidade de janelas ou aberturas nas fachadas dos edifícios pode ser uma forma econômica de evitar intrusão de ruído. Porém, esta medida resulta em ventilação natural deficiente. Considerando isso, pesquisas contínuas têm sido feitas para desenvolver dispositivos e técnicas que consigam uma satisfatória redução de ruído sem comprometer a ventilação natural ao mesmo tempo, proporcionando um ambiente tranquilo com boa qualidade do ar interno (LEE, 2020).

Desse modo, faz-se necessária a criação de formas alternativas de mitigação do ruído urbano e reduzir a exposição sonora das pessoas dentro das residências. Nesse sentido, o tratamento nos dispositivos que são anexados à fachada podem ser soluções para lidar com ruído urbano provenientes de várias fontes, incluindo o tráfego veicular urbano. Este tratamento se faz importante, pois o ruído se propaga principalmente do exterior para o ambiente interno por meio de fachadas de edifícios. Além das paredes externas, grandes porções das fachadas são cobertas por janelas projetadas para permitir a entrada de luz natural e ventilação. Por outro lado, isso faz com que a janela se torne um ponto de fragilidade acústica da fachada, pois a esquadria constitui o caminho principal para o ruído adentrar no ambiente construído (TONG, 2017).

Dessa forma, a ventilação natural e o controle de ruído acabam se tornando duas questões conflitantes. Quando a ventilação natural é permitida, as janelas se tornam o principal caminho para entrada de ruído externo. Como resultado, os residentes que vivem na cidade com altos níveis de ruído de tráfego preferem fechar todas as janelas e usar sistema de ar condicionado e, conseqüentemente, esse uso de climatização aumenta a demanda por eletricidade, elevando o consumo de energia elétrica e contribuindo, finalmente, para problemas ambientais, indo contra o princípio da sustentabilidade, tornando-se, portanto, uma opção energeticamente não eficiente (LI, 2019).

Como mencionado, faz-se importante os estudos que busquem conciliar essas duas grandezas opostas, porém a janela acústica ventilada é um termo de estudo recente no Brasil, datando do começo do século XXI. O maior quantitativo de pesquisas neste sentido é feito na Ásia e na Europa, tendo como intuito principal, a resolução de problemas como a qualidade do ar e o controle do ruído. Esses tipos de janelas permitem um fluxo de entrada e saída de ar com a atenuação do ruído externo, tornando-se uma alternativa econômica e eficaz acusticamente. Alguns exemplos estudados na pesquisa são janelas com defletores acústicos,

com persianas acopladas, com sacadas, com refratores acústicos e a composição da janela plenum. Cada tipo apresenta o seu comportamento de controle de ruído e passagem do fluxo de ar. Neste trabalho, busca-se estudar muitos parâmetros inerentes às janelas plenum, um sistema de duas cavidades escalonadas de entrada e saída de ar que apresenta os melhores resultados de comportamento de ventilação e acústico (LEE, 2020).

Diante das alternativas de janelas acústicas ventiladas estudadas, a janela plenum se destaca pela sua eficiência em ambos os campos do conforto – acústico e térmico. Criada pelo conceito de câmara plenum para a redução de ruídos em dutos, ela foi proposta para ser usada no sistema de janela por Ford e Kerry (1973). As aberturas de entrada e saída da janela foram projetadas em uma configuração em zigue-zague para bloquear o caminho direto do som e permitindo passagem livre do ar para o ambiente interno.

Este sistema de abertura de entrada e saída escalonada, nomeado como janela plenum, tem atraído atenção de muitos pesquisadores, pois aparenta fornecer alto isolamento acústico ao mesmo tempo em que permite ventilação natural ao ambiente interno. Esse dispositivo é testado para ser mais eficaz no fornecimento de proteção acústica para os edifícios residenciais em comparação com o sistema de outras janelas convencionais.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Essa pesquisa tem como objetivo principal analisar janelas acústicas ventiladas, com enfoque na janela plenum, como dispositivo de controle de ruído de fachada quanto ao comportamento acústico – controle de entrada do ruído externo –, e ao comportamento de ventilação – controle do fluxo de entrada e saída de ar.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Coletar dados sobre configurações de janelas ventiladas que promovam satisfatória isolamento sonoro e ventilação natural;
- b) Avaliar o isolamento sonoro de um protótipo de janela ventilada com medições de campo;
- c) Conferir o decaimento simples do gás traçador (CO₂) após a instalação do protótipo de janela plenum com diferentes configurações de abertura, e;

d) Promover uma análise comparativa dos dados obtidos sobre o comportamento de vedação acústica e de ventilação do ar da janela plenum com o resultado de outras pesquisas existentes que utilizam dispositivos de fachada.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, apresentam-se alguns conceitos teóricos importantes para o desenvolvimento e entendimento desta pesquisa. Os conceitos se referem às janelas, aos termos acústicos e de ventilação.

2.1 JANELA

Nesta seção, preocupa-se com o entendimento dos elementos básicos sobre a janela. A começar com elemento de fachada que pode ser considerado tudo que, em uma edificação, compoñha a estrutura de uma parede externa e suas limitações referentes aos lados, ao chão e ao teto. Estes elementos de fachada podem ser vidros, portas, pérgulas, esquadrias, janelas etc. (ABNT, 2017a).

Já a abertura de fachada é todo e qualquer vazio na fachada que permita a interação entre o meio externo e interno, seja essa interação térmica, visual ou acústica. A abertura de fachada pode ser conceituada como uma abertura existente na parede, que pode receber uma esquadria (ABNT, 2017a).

Janela é esquadria, vertical ou inclinada, geralmente envidraçada, destinada a preencher um vão, em fachadas ou não. Entre outras, sua finalidade é permitir a iluminação e/ou ventilação de um recinto para outro (ABNT, 2017a). Com relação à janela, pode-se considerar a abertura na estrutura de uma fachada, ou parede interna em uma edificação que se destina a garantir ventilação e iluminação ao interior de tal edificação. A mesma será mais ou menos eficiente a partir da consideração de fatores como capacidade em promover ventilação natural, a entrada de iluminação e a retenção de ruídos externos por exemplo.

A janela plenum busca a maior eficiência com relação à ventilação natural e iluminação natural, mantendo o contato visual com o exterior e a redução substancial dos ruídos advindos do meio externo à edificação (TANG, 2017a).

Para isso, este modelo de janela conta com uma disposição de aberturas duplas, ou seja, uma externa e outra interna, dispostas em desalinho. Tal disposição consistente em duas camadas de janela, uma externa que em geral são folhas dobradiças de giro ou pivotante, e uma janela interna que é de correr (TANG, 2017a), fazem com que barrem os ruídos que entram na edificação sem comprometer a ventilação natural. A sua construção em painéis transparentes também visa a garantir que a iluminação natural adentre o ambiente interno.

2.2 ISOLAMENTO SONORO

Passa-se neste momento a conceituação dos parâmetros acústicos que se fazem importantes para este estudo. A começar sobre a lei da massa, Nepomuceno (1994) afirma que quanto maior for a massa de um corpo, igualmente maior tenderá a ser o seu isolamento sonoro. Dada à impossibilidade de se construir paredes que sejam mais espessas, uma estratégia pode ser lançar mão de materiais mais densos como, por exemplo, placas de metais como o chumbo ou ferro.

Nesse sentido, segundo a Lei de Berger, também conhecido como Lei da Massa Teórica, estabelecida empiricamente em 1930 (AMORIM; LICARIÃO, 2005), o cálculo da redução do nível sonoro é função logarítmica da massa e da frequência. Dobrada a massa obtém-se uma redução de aproximadamente 6 dB no nível de pressão sonora, conforme a Equação 1.

$$SRI = -42,4 + 20\log_{10}(\sigma \times f)$$

Onde:

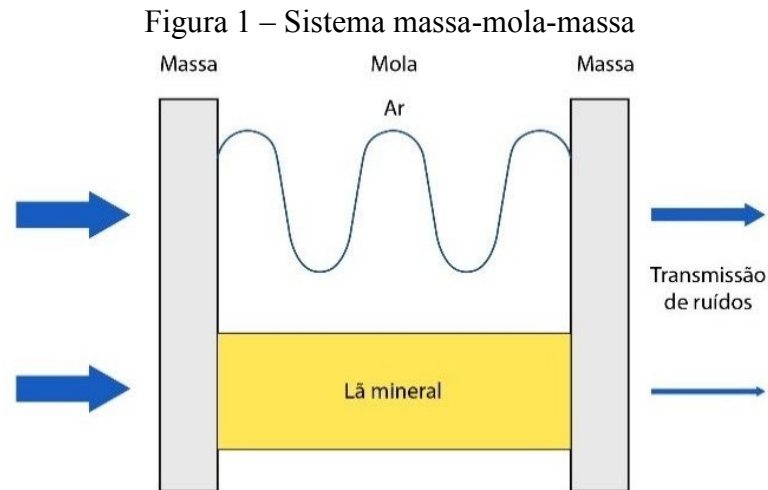
SRI = Isolamento da parede, em dB;

σ (sigma) = Densidade superficial do material, em kg/m²;

f = Frequência, em Hz.

O sistema massa-mola, amplamente utilizado na Física para se estudar a oscilação de partículas e pode ser considerado um dos tipos mais simples de sistemas osciladores harmônicos.

Um sistema massa mola, considerado simples, pode ser constituído por um corpo de massa (m) a se saber, acoplado a uma mola com determinado fator restaurador (k) que, por sua vez, está ligada em um ponto fixo qualquer (Figura 1). Sempre que há uma oscilação no corpo com massa por alguma força atuante no sistema que o desloque de sua posição inicial, afastando-o do ponto de fixação da mola, surge uma força restauradora (F) que incide sobre o corpo tentando trazê-lo a situação inicial (LIMA; ZENERATO, 2016, p. 28).

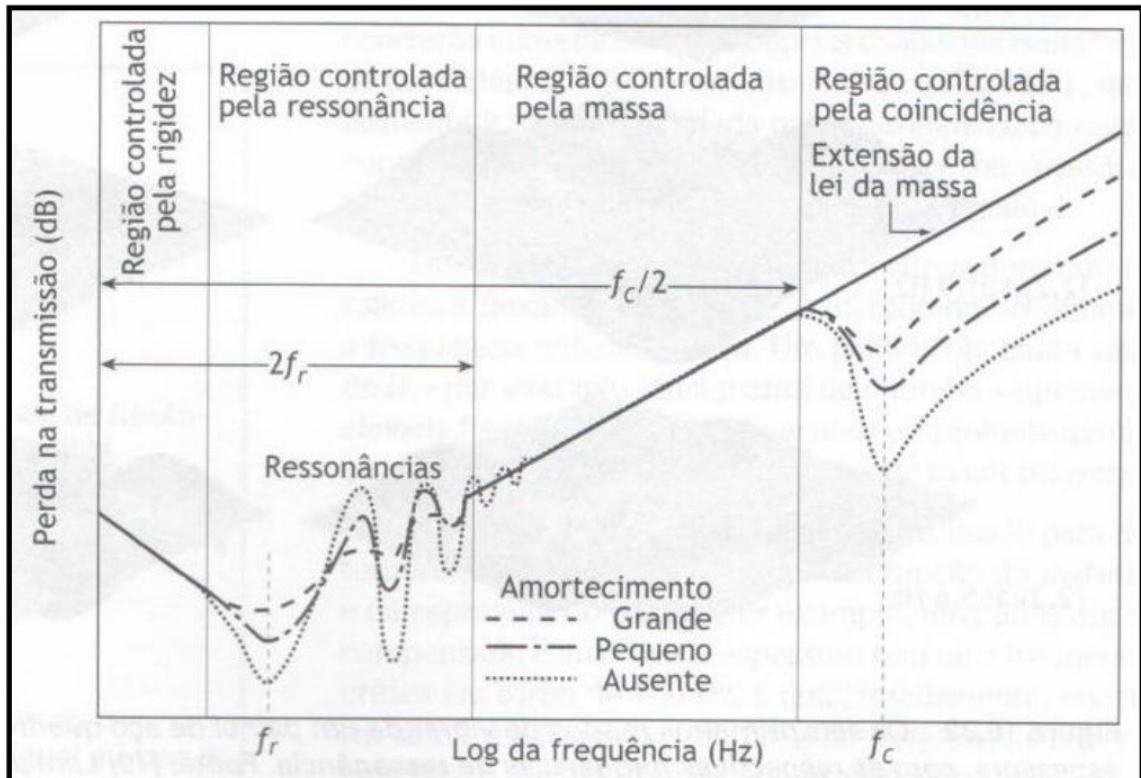


Fonte: Portal Acústica, 2019

Por conta da não continuidade dos meios constituintes dos sistemas conhecidos por massa-mola-massa, as diferenças relacionadas à impedância tendem a causar grandes perdas energéticas. Neste sentido, uma parte de toda a energia sonora pode ser convertida em energia térmica ou retorna ao ambiente de origem, resultando em um aumento do isolamento acústico do conjunto, em relação ao sistema simples de massa (GERGES, 2000).

Neste sentido, massas maiores tendem a diminuir a ocorrência de vibrações e consequentemente a probabilidade da transmissão sonora através do sistema de vedação. Assim, a medida que a espessura de um corpo é aumentado, o isolamento acústico da mesma é aumentado em termos globais, ou seja, para algumas frequências. O sistema – avaliado pelos valores da Perda de Transmissão Sonora (PT) ou do Índice de Redução Sonora (R) –, aumenta aproximadamente 6 dB, sendo que o desempenho do sistema melhora, sobretudo, para altas bandas de frequências (GERGES, 2000). A lei da massa apresenta limitações e ela é válida para frequências abaixo da frequência crítica e acima da frequência de ressonância. A Figura 2 mostra a curva de controle pela massa:

Figura 2 – Curva característica de perda de transmissão em função da frequência do som incidente em painéis sólidos e homogêneos



Fonte: Bistafa, 2011

Como se vê, a curva pode ser subdividida em diferentes regiões. Cada uma destaca a propriedade da parede que mais influência para a perda de transmissão. Para frequências inferiores à de ressonância (f_r), o isolamento depende das características de rigidez da parede analisada. A partir da primeira frequência de ressonância, contudo, a perda de transmissão é controlada pelas ressonâncias mecânicas do painel no movimento de flexão. Conforme afirma Bistafa (2011, p. 281), nessa região “o movimento do painel é amplificado, sendo o som incidente eficazmente transmitido pela parede, com queda da perda na transmissão”. Cada frequência de ressonância está associada a um modo particular de vibração de um painel ideal e é dada pela variação dos índices i e j na equação a seguir:

$$f_{rij} = \frac{\pi}{2} \left(\sqrt{\frac{B}{M}} \right) \left(\frac{i}{a^2} + \frac{j}{b^2} \right) \text{ Hz; } [i, j = 1, 2, 3 \dots]$$

Onde:

B é a rigidez à flexão;

M é a densidade superficial;

a é a largura do painel;

b é o comprimento do painel.

Bistafa (2011) cita que as frequências de ressonância estão ligadas à combinação construtiva de ondas de flexão que se propagam pelo painel e se refletem em suas bordas. As condições de contorno dessas bordas, portanto, influenciam as frequências de ressonância do painel estudado.

A partir do dobro da primeira frequência de ressonância ($2f_r$), a perda de transmissão é dada pela já conhecida lei da massa, válida até a metade da chamada frequência crítica ($f_c/2$). Depois desse ponto, há uma nova diminuição do isolamento devido à coincidência da frequência do som incidente com a frequência de uma vibração natural da parede, produzida na direção de sua superfície por ondas sonoras que nela incidem obliquamente (DE MARCO, 1982). Observa-se, então, uma nova região no gráfico, controlada pela coincidência. A frequência crítica, correspondente à menor frequência de coincidência, é dada pela seguinte equação:

$$f_r = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{M}{B}}$$

Onde:

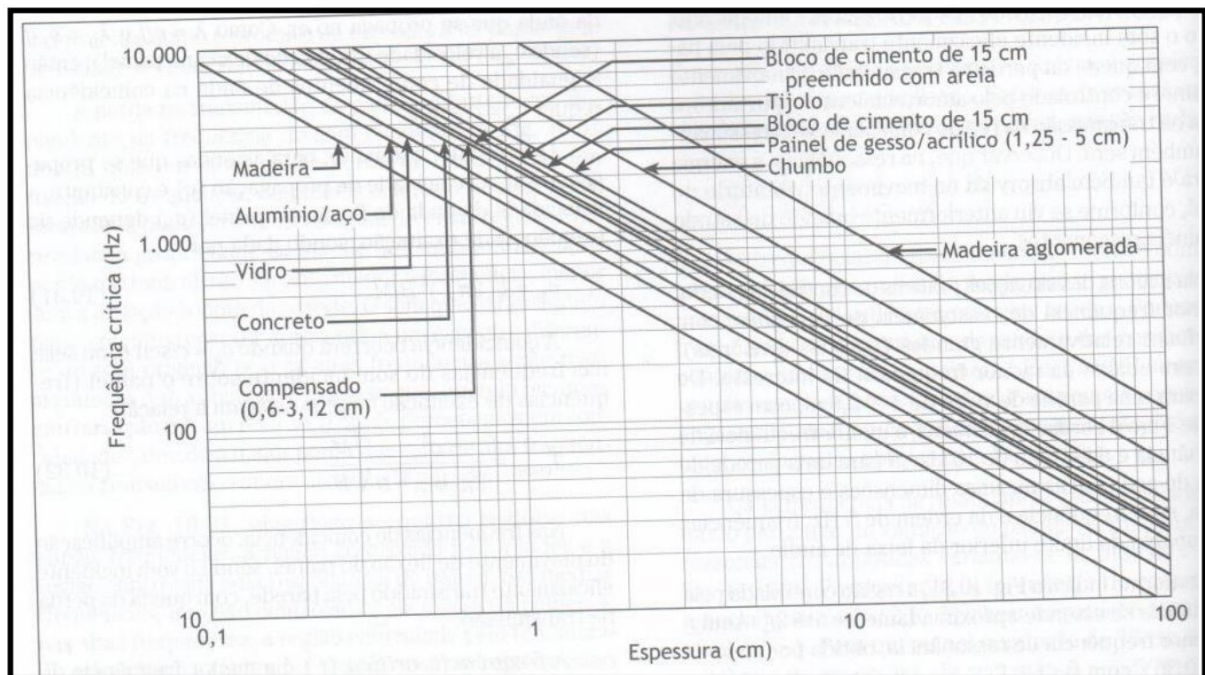
c é a velocidade de propagação da onda sonora;

M é a densidade superficial;

B é a rigidez à flexão.

A seguir, o gráfico da Figura 3 mostra como determinar a frequência crítica de cada material em função de sua espessura:

Figura 3 – Relação entre a espessura e a frequência crítica de painéis de diferentes materiais



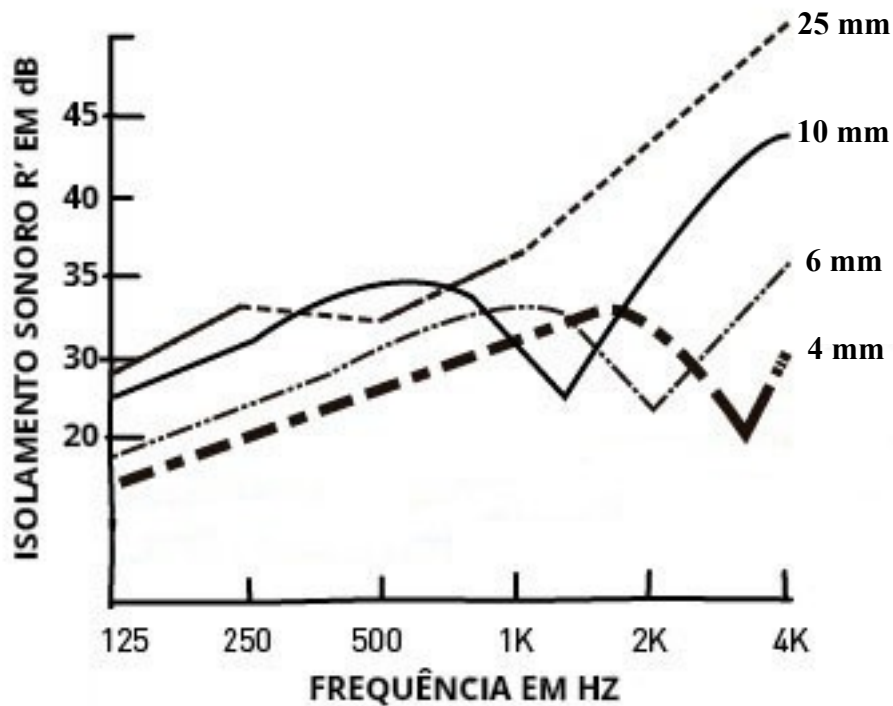
Fonte: Bistafa, 2011

Para exemplificar a utilização do gráfico anterior, Bistafa (2011) cita uma divisória de compensado com 3 cm de espessura. Sua frequência crítica está em torno de 700 Hz, o que a coloca na região central da faixa de frequências coberta pela fala. Desse modo, um ambiente isolado por divisórias desse tipo terá sua privacidade prejudicada.

Em outro exemplo, um vidro simples espesso tende a proporcionar maior redução na transmissão sonora, do que um com menos espessura. No entanto, dependendo de sua composição, o vidro pode transmitir o som de forma mais eficaz em bandas de frequências específicas. As distintas composições de vidro simples tendem a apresentar determinada frequência relacionada com características do vidro, o que pode ser chamado de frequência crítica.

Na Figura 4 abaixo mostra a perda de transmissão por bandas de terço de frequências para algumas espessuras de vidros simples. O vidro simples de espessura 25 mm possui uma redução do isolamento sonoro na faixa de frequência de 500 Hz, tornando-se sua frequência crítica. O mesmo ocorre para o vidro de 10 mm em 1.500 Hz, 6 mm em 2.000 Hz e 4 mm em 2.500 Hz, respectivamente.

Figura 4 – Frequência crítica de espessuras distintas de vidro simples



Fonte: Lord e Templeton, 1995

O nível de pressão sonora é a faixa de audibilidade com que o ouvido humano percebe os sons varia de $0,00002 \text{ N/m}^2$, a qual é a mínima pressão perceptível à banda de frequência de 1.000 Hz , até valores bastante elevados que pode chegar a 200 N/m^2 , valor esse considerado como limiar da dor.

A medição da pressão sonora pode ser feita utilizando uma escala relativa. Para isso, deve se convencionar o decibel (dB) como uma unidade de relação logarítmica (SANTOS *et al.*, 1999, p. 09).

O Nível de Pressão Sonora, abreviado por NPS, é considerado como a relação entre o valor eficaz da pressão que é expressa em Pascal e a menor pressão que é recebida pelo ouvido humano em uma faixa de frequência de 1.000 Hz (SANTOS *et al.*, 1999, p.10). O NPS é expresso pela Equação 2.

$$\text{NPS} = 20 \log P / P_{\text{ref}}$$

Onde:

P = Pressão sonora a medir (Pa)

P_{ref} = Pressão sonora de referência ($0,00002 \text{ Pa}$)

A média energética (L_2) dos níveis de pressão sonora em uma sala corresponde à média ponderada de cada medição realizada em campo em determinado ambiente. Com ela é possível obter um valor absoluto para aquele ambiente em um determinado período do experimento em que o ambiente foi submetido.

A ABNT NBR ISO 16283, define como “Dez vezes o logaritmo na base 10 da razão do valor médio, no espaço e no tempo, do quadrado da pressão sonora e do quadrado da pressão sonora de referência, com a média espacial executada ao longo da zona central da sala, onde a radiação direta a partir de qualquer fonte sonora ou campo próximo de radiação dos limites da sala tem uma influência desprezível.”

Na prática, os níveis de pressão sonora são geralmente medidos e a média energética dos níveis de pressão sonora deve ser determinada utilizando a equação:

$$L_2 = 10 \times \text{LOG}_{10} \left\{ \frac{1}{5} \times \left[\left(10^{\frac{P_1}{10}} \right) + \left(10^{\frac{P_2}{10}} \right) + \left(10^{\frac{P_3}{10}} \right) + \left(10^{\frac{P_4}{10}} \right) + \left(10^{\frac{P_5}{10}} \right) \right] \right\}$$

Onde:

$L_{p,1}, L_{p,2}, \dots, L_{p,n}$ são os níveis de pressão sonora em n diferentes posições de microfones na sala.

A Diferença de nível normalizada pelo método com alto-falantes global ($D_{ls,2m}$) é resultado de uma subtração entre o valor médio obtido no ambiente externo, que está exposta a fachada, e a média energética dos pontos medidos no ambiente interno, que está sendo registrado dentro da sala. Esse valor da diferença de nível expressa o isolamento acústico do sistema de fachada. Para cálculo é utilizada a seguinte equação:

$$D_{ls,2m} = L_{1,2m} - L_2$$

A diferença de nível padronizada leva o mesmo conceito de diferença de nível, porém na padronizada ela considera o tempo de reverberação para corrigir possíveis distorções nas bandas de frequências.

Diferença de nível que é padronizada para um valor de referência do tempo de reverberação na sala de recepção e calculada utilizando a seguinte equação:

$$D_{ls,2m,nT} = D_{ls,2m} + \left[10 \times \text{LOG}_{10} \left(\frac{T}{T_0} \right) \right]$$

Onde:

T é o tempo de reverberação na sala de recepção;

T₀ é o tempo de reverberação de referência; para habitações, T₀ = 0,5 s.

2.3 VENTILAÇÃO NATURAL

Agora, apresenta-se definições concernentes neste trabalho sobre os aspectos referentes à ventilação.

A técnica do gás traçador trata de um experimento que mede a capacidade de ventilação e renovação dos níveis de oxigênio (O₂) em ambientes internos. Uma das possibilidades dessa técnica consiste, basicamente em elevar os níveis de determinado gás, diferente do oxigênio, e posteriormente mensurar o seu decaimento.

O gás traçador é um método que se propõe a mensurar o fluxo de ar. Trata-se, portanto, de uma forma de medição direta e precisa das trocas gasosas entre distintos ambientes, por meio de aberturas.

Com tal técnica é possível medir condições de vento, a temperatura, a humidade do ar, entre outros, além do cálculo de eficiências de ventilação e a remoção dos contaminantes de ar ou gases nocivos à saúde humana (GONÇAUVES, 2011).

Air exchange rate (AER) é a medida que, em linhas gerais, significa a troca ou taxa de troca de ar por determinada medida temporal, geralmente a hora. Tal medida se preocupa com o volume de ar que pode ser removido ou adicionado em um ambiente no referido período de tempo, dividido pelo volume do espaço em questão.

A concentração de CO₂ externo (C_{ext}) é a concentração diz respeito ao volume do gás presente no ambiente externo. No caso desse estudo foi cerca de 400 ppm. A importância de saber essa medida se dá para que seja possível mensurar, adiante, a concentração final do gás traçador.

A concentração inicial (C_o) de gás CO₂ é aquela que está presente no ambiente ao término da saturação do ar com o gás traçador (CO₂). Desse modo, a concentração inicial no caso do teste era de 5.000 ppm.

Por seu turno, a concentração final (C_(t)) é aquela que se iguala à concentração do ambiente externo, como dito, cerca de 400 ppm.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Janelas consistem em esquadria, vertical ou inclinada, geralmente envidraçada, destinada a preencher um vão do sistema de vedação vertical externo ou interno. Entre outras, sua finalidade é permitir a iluminação e/ou ventilação entre ambientes (ABNT, 2017b). Além disso, janelas também constituem uma barreira sonora, pois por mais simples que seja a sua tipologia e os materiais empregados, elas possuem propriedades de isolamento acústico, ao impedir a entrada do ruído externo para o ambiente interno.

Ensaio de campo feitos pela Atenua Som (2019) tendo como base modelos de janelas em escala real, revelou que as janelas de correr 4 mm, com caxilho de alumínio usual (1,2 m x 1,2 m) são capazes de reduzir R' 30 dB, na banda de terço de frequência de 1.000 Hz. Esse valor foi obtido em testes feitos com a janela fechada, porém quando se integra, à mesma janela (Figura 5), uma veneziana que permitisse a ventilação, o isolamento sonoro diminui para R' 21 dB.

Figura 5 – Janelas comuns: sem e com veneziana



Fonte: Catálogo Atenua Som, 2019

Em experimentos semelhantes, o fabricante Alluminium fez testes com a janela maxim-ar de uma folha (1,0 m x 1,0 m) com vidro de 6 mm e perfil de alumínio. O ensaio laboratorial mostrou que essa tipologia de janela isola R' 31 dB do ruído externo quando fechada e R' 19 dB quando aberta, sendo, portanto, o isolamento proporcionado pela fachada, na faixa de frequência de 1.000 Hz.

Nota-se que as janelas presentes no mercado, reduzem o ruído externo em aproximadamente $R' 20$ dB na faixa de frequência de 1.000 Hz, enquanto permitem fluxo de ar, ou seja, elas isolam $R' 20$ dB ao mesmo tempo que ventilam (ATENUA SOM, 2019).

3.1 TIPOLOGIAS DE JANELAS VENTILADAS ACÚSTICA

Existem, atualmente, muitos componentes de janelas para melhorar sua vedação acústica por conta do ruído de tráfego veicular urbano. Também existem alguns componentes de janelas que já são comumente utilizadas como conforto térmico, limitando a exposição solar das janelas, como é o caso de brises e venezianas que, neste trabalho, serão denominados como defletores acústicos, pois além do controle da entrada de luz solar, essas estruturas têm a capacidade de redirecionar o som, podendo refleti-lo de volta para o ambiente externo.

Do mesmo modo, as janelas que possuem persianas integradas (ABNT, 2017b) são vistas como uma solução alternativa para o controle da entrada de luz solar e isolamento sonoro no ambiente interno, como constataram Patrício e Bragança (2004) que as persianas podem contribuir com esse duplo controle, mesmo quando em posição parcialmente abertas.

Outro elemento arquitetônico de fachada bastante conhecido é a sacada, que pode permitir que a esquadria permaneça aberta e protegida em certo nível dos ruídos externos. Isso dependendo do seu formato arquitetônico e dos seus materiais construtivos, as sacadas podem contribuir para que o sistema vertical externo tenha um aumento no isolamento.

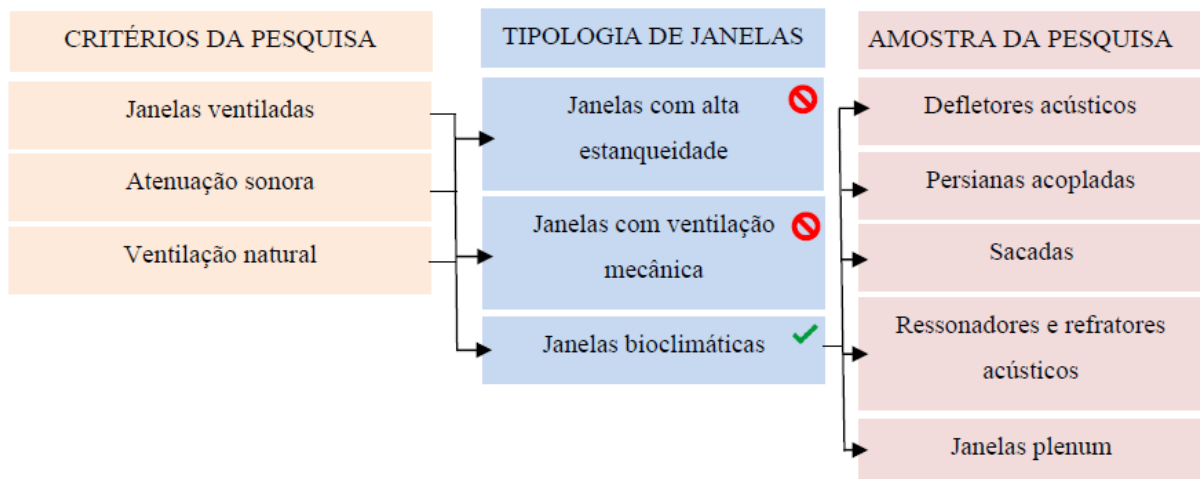
Por sua vez, dispositivos de fachada como os ressonadores e refratores acústicos, que são basicamente pequenos cilindros com orifícios de passagem de ar, ainda se encontram em fase de estudos para, possivelmente, serem aplicados em janelas. Contudo, há diversas pesquisas provenientes da Universidade Politécnica de Hong Kong (TANG, 2017b) voltadas para o uso desses dispositivos nas janelas.

Do mesmo modo, estudos laboratoriais, majoritariamente asiáticos, têm impulsionado e difundido a ideia de eficácia da janela plenum. Criada com base no conceito de câmara plenum na redução de ruídos em dutos, ela foi proposta para ser usada no sistema de janela por Ford e Kerry (1973). Trazendo um conceito novo de janela para o mercado e abrindo caminho para novas pesquisas, descobertas e possibilidades dos dispositivos de fachada.

A fim de realizar uma revisão bibliográfica coerente ao tema, foi coletada uma série de publicações internacionais e nacionais que pudessem fornecer informações sobre possíveis

soluções de isolamento sonoro através de janelas ventiladas. Dentre as publicações estudadas, para adequar ao tema atual de eficiência energética, foram excluídas as amostras que se referiam à estanqueidade da esquadria, que formavam ambientes enclausurados e também as que utilizavam algum procedimento mecânico para fornecer ventilação (Quadro 1). Para esta pesquisa, utilizou-se banco de dados como periódicos capes, *scopus* e *science direct*.

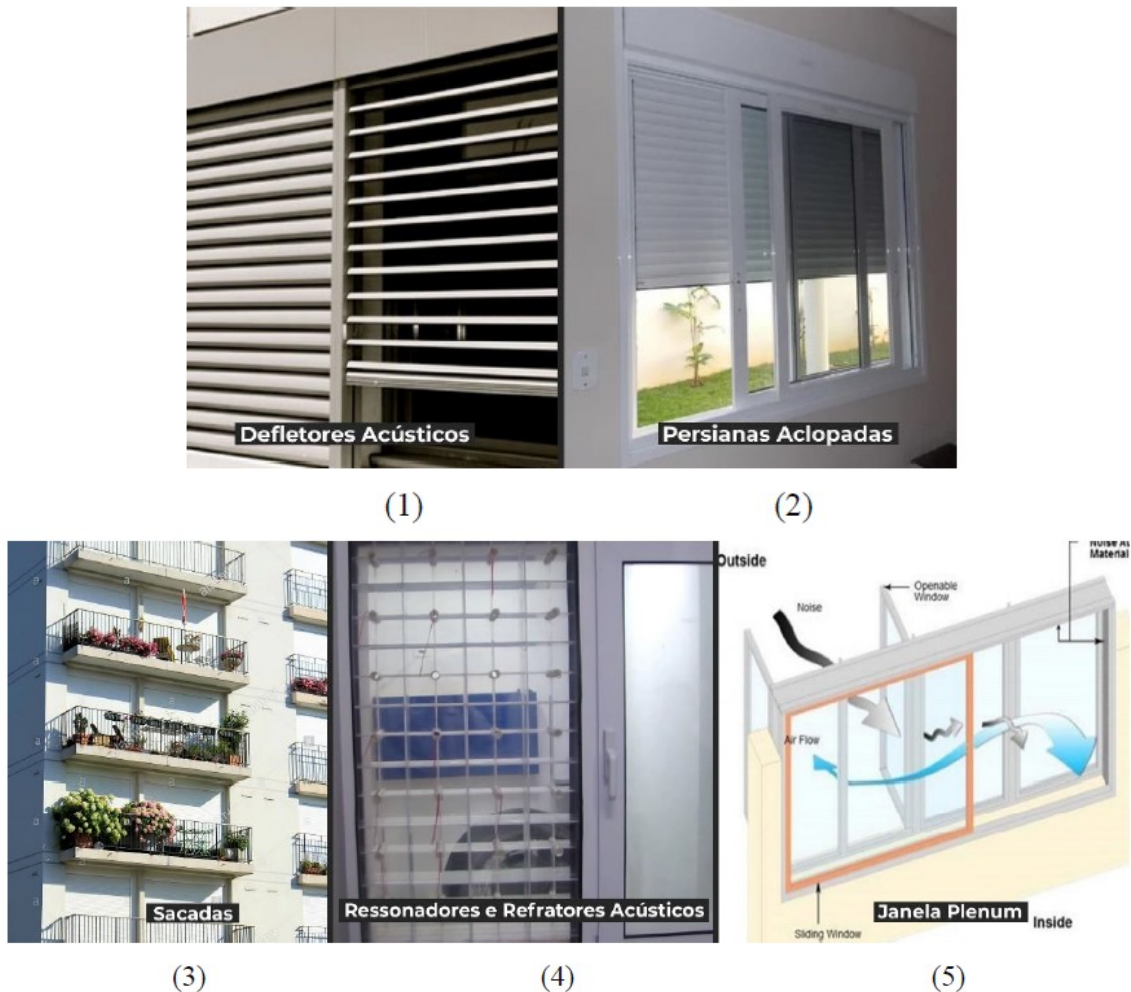
Quadro 1 – Esquema de escolha de amostra a partir dos termos pesquisados



Fonte: Autora, 2021

Dentro dos critérios do trabalho, ou seja, janelas ventiladas, isolamento sonoro e ventilação natural, encontrou-se a amostra da pesquisa referente somente às tipologias de janelas bioclimáticas. Nesse grupo, foram estudados autores que utilizavam metodologias similares para aferir o isolamento acústico e a ventilação natural das janelas. Pode-se citar Martello *et al.* (2015) e Cheung *et al.* (2019) que fazem experimentos em escala 1:1 manuseando caixas acústicas omnidirecionais e sonômetros por meio de modelos de escala real de janelas já disponíveis no mercado. Já Tang (2017a) utiliza o *software* MatLab para simulações computacionais de esquadrias que ainda não estão no mercado. Todos os autores nesse trabalho utilizaram os mesmos pressupostos de pesquisa, partindo do princípio que se poderia reduzir o som externo sem comprometer a ventilação natural da esquadria (Figura 6).

Figura 6 – Tipologias de janelas acústicas ventiladas



Fonte: 1) Desttak, 2020; 2) MATELLO *et al.*, 2015; 3) CHEUNG *et al.*, 2019; 4) Atenua Som, 2019; 5) TANG, 2017a (modificado pela autora)

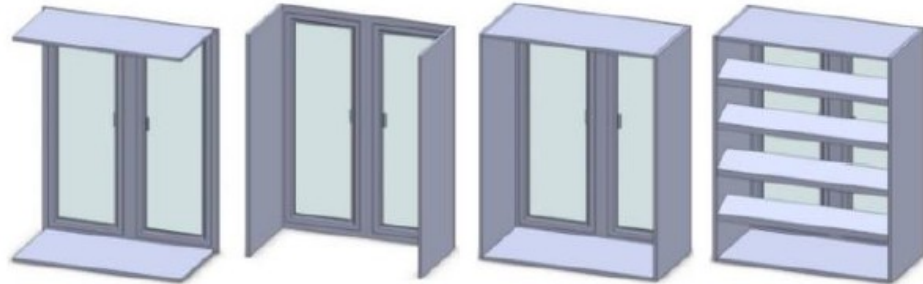
A seguir, serão apresentadas cinco tipologias de janelas ventiladas. Elas foram escolhidas por serem opções de soluções para isolamento sonoro e passagem da ventilação natural, que não dependem de energia ou mecânica para funcionar, tornando-se elementos que contribuem na eficiência energética da construção. Destes dispositivos, três já são usualmente encontrados em fachadas: defletores acústicos, persianas acopladas e sacadas, os outros dois são de testes laboratoriais: ressonadores e refratores acústicos e janelas plenum.

3.1.1 Defletores acústicos

Os defletores acústicos são painéis instalados em fachadas de edifícios, geralmente próximos às janelas, que atuam como barreira ao impedir que o som externo entre no ambiente interno. Nessa solução, como é possível abrir a esquadria, a ventilação natural não possui perdas significativas. Existem diversos tipos de disposição dos defletores na esquadria

(Figura 7). Alguns dos tipos de defletores acústicos são os brises-soleils e as venezianas (TANG, 2017b).

Figura 7 – Defletores acústicos em janelas



Fonte: Tang (2017b)

Porém, antes do posicionamento destas placas na esquadria, fazem-se necessários consistentes estudos do entorno e da própria edificação. Por exemplo, no caso de uma placa abaixo e acima da esquadria, dependendo das medidas, a proteção pode ser limitada ou causar reflexão do som. Para duas placas verticalmente paralelas à janela, pode configurar um caso ainda pior, pois tal posição pode ocasionar múltiplas reflexões do som entre elas, direcionando o ruído para os pavimentos superiores (TANG, 2017b).

Já os painéis instalados ao redor da esquadria, formando uma caixa, podem ter um comportamento mais eficiente para proteção acústica. Porém, esta solução só apresenta mais eficiência em pavimentos superiores, em que a exposição ao ruído tem um ângulo visual mais fechado. Com essa disposição, os pavimentos inferiores, além de ficarem expostos diretamente ao ruído, irão sofrer as reflexões do som pelos pavimentos acima deles (TANG, 2017b).

No caso de uso de venezianas na fachada como atenuadores acústicos, há pesquisas explorando diversos tipos de resultados. Em experimento de laboratório, Sakamoto e Aoki (2015) verificaram que as venezianas em posição horizontal não resultavam em proteção acústica considerável, salvo quando o ângulo de visão do usuário em relação com os possíveis ângulos de incidência do som, ângulo criado entre o olho humano olhando para rua da janela e o ângulo de 90° do edifício com o chão, era excessivamente grande. Do mesmo modo, as venezianas em posição vertical se apresentavam de maneira semelhante, tendo um comportamento menos eficiente que as horizontais. Sakamoto e Aoki (2015) ainda mostraram, através de seus experimentos, que as diversas variações de posicionamento das venezianas podem levar a um isolamento sonoro de *Insertion Loss* IL_{Line} 1 a 10 dB, na banda de terço de frequência de 1.000 Hz, mas o comportamento mais eficiente delas dependia do

ângulo de visão em direção à rodovia. Quanto maior o ângulo, mais eficiente era o comportamento.

Um ensaio laboratorial, com um modelo via *software*, realizado por Badino *et al.* (2019) em venezianas acústicas móveis com protótipos reais teve o objetivo de solucionar problemas relacionados à poluição sonora. Segundo resultados das medições, os pesquisadores constataram que as venezianas a 40° de inclinação em relação ao peitoril apresentavam um comportamento acústico mais eficiente, chegando a apresentar redução do nível de pressão sonora (NPS) ou SPL (*Sound Pressure Level*) de 16 dB do ruído externo, na banda de terço de frequência de 1.000 Hz. As lâminas das venezianas na horizontal e a 25° apresentavam atenuação de 10 dB e de 9 dB, respectivamente, na mesma banda de frequência.

Em outro experimento laboratorial, Martello *et al.* (2015) testaram o acoplamento de materiais de absorção sonora, como espuma de poliuretano, juntamente às placas de brises externos. Os resultados apontaram que o brise-soleil conseguiu reduzir o ruído externo em 6 dB (NPS) a mais do que as outras sem revestimento acústico, que costumam resultar em até 10 dB (NPS) de isolamento acústico, na banda de terço de frequência de 1.600 Hz, influenciando, conforme apontam os autores, principalmente em bandas de frequências altas.

Pode-se concluir que os defletores acústicos são satisfatórios na passagem de ventilação natural, pois permitem a abertura da esquadria. Contudo, embora os resultados de campos apresentados da redução sonora atrelados a altura de cada pavimento, apesar da diferença metodológica entre os estudos de Bandino *et al.* (2019) e Matello *et al.* (2015) (Quadro 2), ainda está abaixo do nível de controle de ruído conseguido por outras medidas, como ressonadores acústicos. Ainda são necessários mais estudos sobre o posicionamento e revestimento dos defletores acústicos.

Quadro 2 – Comportamento acústico dos defletores acústicos

Elemento de controle de ruído	Tipologia/ Composição	Tipo de experimento	Bandas de terço de frequência (Hz)	Redução sonora (dB)
Defletores acústicos	Veneziana 25°	Simulação computacional	62,5 a 8.000	NPS = 9 dB ^a
	Veneziana 0°			NPS = 10 dB ^a
	Veneziana			NPS = 16 dB ^a
	Brise-soleil Padrão		100 a 5.000	NPS = 6 dB ^b
	Brise-soleil com material absorvente sonoro			NPS = 10 dB ^b

Fonte: a BADINO *et al.*, 2019; b MARTELLO *et al.*, 2015.

Com as suas tipologias em veneziana e brise-soleil, supõem-se que os defletores acústicos não influenciam tanto na perda do fluxo de ar. O elemento sobreposto a janela permite que esta seja totalmente aberta, não limitando o seu comportamento em trocas de ar. Contudo, as frestas dos defletores podem diminuir a velocidade do vento para dentro do ambiente interno, dependendo da direção do vento e do ângulo do dispositivo.

3.1.2 Persianas acopladas (janelas integradas)

As persianas em rolo que são acopladas à esquadria, encontradas em algumas fachadas, são utilizadas originalmente para o controle da quantidade de incidência de luz solar que adentra o ambiente interno. Geralmente compostas de material PVC, tais elementos permitem o fluxo de ar, além de controlar a incidência de luz solar, podendo, ainda, proporcionar algum isolamento sonoro proveniente de ruídos externos.

Patrício e Bragança (2004) investigaram, através de um ensaio de campo, a janela com persiana acoplada em PVC em posições distintas: totalmente aberta, metade fechada, totalmente fechada. Os resultados que mostraram um controle maior da entrada de ruídos foram aqueles em que as portas e persianas se encontravam fechadas. Porém houve redução mesmo com as persianas parcialmente abertas.

Os resultados de experimentos, utilizando modelos de escala real, mostraram que com a janela e persiana fechada o isolamento sonoro foi de R'_w (Índice de redução sonora ponderado em campo) 16 a 17 dB; com janela aberta e persiana metade fechada o isolamento sonoro foi de R'_w 14 a 15 dB; com janela aberta e persiana parcialmente fechada o isolamento

sonoro foi de R'_w 11 a 12 dB (Figura 8) e, nos casos com janela aberta e persiana fechada, o isolamento foi de R'_w 3 a 4 dB. Cabe ressaltar que o R'_w estava sempre na mesma banda de terço de frequência de 1.000 Hz.

Figura 8 – Persiana parcialmente fechada e persiana totalmente fechada



Fonte: PATRÍCIO E BRAGANÇA, 2004

Rohden *et al.* (2019) realizaram ensaios laboratoriais com janelas que apresentavam persianas integradas. Nos resultados descobriu-se que o material de absorção (lã de PET) inserido no interior da persiana não contribuiu para o isolamento acústico. Contudo ao colocar o material absorvente na vedação da persiana obteve-se um aumento no isolamento sonoro de R'_w 3 dB a R'_w 4 dB, chegando a R'_w 20 dB de atuação sonora, na banda de frequência de 1.000 Hz.

Para confirmar essa constatação, Rohden e Lima (2019) realizaram outro experimento acrescentando lã de PET à caixa da persiana acoplada, fazendo medições com a janela aberta. Os resultados mostraram um decaimento dos valores nas bandas de terço de frequências de 400 Hz a 1.000 Hz, chegando a reduzir até R'_w 20 dB com as persianas recolhidas (Quadro 3).

Quadro 3 – Comportamento acústico das persianas acopladas

Elemento de controle de ruído	Tipologia/ Composição	Tipo de experimento	Faixa de frequência (Hz)	Redução sonora (dB):
Persianas acopladas	100% Fechada	Ensaio em campo	100 a 2.500	$R'_w = 16 \text{ dB}^a$
	50% Fechada			$R'_w = 14 \text{ dB}^a$
	25% Fechada			$R'_w = 11 \text{ dB}^a$
	0% Fechada			$R'_w = 3 \text{ dB}^a$
	100% Fechada com material absorvente	Ensaio em câmara	100 a 3.150	$R'_w = 20 \text{ dB}^b$

Fonte: a PATRÍCIO E BRAGANÇA, 2004; b ROHDEN *et al.*, 2019

Com as persianas acopladas, por ser uma barreira física na janela, supõem-se que elas influenciam diretamente na passagem do fluxo de ar. Nas suas posições, de totalmente fechada a parcialmente aberta e aberta, há um controle da quantidade de ventilação que entra no ambiente interno, sendo que quanto mais aberta ela estiver, a tendência é que haja um maior fluxo de ar. Quando completamente fechada, a persiana ainda reduz a quantidade de ruído que adentra o ambiente, porém a ventilação da janela fica comprometida.

3.1.3 Sacadas

A sacada de um edifício tem a função de proporcionar um espaço externo nas unidades habitacionais, um cômodo diferenciado que se projeta para fora do prédio. Além disso, a sacada tem por consequência, a capacidade de bloquear o ângulo de visão direto ao passeio público, a fonte de emissão de poluição sonora, ao passo que permite a ventilação natural. Por isso, este elemento arquitetônico tem sido estudado cientificamente como controle de ruído externo (TANG, 2017a).

A equipe de Cheung et al. (2019) tem estudado sacadas acústicas na cidade de Hong Kong, em um edifício que estava localizado a 35 metros da rodovia denominada West Kowloon Corridor. Os volumes ressaltantes em forma de Y foram incorporados ao edifício para minimizar o ângulo de visão para rodovia, como método de redução do ruído externo que atingia picos de $L_{1,2m}$ (Nível de pressão sonora) 85 dB. A solução se mostrou aceitável, tendo um comportamento acústico de D_{2m} (Diferença de nível) 8 dB no isolamento na banda de terço de frequência de 1.000 Hz. (CHEUNG *et al.*, 2019).

Com o sucesso das sacadas acústicas, começou-se a explorar novas volumetrias e tipologias de varandas e seus comportamentos acústicos. Para reduzir a incidência do ruído através da porta da varanda no apartamento, uma tela deslizante foi instalada na frente dela. Com o mesmo objetivo, materiais de absorção sonora foram acoplados na parede e no teto da varanda. Além do ruído, outros fatores como a ventilação natural foram consideradas na versão aprimorada (HKHA, 2017).

Experimentos realizados dentro de apartamentos que sofrem com poluição sonora em Hong Kong mostraram que sacadas padrões podem reduzir de L_{eq} 2 a 6 dB na banda de terço de frequência de 1.000 Hz de ruído externo dependendo do ângulo de elevação (CHEUNG *et al.*, 2019).

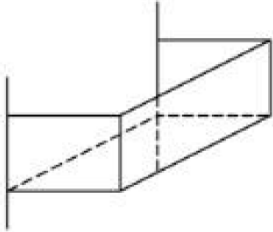

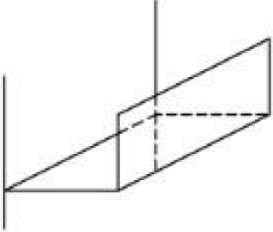

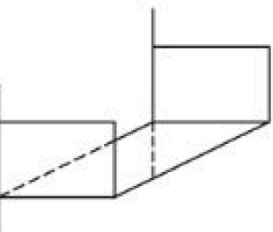

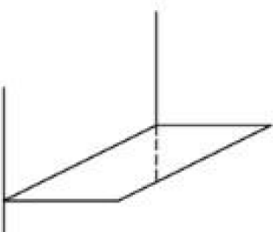

Do mesmo modo, outro experimento de campo similar no Brasil, realizado em uma unidade habitacional, foi executada por Pereira *et al.* (2017) testando cinco diferentes

sistemas de forros em sacadas, como: chapa de aço perfurada com lã de PET, forro mineral, placas de PVC, lambri de madeira de Pinus Elliotti e placas de gesso acartonado. O resultado mostrou que o sistema que obteve o melhor desempenho foi o composto por forro mineral, que aumentou o isolamento acústico em até $D_{nT,w}$ de 2 dB em relação a amostra do teto sem forro, com resultados melhores nas bandas de terço de oitava nas baixas frequências (200 Hz a 315 Hz).

Ao longo dos anos, houve diversas pesquisas sobre o comportamento acústico mais eficiente da sacada, e em sua maioria os pesquisadores concordam no uso de materiais de absorção sonora como solução mais viável. Em experimentos laboratoriais, com modelos computacionais, Tong e Tang (2011) asseguraram que o teto da varanda é o espaço mais apropriado para acomodar o material absorvente, seguido pelas paredes laterais internas. O resultado da sacada instalada com materiais de absorção sonora foi um isolamento sonoro de IL 7 dB a mais que a varanda regular, na banda de frequência de 1.000 Hz.

Diante de diversas tipologias de sacadas, Tang (2017a) classificou quatro tipos mais comuns de sacadas em fachadas (Quadro 4).

Quadro 4 – Tipos de sacadas em fachadas

Forma da varanda	Modelo esquemático	Exemplo
Fechada		
Frente e posterior		
Lados e posterior		
Posterior		

Fonte: Tang (2017a)

As tipologias de sacadas funcionam similares ao posicionamento de defletores acústicos. A forma fechada apresenta maior proteção contra exposição ao ruído, porém uma vez que o som entra na sacada pode ficar refletindo inúmeras vezes dentro do ambiente. O que em vez de controlar o ruído, poderia ocasionar em uma ampliação dele. Já a forma frente e posterior, sem os volumes laterais permite a maior circulação de ventilação natural, contudo pode provocar reverberação do ruído para a cidade (TANG, 2017a).

A forma de sacada com faces laterais e posterior pode ocasionar na reflexão do som para pavimentos superiores, do mesmo modo como ocorre em defletores posicionados

paralelos verticalmente. Essa tipologia pode prejudicar o controle do ruído na fachada. De modo semelhante, a forma posterior da varanda, composta somente pelo piso, pode ocasionar na refletância do ruído, mas dessa vez para os pavimentos inferiores, prejudicando moradores nos andares abaixo (TANG, 2017a).

Estudos iniciais de Hammad e Gibbs (1983) demonstravam que quando as superfícies externas da sacada eram revestidas por refletores acústicos, a proteção do ruído poderia variar de L_{10} (Média de perda de medições internas) 8 a 26 dB(A) na banda de frequência de 1.000 Hz, de acordo com a profundidade e altura da varanda em relação ao solo. Contudo, a pesquisa registrou que essas superfícies provocaram múltiplas reflexões na sacada, reduzindo sua eficiência em 3 dB(A), na mesma banda de frequência.

Em conclusão, pode-se considerar a sacada com um comportamento satisfatório (Quadro 5) de controle de ruído quando posicionada na tipologia mais adequada. O seu comportamento é ainda mais eficiente quando acoplados materiais de absorção acústica no teto e nas paredes laterais, o que é recomendado. Já o uso de refletores acústicos é questionável por causar reverberação e reflexões dentro da varanda. Quanto à ventilação natural, o fluxo de ar pode ser reduzido, pois a sacada pode interferir dependendo do seu volume e da sua tipologia, porém na maioria dos casos a ventilação não é comprometida.

Quadro 5 – Comportamento acústico das sacadas

Elemento de controle de ruído	Tipologia/ Composição	Tipo de experimento	Faixa de frequência (Hz)	Redução sonora (dB): banda de terço de frequência de 1.000 Hz
Sacadas	Padrão	Ensaio em campo	(Não mencionado)	$L_{eq} = 6 \text{ dB}^a$
	Com material absorvente	Ensaio em campo	(Não mencionado)	$D_{2m} = 13 \text{ dB(A)}^b$

Fonte: a CHEUNG *et al.*, 2019; b HKHA, 2017

A sacada é um elemento que permite aproveitamento satisfatório da ventilação, devido sua volumetria que cria um ambiente externo, além de ser uma porta, em vez de janela, assim tendo uma área maior para a passagem de fluxo de ar. Esse elemento é ideal para trocas de ar, pois pouco prejudica a velocidade do vento e ao contrário de limitar a capacidade da esquadria, a sacada cria uma atmosfera favorável para a circulação do fluxo de ar.

3.1.4 Ressonadores e refratores acústicos

Wang *et al.* (2014) ao projetar a janela à prova de ruído para testes, perceberam que o diâmetro do furo deve ser menor que o comprimento de onda da onda sonora para forte difração. Eles criaram um ressonador para interceptar as ondas sonoras em determinada banda de frequência (1.000 Hz), o que levou à separação do meio e do som.

Mareze (2009) afirma que a energia vibratória é transmitida da superfície de contato ao cilindro, onde a energia é amortecida dentro das cavidades pelo ar dentro do tubo e suas paredes internas. Embora esses elementos possuam uma construção física avançada, eles ainda apresentam limitações que fazem dessa solução impopular no mercado. Por isso, os ressonadores e refratores acústicos (Figura 9) continuam a ser estudados e testados dentro de laboratórios na indústria de esquadrias (MAREZE, 2009).

Figura 9 – Ressonadores acústicos em janela



Fonte: Atenua Som (2019)

Existem diferentes tipos de elementos ressonantes e refratores de som para serem acrescentados às esquadrias. Um exemplo é o tubo ressonante de Field (2004), que é capaz de barrar a transmissão do ruído externo. Em seu experimento, Field (2004) descobriu que tubos de ventilação enfileirados, quando acrescentados à janela, chegavam a reduzir 22 dB (R_w) do ruído externo, porém o tubo de ventilação além de ser um elemento volumoso, ele cobria uma área grande da abertura, sendo necessário colocar janelas de vidro adicionais para a passagem de luz solar.

Em outra pesquisa, Asakura *et al.* (2006) testaram o uso desses tubos de ventilação somente no topo de janelas para absorção do ruído externo. Esse elemento era composto por pequenas cavidades acopladas paralelamente funcionando como ressonadores do som. Os resultados dos testes mostraram uma diminuição do nível de ruído em 20 dB de perda de inserção (Insertion Loss - IL) na banda de frequência de 1.000 Hz, em relação ao ambiente

exterior, no entanto as pequenas cavidades projetadas eram insuficientes para uma ventilação natural satisfatória.

Já em ensaios documentados, Nguyen *et al.* (2012) instalaram tubos ressonadores em persianas e venezianas de janelas. As cavidades acopladas apresentavam duas aberturas para entrada e saída de ar, alternando entre seus tamanhos de orifício para conseguir obter perda na transmissão do ruído. O experimento constatou um isolamento sonoro entre 2 e 9 dB de IL, com resultado melhor entre altas frequências (acima de 1.000 Hz).

Experimentos laboratoriais em escala real foram realizados por Fusaro *et al.* (2020) com uma matriz de colunas cilíndricas de vidro acopladas na estrutura de janelas como método de barreira acústica sem bloquear a visibilidade. O modelo de cilindro que possuía dois orifícios para entrada e saída do meio nas duas extremidades, conseguiu reduzir até 35 dB de TL (*Transmission loss*) do ruído externo na banda de terço de frequência de 1.000 Hz.

Atualmente, elementos ressonadores e refratores acústicos são propostas promissoras para o futuro de dispositivos de fachadas inteligentes e sustentáveis (Quadro 6). Embora ainda apresentem limitações, como por exemplo a ventilação e manutenção, a serem estudadas em laboratórios, os resultados apresentados já são considerados uma alternativa para o desenvolvimento das janelas ventiladas acústicas.

Quadro 6 – Comportamento acústico dos ressonadores e refratores acústicos

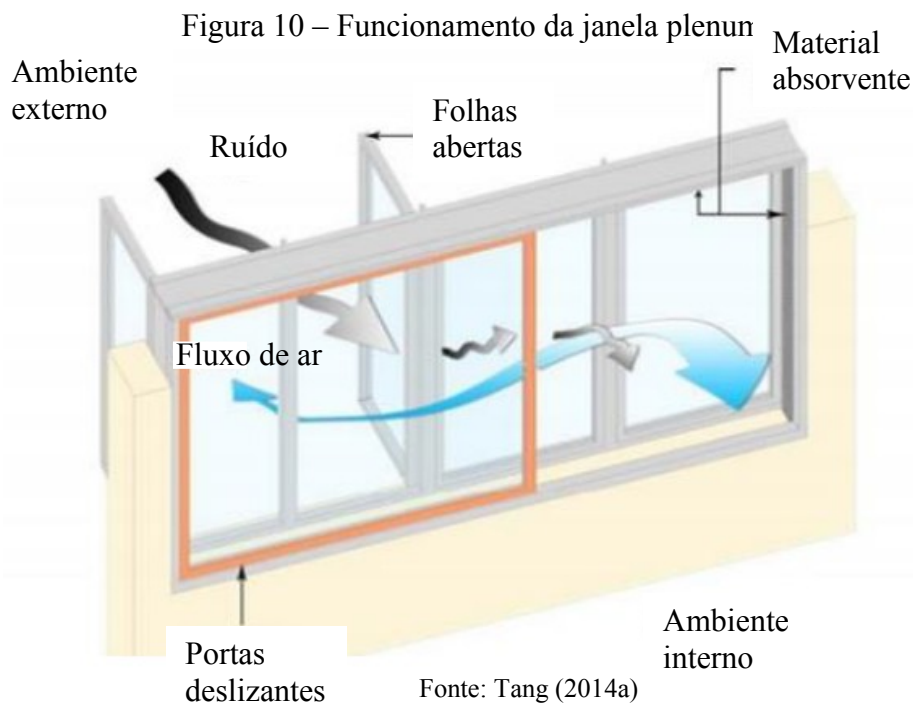
Elemento de controle de ruído	Tipologia/ Composição	Tipo de experimento	Faixa de frequência (Hz)	Redução sonora (dB): banda de terço de frequência de 1.000 Hz
Ressonadores e refratores acústicos	Padrão	Ensaio em câmara	350 a 5.000 Hz	TL = 20 a 30 dB

Fonte: FUSARO *et al.*, 2020

Ao criar uma superfície de barreira ao ruído, os ressonadores e refratores acústicos limitam a passagem do fluxo de ar. Os pequenos orifícios ajudam no isolamento sonoro, mas diminuem a velocidade do vento, comprometendo as trocas térmicas. Esse elemento limita, quase totalmente, o comportamento da ventilação da janela, sendo uma solução ainda a ser aprimorada em laboratório.

3.1.5 Janelas plenum

Usualmente conhecida no uso em dutos para silenciar o ruído de passagem de fluxo, a câmara plenum é uma técnica com aberturas duplas, uma externa e outra interna com disposição desalinhada. Essa técnica desenvolvida em janelas é denominada janela plenum (Figura 10), que consiste em duas camadas de janela, uma externa que em geral são folhas dobradiças de giro ou pivotante, e uma janela interna que é de correr (TANG, 2017a).



Essa tipologia oferece flexibilidade na disposição de alinhamento de aberturas. Quando alinhadas uma à frente da outra, a janela plenum pode oferecer fluxo máximo de ventilação natural. Já quando as aberturas estão desalinhadas fornecem redução do ruído externo. O método escalonado das aberturas de entrada e saída de ar é responsável pelo controle do ruído e da ventilação natural (TANG, 2014a).

Descoberta em testes de laboratórios por Ford e Kerry (1973), eles constataram que emparelhando duas janelas de vidros duplos, com aberturas escalonadas, a redução do ruído pode chegar a 9 dB(A) de SRI (*Sound reduction index*) na banda de terço de frequência de 1.000 Hz com a janela aberta. Logo mais, foram desenvolvidas outras tipologias de estudo como aberturas na vertical, com materiais absorventes e diferentes espessuras do vidro.

As simulações realizadas por Kang e Li (2007) englobaram diferentes formas que a janela plenum poderia apresentar, para saber mais sobre seu controle na atuação sonora.

Observou-se que havia variação quando se alterava o tipo de vidro utilizado, mas o comportamento mais eficiente era quando utilizava persianas absorventes na esquadria, podendo chegar a resultados de isolamento sonoro de 8 a 40 dB de SPL (*Sound pressure level*).

Yeung *et al.* (2014), em testes laboratoriais dentro de câmaras fechadas em Hong Kong, constataram que uma janela plenum regular consegue reduzir 18,3 dB(A) de TL (*Transmission loss*) e 10,4 dB(A) de NR (*Noise reduction*). Porém, em ensaios realizados em campo e em escala real, a mesma janela conseguiu reduzir até 8 dB(A) de D_{2m} (Diferença de nível) do ruído externo.

Estudos realizados por simulação computacional, em Singapura por Yu *et al.* (2017), revelaram que o comportamento acústico da janela plenum pode mudar de acordo com suas dimensões. Foram encontrados valores de redução sonora de SRI de 3 dB na banda de terço de frequência de 1.000 Hz para metade de abertura da cavidade, SRI de 4,8 dB para um terço de abertura e SRI de 7 dB para um quinto de abertura.

Experimentos realizados no conjunto habitacional San Po Kong, com influência do tráfego intenso da rodovia Prince Edward em Hong Kong, confirmam que as janelas plenum podem reduzir o ruído externo em D_{2m} de 8 dB(A) na banda de frequência de 1.000 Hz, com ambas as folhas abertas em disposição desalinhada (HKHA, 2017).

Com uma abordagem diferente, Tang (2017a) testou diferentes números de cilindros refratores acústicos dentro da janela plenum em simulações computacionais, a fim de tornar mais eficiente o seu comportamento acústico. Em simulações computacionais no MatLab, dois tubos ressonadores foram acoplados às janelas plenum, para melhorar seu comportamento. O resultado mostrou uma redução de até TL de 25 dB na banda de terço de frequência de 1.000 Hz do ruído externo. Esse modelo reduziu TL de 5 dB a mais que a janela plenum regular na mesma faixa de frequência (TANG, 2017a).

Em outro estudo paramétrico realizado em câmaras laboratoriais, Tong e Tang (2017) mudando as dimensões das janelas, o espaçamento da cavidade interna e o tipo de vidro, descobriram que o tamanho do espaçamento interno entre superfícies não influencia significativamente no isolamento sonoro, mas já o tamanho das aberturas e a proporção largura e altura influenciam demais nos resultados. Em uma janela com largura de 43 cm o resultado foi a redução de 19 dB (IL na banda de frequência de 1.000 Hz) a mais do que janelas de dimensões maiores.

Continuando o estudo anterior, testes paramétricos, dessa vez realizados em modelo de escala real, foram feitos por Li *et al.* (2019), em que diferentes dimensões e tipos de

aberturas de janelas plenum comprovaram que na banda de frequência de 1.000 Hz houve uma redução de até 16,9 dB de TL na banda de frequência de 1.000 Hz com a janela de 1,3 m de largura com inserção de material absorvente.

Em simulação computacional, observou-se que havia variação do índice de redução sonora quando se alterava o tipo de vidro utilizado ou material do perfil, contudo o comportamento mais eficiente era alcançado quando se utilizavam persianas absorventes na esquadria, podendo chegar a resultados de redução de D_{2m} de 8 a 40 dB(A) na banda de terço de frequência de 1.000 Hz (CHEUNG *et al.*, 2019).

Em um experimento diferente, utilizando câmaras laboratoriais, Lee *et al.* (2020) acoplaram uma placa micro perfurada dentro da cavidade interna da janela plenum para avaliar seu comportamento perante o espectro do ruído branco, do ruído de tráfego e do ruído de construção civil. O resultado mostrou que a composição da janela plenum pode reduzir até IL 8,4 dB, 8,7 dB e 6,9 dB dos ruídos na faixa de frequência de 1.000 Hz, respectivamente.

Por fim, os pesquisadores Li *et al.* (2020) fizeram medições em unidades residenciais de um edifício em Hong Kong recém-construído com janelas plenum. As medições foram feitas em 35 apartamentos, sendo medidos a cada 5 andares, começando pelo quinto andar. Resultados das medições mostraram que há uma redução em média de D_{2m} de 13 dB na banda de frequência de 1.000 Hz do ruído urbano e que a diferença de altura dos andares não influencia tanto na perda de transmissão.

Em resumo, as janelas plenum apresentam comportamento mais eficiente no controle do ruído (Quadro 7), diante de todas suas variações estudadas.

Quadro 7 – Comportamento acústico das janelas plenum.

Elemento de controle de ruído	Tipologia/ Composição	Tipo de experimento	Faixa de frequência (Hz)	Redução sonora (dB): banda de terço de frequência de 1.000 Hz
Janela plenum	Padrão	Ensaio em campo	(Não mencionado)	$D_{2m} = 8 \text{ dB(A)}^b$
	Com tubos ressonadores	Simulação computacional	164 a 5.500	$TL = 25 \text{ dB}^c$
	Com persianas absorventes acopladas	Ensaio em campo	(Não mencionado)	$D_{2m} = 8 \text{ a } 40 \text{ dB(A)}^a$
	Com placa micro perfurada	Ensaio em câmara	20 a 5.000	$IL = 8,4 \text{ dB (A)}^d$
	Com mudanças paramétricas (vãos diferentes)	Simulação computacional	164 a 5.500	$TL = \text{Variável (depende da composição)}^c$

Fonte: a CHEUNG *et al.*, 2019; b HKHA, 2017; c TANG, 2017a; d LEE *et al.*, 2020.

Com suas aberturas dispostas de forma oposta, a janela plenum compromete a velocidade do vento. O ato de o vento circular de maneira sinuosa no interior da janela reduz a sua velocidade, amortecendo a entrada no ambiente. Contudo, o dispositivo é considerado eficiente para efetuar as trocas de ar, influenciando moderadamente no fluxo de ar.

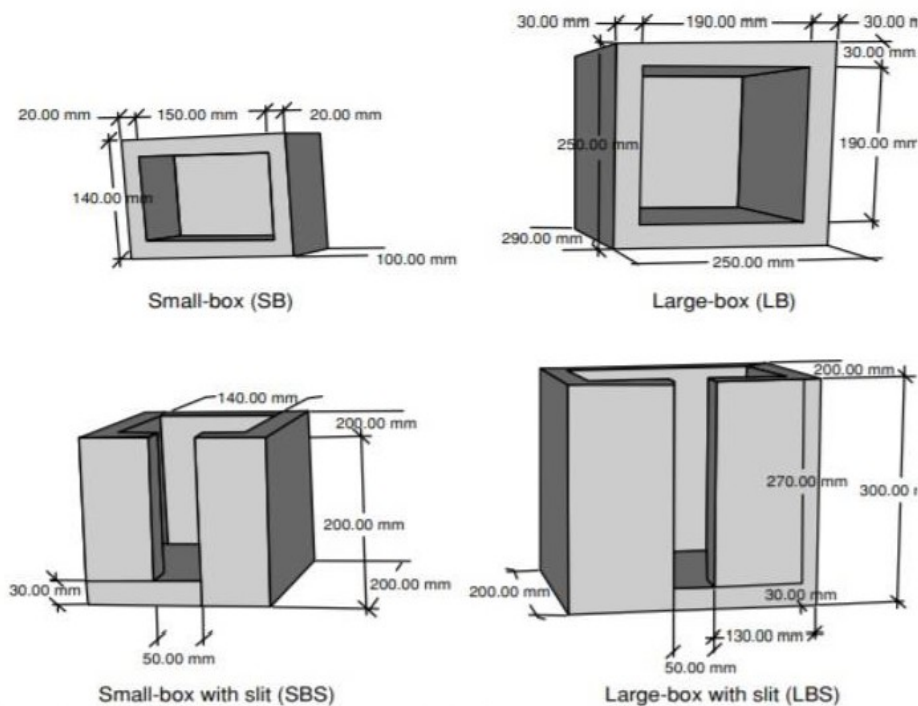
3.2 ADEQUAÇÃO DA ARQUITETURA AO CLIMA: OUTROS ELEMENTOS DE FACHADA

Além das estratégias passivas para conforto térmico e isolamento sonoro em fachada já citadas, é importante também mencionar outros elementos de fachadas, que são soluções acústicas ligadas ou não à esquadria. Soluções estas que buscam a redução sonora para o ambiente interno, sem que seja necessária a utilização de ventilação mecânica ou consumo de energia elétrica.

Os pesquisadores Araújo e Bistafa (2012) analisaram o comportamento acústico de elementos vazados, como é o caso dos cobogós. Os cobogós são elementos muito utilizados na construção civil em fachadas, sendo um componente arquitetônico que possibilita o fluxo de ar para dentro do edifício e o controle solar.

Assim, eles foram testados em duas tipologias diferentes, quanto a seus parâmetros geométricos e material de composição, o primeiro elemento, uma caixa menor, se assemelhando aos blocos de alvenaria já existentes no mercado e o segundo elemento, uma caixa maior, com dimensões e peso ainda não presente no mercado. Os elementos ainda sofriam variação com recortes geométricos na estrutura vazada do cobogó (Figura 11).

Figura 11 – Proposta geométricas de cobogós



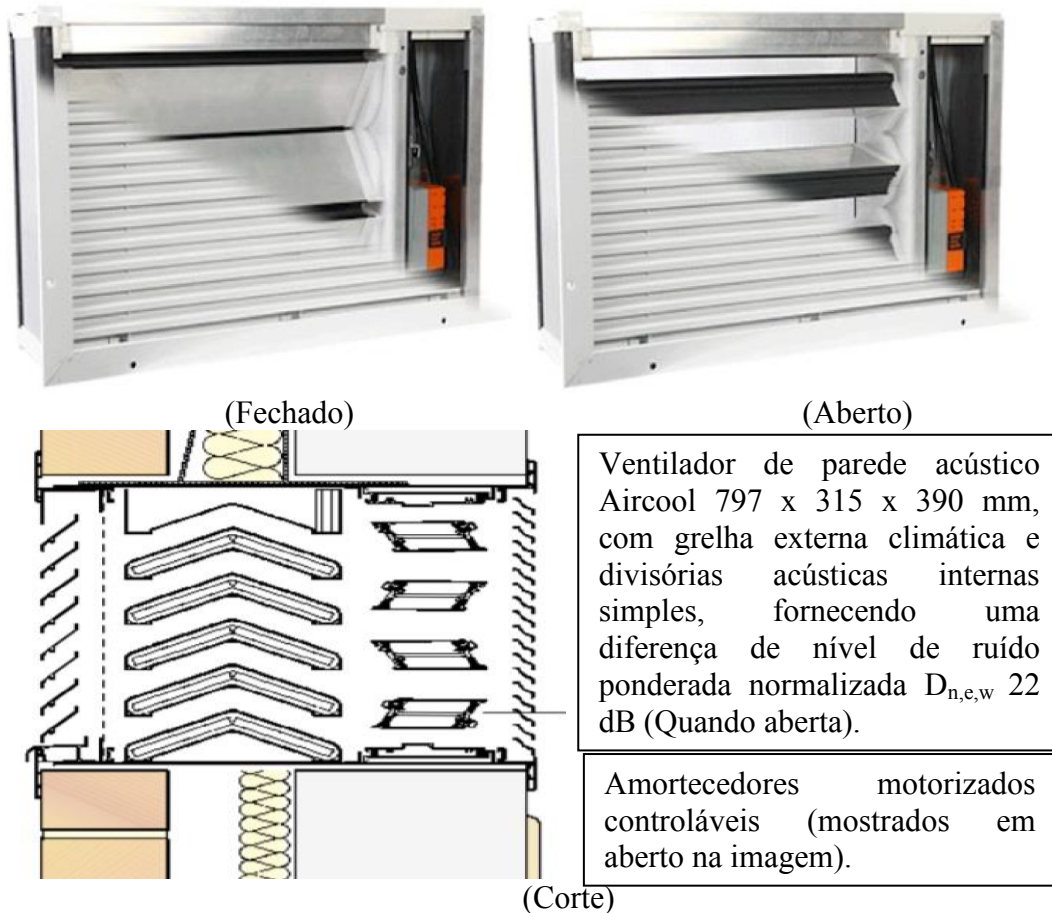
Fonte: ARAÚJO E BISTAFÁ, 2012

Os testes foram feitos utilizando um modelo em escala real, em que os cobogós de concreto foram assentados de três formas distintas: justapostos, com 5 cm de distância e com 10 cm de distância, e em outro momento também foi inserida a lã de vidro. Os resultados mostraram que a lã de vidro proporciona redução da poluição sonora, já quanto ao espaçamento o comportamento mais promissor com relação a redução de ruídos externos foi com os blocos de cobogós justapostos chegando a D_{nTw} (diferença de nível ponderada) 40 dB de isolamento sonoro. O primeiro elemento, caixa menor, apresentou um D_{nTw} de 21 dB com espaçamento de 5 cm, e o segundo elemento, caixa maior, apresentou um D_{nTw} de 25 dB tanto com 5 cm e 10 cm de espaçamento entre eles.

Outra solução acústica para fachadas são os *Acoustic Aircooler Ventilator* fabricados na Europa. Um elemento que permite a passagem do fluxo de ar para dentro do edifício isolando dos ruídos externos. Há três tipos de modelos mais comercializados, que são eles os

ventiladores acústicos com exaustores, os ventiladores acústicos com lâmina simples de proteção e os ventiladores acústicos com lâminas duplas de proteção (Figura 12).

Figura 12 – Ventiladores acústicos



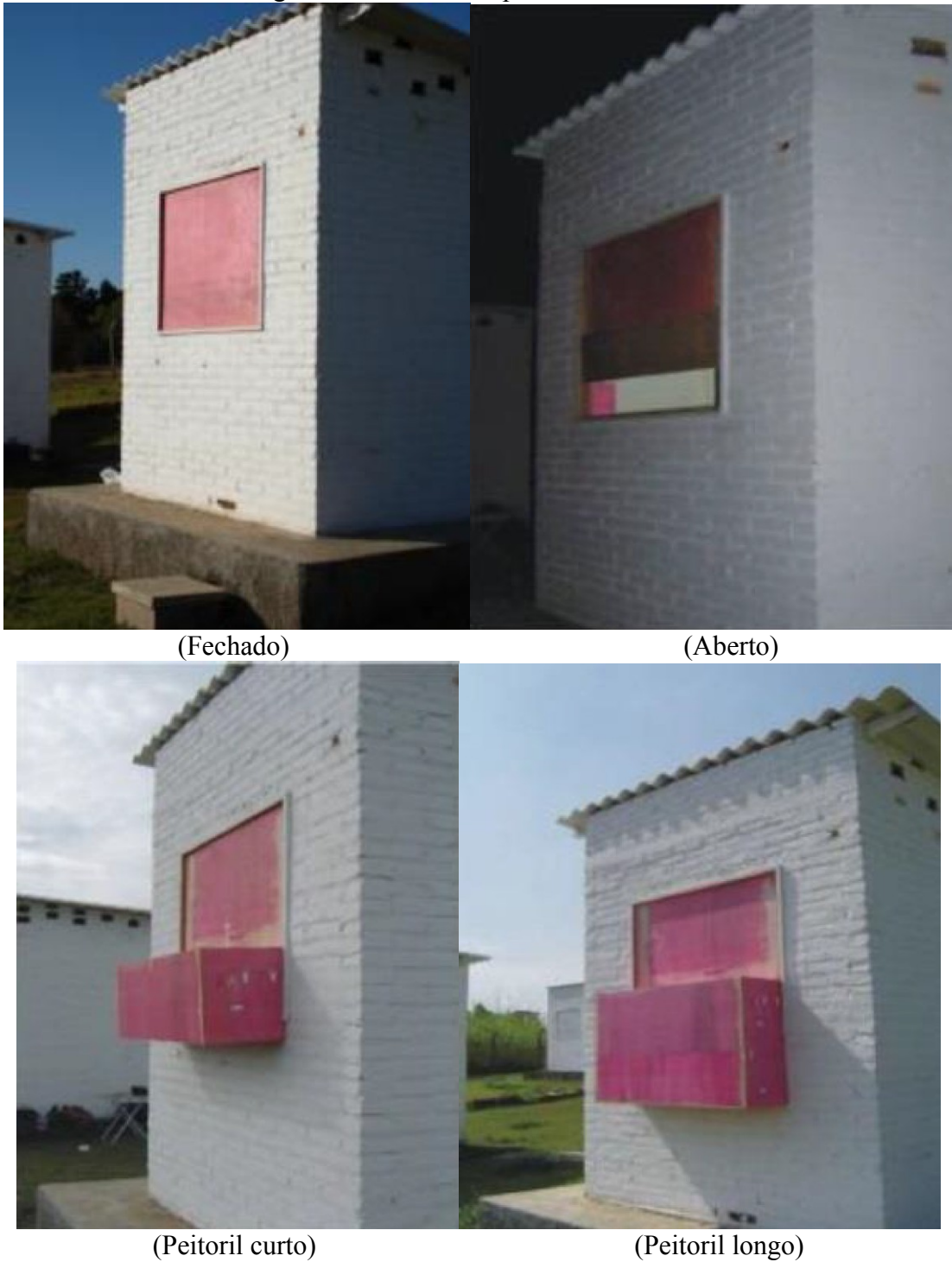
Fonte: Catálogo Passivent, 2021

Os resultados com o uso desse equipamento mostram que o comportamento acústico muda de acordo com a tipologia do equipamento utilizado. Os ventiladores acústicos com exaustor reduz até $D_{n,e,w}$ (Índice de avaliação de isolamento acústico padrão) de 30 dB. Já o ventilador acústico com lâmina simples de proteção chega a barrar $D_{n,e,w}$ de 24 dB na mesma faixa de frequência do ruído externo, e o ventilador acústico com lâminas duplas de proteção isola até $D_{n,e,w}$ de 26 dB de som para a mesma frequência. Essa solução é mais utilizada em fachada de prédios europeus, onde o clima requer menos aberturas nas fachadas, devido ao inverno rigoroso, já no Brasil, por ter clima tropical, é duvidoso se somente a utilização desses elementos nas fachadas seria suficiente para o conforto térmico do ambiente interno.

Por outro lado, uma solução que já é utilizada nas fachadas de prédios brasileiros é o peitoril ventilado. Ele permite que a ventilação natural aconteça ao mesmo tempo em que atenua ruídos externos. Oiticica (2010) pesquisou diversas tipologias de peitoris ventilados

para obter melhor conhecimento sobre o comportamento acústico destes elementos. A autora alterou configurações da abertura e composição do material, no qual ela titulóu peitoril longo e peitoril curto (Figura 13). Quanto aos materiais, ela eventualmente acrescentou lã de rocha e um painel ressonador com furos de 60 mm.

Figura 13 – Testes em peitoris ventilados



Fonte: OITICICA, 2010

O experimento foi realizado em modelo de escala real, onde o pesquisador instalou os protótipos de peitoris nas cavidades das paredes e mediu seu índice de redução sonora. O resultado mostrou que o peitoril curto apresentou melhor isolamento sonoro, reduzindo D_{nt} (Diferença padronizada de nível ponderada) de 20,3 dB em comparação com peitoril longo que diminuiu D_{nt} de 18,4 dB, ambos para banda de frequência de 1.000 Hz.

A continuação dos estudos com a troca de materiais dos peitoris ventilados revelou que a composição que apresenta o melhor comportamento a 1.000 Hz é o peitoril com lã de rocha acoplada na superfície do peitoril, chegando a reduzir D_{nt} de 22,7 dB de ruído externo. Já com o painel ressonador acoplado na parede do peitoril a redução chega a D_{nt} de 19 dB (Figura 14), não muito distante dos resultados já obtidos sem inserção de materiais.

Figura 14 – Peitoril acrescido lã de rocha ou painel ressonador



Fonte: OITICICA, 2010

Existem diversas pesquisas que objetivam um comportamento acústico mais eficiente em fachadas, que permitem a ventilação natural. Sejam elas já usadas no comércio ou ainda em testes laboratoriais, todas são válidas e acrescidas para o desenvolvimento do tema. Como se pode ver, algumas soluções envolvem o aprimoramento da janela comum, às vezes trazendo novos materiais para compor a esquadria e outras utilizando os elementos já existentes na janela. Já outras soluções envolvem aberturas na parede como é o caso do cobogó e dos ventiladores acústicos.

A partir destes estudos, fica clara a percepção que o comportamento acústico da fachada tem que ser pensado desde o início da concepção do projeto. O controle do ruído deve ser pensado juntamente com a ventilação natural, respeitando o seu entorno projetado e suas exigências de atividade para o interior do edifício.

3.3 COMPORTAMENTO DAS JANELAS VENTILADAS ACÚSTICAS

Considerando as diferentes tipologias de janelas ventiladas acústicas estudadas, levando em conta que algumas delas estão presentes no mercado e outras ainda estão em fase de estudos laboratoriais, viu-se que ao analisar o comportamento acústico dessas janelas foi levado em consideração também a vazão do seu fluxo de ar, sempre tentando balancear o conforto acústico com o térmico da edificação.

Assim como a métrica de satisfação do conforto, também é importante estudar as soluções de janelas quanto ao seu impacto na arquitetura e a viabilidade técnica, para que possa ter uma noção da interferência visual dessas janelas na fachada do edifício e seus custos operacionais para execução e manutenção.

3.3.1 Conforto acústico e térmico

A partir dos níveis de redução sonora, Tang (2017b) afirma que até TL 9 dB é um comportamento pouco eficiente, sem muita alteração na percepção do usuário e acima de TL 10 dB já é considerado um comportamento acústico médio. Já Cheung *et al.* (2019) afirmam que acima de D_{2m} de 25 dB(A) na banda de terço de frequência de 1.000 Hz, podendo considerar as janelas ventiladas com um comportamento bastante eficiente.

Partindo dessas pesquisas estudadas, este trabalho resumiu no Quadro 9 o comportamento acústico de cada tipologia de janela estudada, de maneira individual para cada pesquisa específica, pois cada experimento apresenta sua metodologia particular, portanto sua própria variável mensurável, não sendo possível compara-las entre si.

Por outro lado, poucos estudos de janelas ventiladas mencionaram mensurações no fluxo de ar para medir quantitativamente o comportamento de ventilação da janela. Como exemplo dos poucos trabalhos, tem-se na pesquisa recente de Du *et al.* (2020), em que os pesquisadores mensuraram o fluxo de ar pela variável ACH – *Air Changes Per Hour* (Fórmula 3). Essa variável é obtida através da vazão (Q) da janela em metros cúbicos por hora dividido pelo volume do ambiente (V_r) em que a janela se encontra em metros cúbicos.

A fórmula 6 do ACH, mudança de ar por hora é a seguinte:

$$ACH=Q(t) \div Vr$$

Nos seus estudos, Du *et al.* (2020) mencionam que para dormitórios uma janela ventilada deve permitir no mínimo de 5 a 6 ACH para assegurar uma boa qualidade de ar no ambiente interno.

Em outra pesquisa com finalidade de medir a qualidade de ventilação, Barmpareos *et al.* (2018) realizaram um ensaio em campo em uma escola de Atenas, Grécia. Nesse experimento, utilizaram o método de decaimento de gás traçador, usando o CO₂, em que consiste em saturar o ar das salas e monitor o as taxas de CO₂ decaírem conforme o tempo transcorrido.

Nesse mesmo ensaio, os autores utilizaram o cálculo de *Air Exchange Rate* (AER) ou índice de trocas de ar, com a finalidade de obter uma análise analítica da qualidade de trocas de ar das salas de aulas, se era suficiente ou não para o ambiente. A Equação 7 apresenta a forma de cálculo do AER, conforme experimentos de decaimento de CO₂.

$$AER = \frac{1}{t-t_0} \times \ln \left(\frac{C_{(t)} - C_{ext}}{C_0 - C_{ext}} \right)$$

Onde:

AER = Índice de trocas de ar, em h⁻¹;

t = Tempo final do experimento, em horas;

t₀ = Tempo inicial da saturação do ambiente, em horas;

C_(t) = Concentração de CO₂ no tempo t, em ppm;

C₀ = Concentração de CO₂ no tempo t₀, em ppm;

C_{ext} = Concentração de CO₂ no ambiente externo.

No mesmo tópico de AER, um estudo de Dimitroulopoulou (2011) catalogou experimentos de medições realizados por diversos países da Europa, como Bélgica, República Checa, Alemanha, Finlândia, França, Dinamarca, Grécia, Itália, Holanda, Noruega, Portugal, Suíça, Suécia e Reino Unido. Nesse estudo, o autor caracteriza o mínimo de AER 0,5 h⁻¹ é necessário para que evite o crescimento de mofo no ambiente, e o mínimo de AER 0,8 h⁻¹ para controlar o crescimento de ácaros. Em habitações com um AER menor que 0,8 h⁻¹ são identificados problemas de doenças respiratórias recorrentes nas pessoas que frequentam o local como asma, sinusite e rinite.

Para os estudos de ventilação dessas esquadrias específicas não foram encontrados estudos de ventilação relevantes, que se possa levar em consideração, portanto o trabalho vai

resumi-las segundo sua geometria da esquadria, se permite a abertura total, parcial ou não a permite.

Diante dos estudos apresentados, de acústica e ventilação, será realizado um quadro resumo que indica as pesquisas acústicas relevantes ao trabalho. De forma geral, as pesquisas estudadas são expostas no Quadro 8.

Quadro 8 – Balanço geral de comportamento de ventilação e acústico

Elemento de controle de ruído		Tipologia	Tipo de experimento	Faixa de frequência (Hz)	Redução sonora (dB): banda de terço de frequência de 1.000 Hz	Geometria da esquadria (ventilação)
Disponível no mercado	Deflatores acústicos	Veneziana 25°	Simulação computacional	62,5 a 8.000	NPS = 9 dB ^a	Permite total abertura
		Veneziana 0°			NPS = 10 dB ^a	
		Veneziana 40°			NPS = 16 dB ^a	
		Brise-soleil padrão		100 a 5.000	NPS = 6 dB ^b	
		Brise-soleil com material absorvente acústico			NPS = 10 dB ^b	
	Persianas acopladas	100% Fechada	Ensaio em campo	100 a 2.500	R _w ' = 16 dB ^c	Permite parcial abertura
		50% Fechada			R _w ' = 14 dB ^c	
		25% Fechada			R _w ' = 11 dB ^c	
		0% Fechada			R _w ' = 3 dB ^c	
		Com material absorvente acústico	Ensaio em câmara	100 a 3.150	R _w ' = 20 dB ^d	
Sacadas	Padrão	Ensaio em campo	(Não mencionado)	L _{eq} = 6 dB ^c	Permite total abertura	
	Com material absorvente acústico	Ensaio em campo	(Não mencionado)	D _{2m} = 13 dB(A) ^f		
Teste	Ressonadores e refratores acústicos	Padrão	Ensaio em câmara	350 a 5.000	T _L = 20 a 35 dB ^g	Não permite abertura
	Janela plenum	Padrão	Ensaio em campo	(Não mencionado)	D _{2m} = 8 dB(A) ^f	Permite parcial abertura
		Com tubos ressonadores	Simulação computacional	164 a 5.500	TL = 25 dB ^h	Não permite abertura
		Com persianas absorventes acopladas	Ensaio em campo	(Não mencionado)	D _{2m} = 8 a 40 dB(A) ^e	Permite parcial abertura
		Com placa micro perfurada	Ensaio em câmara	20 a 5.000	IL = 8,7 dB (A) ⁱ	
		Com mudanças paramétricas (com aberturas variadas)	Simulação computacional	164 a 5.500	TL = Variável ^h	

Fonte: a BADINO *et al.*, 2019; b MARTELLO *et al.*, 2015; c PATRÍCIO E BRAGANÇA, 2004; d ROHDEN *et al.*, 2019; e CHEUNG *et al.*, 2019; f HKHA, 2017; g FUSARO *et al.*, 2020; h TANG, 2017a; i LEE *et al.*, 2020.

Conforme o Quadro 8, o balanço geral de comportamento de ventilação e acústico, agora a pesquisa irá discutir resumidamente sobre cada elemento de controle de ruído, avaliados individualmente.

Pode-se perceber que os defletores acústicos em geral possuem um comportamento acústico regular, com exceção da veneziana a 40° que é considerada de comportamento bastante eficiente. Do mesmo modo, na ventilação natural, as janelas ventiladas com defletores acústicos são consideradas como ótimas, devido a solução permitir a abertura total da esquadria, sem impedimentos ou barreiras para passagem do fluxo de ar para dentro do ambiente interno.

As janelas com persianas acopladas apresentam o comportamento acústico bom, com exceção quando a persiana está totalmente aberta sendo considerada ruim na redução sonora. De forma semelhante, o comportamento da ventilação natural das janelas ventiladas com persianas acopladas é bom, pois o desenho das janelas com persianas acopladas, em sua maioria no mercado, é de esquadrias de correr com duas folhas, permitindo fluxo de ar parcial devido sua geometria.

As sacadas são regulares no comportamento acústico se for uma tipologia padrão, e boa se for uma tipologia com material absorvente. Por outro lado, na ventilação natural a sacada permite a abertura total da esquadria, sendo ótimo para a passagem do fluxo de ar.

As janelas que apresentam na sua composição ressonadores e refratores acústicos apresentam uma dualidade entre ser consideradas ótimas em comportamento acústico e ruins na ventilação. A técnica é eficiente para barrar os ruídos externos para dentro do ambiente interno, contudo os orifícios de passagem de ar são insuficientes para permitir grandes trocas de ar entre os ambientes externos e internos, reduzindo a ventilação, e consequentemente a qualidade do ar.

As janelas plenum padrão e com placas micro perfuradas apresentam o comportamento acústico regular, enquanto que as janelas plenum que contém tubos ressonadores ou persianas absorventes acopladas são vistas como ótimo na redução do ruído. Quanto a ventilação natural, a janela plenum é considerada como boa, pois ela é composta por janelas de duas folhas de correr que permitem a abertura parcial para passagem do fluxo de ar conforme seu desenho geométrico. Há exceção quando a janela plenum é composta pelos

tubos ressonadores, em que os orifícios limitam a passagem de ar, sendo reduzido o fluxo de ar para o ambiente interno, e conseqüentemente prejudicando a ventilação.

Como observado no Quadro 8, as pesquisas possuem diferentes índices, pelo motivo de terem sido realizadas em diferentes circunstâncias, e com objetivos distintos. Não há melhor ou pior índice a ser utilizado, depende do objetivo da pesquisa. Com isso, considerando o método desta pesquisa será utilizado o índice $D_{ls,2m}$ que é um indicador para pesquisa em campo utilizando fonte sonora.

Por fim, ambos os índices, de conforto acústico e térmico, têm que ser balanceados ao considerar o comportamento das janelas como um todo. Nesse estudo, pode-se considerar que a janela plenum teve um comportamento geral médio mais eficiente, devido sua geometria permitir uma ótima redução sonora, dependendo da sua composição, e boa passagem do fluxo de ar.

3.3.2 Impacto estético na arquitetura

No quesito impacto na arquitetura, o critério para a avaliação foi a verificação da composição, proporção e harmonia da fachada do edifício. Sendo classificado como alto impacto se o elemento muda significativamente a estética da fachada e baixo impacto se não a altera (MARIN *et al.*, 2019; REIS; CONTE, 2014).

Os defletores acústicos, como brises e venezianas, localizam-se em sua maioria na parte externa da janela, causando uma mudança significativa na estética da fachada. Os defletores acústicos influenciam tanto na composição da fachada que alguns arquitetos tomam partido dos brises, brincando com formas diferentes e materiais para que eles possam ser a identidade do edifício.

Por outro lado, as janelas com persianas acopladas podem passar despercebidas nas fachadas de um edifício por ser visualmente semelhante a uma janela comum. As persianas, em sua maioria, possuem um baixo impacto na estética da fachada, já que a sua caixa de recolhimento se localiza dentro do ambiente interno.

Do mesmo modo que os defletores acústicos, as sacadas possuem um alto impacto na arquitetura, devido sua volumetria para fora do edifício, marcando a fachada. Devido ao fato de ser um elemento importante na composição e harmonia da fachada, pode-se encontrar diversos tipos de sacadas, de vários formatos e composições no mercado, para melhor adequar a identidade da construção.

Os ressonadores e refratores acústicos são elementos encontrados dentro da janela, entre os seus perfis de vidro, embora os cilindros sejam visualmente perceptíveis na esquadria, eles pouco afetam a leitura da fachada como um todo, sendo considerados de baixo impacto arquitetônico. Os cilindros dentro das janelas, esteticamente, não afetam na composição e harmonia da fachada, podendo ser percebida como uma esquadria comum dentro do contexto da fachada.

A janela plenum é a mais próxima, esteticamente, da janela comum do mercado. Apresentando suas duas camadas de janela, ela tem pouco impacto arquitetônico, não alterando a proporção, composição e harmonia na leitura da fachada.

Desse modo, define-se como alto impacto na fachada o uso de defletores acústicos e sacadas nas janelas do edifício, e como baixo impacto na fachada o uso de persianas acopladas, ressonadores e refratores acústicos e janela plenum (Quadro 9). É importante destacar que os elementos de baixo impacto na arquitetura proporcionam liberdade criativa à fachada, e não limita a estética somente ao dispositivo de controle de ruído.

Quadro 9 – Impacto na arquitetura

Elementos de controle de ruído		Impacto na arquitetura
Disponível no mercado	Defletores acústicos	Alto impacto
	Persianas acopladas	Baixo impacto
	Sacadas	Alto impacto
Testes em laboratório	Ressonadores e refratores acústicos	Baixo impacto
	Janela plenum	Baixo impacto

Fonte: Autora, 2021

3.3.3 Viabilidade técnica

No quesito viabilidade técnica, levou-se em consideração, como critério de classificação, as condições de manutenção, o custo da operação e possibilidade de construção, sendo avaliada em alta viabilidade quando o elemento possuir baixo custo e fácil manutenção e construção (ABNT, 2021; MENDES, 2009; CONSOLI, 2006).

Os defletores acústicos, como brises e venezianas, são uma das soluções acústicas de menor custo operacional, fácil manutenção e com um método de construção já presente no mercado, portanto são classificados com alta viabilidade técnica. Do mesmo modo, as persianas acopladas e as sacadas são definidas como alta viabilidade técnica por já ser uma solução conhecida no mercado, possuir bom custo benefício e fácil manutenção.

Nas soluções que ainda estão sendo estudadas em laboratório, as janelas com ressonadores e refratores acústicos são classificadas como baixa viabilidade técnica, devido ao fato de o material ser de elevado custo operacional, de difícil manutenção, pois os cilindros ficam acoplados dentro da janela, e baixa possibilidade de construção devido à falta de mão de obra especializada. Por outro lado, as janelas plenum apresentam alta viabilidade, por sua estrutura simples de solução acústica, possuindo um bom custo benefício, fácil manutenção e existem técnicas parecidas no mercado, como o uso de janela sob outra janela.

Desse modo, tem-se a alta viabilidade técnica para as janelas que contém defletores acústicos, persianas acopladas, sacadas e as janelas plenum, sendo elementos que possuem baixo custo, fácil manutenção e construção (Quadro 10).

Quadro 10 – Viabilidade técnica

Elementos de controle de ruído		Viabilidade técnica
Disponível no mercado	Defletores acústicos	Alta viabilidade
	Persianas acopladas	Alta viabilidade
	Sacadas	Alta viabilidade
Testes em laboratório	Ressonadores e refratores acústicos	Baixa viabilidade
	Janela plenum	Alta viabilidade

Fonte: Autora, 2021

3.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS JANELAS VENTILADAS ACÚSTICAS

Analisando a Quadro 11 com o resumo dos balanços analisados de cada elemento avaliado individualmente, pode-se perceber que os ressonadores e refratores acústicos ainda precisam ser mais explorados antes de começarem a ser comercializados em massa. Os defletores acústicos, persianas acopladas e as sacadas apresentam a mesma dinâmica de comportamento mediano geral podendo ser melhorada com a composição de materiais absorventes. Já a janela plenum é considerada uma opção nova ao mercado, e muito promissora, devido sua flexibilidade e comportamento eficiente tanto no baixo impacto na arquitetura como no alto potencial para promoção do conforto acústico.

Quadro 11 – Balanço geral de índices

Elementos de controle de ruído		Redução de ruído	Ventilação natural	Impacto na arquitetura	Viabilidade técnica
Disponível no mercado	Defletores acústicos	Regular	Ótimo	Alto impacto	Alta viabilidade
	Persianas acopladas	Bom	Bom	Baixo impacto	Alta viabilidade
	Sacadas	Regular	Ótimo	Alto impacto	Alta viabilidade
Testes em laboratório	Ressonadores e refratores acústicos	Ótimo	Ruim	Baixo impacto	Baixa viabilidade
	Janela plenum	Ótimo	Bom	Baixo impacto	Alta viabilidade

Fonte: Autora, 2021

Diante do balanço apresentado, conclui-se que a janela plenum é uma alternativa recente, ainda em fase de testes laboratoriais, recomendada para ventilação natural e isolamento sonoro, simultaneamente. Isso devido ao seu fluxo de ar contínuo e comportamento acústico considerável, facilitando a eficiência energética para construção. Além disso, ela apresenta índices promissores de baixo impacto na arquitetura da fachada e alta viabilidade técnica com seu bom custo benefício.

Portanto, em frente a essas conclusões, a pesquisa irá continuar com os ensaios em campo com a janela plenum, explorando diferentes parâmetros e técnicas, a fim de compreender melhor seu o comportamento e funcionamento.

4 MÉTODOS

Na presente sessão, será apresentada a metodologia que foi utilizada para que fosse possível a análise dos comportamentos de ventilação e acústico da janela plenum. Com este intento, fez de ímpar relevância selecionar uma área em um local adequado que possibilitasse a construção e acomodação de um protótipo da janela estudada.

Fez-se igualmente importante a seleção do material e sítios para os estudos e testes, bem como a escolha dos procedimentos para se realizarem as medições e, conseqüentemente, para promover as análises.

A seguir, será apresentado o caminho escolhido para esse estudo exploratório experimental, enquanto seleções metodológicas dos materiais, dos locais, bem como das técnicas e dos instrumentos de medição, e também dos parâmetros de análise adotados.

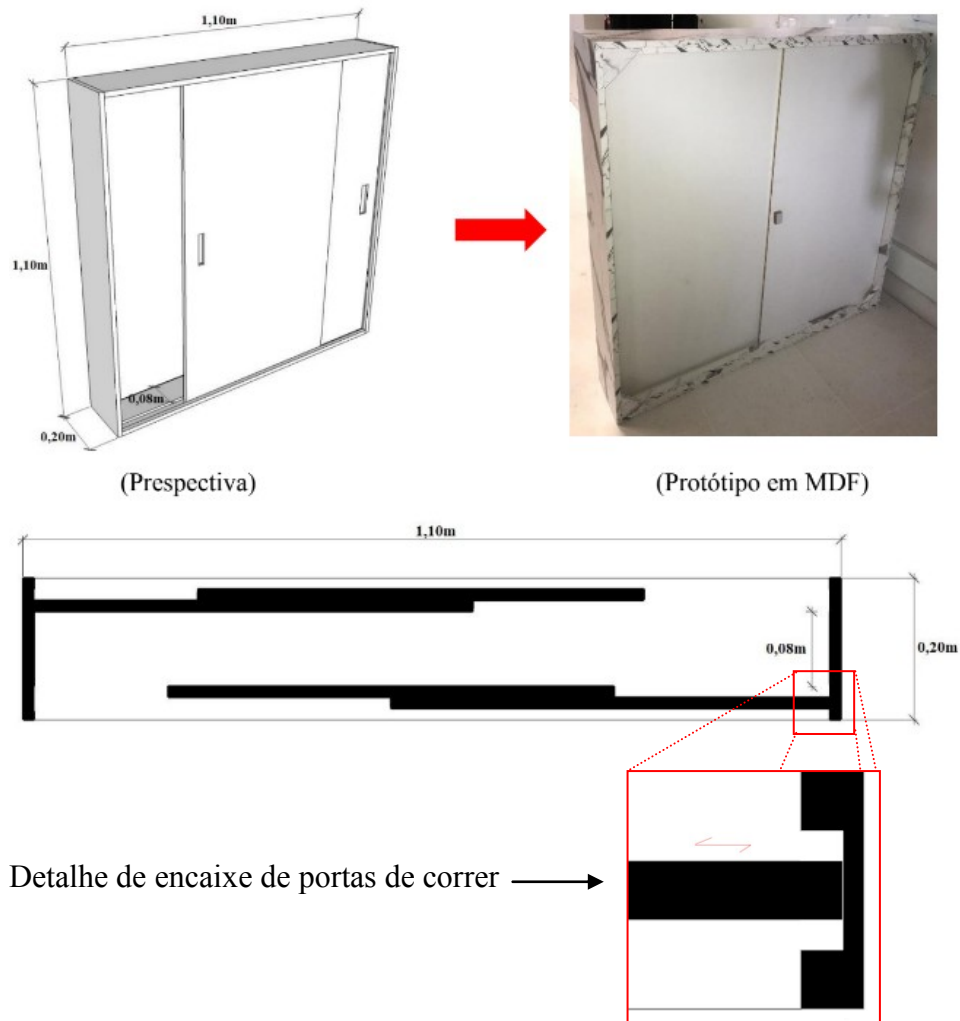
4.1 OBJETO DE ESTUDO: PROTÓTIPO DE JANELA PLENUM

Para a realização dos experimentos, projetou-se e construiu-se um protótipo que se assemelhasse ao sistema da janela plenum. O aparato apresentou as mesmas dimensões da janela modelo maxim-ar já existente no local do experimento, com dimensões de 1,1 m por 1,1 m, 20 cm de profundidade e 8 cm de espaçamento interno entre as portas externa e interna.

O presente protótipo foi produzido no formato de uma caixa, com quatro portas de correr móveis, sendo duas delas externas e as outras duas internas, como pode ser observado na Figura 15. As portas podem ser dispostas de distintas formas, permitindo diferentes configurações, dependendo da necessidade do usuário.

Com o objetivo de facilitar a construção, foram utilizadas chapas de madeira MDF de 15 mm de espessura. Com isso em mente e sabendo que em uma aplicação real as portas de madeiras seriam substituídas por vidro, compreende-se que a substituição dos materiais na confecção do protótipo pode alterar o comportamento do isolamento acústico da janela. Contudo, o pretendido inicialmente é entender melhor a interação do fenômeno acústico e de ventilação com as distintas configurações de aberturas do protótipo.

Figura 15 – Protótipo de janela plenum



Fonte: Autora, 2021

O material escolhido para a construção do protótipo de janela plenum, MDF – sigla para *medium density fiber*. A escolha se deu por conta da homogeneidade do produto que é uniforme e muito estável, além possuir uma superfície ideal para vários fins, como encaixes, parafusar, entalhar, cortar etc. O material possui densidade igual ou maior do que 450 kg/m^3 , quando produzido com teor de umidade de até 20%, segundo a ABNT NBR 15316-1.

O presente protótipo de uma janela plenum foi acoplado em uma janela de modelo maxim-ar. A conexão se deu através de uma aproximação entre o protótipo e a janela maxim-ar, com o auxílio de uma mesa para dar o suporte e altura necessários. O encaixe por aproximação do protótipo junto à esquadria metálica da janela maxim-ar foi efetivo, não apresentando demais dificuldades e atentando-se para evitar o máximo possível de frestas. A abertura máxima da janela maxim-ar, de 90° , foi mantida durante a instalação e todas as medições com o aparato (Figura 16).

Figura 16 – Implantação do protótipo na janela maxim-ar



Fonte: Autora, 2021

4.2 VARIÁVEIS DO PROTÓTIPO DE JANELA PLENUM

Segundo ensaios laboratoriais de Tong e Tang (2017), notou-se que, em relação às dimensões do espaçamento interno da janela plenum, os melhores resultados com isolamento acústico foram encontrados no intervalo entre 5 cm e 10 cm. Com base nesta pesquisa, o protótipo de janela plenum foi elaborado com 8 cm de espaçamento interno.

Para as medições acústicas e de ventilação foram adotadas 7 configurações do protótipo de janela plenum, são elas:

- a) Completamente fechado;
- b) Aberturas de 10 cm desalinhadas;
- c) Aberturas de 20 cm desalinhadas;
- d) Aberturas de 30 cm desalinhadas;
- e) Aberturas de 40 cm desalinhadas;
- f) Aberturas de 50 cm desalinhadas;
- g) Aberturas de 50 cm alinhadas.

Estas configurações serão exemplificadas no tópico 4.4.4.

4.3 NORMAS ADOTADAS

Esta sessão é destinada a explicar a padronização e normalização dos procedimentos conduzidos a avaliar o comportamento acústico e de ventilação do ambiente interno com relação ao externo mediante instalação do protótipo de janela plenum.

4.3.1 ABNT NBR ISO 16283-3

Para o método de medições acústicas com o protótipo de janela plenum foi seguida a ABNT NBR ISO 16283-3 que dispõe sobre medição de campo para avaliação do isolamento acústico nas edificações e nos elementos de edificações, especificamente em sua parte 3, que trata de isolamento de fachada a ruído aéreo. Essa norma expõe diversas formas para mensurar o isolamento acústico de um elemento de fachada, mas para essa pesquisa foi utilizado o método da fonte sonora com alto-falantes global. Esse método resulta em 10 passos, dos quais foram adotados neste trabalho:

- 1) posicionamento do protótipo junto à janela;
- 2) posicionamento do sonômetro e computador de apoio, utilizando o sonômetro Bruel & Kjaer;
- 3) Medição do tempo de reverberação da sala por meio da técnica do ruído interrompido (ABNT, 2009);
- 4) Posicionamento da fonte sonora em um distanciamento de 5 m, em um ângulo de 45° na direção da janela, com um tripé a 1,5 m do chão;
- 5) Mensuração do ruído de fundo (L_b), dentro da sala;
- 6) Medição do NPS externo ($L_{1,2m}$), a medição realizada a dois metros de distância da fachada, a um metro de distância de guarda-corpos ou obstáculos, pelo menos 1,5 m do chão e com o tempo médio de medição de 15 s interruptos;
- 7) Constatação do NPS interno, realizado em 5 posições diferentes (P_1, P_2, P_3, P_4, P_5) em que o microfone deve estar na sala. Essas posições estavam desalinhadas e contaram com um tempo medição de no mínimo 15 s. Essas medições foram realizadas para cada disposição de abertura diferente do protótipo;
- 8) Cálculo da média energética do NPS interno (L_2), por meio da média de todos os pontos medidos na sala, aferidos para a mesma disposição de abertura, com a fórmula:

$$L_2 = 10 \times \text{LOG}_{10} \left\{ \frac{1}{5} \times \left[\left(10^{\frac{P_1}{10}} \right) + \left(10^{\frac{P_2}{10}} \right) + \left(10^{\frac{P_3}{10}} \right) + \left(10^{\frac{P_4}{10}} \right) + \left(10^{\frac{P_5}{10}} \right) \right] \right\}$$

Onde:

L_2 – Média energética do NPS interno, em dB;

P_x – NPS medido no ponto X da sala, em dB.

9) Cálculo da diferença de nível ($D_{ls,2m}$), diferença entre NPS externo e o interno:

$$D_{ls,2m} = L_{1,2m} - L_2$$

Onde:

$D_{ls,2m}$ - Diferença de nível, em dB;

$L_{1,2m}$ - NPS externo, em dB;

L_2 - Média energética do NPS interno, em dB.

10) Cálculo da diferença de nível padronizado ($D_{ls,2m,nT}$) que tem como referência o tempo de reverberação da sala, como uma forma de correção de dados dos resultados já obtidos de diferença de nível ($D_{ls,2m}$). Pela fórmula:

$$D_{ls,2m,nT} = D_{ls,2m} + \left[10 \times \log_{10} \left(\frac{T}{T_0} \right) \right]$$

Onde:

$D_{ls,2m,nT}$ - Diferença de nível padronizado, em dB;

$D_{ls,2m}$ - Diferença de nível, em dB;

T - Tempo de reverberação da sala, em segundos;

T_0 - Tempo de reverberação de referência, em segundos ($T_0 = 0,5$ s).

Nas medições internas, para cada configuração do dispositivo, inicialmente era realizada a medição do ponto 1, posteriormente movendo o sonômetro para o ponto 2, e assim sucessivamente, contabilizando as cinco posições fixas do sonômetro, sendo medições sequenciais. As medições em cada ponto foram de 15 segundos, sendo que a norma estabelece o mínimo de seis segundos para a faixa de frequência de 100 Hz a 400 Hz, e pelo menos 4 segundos para faixa de frequência entre 500 Hz a 5.000 Hz. Para a faixa entre 5.000 Hz e 8.000 Hz o intervalo recomendado é de 15 segundos. Neste sentido, reitera-se que todas as medidas foram feitas com 15 segundos em conformidade normativa.

Na parte externa da edificação, foi disposta uma fonte sonora, um computador e um amplificador de som a fim de simular o ruído do trânsito com uma intensidade desejada. A fonte sonora foi disposta sobre um tripé, com angulação de 45° na direção da janela com o

protótipo. Posteriormente, foram conectados a fonte sonora ao amplificador, e este por sua vez ao computador.

O próximo passo foi medir o ruído de fundo, pois o ruído do trânsito presente na localidade poderia interferir nas medições, mesmo com a simulação de ruído amplificada. O resultado careceria de correções caso a diferença entre o ruído gerado e o ruído de fundo – do trânsito na localidade – fosse inferior a 10 dB, porém não foi o caso, o que descartou a necessidade de correções por ruído de fundo (L_b).

Após a medição externa, promoveu-se as medições no ambiente interno e o cálculo da média energética dos NPS de todos os cinco pontos relatados anteriormente, para cada configuração do protótipo de janela (condições de abertura, conforme listado no item 4.3). Calculou-se também a diferença de nível ($D_{Is,2m}$), ou seja, a diferença entre o NPS interno e o externo de cada configuração de abertura do protótipo. Por fim, com a medição de tempo de reverberação foi possível calcular a diferença de nível padronizado ($D_{Is,2m,nT}$), que observa correções do isolamento sonoro da fachada, pelo tempo de reverberação da sala.

A partir da obtenção destes resultados, pode-se caracterizar acusticamente o isolamento da fachada com o protótipo.

4.3.2 ABNT NBR ISO 3382-2

A metodologia presente na ABNT NBR ISO 3382-2 descreve dois modos de medições de tempo de reverberação: o método resposta impulsiva integrada e o método ruído interrompido. Por uma escolha autoral e disponibilidade de materiais e equipamentos, utilizou-se do método da resposta impulsiva integrada que consiste, basicamente, em reproduzir um som de forma impulsiva, como o estouro de um balão, como foi o caso. Na sequência, tendo passado o ápice do som impulsivo, o aparelho responsável pela mensuração mediu a pressão provocada pelas reflexões sonoras e seu consequente decaimento, por meio da medição da pressão incidente das ondas sonoras ao passarem pelo dispositivo.

Em conformidade normativa ao método de tempo de reverberação, o ideal da mensuração do decaimento do som no ambiente interno deveria acontecer até o nível de 60 dB, após o estímulo impulsivo. Contudo, diante da dificuldade em se conseguir um ruído de fundo utilizável no ambiente interno, local do experimento, pensou-se em um estímulo impulsivo alto suficiente para a obtenção de uma diferença de 60 dB entre ambos – estímulo impulsivo e ruído de fundo. Por isso ser inviável tecnicamente, os tempos de reverberação

foram mensurados para decaimentos de 20 dB e 30 dB, sabendo que ambas as linhas de regressão são, de modo respectivo, extrapoladas para 60 dB.

4.3.3 Técnica de gás traçador

A técnica do gás traçador trata de um experimento que mede a capacidade de ventilação e renovação do ar em ambientes internos. Uma das possibilidades dessa técnica consiste, basicamente, em elevar os níveis de determinado gás, e posteriormente mensurar o seu decaimento. O Quadro 12 informa os tipos de mensuração possíveis pela técnica de gás-traçador segundo Sherman (1990). Na área hachurada tem-se o método adotado neste experimento: decaimento simples utilizando o dióxido de carbono (CO₂).

Quadro 12 – Tabela da Técnica do gás-traçador em uma única área¹

<i>Nome</i>	<i>Tipo de mensuração</i>	<i>Controle de fluxo</i>	<i>Média Enviesada</i>
<i>Métodos transitórios (medida λ)</i>			
<i>Decaimento simples</i>	<i>Regressão</i>	<i>Decai</i>	<i>Sim</i>
<i>Decaimento de dois pontos</i>	<i>Média</i>	<i>Decai</i>	<i>Não</i>
<i>Decaimento integral</i>	<i>Integral</i>	<i>Decai</i>	<i>Sim</i>
<i>Carregar</i>	<i>Regressão</i>	<i>Const. inj./pulso</i>	<i>*</i>
<i>Métodos de estado estacionário (medida Q)</i>			
<i>Pulso</i>	<i>Integral</i>	<i>Pulso</i>	<i>Sim</i>
<i>Injeção constante</i>	<i>Regressão</i>	<i>Constant injeção</i>	<i>Não</i>
<i>Integral de longo prazo</i>	<i>Integral</i>	<i>Qualquer</i>	<i>sim</i>
<i>Constante concentração</i>	<i>Média</i>	<i>Constante concentração</i>	<i>Não</i>

* Geralmente utilizado com outros métodos para determinar o volume efetivo.

Fonte: SHERMAN, 1990 (Grifo da autora).

Para que seja possível a referência, faz-se uma mensuração inicial do nível de injeção zero do gás traçador, ou seja, mede-se o nível do traçador no ambiente interno sem a sua injeção para que seja possível observar o seu decaimento com relação ao posterior excedente que será introduzido no mesmo ambiente (SHERMAN, 1990, p. 369).

A técnica de decaimento de gás traçador proposta por Sherman (1990), foi aperfeiçoada por You *et al.* (2007), quando os autores trouxeram o cálculo de *Air Exchange Rate* (AER) ou índice de trocas de ar, para os testes com gases traçadores. O AER, expresso em h⁻¹, tem a finalidade de conseguir analisar a capacidade de renovação do ar pelo ambiente

¹ Tradução livre.

estudado de forma analítica, podendo ser comparada entre outros estudos e conseguir extrair conclusões a partir dos resultados encontrados, afim de caracterizar a ventilação do ambiente, e conseqüentemente, a eficácia de suas aberturas.

Como exemplo, em outra pesquisa com finalidade de medir a qualidade de ventilação, Barmparetos *et al.* (2018) realizaram um ensaio em campo com CO₂ em uma escola de Atenas, Grécia. Nesse mesmo ensaio, os autores utilizaram o cálculo de *Air Exchange Rate* (AER) ou índice de trocas de ar, com a finalidade de obter uma análise analítica da qualidade de trocas de ar das salas de aulas, se era suficiente ou não para o ambiente, dependendo dos resultados podendo ter conseqüências de saúde para os alunos. Isso reforça, a relevância do cálculo de AER para experimentos de ventilação natural.

4.4 ESTUDO ACÚSTICO

O presente tópico objetiva descrever sobre os experimentos acústicos realizados no decorrer da pesquisa para continuidade da análise sobre o comportamento da janela plenum.

4.4.1 Local do experimento

Os testes foram elaborados na cidade de Florianópolis/SC, uma cidade com latitude -27,6°, longitude -48,6° e altitude 4,87 m. Ressalta-se que tais testes foram realizados em 14 de junho de 2021, segunda-feira, das 8 h às 13 h. O céu estava limpo, a temperatura média era de 21 °C, a umidade relativa média era de 52% e a velocidade do vento média era de 2,5 m/s na direção predominante sudeste (INMET, 2021). Observa-se que as circunstâncias de clima e tempo não interferiram ou minimizaram alterações no experimento, por conta de temperatura e umidade.

Os experimentos acústicos foram realizados nas dependências do Laboratório de Conforto Ambiental (LabCon) que fica localizado no segundo andar da edificação do departamento de Arquitetura e Urbanismo pertencente à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), indicado na Figura 17. A principal razão por trás da escolha desse local de ensaios acústicos é a facilidade de manipulação do protótipo e equipamentos para realização de medições.

Figura 17 – Local do experimento



Fonte: Google Earth, 2021 (Modificado pela autora)

Especificamente, o local onde o experimento foi realizado trata-se da sala de reunião do LabCon. Ela possui quatro paredes distintas em duas variedades, a saber: duas de alvenaria, duas de painel cartonado. O teto da sala é uma laje de alvenaria e o piso do ambiente é revestido por granitina. O formato da sala é retangular, cujas dimensões são 4,5 m de comprimento e 3,2 de largura, com um pé direito de 2,9 m. A área útil total do ambiente é de 14,4 m², com um volume interno de 41,7 m³.

O ensaio foi realizado na única janela presente na sala de reunião que possui uma fachada de alvenaria, no referido prédio do curso de Arquitetura. Tal fachada se encontra voltada para o norte geográfico, exatamente a direção da Rua Deputado Antônio Edu Vieira. Isso se faz evidente a partir das Figuras 18 e 19, em que é possível visualizar a planta baixa do laboratório, bem como a locação do sonômetro e dos pontos escolhidos para as medições.

Figura 18 – Planta baixa sala LabCon e os pontos de medição

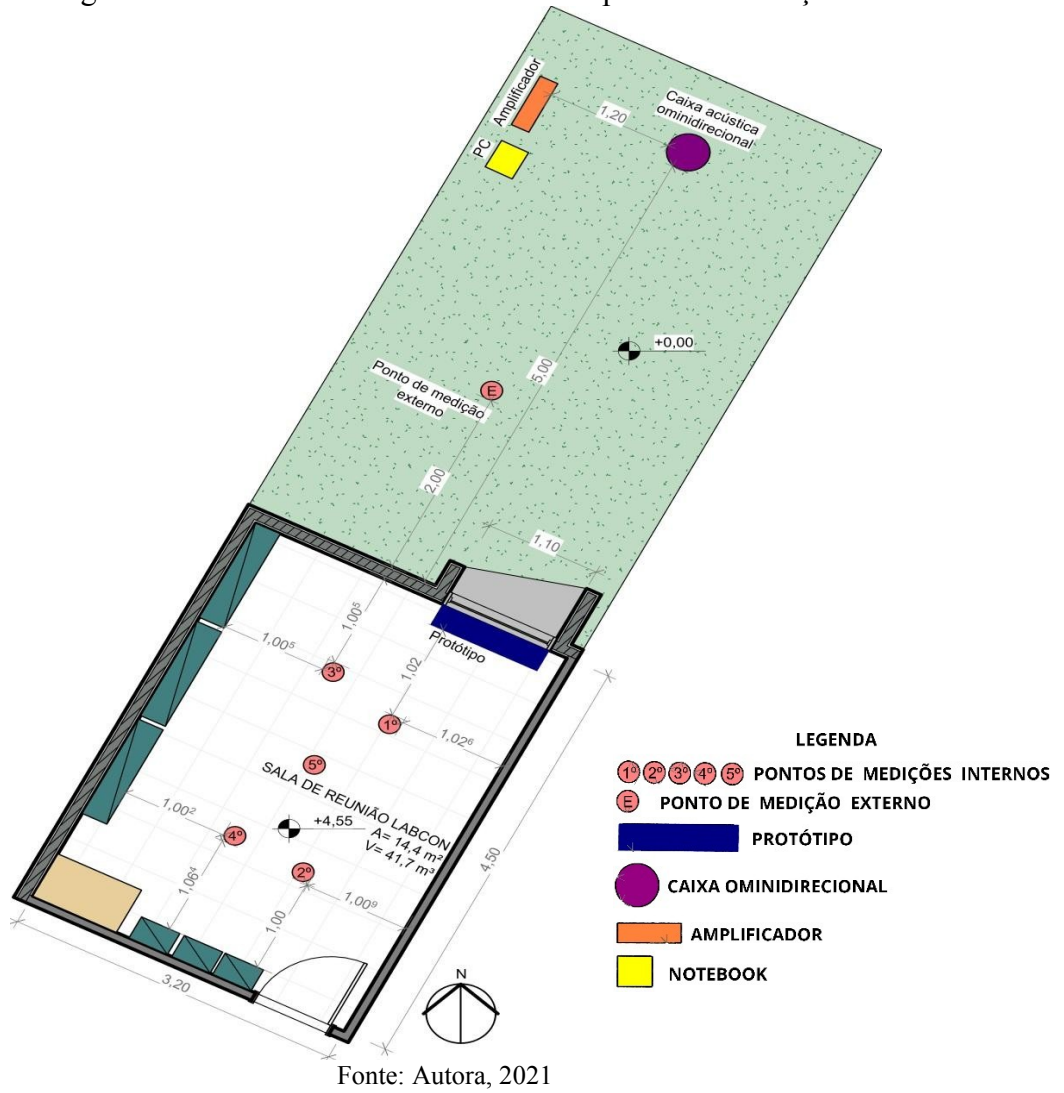


Figura 19 – Corte esquemático sala LabCon



A ABNT NBR ISO 16283-3 afirma que o experimento deve ser realizado com duas fontes sonoras, porém com a limitação de recurso e equipamento para pesquisa foi utilizado apenas uma fonte sonora, como foi mostrado nos esquemas de figura acima.

A mobília presente na sala é composta por 6 estantes metálicas com livros, arquivos e material de escritório, uma baía de estudo no canto da sala, um lixeiro pequeno, um aparelho televisor e um ar condicionado, ambos acoplados à parede (Figura 20).

Figura 20 – Sala LabCon



Fonte: Autora, 2021

A janela da sala de reunião (Figura 21), modelo maxim-ar, onde foi acoplado o objeto de estudo, possui as seguintes dimensões: 1,1 m por 1,1 m, com 1 m de peitoril, além de possuir uma folha móvel pivotante, com abertura máxima que se aproxima dos 90°. A bandeira de vidro superior e inferior são fixas.

Figura 21 – Janela da sala LabCon



Fonte: Autora, 2021

Para a realização do experimento, dada a impossibilidade em se retirar a janela, o procedimento adotado foi acoplar devidamente o protótipo à parte interna da janela, visto que essa também pode ser uma solução de reforma para edificações existentes.

4.4.2 Implantação do objeto de estudo a janela existente

A janela maxim-ar pertencente à fachada do prédio foi aberta em sua máxima amplitude, cerca de 90°. Na sequência, o protótipo foi acoplado à mesma. Tal acoplagem se deu através da máxima proximidade entre as superfícies retangulares de contato da janela e do protótipo, juntando as mesmas, sem necessidade de vedação adicional.

A permanência da acoplagem foi possível através de uma mesa de sustentação que manteve o protótipo à altura da janela e estavelmente em contato (Figura 22).

Figura 22 – Acoplagem do protótipo à janela



Fonte: Autora, 2021

Com o fim de se obter a validação dos testes, é importante ressaltar que se teve o devido cuidado para que sons externos não interferissem nos procedimentos e, possivelmente, alterassem os resultados. Quando houve ruído intermitente externo, aquela medição específica foi invalidada e refeita.

4.4.3 Medições

A primeira medição ocorreu no ambiente externo, com o sonômetro posicionado a 2 m da fachada e o dodecaedro a 5 m da fachada (Figura 23) para aferição do NPS que chega à fachada em estudo ($L_{1,2m}$).

Figura 23 – Medição no ambiente externo



Fonte: Autora, 2021

Posteriormente, dentro da sala, realizaram-se as medições com a janela sem o protótipo acoplado, nas posições fechada e aberta, como forma de se ter um parâmetro de referência para a análise de dados, pois espera-se que o isolamento da fachada com o protótipo esteja dentro desse intervalo, e certamente o mais próximo possível do comportamento da janela fechada. Posteriormente, foram feitas as medições das sete distintas configurações do protótipo.

Ao todo, foram realizadas dez medições: uma externa; duas internas sem o protótipo, com a janela aberta e fechada, e; sete com o protótipo em diferentes configurações, como será possível observar adiante no tópico 4.4.4.

Por fim, foi realizada a medição do tempo de reverberação pelo método de resposta impulsiva integrada segundo a ABNT NBR ISO 3382-2, que consiste no estouro do balão conforme já foi mencionado anteriormente no tópico de normas. Os modelos dos balões

utilizados para o teste de tempo de reverberação eram de material latex, tamanho 18, inflado por meio de compressor. A medição do tempo de reverberação (Figura 24) foi importante para futuros cálculos do diferencial de nível padronizado ($D_{1s,2m,nT}$)

Figura 24 – Recurso utilizado na medição do tempo de reverberação



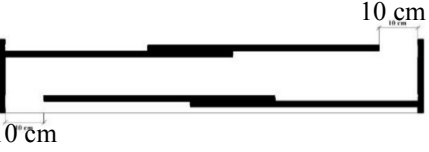





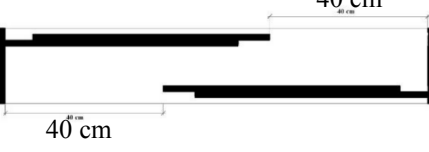

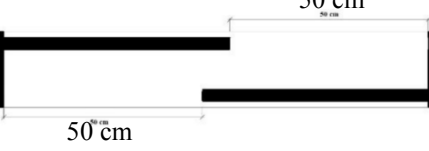

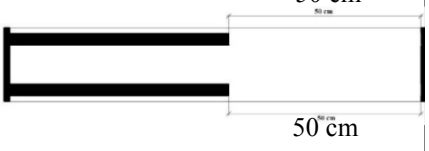



Fonte: Autora, 2021

4.4.4 Procedimentos de medição

Com relação às configurações do protótipo, devidamente acoplado, tem-se que a primeira delas foi com as abas totalmente fechadas. Após isso, abriu-se 10 cm cada aba e se formou a segunda configuração, de forma que as aberturas ficassem não alinhadas. Para a terceira configuração, abriram-se mais 10 cm das abas, totalizando 20 cm de abertura para cada uma delas. As demais configurações se sucederam do mesmo modo, acrescentando 10 cm ao espaçamento de cada aba com relação à posição anterior, até a abertura completa das abas, totalizando 50 cm. A última medição com o dispositivo foi a configuração aberturas alinhadas, como se pode observar no Quadro 13.

Quadro 13 – Configurações de abertura do protótipo adotadas nas medições

Medições do protótipo			
Medição	Configuração do protótipo	Vista planta baixa	Vista Frontal
1 ^a	Totalmente fechada		
2 ^a	Abertura 10 cm		
3 ^a	Abertura 20 cm		
4 ^a	Abertura 30 cm		
5 ^a	Abertura 40 cm		
6 ^a	Abertura 50 cm		
7 ^a	Aberturas alinhadas		

Fonte: Autora, 2021

4.4.5 Equipamentos utilizados

Para as medições foi utilizado o sonômetro Brüel & Kjaer, modelo Investigator 2260-D (Figura 25). Sua faixa de frequência compreendia entre 100 Hz a 3.15 kHz, durante o experimento. O mesmo foi calibrado anteriormente e configurado de acordo com o Quadro 14.

Figura 25 – Sonômetro utilizado



Fonte: Autora, 2021

Quadro 14 – Dados das medições²

Definição do trabalho (configuração geral para medição da fachada)	<i>Trabalho</i>	Novo
	<i>Padrão</i>	ISO
	<i>Tarefa</i>	Fachada
	<i>Largura da banda</i>	1/3 – oct.
	<i>Frequência</i>	100 Hz a 3.150 Hz
Opção de medição (configuração para medições internas e externas)	Tempo de fuga	05 s
	Tempo de compilação	20 s
	Reserva automática	Ligado
	Corrente de fundo	Desligado
	Participação	A
	Registro	Ponto_1
Medições de reverberação	Ruído	Impulsivo
	Tempo de decaimento	03 s
	Repetição automática	Desligado
	Partição	A
	Registro	Ponto_1

Fonte: Autora, 2021

² Tradução livre do conteúdo da tela do sonômetro.

No ambiente externo, para a reprodução do ruído branco, utilizou-se dos seguintes equipamentos: um notebook da marca Dell, um amplificador Brüel & Kjaer – Type 2718 e uma fonte sonora OmniPower Sound Source Type – 4292 (Figura 26).

Figura 26 – Materiais utilizados e disposição da instalação para a geração de ruído externo

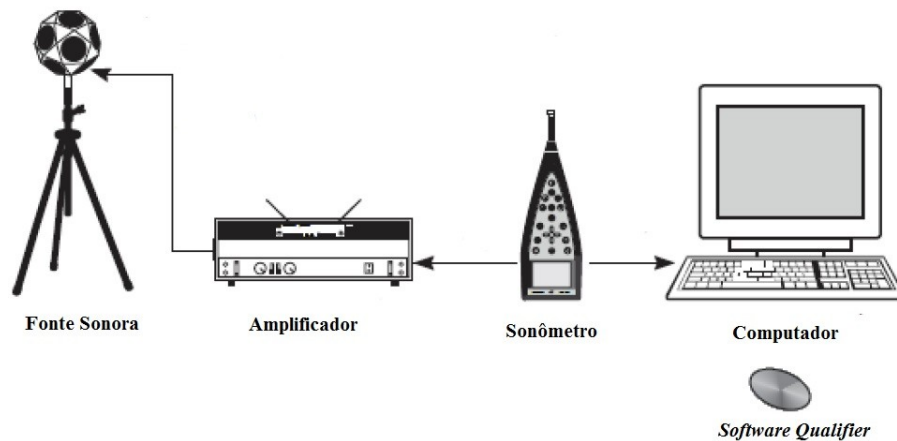


Fonte: Autora, 2021

Para conectar tais equipamentos, utilizaram-se os cabos conectores AQ-0673, AO-0523 e AO-1442, em conformidade ao manual de utilização dos equipamentos Brüel & Kjaer.

A Figura 27 ilustra o esquema de conexão entre os equipamentos.

Figura 27 – Esquema de conexão dos componentes



Fonte: Manual Brüel & Kjaer, 2006

O notebook gravava o ruído branco, repetidamente, conectado ao amplificador que dava intensidade ao ruído, com configuração de 3,2 volts, 0,4 amperes, ganhos de 30 dB, o máximo permitido que não provocasse distorções do áudio. Por sua vez, o amplificador foi conectado à fonte sonora omnidirecional que reproduzia o ruído de maneira desejada para o experimento.

As medições eram gravadas na memória interna do sonômetro, e posteriormente feita a extração dos dados guardados no sonômetro pelo software *Qualifier Type 7830*, disponível pelo fabricante Brüel & Kjaer para processamento de dados.

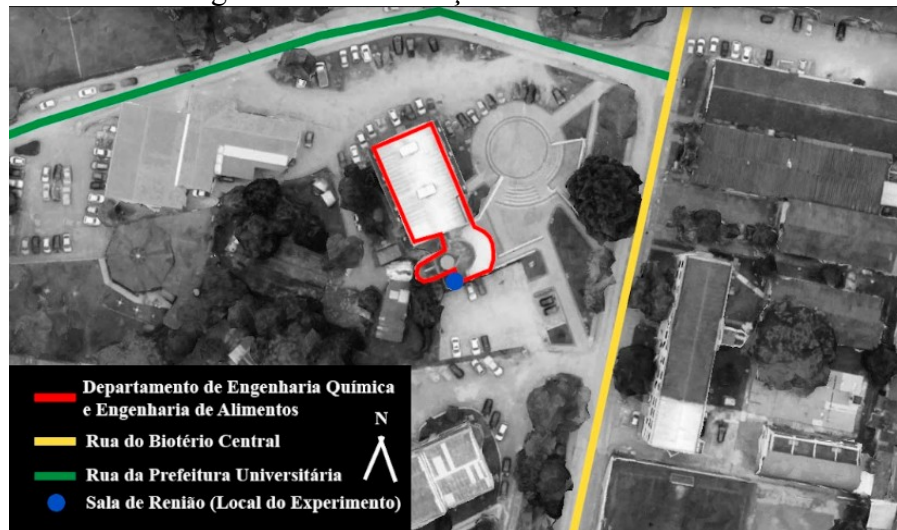
4.5 ENSAIO DE VENTILAÇÃO

Os ensaios de ventilação aconteceram do dia 12 de julho de 2021 – segunda-feira, até o dia 30 de julho – sexta-feira, totalizando três semanas de experimento, com a ressalva de que nem todos os dias tiveram medições. Os dias chuvosos foram eliminados do estudo, o que explica o lapso temporal razoavelmente dilatado.

Os dias utilizados para a realização dos testes foram os que tiveram temperatura ambiente média entre 10°C e 20°C e com umidade propícia ao estudo, variando entre 50% e 80%. A velocidade do vento era em média 1,5 m/s na direção predominante sudeste (INMET, 2021), sendo que o teste foi aplicado em uma fachada sul.

Estes experimentos aconteceram na sala de reunião do Departamento de Engenharia Química e de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, localizada em Florianópolis/SC (Figura 28).

Figura 28 – Localização da sala de reunião



Fonte: Google Earth, 2021 (Modificado pela autora)

Essa sala foi escolhida devido a sua localização. O Laboratório de Termodinâmica e Tecnologia Supercrítica (LATESC) cedeu os cilindros contendo o gás CO_2 para a realização do ensaio, porém, dada a impossibilidade de se transportar os tanques para o local onde ocorreram os testes acústicos, decidiu-se transportar o protótipo para uma sala do laboratório.

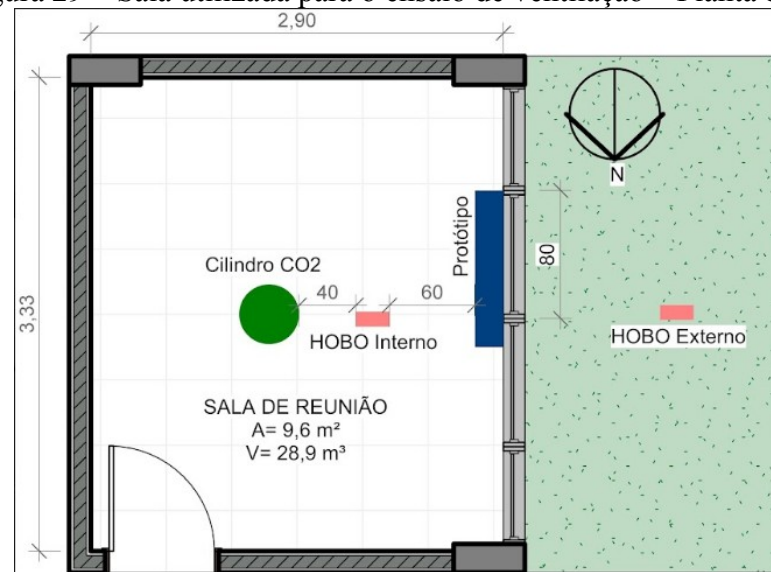
Essa mudança se mostrou favorável também por conta da economia de material de testes, pois a sala de reunião do departamento de alimentos possui um volume menor, exigindo menor consumo de gás para a saturação.

4.5.1 Local do experimento

Trata-se de uma sala no térreo, com uma largura de 3,33 m, com comprimento dos 2,90 m e uma altura de 3,00 m, totalizando uma área de $9,66 \text{ m}^2$, e conseqüentemente um volume de $28,97 \text{ m}^3$.

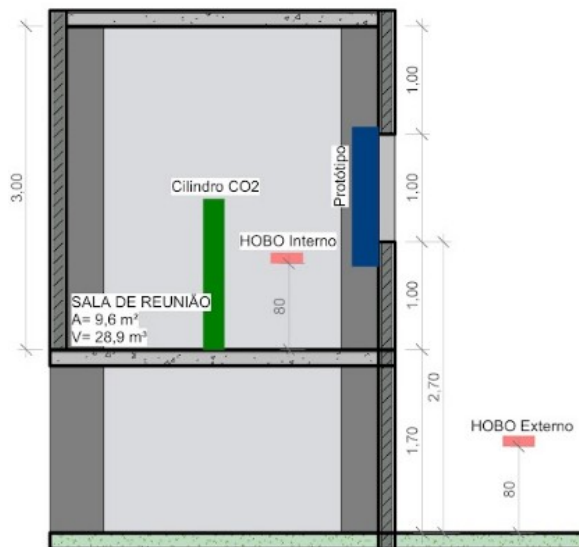
A sala possui revestimento cerâmico no piso e teto em laje de alvenaria. Três paredes são em alvenaria e uma em vidro, local onde foi devidamente acoplado o protótipo, junto à única janela presente na sala. Esta possui duas folhas maxim-ar, cada uma com 1,0 m de altura e 0,80 m de largura, porém, para o estudo, foi utilizada uma única folha, mantendo a outra fechada (Figuras 29 e 30). As bordas superiores, inferiores e laterais da janela são em vidro fixo.

Figura 29 – Sala utilizada para o ensaio de ventilação – Planta baixa



Fonte: Autora, 2021

Figura 30 – Sala utilizada para o ensaio de ventilação - Corte



Fonte: Autora, 2021

O ambiente não possuía qualquer tipo de mobília, estando completamente vazio para a realização dos experimentos (Figuras 31 e 32).

Figura 31 – Sala onde foram realizados os testes (Paredes, piso e teto)



Parede da porta

Parede em frente à parede da porta



Parede em frente à janela

Paredes da Janela



Piso

Teto

Fonte: Autora, 2021

Figura 32 – Janela onde foi acoplado o protótipo



Fonte: Autora, 2021

4.5.2 Implantação do objeto de estudo a janela existente

A metodologia de implantação do protótipo segue o mesmo modelo pensado e realizado para as medições acústicas, ou seja, o mesmo protótipo foi acoplado à janela do ambiente supracitado com auxílio de um suporte para sustentação (Figura 33).

Figura 33 – Acoplagem do protótipo à janela



Fonte: Autora, 2021

4.5.3 Medições

Os dados foram registrados a cada um minuto, pois o aparelho HOBO (Figura 34) foi programado para gravar uma mensuração por minuto. Desse modo, o procedimento foi medir a quantidade inicial de CO₂ no ambiente, sem a liberação do gás e posteriormente com a saturação do ambiente e seu decaimento, minuto a minuto.

Figura 34 – Medição com o HOBO



Fonte: Autora, 2021

Inicialmente, a concentração de CO₂ registrada foi por volta de 400 ppm, sem a liberação do gás presente nos cilindros. Após essa mensuração, acionava-se a válvula dos cilindros, liberando o gás até a concentração máxima que o aparelho medidor (HOBO) conseguia registrar, ou seja, 5.000 ppm. Quando essa marca era alcançada, fechava-se o registro dos cilindros, interrompendo a liberação do gás, e observava-se o decaimento da concentração do gás até o retorno à marca inicial de 400 ppm, ou equilíbrio com o HOBO externo.

Esse processo de decaimento levava cerca de 6 horas. Por isso, trancava-se a sala até o monitoramento da mensuração por sistema remoto, aplicativo de celular, indicasse que o ambiente interno já estava em equilíbrio com o externo.

4.5.4 Equipamentos utilizados

Para estes experimentos, utilizou-se do HOBO MX CO₂ logger (Figura 35) que tem a capacidade de mensurar a concentração de CO₂ em parte por milhão (ppm) de ar, além de

medir também a temperatura e a umidade do ar, ou seja, este equipamento fornece três variáveis importantes para a validação das medições dos testes.

Figura 35 – Aparelho HOBO



Fonte: Autora, 2021

Também foram usados cilindros de gás contendo CO₂ com 99,5% de pureza, que foram utilizados na quantidade de dois cilindros com capacidade de 50 litros (Figura 36).

Figura 36 – Cilindros de CO₂



Fonte: Autora, 2021

4.5.5 Procedimentos de medição

As medições foram inicialmente feitas com a janela aberta e sem o protótipo, configuração está adotada como condição de referência, do mesmo modo que foi realizado para os experimentos acústicos. Posteriormente, mensurou-se a capacidade de trocas de ar com protótipo devidamente acoplado e com suas aberturas alinhadas. No momento seguinte, os testes ocorreram com as aberturas desalinhadas de 50 cm, 40 cm, 30 cm, 20 cm e 10 cm.

Diferentemente dos experimentos acústicos, não se promoveram os experimentos com a janela e com o protótipo totalmente fechados, pois o objetivo era mensurar a capacidade de renovação do ar no ambiente interno utilizando a janela plenum como elemento de acesso à ventilação natural.

Os cilindros de CO₂ foram utilizados um de cada vez, locados no centro da sala para uma injeção e melhor homogeneização do ar com grande concentração de CO₂, para que o gás fosse distribuído de modo mais uniforme no ambiente.

O HOBO interno foi locado entre a janela e o cilindro de CO₂ a 0,80 m do chão. Do lado externo, outro HOBO foi colocado para comparação dos valores mensurados, simultaneamente, dos dois ambientes (Figuras 29 e 30).

4.6 LIMITAÇÕES EXPERIMENTAIS

O que pode interferir para que os experimentos acústicos não sejam tão precisos, entre outros fatores, são as frestas entre os painéis de MDF e entre a janela maxim-ar e o protótipo. A presença das frestas faz a fachada perder isolamento sonoro, assim como a falta de massa e rigidez do material utilizado para o protótipo, que poderia ser mais espesso.

Outra limitação da pesquisa, é o fato de estar mensurando o comportamento acústico da fachada e não especificamente o do protótipo de janela plenum, chegando a resultados que caracterizam a fachada com e sem a presença do dispositivo. Da mesma forma, o experimento de ventilação afere as trocas de ar do ambiente como um todo, com e sem o protótipo, e não somente do dispositivo estudado.

Isso também leva a compreensão, enquanto incerteza, que os resultados obtidos nos experimentos sobre a capacidade de ventilação e de isolamento sonoro de ruídos do protótipo são característicos apenas para as circunstâncias em tela, ou seja, apenas para salas com aquele volume e características. Não podendo afirmar a validade dos testes sobre o comportamento da janela plenum de modo universal para salas maiores em volume, com mais

aberturas e em outras condições. Afinal, entre outras variáveis, há os modos normais da sala e isso muda dependendo da composição e geometria do ambiente.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Esse tópico tratará sobre os resultados obtidos perante os experimentos realizados e as análises dos dados com a base teórica que foi estudada.

5.1 COMPORTAMENTO ACÚSTICO DA JANELA PLENUM

Conforme foi afirmado anteriormente, os experimentos acústicos do protótipo de janela plenum foram realizados na sala de reunião do LabCon, 1º pavimento do prédio de arquitetura, com base nas ABNT NBR ISO 16283-3 e ABNT NBR ISO 3382-2. A seguir os resultados obtidos do experimento.

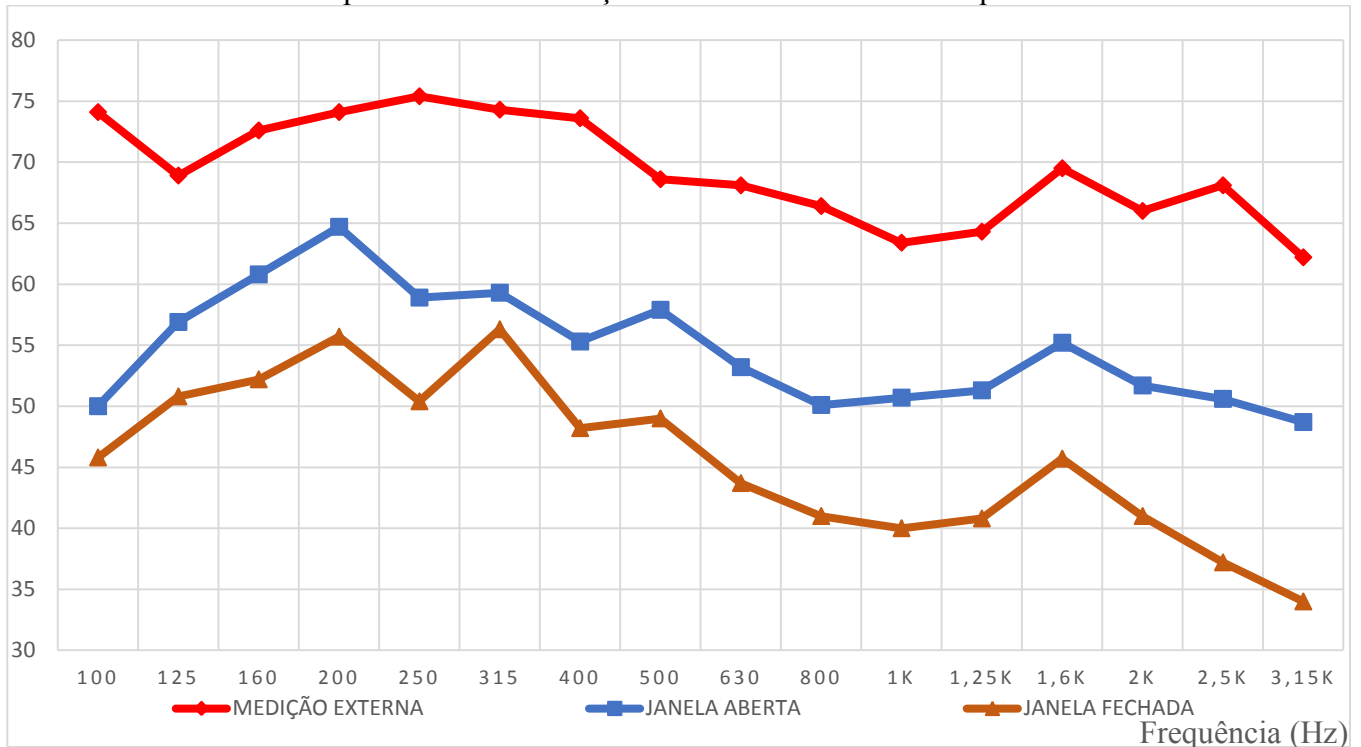
5.1.1 Média energética dos NPS medidos ($L_{1,2m}$ e L_2)

Para começo de análise, foi calculada a média energética do ruído que chega à fachada ($L_{1,2m}$) do lado externo a edificação. Essa medição aparece no Gráfico 1 como a linha vermelha. Posteriormente, compara-se o $L_{1,2m}$ com duas médias energéticas calculadas internamente (L_2), ou seja, dentro da sala de reunião do LabCon, essas duas médias são feitas com a janela aberta e a janela fechada, representadas pelas linhas azul e marrom no Gráfico 1, respectivamente.

Assim, no Gráfico 1 a seguir será analisado inicialmente o comportamento da fachada, mostrando suas características iniciais sem a presença do protótipo.

L₂ (dB)

Gráfico 1 – Medições iniciais da fachada com a janela aberta e fechada por banda de um terço de oitava das faixas de frequência



Fonte: Autora, 2021

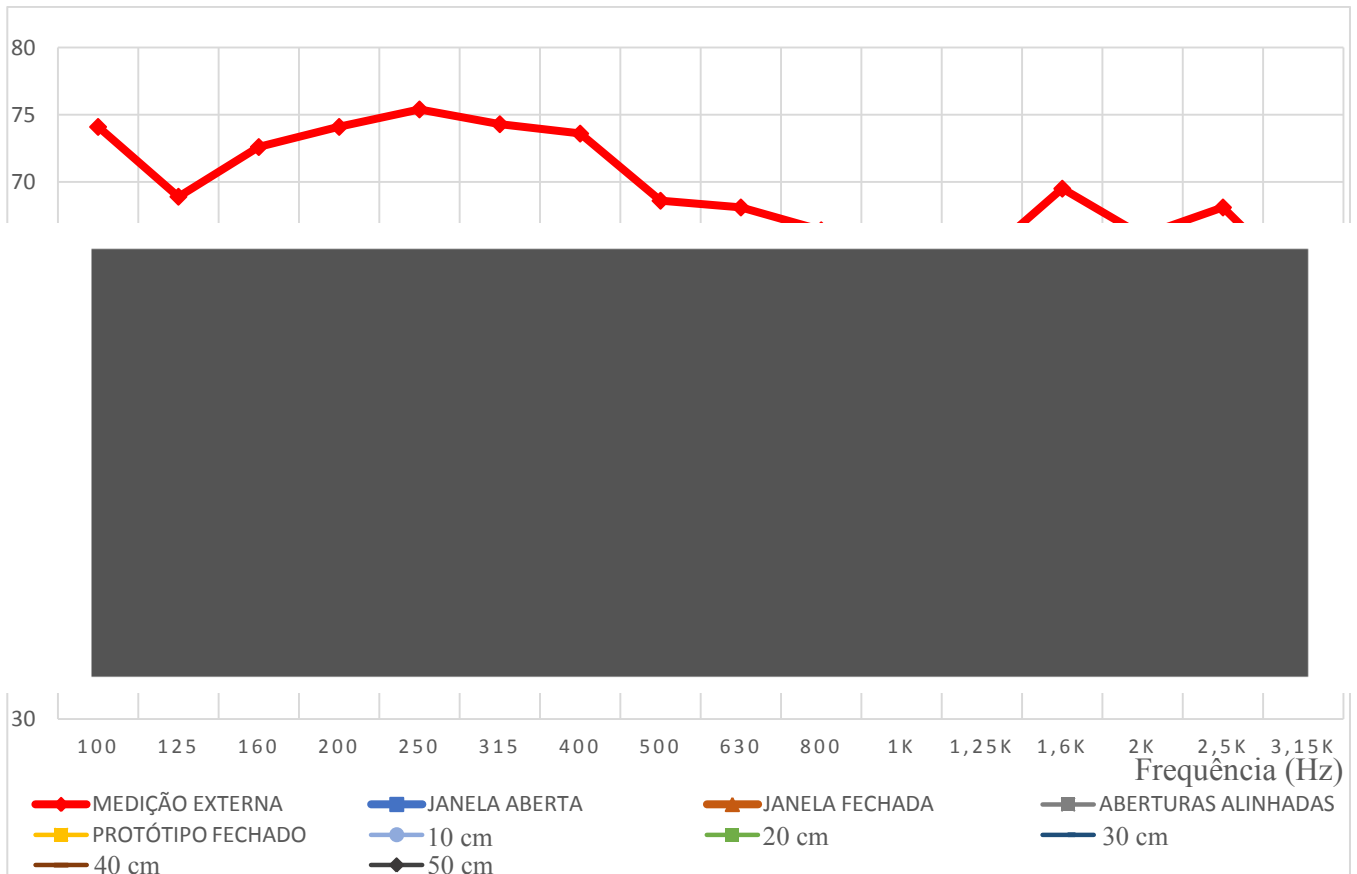
Observando o Gráfico 1, pode-se perceber pela linha vermelha, média energética externa ($L_{1,2m}$), que o som reproduzido que chega à fachada tem maior intensidade nas faixas de frequência mais baixas (100 Hz a 250 Hz), diminuindo nas médias (315 Hz a 1,6 kHz) e altas (2 kHz a 3,15 kHz) frequências, característico do ruído do tráfego, conforme estudo realizado pela Hong Kong Housing Authority (2017).

As médias energéticas internas (L_2) da janela aberta e fechada apresentam uma diminuição do NPS medido, caracterizando a fachada, que apresenta picos diferenciados nas bandas de frequência de 200 Hz e 315 Hz, representando pontos fracos da fachada para ruídos provenientes dessas faixas de frequências. Pode-se perceber que quando a janela está fechada, o NPS nestas faixas de frequência aumenta. O que pode indicar que a geometria ou material da sala pode ocasionar a ressonância dos ruídos nessas faixas de frequência (LONG, 2005) ou a janela fechada tem deficiência de isolamento nessas faixas. Em breve será calculada, segundo fórmula apresentada anteriormente de Bistafa (2011), a frequência de ressonância do protótipo para entender melhor esses fenômenos, com a presença do dispositivo. Isso vai ser estudado mais a frente com o tempo de reverberação mensurado da sala.

Já caracterizado o comportamento da fachada sem o protótipo, agora será inserido no Gráfico 2 as linhas de medições das médias energéticas (L_2) com o dispositivo de janela

plenum, ou seja, o cálculo do nível de pressão sonora equivalente entre os cinco pontos medidos internamente na sala para cada disposição da janela no experimento.

L_2 (dB) Gráfico 2 - Média energética dos NPS medidos (L_2) por banda de um terço de oitava das faixas de frequência



Fonte: Autora, 2021

Pelo Gráfico 2, pode-se notar a região hachurada em cinza entre a média energética da janela aberta e fechada, localizam-se todas as medições com o dispositivo de janela plenum. Então, pode-se confirmar que o protótipo, independentemente de sua disposição de abertura, promove isolamento acústico entre o máximo promovido pela janela fechada, e o mínimo, o correspondente à janela aberta.

O comportamento da fachada com o dispositivo de janela plenum apresenta-se graficamente de forma semelhante à fachada sem o dispositivo. Pode-se observar os picos nas bandas de frequências de 200 Hz, 315 Hz, 500 Hz e 1,6 kHz repetindo-se nos testes com o protótipo. Também, é visivelmente notável o decaimento nas bandas de médias e altas frequências, uma característica inicial do ruído utilizado no experimento.

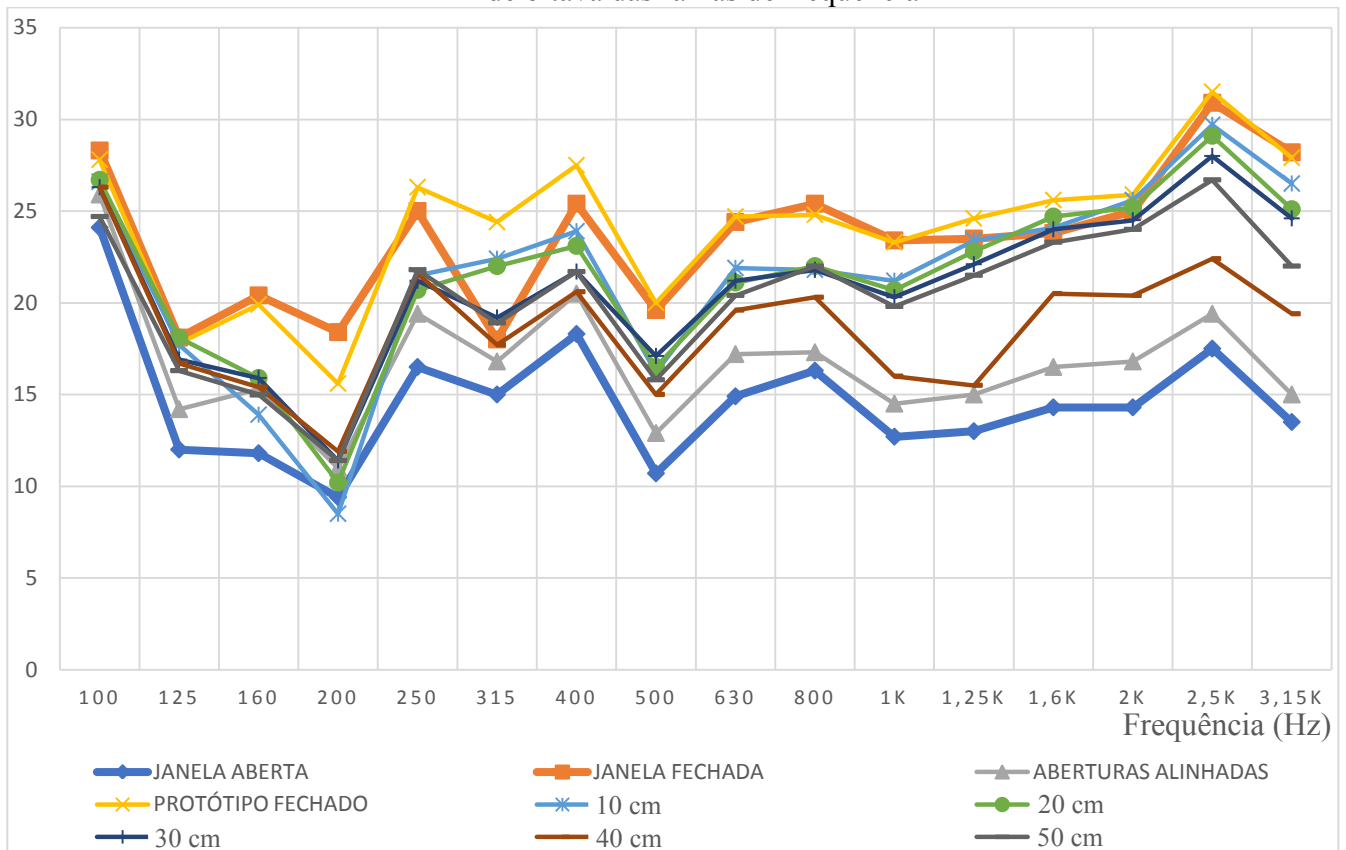
Uma particularidade do comportamento da fachada com o protótipo é o pico nas faixas de frequências de 500 Hz, que antes não estava evidenciado nas medições sem o dispositivo. Para avaliar e comparar o comportamento da fachada com as configurações do dispositivo de janela plenum entre si, de maneira mais detalhada, será apresentado no próximo tópico a diferença de nível ($D_{ls,2m}$) de cada medição.

5.1.2 Diferença de nível dos NPS medidos ($D_{ls,2m}$)

A diferença de nível ($D_{ls,2m}$) representa o NPS externo à fachada ($L_{1,2m}$) subtraído pela média energética obtida para o interior da sala (L_2) para cada disposição estudada do protótipo de janela plenum, por bandas de frequência. O Gráfico 3 irá mostrar os resultados dessas diferenças de nível proporcionadas pela fachada em medições com e sem o dispositivo, para avaliar o comportamento das diferentes configurações de abertura do protótipo.

$D_{ls,2m}$ (dB)

Gráfico 3 – Diferença de nível ($D_{ls,2m}$) por banda de um terço de oitava das faixas de frequência



Fonte: Autora, 2021

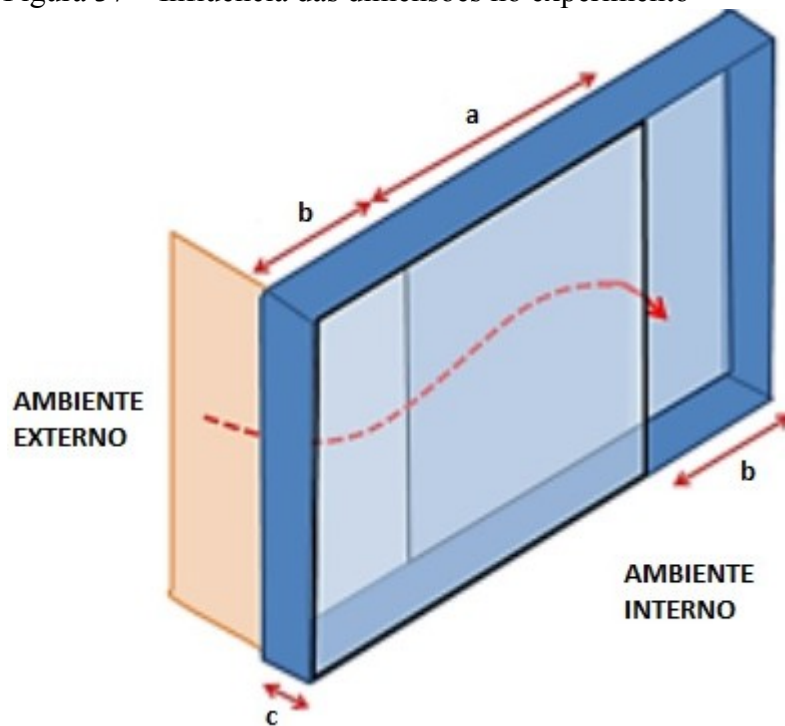
Pelo Gráfico 3, pode-se observar que a maior diferença de nível ($D_{ls,2m}$) da fachada, entre as medições com dispositivos, foi o protótipo fechado representado pela linha amarela, seguido pela disposição de janela com as aberturas a 10 cm, representada pela linha azul-claro. Com isso, retirando a opção do protótipo fechado, que não permite a ventilação, pode-se afirmar que a melhor posição do protótipo para reduzir o ruído é a com menor abertura. O que já era algo esperado na pesquisa, sabendo que diminuindo a passagem do ar, também diminui a entrada do ruído ao ambiente interno.

Seguindo este pensamento, era esperado que a disposição de 50 cm apresentasse menor diferença de nível ($D_{ls,2m}$) do que as aberturas a 40 cm, mas como pode-se notar no Gráfico 3 isso não ocorreu. Este fenômeno pode ser justificado pelo estudo espacial geométrico interno (modos normais) do protótipo em estudo, que com espaçamento interno de 8 cm e em um formato retangular com suas aberturas a 40 cm, o ruído fica propício a reverberar dentro da câmara de ar, causando a queda significativa da curva de 40 cm no gráfico, em relação às outras disposições.

O estudo de Tong e Tang (2017) em laboratório, já tentava correlacionar uma dimensão adequada a janela plenum, experimentando diversos tipos de parâmetros (Figura 37). Segundo os autores:

Um total de 24 configurações diferentes de janelas plenum com vários tamanhos de aberturas (b), larguras de câmara de ar interna (c) e comprimentos do intervalo entre aberturas (a) com e sem materiais de absorção dentro da cavidade do plenum foram testados. [...] A partir dos resultados, sugeriu-se que a janela plenum é uma triagem de ruído eficaz e que pode ser usada para atenuar o ruído do tráfego. O máximo de TL obtida pela plenum é de cerca de 19 dBA. O TL aumentou com o aumento do comprimento do intervalo entre as aberturas (a) ou do comprimento total da janela. No entanto, o aumento dos tamanhos das aberturas (b) resultou na redução do TL. A mudança da largura da câmara de ar interna (c) tem efeito insignificante no desempenho da janela plenum em termos de TL. O maior índice de TL pode ser obtido com o maior comprimento do intervalo entre aberturas (a), e menor a largura de câmara de ar interna (c). Para estas configurações, aumentar os tamanhos das aberturas (b) aumentará o benefício acústico da janela. (TONG; TANG; 2017; p.7)

Figura 37 – Influência das dimensões no experimento



Fonte: Tong; Tang (2017) (modificado pela autora).

Assim, é sabido que este fenômeno físico, em que há a interação de ondas sonoras que ora se somam, ora se anulam, modificada pela geometria do local em que se propaga (LONG, 2005), influencia os resultados desta pesquisa, e possivelmente onerou a posição com aberturas de 40 cm.

Outro questionamento a ser abordado a partir do Gráfico 3 são as quedas acentuadas na diferença de nível ($D_{ls,2m}$) em todos os experimentos realizados nas bandas de frequências de 200 Hz, 315 Hz e 500 Hz. Para entender cada evento ocorrido no gráfico é necessário ter conhecimento das condições de realização do protótipo, em que apenas se aproximou o protótipo a janela, tentando impedir frestas pela aproximação entre as peças, mas ainda assim haviam frestas presentes.

Tendo em vista as condições da pesquisa, pode-se afirmar que na faixa de frequência de 500 Hz, a queda no isolamento sonoro ocorre devido as frestas ocasionadas pelo experimento, entre o protótipo e a janela maxim-ar, e as próprias falhas de fabricação do protótipo permitindo frestas. Estas frestas permitem a entrada do ar livre, sem passar pela câmara plenum, resultando em diminuição do isolamento sonoro da fachada.

Como resultado geral da diferença de nível, observa-se que o protótipo de janela plenum pode incrementar ao isolamento da janela existente em até 8 dB na banda de frequência de 1.000 Hz. Uma comparação entre valores encontrados de diferença de nível

entre a janela aberta e o protótipo com aberturas a 10 cm, por fim, pode ser observado quanto o protótipo isola a mais que a janela aberta para cada faixa de frequência (Quadro 15).

Quadro 15 – Diferença de isolamento entre a janela aberta e o protótipo a 10 cm

Frequência (Hz)	$D_{ls,2m}$ Posição: Protótipo com aberturas a 10 cm (dB)	$D_{ls,2m}$ Posição: Janela aberta (dB)	Quanto o protótipo a 10 cm isola a mais que janela aberta (dB)
100	26,6	24,1	+2,5
125	17,7	12	+5,7
160	13,9	11,8	+2,1
200	8,5	9,4	-0,9
250	21,5	16,5	+5,0
315	22,4	15	+7,4
400	23,9	18,3	+5,6
500	16,2	10,7	+5,5
630	21,9	14,9	+7,0
800	21,8	16,3	+5,5
1.000	21,2	12,7	+8,5
1.250	23,4	13	+10,4
1.600	24,1	14,3	+9,8
2.000	25,6	14,3	+11,3
2.500	29,7	17,5	+12,5
3.150	26,5	13,5	+13,0

Fonte: Autora, 2021

Para justificar as quedas da diferença de nível ($D_{ls,2m}$) nas faixas de frequência de 200 Hz e 315 Hz, que já foi acentuada anteriormente com as medições sem o dispositivo de janela plenum, é necessário obter o tempo de reverberação (T) da sala de reunião. Portanto, o próximo tópico irá abordar a diferença de nível padronizada ($D_{ls,2m,nT}$), que correlaciona o tempo de reverberação com a diferença de nível ($D_{ls,2m}$).

5.1.3 Diferença de nível padronizado dos NPS medidos ($D_{ls,2m,nT}$)

A diferença de nível padronizada ($D_{ls,2m,nT}$) tem o mesmo conceito da diferença de nível ($D_{ls,2m}$), mas nesta diferença, é levada em consideração a correção pelo tempo de reverberação da sala (T) e tempo de reverberação de referência (T_0), no qual foi considerado como referência 0,5 s, pois em ambientes com mobília o tempo de reverberação comumente encontrado é razoavelmente independente do volume e da frequência e é aproximadamente igual a 0,5 s (ABNT,2016). Esta correção será chamada de Diferencial (Δ).

Deste modo, a partir dos experimentos de tempo de reverberação (TR) na sala de reunião, pelo método de ruído interrompido da ABNT NBR 3382-2, foi encontrado o tempo de reverberação (TR) da sala de reunião para cada banda de frequência estudada, apresentando os seguintes resultados do Quadro 16:

Quadro 16 – Tempo de reverberação (Eyring) sala de reunião LabCon

Frequência (Hz)	TR (s)	Δ Diferencial referente ao TR (dB)
100	0,57	-0,5
125	0,51	-0,0
160	0,52	-0,1
200	0,62	-0,9
250	0,78	-1,9
315	0,92	-2,6
400	0,65	-1,1
500	0,65	-1,1
630	0,60	-0,7
800	0,63	-1,0
1.000	0,58	-0,6
1.250	0,61	-0,8
1.600	0,58	-0,6
2.000	0,61	-0,8
2.500	0,61	-0,8
3.150	0,64	-1,0

Fonte: Autora, 2021

Pode-se observar pelo Quadro 17 que o maior diferencial (Δ) é encontrado na faixa de frequência de 315 Hz, diminuindo o isolamento da fachada em 2,6 dB. Isso significa que a sala de reunião do LabCon reverbera por mais tempo, precisamente 0,92 segundos, os ruídos provenientes desta banda de frequência. Com o diferencial (Δ) em estudo, é justificável a queda no isolamento da fachada na banda de frequência de 315 Hz, anteriormente vista no Gráfico 3 de diferença de nível ($D_{ls,2m}$).

Os outros valores de diferenciais (Δ) encontrados não chegaram a interferir no experimento, expressivamente, ficando todos abaixo de 1,93 dB de subtração a diferença de nível ($D_{ls,2m}$).

Deste modo, na faixa de frequência de 200 Hz não se justifica a queda da diferença de nível ($D_{ls,2m}$), em todos os experimentos realizados na fachada com e sem o protótipo, pelo tempo de reverberação da sala, pois a diminuição de diferencial é pequena para causar este evento.

O que pode ter ocasionado esta falha na banda de frequência de 200 Hz pode ser a frequência de ressonância do protótipo, composto por MDF material do protótipo e de duas

paredes da sala de reunião. Para saber a veracidade dessa afirmação, calculou-se a frequência de ressonância do protótipo de janela plenum pela fórmula apresentada por Bistafa (2011) anteriormente, assim tem-se:

$$f_{rij} = \frac{3,14}{2} \left(\sqrt{\frac{700}{450}} \right) \left(\frac{1}{1,10^2} + \frac{1}{1,10^2} \right)$$

$$f_{rij} = 222,8 \text{ Hz}$$

Assim, identificou-se que a frequência de ressonância do protótipo de janela plenum é de 222,8 Hz, muito próximo da faixa de frequência de 200 Hz. O que comprova que a diminuição do isolamento sonoro nessa banda de um terço de oitava na faixa de frequência de 200 Hz no experimento foi provocada pelo fenômeno da frequência de ressonância do dispositivo de janela plenum.

5.2 COMPORTAMENTO DA VENTILAÇÃO PELA JANELA PLENUM

A seguir serão analisados os dados apurados nos experimentos de decaimento de CO₂ para ventilação na sala de reunião do laboratório de termodinâmica e tecnologia em edificações (LATESC).

5.2.1 Decaimento de CO₂ por minutos

O experimento de decaimento de CO₂ começou a ser registrado a partir da saturação do ar em 5.000 ppm, sendo gravadas informações a cada minuto até o ar interno equilibrar em CO₂ com o externo. Os dados apurados pelos HOBOS foram processados e extraída a curva de decaimento.

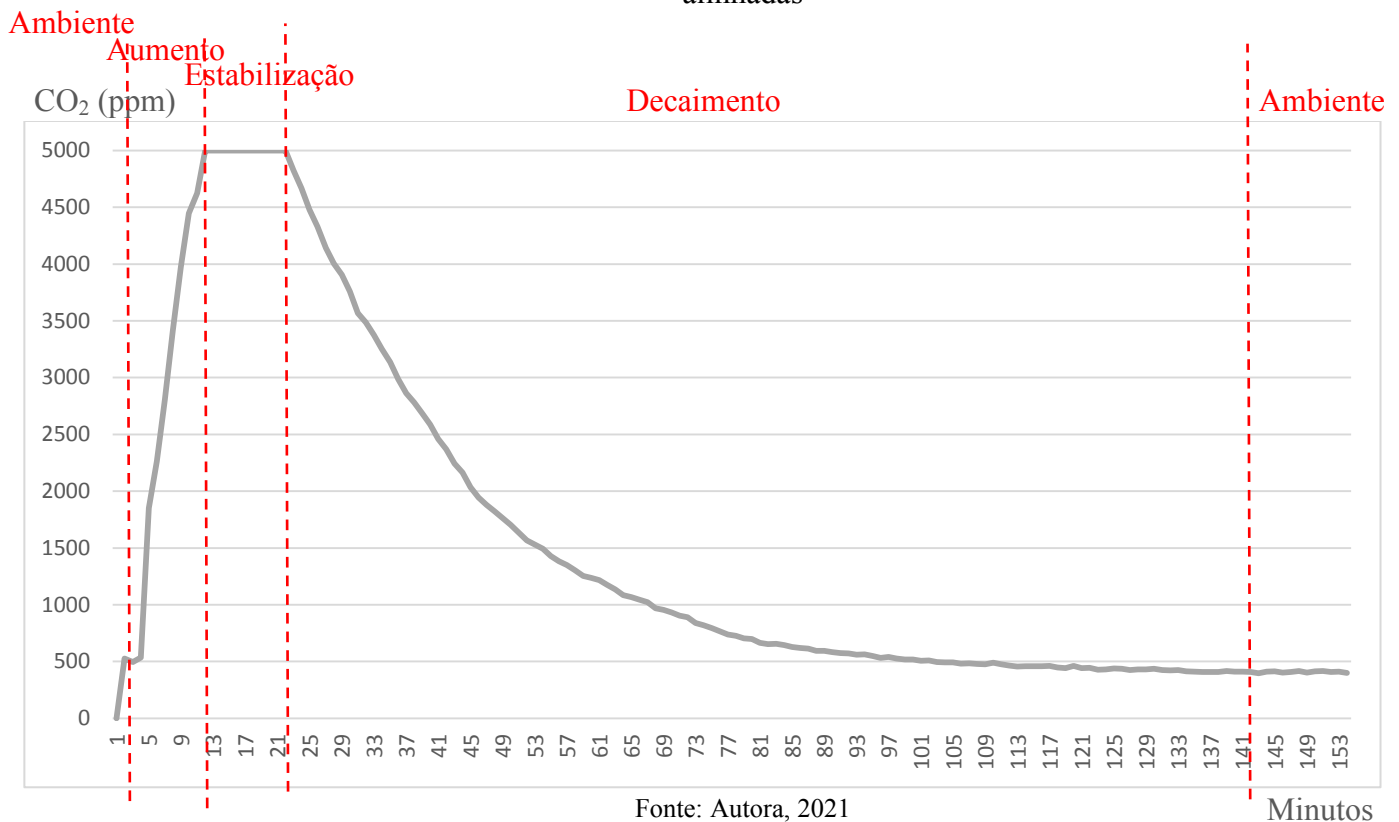
Antes de começar a análise das curvas de decaimento é necessário mencionar que as condições de vento eram mutáveis de semana para semana, a direção do vento por maior parte do experimento era provinda do Sudeste, mas havia variações com ventos do Leste. Quanto à velocidade do vento, também era mutável a cada hora, podendo chegar à máxima de 2,5 m/s (INMET, 2021). Durante o experimento, que tinha duração de até 6 horas interruptas, as medições começavam ao meio dia e terminavam ao final de cada dia, a sala de reunião ficava fechada, porém, embora as frestas tenham sido estancadas ao máximo, é possível que,

dependendo das outras aberturas no edifício, possa ter favorecido a ventilação cruzada pelas frestas da porta, em determinado momento.

É importante destacar as incertezas do experimento, que embora seja uma pesquisa fundamentada, há imprecisão em experimentos de campo. A frente, essas possibilidades podem explicar porque em determinado momento a curva de decaimento é acentuada e em outros não.

Para exemplificar como a pesquisa foi realizada, o Gráfico 4 irá mostrar uma curva modelo do experimento, que demonstra como foi extraída as curvas de decaimento na pesquisa.

Gráfico 4 – Curva modelo de decaimento de CO₂ na situação: protótipo com aberturas alinhadas

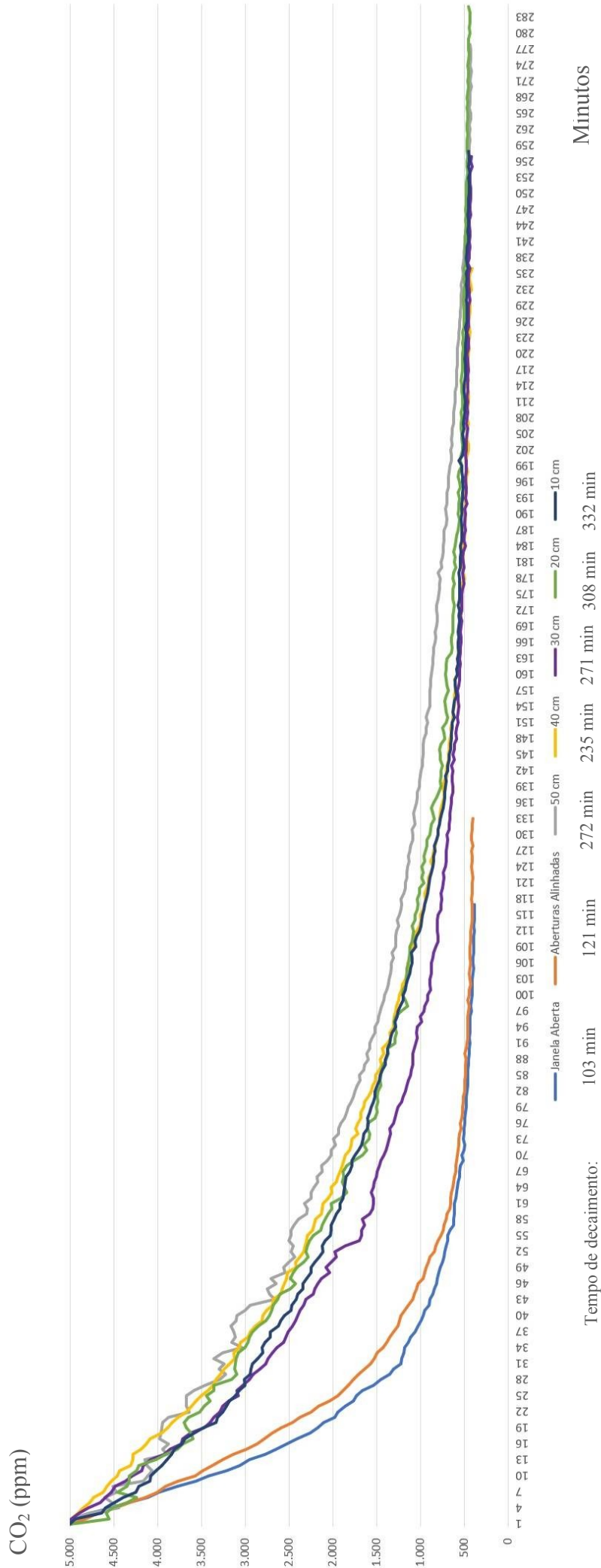


No Gráfico 4 pode-se observar a curva de decaimento da quantidade CO₂ na sala de reunião com a situação da janela maxim-ar aberta acoplada com o protótipo de janela plenum na disposição de aberturas alinhadas. Também, percebe-se o estágio de cada etapa durante o experimento, como primeiramente o ambiente interno equilibrado com o ambiente externo do minuto 1 ao 3, posteriormente a injeção de gás CO₂ no ambiente interno notando a subida no gráfico representando o aumento de CO₂ na sala do minuto 4 ao 12, depois o período de estabilização, do minuto 13 ao 20, em que já atingiu o máximo de leitura do HOBO em 5.000

ppm de CO₂ no ar e aguarda-se o começo do decaimento. Após acontecer o evento de decaimento nota-se novamente a etapa inicial, em que o ambiente interno está equilibrado com o ambiente externo, do minuto 143 em diante.

Do mesmo modo, foi possível extrair a curva de decaimento para cada disposição de abertura. A seguir, no Gráfico 5, será mostrado o resultado do experimento de trocas de ar para cada configuração do protótipo de janela plenum, juntamente com seu respectivo tempo de decaimento.

Gráfico 5 – Curva de decaimento de CO₂ geral



Fonte: Autora, 2021

Diante das informações do Gráfico 5, pode-se observar que a janela aberta apresentou um tempo de decaimento de 103 minutos até a quantidade de CO₂ do ambiente interno equilibrar com o externo, sendo o mais rápido do experimento.

Também, pode-se notar que a configuração com as aberturas alinhadas é a disposição que permite maiores trocas de ar entre o ambiente interno e externo, dos experimentos com o aparato. Em contraste, a disposição que teve o tempo o decaimento mais longo foi as aberturas de 10 cm com 332 minutos, resultando em uma maior dificuldade de troca de ar.

Segundo estudos de Dimitroulopoulou (2011), que realizou uma revisão literária contendo diversas pesquisas sobre trocas de ar em edificações dentro da Europa, o autor caracteriza o mínimo de AER 0,5 h⁻¹ como necessário para evitar o crescimento de mofo no ambiente, e o mínimo de AER 0,8 h⁻¹ para controlar o crescimento de ácaros. Em habitações com AER menor que 0,8 h⁻¹ são identificados problemas de doenças respiratórias recorrentes nas pessoas que frequentam o local, tais como asma, sinusite e rinite.

Nesta pesquisa de ventilação foi considerado o mínimo aceitável de AER 0,8 h⁻¹, o que é um padrão europeu. Sabe-se que há divergências de conforto térmico entre a Europa e o Brasil por se tratar de climas diferentes, mas sendo os únicos parâmetros encontrados documentados em pesquisas, serão utilizados estes, tendo conhecimento que o mínimo de trocas de ar para a Europa pode não ser o mínimo de trocas de ar para o Brasil.

Em resumo são dispostos no Quadro 17 os resultados de *Air Exchange Rate* (AER) por configurações do protótipo e com a janela aberta como parâmetro de referência da pesquisa.

Quadro 17 – Índice de renovação do ar ou *Air Exchange Rate* (AER)

DISPOSIÇÃO DE ABERTURA	TEMPO DE DECAIMENTO (min)	<i>AIR EXCHANGE RATE</i> (AER)
Janela Aberta	103	2,80 h ⁻¹
Aberturas Alinhadas	121	2,50 h ⁻¹
Protótipo 50 cm	272	1,22 h ⁻¹
Protótipo 40 cm	235	1,27 h ⁻¹
Protótipo 30 cm	271	1,19 h ⁻¹
Protótipo 20 cm	308	1,00 h ⁻¹
Protótipo 10 cm	332	0,89 h ⁻¹

Fonte: Autora, 2021

Pelo Quadro 17, pode-se observar que todas disposições de abertura atendem ao mínimo padrão de trocas de ar exigido pela Europa de AER 0,8 h⁻¹. É possível notar também, que em comparação ao AER da janela maxim-ar aberta, todos os índices de trocas de ar

caíram mais da metade quando acoplado o protótipo à janela. Isso mostra que o dispositivo de janela plenum reduz significativamente a ventilação do ambiente interno.

Os índices de trocas de ar entre as disposições de aberturas de 50 cm, 40 cm e 30 cm foram bastantes semelhantes, apresentando uma diferença de $0,08 \text{ h}^{-1}$ entre a menor e a maior taxa de trocas de ar entre as três configurações. Esse resultado explicita que estas disposições do protótipo, embora com aberturas diferentes, não alteram consideravelmente a ventilação.

Como já era esperado, o experimento de ventilação comprovou que as aberturas alinhadas proporcionam as maiores taxas de trocas de ar. Do mesmo modo, a menor abertura do dispositivo, de 10 cm, foi a que obteve menor índice de trocas de ar, com $0,89 \text{ h}^{-1}$, o que é próximo do padrão mínimo europeu. Isso deixa questionamentos, se em um padrão mínimo brasileiro, este índice atenderia ou não ao conforto térmico.

Destaca-se que foi avaliada uma condição de ventilação unilateral, e os resultados já se mostraram bem promissores. Considerando que na prática, provavelmente, haverá situações de ventilação cruzada, o comportamento da janela plenum deverá ser melhor.

5.3 ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS

Ao término da análise dos gráficos de cada configuração do protótipo, para o comportamento acústico e de ventilação, questiona-se o quanto é razoável abdicar da ventilação para obter um isolamento acústico satisfatório, tornando uma situação conveniente ao usuário.

A abertura de 10 cm, por exemplo, embora tenha resultado em um maior índice de isolamento sonoro, em todas as bandas de terço de frequência, o seu índice de troca de ar está muito próximo do limite europeu para manter a higienização da sala e evitar que ácaros e mofos cresçam na sala. Isso pode resultar em uma sensação maior pelo usuário de que o ar está parado na sala e não está sendo renovado, portanto uma situação desagradável, não compensando os ganhos de isolamento acústico.

Por outro lado, o protótipo com a disposição de aberturas alinhadas tem o índice de trocas de ar mais alto do experimento, entre as configurações do aparato, com $\text{AER } 2,50 \text{ h}^{-1}$. Entretanto, o diferencial de nível ($D_{\text{ls},2\text{m}}$) registrado é o mais baixo do experimento, se assemelhando a janela maxim-ar aberta sem o protótipo. Esses resultados mostram que a capacidade das aberturas alinhadas é maior de ventilar do que reduzir o som externo, sendo uma disposição que possa ser utilizada nos dias menos barulhentos para obter maiores trocas de ar entre o ambiente interno e externo.

Do mesmo modo que as aberturas alinhadas, a disposição de aberturas a 40 cm obtém um índice de trocas de ar alto, em relação às outras disposições estudadas, com AER $1,27 \text{ h}^{-1}$, mas o isolamento sonoro tem resultados abaixo do esperado, comparando com os outros experimentos. Isso resulta em uma disposição com o isolamento sonoro baixo, com alta capacidade de ventilação, não se apresentando como uma disposição interessante, pois há configurações com maior potencial de atenuação e maior potencial de ventilação, neste experimento.

As aberturas do protótipo a 50 cm resultam em um isolamento sonoro mediano, e um índice de trocas de AER $1,22 \text{ h}^{-1}$, o que é suficiente para suprir a ventilação do ambiente. Apesar de ter um índice de trocas de ar alto, há outras disposições com um índice semelhante e que apresentam números de isolamento sonoro maiores, tornando a abertura a 50 cm não tão vantajosa quanto às configurações de 30 cm e 20 cm.

As aberturas a 30 cm e 20 cm apresentam índices de trocas de ar medianos, entre as configurações estudadas, diminuindo a ventilação para obter uma atenuação sonora alta, em relação aos outros experimentos da pesquisa. Nesse caso, as aberturas de 30 cm e 20 cm encontram o equilíbrio necessário entre ventilação e isolamento acústico para satisfação do usuário.

A seguir é apresentada no Quadro 18 a comparação entre cada disposição de abertura do protótipo, com seu resultado final em relação à acústica e ventilação.

Quadro 18 – Comparativo das posições do protótipo e janela aberta

Posição do Protótipo	Diferencial de Nível ($D_{ls,2m}$) a 1 kHz (dB)	Tempo de decaimento de CO_2 (min)	<i>Air Exchange Rate</i> (AER)
Janela Aberta	12,7 dB	103 min	$2,80 \text{ h}^{-1}$
Aberturas Alinhadas	14,5 dB	121 min	$2,50 \text{ h}^{-1}$
Abertura 50 cm	19,8 dB	272 min	$1,22 \text{ h}^{-1}$
Abertura 40 cm	16,0 dB	235 min	$1,27 \text{ h}^{-1}$
Abertura 30 cm	20,3 dB	271 min	$1,19 \text{ h}^{-1}$
Abertura 20 cm	20,7 dB	308 min	$1,00 \text{ h}^{-1}$
Abertura 10 cm	21,2 dB	332 min	$0,89 \text{ h}^{-1}$

Fonte: Autora, 2021

Por fim, é visto pelo Quadro 18 que o protótipo de janela plenum, fabricado por MDF 15 mm, pode reduzir até $D_{ls,2m}$ 8,5 dB a mais, nas bandas de frequência de 1 kHz, em relação a janela maxim-ar aberta. Do mesmo modo, um valor semelhante foi encontrado e estudado na revisão de literatura, no experimento de campo de HKHA (2017), de $D_{ls,2m}$ 8

dB(A) em faixas de frequência de 1 kHz, reafirmando o isolamento do dispositivo. Com a inserção de persianas absorventes, Cheung (2019) também encontrou valores semelhantes que começavam a partir de $D_{1s,2m} \geq 8$ dB(A), similares aos valores encontrados neste trabalho. Porém, pode acontecer que em determinadas faixas de frequências não se obtenha um alto isolamento, como foi o caso das bandas de frequência a 200 Hz, 315 Hz e 500 Hz.

Por outro lado, a ventilação com os índices de trocas de ar (AER) mostrou reduzir mais da metade, quando utilizando o formato de aberturas intercaladas. Esse resultado está acima do considerado mínimo no padrão europeu de $0,8 \text{ h}^{-1}$ (DIMITROULOPOULOU, 2011), mas ao final questiona-se se esses parâmetros seriam satisfatórios em um país tropical como o Brasil.

Com o final da pesquisa, é perceptível que quanto mais fechadas as aberturas, maior vai ser a redução sonora. Porém, pode haver exceções como é o caso das aberturas a 40 cm, a depender da geometria e material do protótipo utilizado. Quanto ao posicionamento das aberturas, as de 30 cm e de 20 cm registram o equilíbrio entre um alto isolamento sonoro e ventilação suficiente, sendo as disposições de aberturas mais recomendadas para uso na janela plenum.

Os resultados aqui expostos nessa pesquisa foram obtidos com ensaios em campo, portanto os valores podem diferir conforme as condições do experimento. Contudo, o trabalho cumpre seu papel de afirmar a importância e utilidade da janela plenum com seu sistema de isolamento sonoro e ventilação natural simultâneo, à frente de soluções já presentes no mercado.

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse tópico serão apresentadas as conclusões obtidas com base nos resultados e reflexões alcançados pela pesquisa. Assim como limitações que o trabalho confrontou e sugestões para próximas pesquisas.

6.1 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa, realizou-se uma revisão de literatura sobre as possíveis soluções de janelas acústicas ventiladas, e apresentou-se ensaios em campo, de acústica e de ventilação, com um protótipo de janela plenum. O presente trabalho teve como objetivo principal caracterizar esse dispositivo de janela plenum, quanto ao comportamento acústico e de ventilação, buscando um método eficiente de reduzir o ruído externo sem a necessidade de abdicar da ventilação natural por completo, encontrando um equilíbrio entre ambas as necessidades.

6.1.1 Comportamento das esquadrias ventiladas acústicas

A revisão de literatura apresentou um compilado de estudos que abordavam elementos de fachada que isolavam os ruídos externos ao mesmo tempo em que permitiam a ventilação do ambiente. O estudo apresentou cinco tipologias de janelas que registravam soluções acústicas ventiladas, são elas: defletores acústicos, persianas acopladas, sacadas, ressonadores e refratores acústicos e janela plenum.

Os defletores acústicos em geral possuem um comportamento acústico regular, em comparação às outras soluções estudadas, com exceção da veneziana a 40° que tem um maior aproveitamento. Do mesmo modo, na ventilação natural, as janelas ventiladas com defletores acústicos são registradas como uma solução adequada, devido à solução permitir a abertura total da esquadria, sem impedimentos ou barreiras para passagem do fluxo de ar para dentro do ambiente interno.

As janelas com persianas acopladas apresentam o comportamento acústico bom, em comparação com os outros elementos em estudo, com exceção quando a persiana está totalmente aberta sendo considerada inferior aos outros da mesma tipologia. De forma semelhante, o comportamento da ventilação natural foi entendido como bom, pois o desenho

das janelas com persianas acopladas, presentes em maioria no mercado, são esquadrias de correr com duas folhas, permitindo fluxo de ar parcial devido sua geometria.

As sacadas estão registradas no comportamento acústico como regular se for uma tipologia padrão, e como bom se for uma tipologia com material absorvente. Por outro lado, no comportamento da ventilação natural a sacada permite a abertura total da esquadria, sendo observada pela pesquisa como ótimo para a passagem do fluxo de ar.

As janelas que apresentam na sua composição ressonadores e refratores acústicos registraram uma dualidade entre ser ótimo em comportamento acústico e ruim na ventilação. A técnica é eficiente para barrar os ruídos externos para dentro do ambiente interno, contudo os orifícios de passagem de ar são insuficientes para permitir grandes trocas de ar entre os ambientes externos e internos, reduzindo a ventilação, e conseqüentemente a qualidade do ar dentro da sala.

Por fim, as janelas plenum padrão e com placas micro perfuradas apresentam o comportamento acústico regular, enquanto que as janelas plenum que contém tubos ressonadores ou persianas absorventes acopladas são apresentadas na pesquisa como ótimo na atenuação do ruído. Quanto ao comportamento da ventilação natural, a janela plenum é categorizada como boa, pois ela é composta por duas camadas com duas folhas de correr cada uma, que permitem a abertura parcial para passagem do fluxo de ar conforme seu desenho geométrico. Há exceção quando a janela plenum é composta pelos tubos ressonadores, em que os orifícios limitam a passagem de ar, sendo reduzido o fluxo de ar para o ambiente interno, e conseqüentemente sendo apresentado como solução inviável.

Com esse estudo da revisão de literatura das tipologias de janelas acústicas ventiladas, foi escolhido para aprofundar a pesquisa na solução de janela plenum, a qual propõe uma nova solução de isolamento acústico permitindo as trocas de ar entre o ambiente interno e externo.

6.1.2 A eficiência do protótipo de janela plenum

Para obter os resultados do comportamento acústico e de ventilação com o protótipo de janela plenum, os experimentos foram divididos em duas partes: a acústica e a de ventilação. Os testes de acústica foram realizados na sala de reunião do LabCon no prédio de arquitetura da UFSC, o protótipo foi acoplado à única janela existente da sala. Nesse teste foram realizadas medições externas e internas, a medição externa tinha o objetivo de conhecer

o ruído que chegava à fachada em estudo, e a medição interna serviu para caracterizar a fachada com a presença do protótipo em estudo.

No experimento acústico foi levado em consideração variáveis que interferiam nos resultados como o tempo de reverberação (TR) da sala, as frestas do protótipo, frequência de ressonância e crítica do protótipo. O resultado obtido pelo experimento acústico registrou o baixo potencial de redução nas baixas (100 Hz a 250 Hz) e médias (315 Hz a 1,6 Hz) bandas de frequências, principalmente os ruídos provenientes das faixas de frequências de 200 Hz, 315 Hz e 500 Hz, e uma facilidade em atenuar nas altas bandas de frequências (2 kHz a 3,15 kHz).

Os estudos acústicos revelaram que os ruídos da bandas de frequência de 315 Hz sofreram uma interferência significativa pelo tempo de reverberação da sala. Já os ruídos provenientes da banda de frequência de 200 Hz e 500 Hz tiveram alterações pela frequência de ressonância do protótipo e pelas frestas, respectivamente. Os resultados perante as disposições de abertura do protótipo foram bastantes semelhantes, obtendo o maior comportamento de isolamento nas aberturas de 10 cm e 20 cm, menor atenuação acústica nas aberturas alinhadas e de 40 cm, as outras, de 30 cm e 50 cm, tiveram comportamento acústico mediano, comparando todas as bandas de frequências estudadas.

Posteriormente, os testes de ventilação foram realizados na sala de reunião do LATESC no prédio de engenharia química e de alimentos da UFSC. O protótipo foi acoplado à única janela da sala, obstruindo as frestas da janela e da porta para não interferir, ou minimizar a interferência, nas medições de decaimento do gás CO₂. Os resultados das medições registraram um tempo de decaimento mais longo na abertura de 10 cm de 332 min e o menor nas aberturas alinhadas de 121 min.

Com o tempo de decaimento de CO₂ obtido foi possível calcular o índice de trocas de ar ou *Air Exchange Rate* (AER) das disposições de aberturas do protótipo para analisar de forma analítica o comportamento de ventilação do dispositivo de janela. O resultado registrou um índice trocas de ar aceitável para todas as aberturas, tendo como referência índices de pesquisas europeias de 0,80 h⁻¹ mínimo. As aberturas alinhadas foi a configuração com maior AER, seguido pelas aberturas a 50 cm. Por outro lado, o menor índice, único abaixo de AER 1,00 h⁻¹, foi visto nas aberturas a 10 cm com AER 0,89 h⁻¹, aproximando-se do limite de ventilação higiênica estabelecido por Dimitroulopoulou (2011) de 0,80 h⁻¹ mínimo.

Ambos os resultados de acústica e ventilação sendo avaliados juntos registraram um isolamento sonoro insuficiente para as aberturas alinhadas e aberturas a 40 cm, um isolamento sonoro mediano para aberturas a 50 cm e uma ventilação ineficiente para as aberturas a 10

cm. Por fim, as aberturas a 30 cm e 20 cm apresentaram um equilíbrio aceitável entre atenuação acústica e índice de trocas de ar, resultando em um melhor comportamento geral durante toda a pesquisa, sendo as aberturas mais recomendadas a ser utilizadas e estudadas em próximas pesquisas relacionadas.

6.1.3 Conclusões gerais

De forma geral, a pesquisa objetiva a busca por um equilíbrio satisfatório entre a isolamento acústico e a permeabilidade de ventilação, através de um elemento de fachada denominado janela plenum. Os resultados mostraram que o protótipo de janela plenum fabricado em MDF teve dificuldade em reduzir ruídos provenientes das baixas (100 Hz a 250 Hz) e médias (315 Hz a 1,6 kHz) bandas de frequências, com números de diferença de nível ($D_{1s,2m}$) baixos. Porém no comportamento de ventilação todas as aberturas apresentaram índice de trocas de ar ou *Air Exchange Rate* (AER) suficiente para manter a salubridade da sala.

Ao fim desta pesquisa, constata-se que o protótipo de janela plenum, composto com o MDF de 15 mm, pode reduzir até 8,5 dB de $D_{1s,2m}$ a mais, nas bandas de frequência de 1 kHz, em comparação com a janela maxim-ar aberta.

Quanto ao comportamento das aberturas, há destaque para as aberturas a 30 cm e a 20 cm do protótipo de janela plenum que apresentaram o equilíbrio entre um alto isolamento sonoro e ventilação suficiente, sendo as configurações mais recomendadas para uso na janela plenum e futuros estudos.

6.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para finalizar a pesquisa é importante mencionar as limitações em que foram submetidas à pesquisa e quais as sugestões para futuros trabalhos com janela plenum.

6.2.1 Limitações da pesquisa

As limitações desta pesquisa estão atreladas tanto a fatores externos quanto internos ao trabalho, tais como:

- a. Os experimentos foram realizados durante período de *lockdown* da pandemia de 2020/21, sendo difícil o acesso aos laboratórios e aos equipamentos necessários, restringindo a janela de tempo e possibilidades para realização dos experimentos;

- b. Durante a pesquisa foi considerado apenas o clima de inverno registrado durante os dias de testes. Outros climas mais quentes podem ter resultados de ventilação diferentes;
- c. Limitou-se a apenas uma tipologia de janela plenum, com medidas fixas do protótipo de largura, altura e espaçamento interno. Outras tipologias de janela plenum podem apresentar resultados divergentes;
- d. Pelo material utilizado do protótipo ser MDF, não se avaliou o estudo lumínico nessa pesquisa; O uso do MDF também influenciou nos testes acústicos, outras composições de materiais da janela podem ocasionar resultados diferentes;
- e. Os resultados estão limitados não somente ao protótipo em estudo, como também aos espaços em que os testes foram realizados, as salas de reuniões;
- f. Concentrou-se na análise do comportamento acústico e de ventilação do protótipo de janela plenum, sem avaliar os ganhos econômicos que o uso do protótipo de janela plenum proporcionou ao ser utilizado nas salas dos testes.

6.2.2 Sugestões para trabalhos futuros

De forma a complementar esta pesquisa considerando as diferentes tipologias de janela plenum, sugere-se que trabalhos futuros abordem:

- a. O estudo comportamental da janela plenum composta com outros tipos de materiais, como o vidro, alumínio e PVC;
- b. A avaliação do conforto térmico proporcionado pela janela plenum acopladas a janelas já existentes, considerando os diferentes climas brasileiros;
- c. A análise quanto ao comportamento mais eficiente e conforto luminoso considerando os tipos de vidros utilizados na composição da janela plenum;
- d. O estudo de viabilidade econômica do uso da janela plenum a partir da economia de energia elétrica gerada, quando pertinente.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

- ABNT. **NBR 10821-1: Esquadrias para edificações Parte 1:** Esquadrias externas e internas – Terminologia. Rio de Janeiro, 2017a.
- ABNT. **NBR 10821-4: Esquadrias para edificações Parte 4:** Esquadrias externas – Requisitos adicionais de desempenho. Rio de Janeiro, 2017b.
- ABNT. **NBR 15316-1: Painéis de fibras de média densidade Parte 1:** Terminologia. Rio de Janeiro, 2014.
- ABNT. **NBR 15575: Desempenho de edificações habitacionais.** Rio de Janeiro, 2021.
- ABNT. **NBR ISO 3382-2: Acoustics — Measurement of room acoustic parameters — Part 2:** Reverberation time in ordinary rooms — Technical Corrigendum 1. Rio de Janeiro, 2009.
- ABNT. **NBR ISO 12.354-3: Building acoustics — Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements — Part 3:** Airborne sound insulation against outdoor sound. Rio de Janeiro, 2017c.
- ABNT. **NBR ISO 16283-3: Acoustics — Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements — Part 3:** Façade sound insulation. Rio de Janeiro, 2016.
- AMORIM, Adriana; LICARIÃO, Carolina. Introdução ao conforto ambiental. IN: Conforto acústico. **ICO42**. E-Labora: FEC/UNICAMP. 2005. 38 p.
- ARAÚJO, Bianca; BISTAFA, Sylvio. Façade elements for natural ventilation and sound insulation. **Building Acoustics**, [s.l.], v. 19, n. 1, p. 25-43, mar.2012. Sage. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1260/1351-010X.19.1.25>. Acesso em 16 nov. 2021.
- ASAKURA, Takumi; SAKAMOTO, Shinichi; UENO, Kanako. Visualization of acoustic resonance phenomena using Kundt's dust figure method. **The Journal of the Acoustical Society of America**, [s.l.], v. 120, n. 5, oct.2006. Disponível em: <https://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.4787366>. Acesso em 16 nov. 2021.
- ATENUASOM. Painel Ventilado da Atenua Som. **Atenua Som**, São Paulo, 18 de out. de 2019. Disponível em: <https://atenuasom.com.br/painel-ventilado-da-atenua-som>. Acesso em: 27 jan. 2021.
- BADINO, Elena; MANCA, Roberto; SHTREPI, Louena; CALLERI, Cristina. ASTOLFI, Arianna. Effects of façade shape and acoustic cladding on reduction of leisure noise levels in street canyon. **Building and Environment**, [s.l.], v. 157, p. 242-256, jun.2019. Elsevier BV. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132319302914>. Acesso em 16 nov. 2021.
- BARMPARESOS, N.; ASSIMAKOPOULOUS, M.; ASSIMAKOPOULOUS, V.; LOUMOS, N.; SOTIRIOU, M.; KOUKOUMTZIS, A. Indoor air quality and thermal conditions in a

primary school with a green roof system. **Atmosphere**, [s.l.], v. 9, n. 2, feb.2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4433/9/2/75>. Acesso em 16 nov. 2021.

BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle de ruído**. 2 ed. São Paulo: Editora Blucher, 2011. 380 p.

CHEUNG, Ka; WONG, Hoi; HUNG, Wan; LAU, Kwok. Development and application of specially designed windows and balconies for noise mitigation in Hong Kong. **Inter Noise**, Madrid, jun.2019. Disponível em: http://www.sea-acustica.es/fileadmin//INTERNOISE_2019/Fchrs/Proceedings/2101.pdf. Acesso em 16 nov. 2021.

CONSOLI, O. J. **Análise da durabilidade dos componentes das fachadas de edifícios, sob a ótica do projeto arquitetônico**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSC. UFSC: Florianópolis, 2006.

DE MARCO, C. S. **Elementos de acústica arquitetônica**. 2 ed. São Paulo: Editora Nobel, 1982. 129 p.

DIMITROULOPOULOU, C. Ventilation in European dwellings: A review. **Build Environ**. 2011, 47, 109–125. 10.1016/j.buildenv.2011.07.016.

DU, Liangfen; LAU, Siu-Kit; LEE, Siew; DANZER, Martin. Experimental study on noise reduction and ventilation performances of sound-proofed ventilation window. **Building and Environment**, [s.l.], v. 181, aug.2020. Elsevier BV. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132320304807>. Acesso em 16 nov. 2021.

FIELD, C. The latest developments of an attenuator for naturally ventilated buildings. International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, **Inter Noise**, Prague, n. 33, jan.2004.

FORD, R.D.; KERRY, G. The sound insulation of partially open double glazing. **Applied Acoustics**, [s.l.] v. 6, n. 1, p. 57-72, jan.1973. Elsevier BV. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0003682X73900297>. Acesso em 16 nov. 2021.

FUSARO, Gioia; YU, Xiang; KANG, Jian; CUI, Fangsen. Development of metacage for noise control and natural ventilation in window system. **Applied Acoustics**, [s.l.], v. 170, dec.2020. Elsevier BV. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X20306149>. Acesso em 16 nov. 2021.

GERGES, N.Y. S. **Ruído – Fundamentos e Controle**, 2ª edição, Florianópolis, SC, 2000.

GONÇAVES, A. P. M. **Aplicação do Método dos Gases Traçadores para avaliar a taxa de renovação de ar em Bibliotecas do Pólo II**. Dissertação apresentada à Universidade de Coimbra. Coimbra: Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2011.

HAMMAD, R.N.S.; GIBBS, B.M. The acoustic performance of building façades in hot climates: Part 2 – Close balconies. **Applied Acoustics**, [s.l.], v. 16, n. 6, p. 441-454, 1983. Elsevier BV. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0003682X83900117>. Acesso em 16 nov. 2021.

HONG KONG HOUSING AUTHORITY (HKHA). Application of acoustic window and acoustic balcony for public housing development in Hong Kong. **The Hong Kong Institution of Engineers**, Hong Kong, 2017. Disponível em: <https://www.hkie.org.hk/>. Acesso em 16 nov. 2021.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Brasília: INMET, 2021. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em 17 nov. 2021.

KANG, Jian; LI, Zhemin. Numerical simulation of an acoustic window system using finite element method. **Acta Acustica United with Acustica**, [s.l.], v. 93, n. 1, p. 152-163, jan.2007.

LEE, Hsiao; WANG, Zhaomeng; LIM, Kian; XIE, Jinlong; LEE, Heow. Novel plenum window with sonic crystals for indoor noise control. **Applied Acoustics**, [s.l.], v. 167, oct.2020. Elsevier BV. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X20304941>. Acesso em 16 nov. 2021.

LEE, Hsiao; HARIS, Andi; LIM, Kiam; XIE, Jinlong; LEE, Heow. Solving noise pollution issue using plenum window with perforated thin box. **Crystals**, [s.l.], v. 10, n. 7, jul.2020. MDPI. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4352/10/7/614>. Acesso em 16 nov. 2021.

LI, Xiaolong; TONG, Y.G.; TANG, S.K.; LAU, K.K. Empirical prediction of traffic noise transmission loss across plenum windows. **Applied Acoustics**, [s.l.], v. 151, ago.2019. Elsevier BV. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X18311344>. Acesso em 16 nov. 2021.

LI, Xiaolong; TANG, S.K.; YIM, Stephen Y.C.; LEE, Rudolf Y.C.; HUNG, Tim. Noise reduction of plenum windows on the façade of a high-rise residential building next to heavy road traffic. **Building and Environment**, [s.l.], v. 186, dec.2020. Elsevier BV. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132320307228>. Acesso em 16 nov. 2021.

LIMA, K. E. J. B.; ZENERATO, T. S. **Comparativo de desempenho acústico de MDF e drywall e suas composições com lâ de vidro e lâ de rocha**. Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Tecnológica Federal do Paraná. UTFPR: Curitiba, 2016.

LONG, Marshall. **Architectural acoustics**. Elsevier, 2005.

MAREZE, Paulo. **Aplicação de tubos ressonantes para atenuação sonora de cavidades e filtros acústicos**. 2009. 128f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Programa de Pós-graduação

em Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

MARIN, Camila; WILLE, Joice Eloisa; SOARES, Roberta Mulazzani Doleys. Parede trombe: análise do impacto estético e térmico em um modelo de residência. **Vivências**, v. 15, n. 28, p. 296-309, 2019.

MARTELLO, N.; FAUSTI, N.; SANTONI, P.; SECCHI, S. The use of sound absorbing shading systems for the attenuation of noise on building façades: An experimental investigation. **Buildings**, [s.l.], v. 5, n. 4, p. 1346–1360, dez.2015. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/5/4/1346>. Acesso em 16 nov. 2021.

NEPOMUCENO, L. A. **Elementos de acústica física e psicoacústica**, São Paulo: Edgard Blücher, 1994.

NGUYEN, Quang Huy; YANO, Takashi; TAKASHIMA, Yusuke; NISHIMURA, Tsuyoshi; NISHIMURA, Sohei; NISHIMURA, Yuya. Wave analysis of soundproofing air ventilation grille. **J-Global**, v. 9, p. 7563-7569, 2012. Disponível em: https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=201902220828633812. Acesso em 16 nov. 2021.

OITICICA, Maria Lúcia. **Desempenho acústico de diferentes tipologias de peitoris ventilados**. 2010. 259 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

PATRÍCIO, Jorge; BRAGRANÇA, Luís. The contribution of Roller Shutters to noise insulation of façades. **Building Acoustics**, [s.l.], v. 11, n. 4, p. 309-324, dec.2004. Sage. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1260/1351010042900095>. Acesso em 16 nov. 2021.

PEREIRA, Márcio de Campos; KLIPPEL FILHO, Sérgio; LABRES, Henrique Santos; OLIVEIRA, Maria Fernanda. **Influência das sacadas no desempenho acústico de fachadas**. In: XXVII ENCONTRO DA SOBRAC, 2017, Brasília-DF.

REIS, A.; CONTE, M. Medições de atributos formais de cenas urbanas e avaliações estética. **XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Maceió, 2014

ROHDEN, Abrahão; LIMA, Gabriela. Desempenho acústico de esquadria de alumínio com melhorias na caixa de persiana. **Revista de Engenharia Civil IMED**, Passo Fundo - RS, v. 6, n. 2, jul./dez. 2019. Disponível em: <https://seer.imed.edu.br/index.php/revistaec/article/view/3154>. Acesso em 01 set. 2020.

SAKAMOTO, Shinichi; AOKI, Ami. Numerical and experimental study on noise shielding effect of eaves/louvers attached on building façade. **Building and Environment**, [s.l.], v. 94, n. 2, p. 773-784, dec.2015. Elsevier BV. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132315002437>. Acesso em 16 nov. 2021.

SANTOS, U.P *et al.* **Ruídos riscos e prevenção**. 3. ed., São Paulo: Hucitec, 1999.

SHERMAN, M. H. Tracer-gas techniques for measuring ventilation in a single zone. **Building and environment**, v. 25, n. 4, p. 365-374, 1990.

TANG, S.K. Reduction of sound transmission across plenum windows by incorporation an array of rigid cylinders. **Journal of Sound and Vibration**, [s.l.], v. 415, p. 25-40, nov.2017a. Elsevier BV. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022460X1730799X>. Acesso em 16 nov. 2021.

TANG, S.K. A review on natural ventilation-enabling façade noise control devices for congested high-rise cities. **Applied Sciences**, [s.l.], v. special issue, p. 93-108, feb. 2017b. Elsevier BV. <https://www.mdpi.com/2076-3417/7/2/175>

TONG, Yean; TANG, S.K. Acoustical benefits of plenum window as facade device – a parametric study. International Symposium on Civil and Environmental Engineering – ISCEE. **MATEC Web of Conferences**, n. 103, jan.2017.

TONG, Yean; TANG, S.K. Full scale model investigation on the acoustical protection of a balcony-like façade device (L). **The Journal of the Acoustical Society of America**, [s.l.], v. 130, n. 2, may.2011. Disponível em: <https://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/1.3598430>. Acesso em 16 nov. 2021.

WANG, Z.H.; HUI, C.K.; NG, C.F. The acoustic performance of ventilated window with quarter-wave resonators and membrane absorber. **Applied Acoustics**, [s.l.], v. 78, apr.2014. Elsevier BV. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X13002314>. Acesso em 16 de nov. 2021.

YEUNG, Maurice; NG, Isaac; LAM, John; TANG, S.K.; LO, David; YEUNG, David. Trackling traffic noise throught plenum windows – An application in Hong Kong. In: **Inter Noise**. Melbourne. 2014. Disponível em: https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/INTERNOISE2014/papers/p427.pdf. Acesso em 07 de julho de 2022.

YOU, Yan; BAI, Zhipeng; JIA, Chunrong; WAN, Zhaofeng; RAN, Wenting; ZHANG, Jingjing. Measuring air exchanges rates using continuos CO₂ sensors. **Proceedings of clima. WellBeing Indoors**. 2007. Disponível em: https://web.archive.org/web/20170811093502id_/http://www.inive.org/members_area/medias/pdf/Inive/clima2007/A02/A02M1331.pdf. Acesso em 07 de julho de 2022.

YU, Xiang; LAU, Siu-Kit; CHENG, LI; CUI, Fangsen. A numerical investigation on the sound insulation of ventilation windows. **Applied Acoustics**, [s.l.], v. 117, fev.2017. Elsevier BV. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X16304388>. Acesso em 16 nov. 2021.

APÊNDICE A – PLANILHA DE CÁLCULOS ACÚSTICOS

DADOS DA SALA DE REUNIÃO LABCON	
COMPRIMENTO	4,5 m
LARGURA	3,2 m
ALTURA	2,9 m
ÁREA	14,4 m²
VOLUME	41,7 m³

TEMPO DE REVERBERAÇÃO (EYRING)	
Frequência (Hz)	Segundos (s)
100	0,57
125	0,51
160	0,52
200	0,62
250	0,78
315	0,92
400	0,65
500	0,65
630	0,6
800	0,63
1k	0,58
1,25 k	0,61
1,6 k	0,58
2 k	0,61
2,5 k	0,61
3,15 k	0,64

MEDIÇÃO EXTERNA	
Frequência (Hz)	L_{1,2m} (dB)
100	74,1
125	68,9
160	72,6
200	74,1
250	75,4
315	74,3
400	73,6
500	68,6
630	68,1
800	66,4
1k	63,4
1,25 k	64,3
1,6 k	69,5

2 k	66
2,5 k	68,1
3,15 k	62,2

MEDIÇÃO INTERNA JANELA MAXIM-AR ABERTA						
f (Hz)	PONTO 1: Lp₁ (dB)	PONTO 2: Lp₂ (dB)	PONTO 3: Lp₃ (dB)	PONTO 4: Lp₄ (dB)	PONTO 5: Lp₅ (dB)	MÉDIA: L₂ (dB)
100	47,9	53,2	46,8	49,4	50,1	50,0
125	58,6	55,8	55,6	58,2	55,4	56,9
160	63,4	62,1	57,6	56,1	61,3	60,8
200	66,3	67,6	60,1	61,7	63,6	64,7
250	58,4	58,2	54,1	60,6	60,6	58,9
315	60,5	61,3	57,6	58,2	57,8	59,3
400	55	56,1	57	53,2	54,3	55,3
500	57,9	57,8	58,5	57,7	57,6	57,9
630	53,4	54,4	52,5	51,6	53,8	53,2
800	51,7	49,7	48,7	49,7	50,6	50,1
1k	51,4	51,1	50	49,8	51,1	50,7
1,25 k	52,5	51,5	49,7	51,7	51	51,3
1,6 k	56,6	55,6	54	55,6	54,1	55,2
2 k	52,7	51	51,6	50,9	52,1	51,7
2,5 k	51,1	50,6	49,6	50,2	51,3	50,6
3,15 k	48,3	50	47,8	48,5	48,9	48,7

MEDIÇÃO INTERNA JANELA MAXIM-AR FECHADA						
f (Hz)	PONTO 1: Lp₁ (dB)	PONTO 2: Lp₂ (dB)	PONTO 3: Lp₃ (dB)	PONTO 4: Lp₄ (dB)	PONTO 5: Lp₅ (dB)	MÉDIA: L₂ (dB)
100	41,7	51,4	39,8	42	41	45,8
125	49,8	54,7	46,7	50,3	48,1	50,8
160	53,5	52,8	49	50,3	53,9	52,2
200	57,1	54,1	52,2	49,9	59,3	55,7
250	50,9	48,6	48,8	52,4	50,6	50,4
315	57,3	55,5	56,1	55,2	57,1	56,3
400	47,1	50,7	48,3	47,4	46,6	48,2
500	49,8	48,2	50	47,4	49,2	49,0
630	45,4	44,6	42,9	42,6	42,6	43,7
800	40,6	43,3	40,4	40,8	38,6	41,0
1k	40,4	38,5	40,6	40,6	39,9	40,0
1,25 k	42,2	40,2	40,8	40,4	40,3	40,8
1,6 k	45,4	46,5	45,5	44,5	46,4	45,7
2 k	41	40,7	41,8	40,9	40,8	41,0
2,5 k	37,4	37	38,6	37	35,9	37,2
3,15 k	34,3	33,9	35,2	33,8	32,9	34,0

MEDIÇÃO INTERNA COM PROTÓTIPO: ABERTURAS ALINHADAS						
f (Hz)	PONTO 1: Lp₁ (dB)	PONTO 2: Lp₂ (dB)	PONTO 3: Lp₃ (dB)	PONTO 4: Lp₄ (dB)	PONTO 5: Lp₅ (dB)	MÉDIA: L₂ (dB)
100	47,8	51,5	42,6	48,6	46	48,2
125	55,6	52,4	54,1	57,4	52,1	54,7
160	58,6	57,5	56,5	55,3	57,9	57,3
200	64,5	63,2	63,7	59,1	63,7	63,1
250	57,8	53,4	55,7	56,3	55,8	56,0
315	59,5	56,9	56	57,5	57,1	57,5
400	53,2	54,3	52,6	52	53,4	53,1
500	57,3	55,3	54,6	56,8	53,5	55,7
630	52,2	51,1	49,8	52	48,9	50,9
800	51,4	47,4	47,8	50,5	47	49,1
1k	51,3	47,1	48,6	49	47,5	48,9
1,25 k	51,3	48,8	49	49,5	47,2	49,3
1,6 k	54,7	52,1	53,6	52,3	51,7	53,0
2 k	50,3	50	48,3	49	48,4	49,2
2,5 k	50,2	49,3	48,5	47,8	47,5	48,7
3,15 k	47,8	47,6	46,6	47,4	46,5	47,2

MEDIÇÃO INTERNA COM PROTÓTIPO: FECHADO						
f (Hz)	PONTO 1: Lp₁ (dB)	PONTO 2: Lp₂ (dB)	PONTO 3: Lp₃ (dB)	PONTO 4: Lp₄ (dB)	PONTO 5: Lp₅ (dB)	MÉDIA: L₂ (dB)
100	45,3	49,7	42,9	46,1	44,8	46,3
125	52,6	52,6	48,4	51,4	49,3	51,1
160	55,3	53	49,4	48,9	53,8	52,7
200	59,7	58,2	55,6	53,4	61,6	58,5
250	49,9	47,5	50,1	48,9	49,1	49,1
315	50,7	51	49,8	48,7	49,1	49,9
400	47,4	47,3	46,1	43,4	45,3	46,1
500	47,3	49	49,7	47,7	49,1	48,6
630	44,3	44,4	42	41,4	44,1	43,4
800	41,9	42,6	41	41,9	40,4	41,6
1k	42,2	39,9	39,4	38,4	40	40,1
1,25 k	40,9	39,9	39,5	39,2	39,2	39,7
1,6 k	45	44,8	43,7	42	43,8	43,9
2 k	41,5	41	39,3	38	40,2	40,1
2,5 k	37,1	37	36,1	35,1	37,6	36,6
3,15 k	35,4	35,1	33,6	32,8	34,3	34,3

MEDIÇÃO INTERNA COM PROTÓTIPO: ABERTURAS A 10 CM						
f (Hz)	PONTO 1: Lp₁ (dB)	PONTO 2: Lp₂ (dB)	PONTO 3: Lp₃ (dB)	PONTO 4: Lp₄ (dB)	PONTO 5: Lp₅ (dB)	MÉDIA: L₂ (dB)
100	48,5	50,5	43,7	46	45,9	47,5
125	51	51,8	50,2	52,2	50,5	51,2
160	62	59,3	54,6	53,6	59,2	58,7
200	68,6	66	62,9	60,4	66,3	65,6
250	55	53,1	52,4	55	53,7	53,9
315	51,5	53,1	51,7	52,1	50,8	51,9
400	51,6	50,2	46,6	49	49,7	49,7
500	52,2	52,9	51,5	53,1	52,4	52,4
630	45,9	46,9	46,2	45,3	46,9	46,2
800	43,8	45,5	43,8	45,8	43,8	44,6
1k	42,6	42,3	42,6	42,8	40,8	42,2
1,25 k	41,2	41,9	40,9	41,1	39,2	40,9
1,6 k	45,8	46,3	45,3	45	44,7	45,4
2 k	41,7	40,4	40,3	40,3	39,5	40,4
2,5 k	39,2	38,5	38	38,8	37,4	38,4
3,15 k	35,7	36,3	35,8	36	35,1	35,7

MEDIÇÃO INTERNA COM PROTÓTIPO: ABERTURAS A 20 CM						
f (Hz)	PONTO 1: Lp₁ (dB)	PONTO 2: Lp₂ (dB)	PONTO 3: Lp₃ (dB)	PONTO 4: Lp₄ (dB)	PONTO 5: Lp₅ (dB)	MÉDIA: L₂ (dB)
100	48,1	50,7	43	45,7	46	47,4
125	50,8	51,4	49,5	51,7	50,3	50,8
160	59,6	56,3	53,5	54,2	57,5	56,7
200	67,2	63,5	60,9	61,1	63,6	63,9
250	54	52,8	52,4	57,2	55,6	54,7
315	52,2	53,6	50,1	53,2	51,7	52,3
400	50,2	51,5	49,5	51,9	49,1	50,5
500	52,9	53	52,4	51,7	50,5	52,1
630	47,1	48,1	46,3	47,7	45,9	47,0
800	44,4	45,8	43,7	44,3	43,6	44,4
1k	43,3	43	43	42	42,1	42,7
1,25 k	41,8	41,2	42,1	41,9	40,8	41,5
1,6 k	44,5	45,8	45,2	44,8	43,7	44,8
2 k	41	41,3	40,4	40,4	41,2	40,8
2,5 k	38,3	38,9	39	39,2	39,7	39,0
3,15 k	37,6	37,7	37	36,3	36,8	37,1

MEDIÇÃO INTERNA COM PROTÓTIPO: ABERTURAS A 30 CM						
f (Hz)	PONTO 1: Lp₁ (dB)	PONTO 2: Lp₂ (dB)	PONTO 3: Lp₃ (dB)	PONTO 4: Lp₄ (dB)	PONTO 5: Lp₅ (dB)	MÉDIA: L₂ (dB)
100	46,9	51,8	43,1	47,2	45,1	47,8
125	51,6	53,7	50,3	52,8	50,8	52,0
160	59,1	56,6	53,1	54,1	58	56,7
200	65	63,1	59,1	61,6	63	62,7
250	52,8	53,8	52,7	55,2	55,7	54,2
315	57,5	55	49,7	55,1	55,4	55,1
400	50,7	52,6	52,2	52,7	51,1	51,9
500	50,8	53,4	51,1	52,7	47,6	51,5
630	44,8	48,2	46,2	48,1	46,3	46,9
800	44,8	45	43,7	45,2	44,3	44,6
1k	44,4	42,6	41,7	42,6	43,9	43,1
1,25 k	42,2	43,1	41,5	42,1	42,3	42,2
1,6 k	46,1	46,5	45,4	45	44,6	45,5
2 k	40,8	42,5	41,1	41,3	41,8	41,5
2,5 k	38,8	40,8	40,5	40	40,5	40,1
3,15 k	37,4	38	37,6	37,9	37,3	37,6

MEDIÇÃO INTERNA COM PROTÓTIPO: ABERTURAS A 40 CM						
f (Hz)	PONTO 1: Lp₁ (dB)	PONTO 2: Lp₂ (dB)	PONTO 3: Lp₃ (dB)	PONTO 4: Lp₄ (dB)	PONTO 5: Lp₅ (dB)	MÉDIA: L₂ (dB)
100	47,3	51,2	43,1	47	47,1	47,8
125	52,8	51,9	51,2	53,5	51,3	52,2
160	59,8	56,9	53,2	53,1	59,1	57,2
200	65	63,5	57,5	58,4	62,6	62,2
250	53,6	53,9	52	54,4	54,9	53,8
315	60	56,7	51,8	55,4	55,3	56,6
400	54,7	52,3	53	51,4	53,1	53,0
500	55,5	53,6	52,7	53,4	52,5	53,6
630	50,6	48,1	47,6	47,7	47,7	48,5
800	49,9	44,4	43,6	45	44	46,1
1k	52,4	45,4	43,6	43,3	44	47,4
1,25 k	54,9	43	43,1	41,8	43,2	48,8
1,6 k	54	45,8	45,6	46,2	45,7	49,0
2 k	50,8	42,4	41,7	41,6	42,7	45,6
2,5 k	51,4	39,8	40,5	40,5	42,3	45,7
3,15 k	48,5	37,8	37,6	38,2	38,5	42,8

MEDIÇÃO ABERTURA PROTÓTIPO 50 cm						
f (Hz)	PONTO 1: Lp₁ (dB)	PONTO 2: Lp₂ (dB)	PONTO 3: Lp₃ (dB)	PONTO 4: Lp₄ (dB)	PONTO 5: Lp₅ (dB)	MÉDIA: L₂ (dB)
100	48,5	52	43,6	50,5	48,6	49,4
125	52	51,9	51,2	54,6	52,8	52,6
160	60,2	59	53,8	52,8	58	57,6
200	64,9	65,1	57,7	58,6	62,6	62,7
250	52,7	54,2	52,6	54	54,4	53,6
315	58,2	55,9	51,9	54,9	53,7	55,4
400	51,7	50,8	52,4	52,5	52,1	51,9
500	53,9	54,3	50,6	52	52,6	52,8
630	49,6	47,1	46,1	46,3	48,5	47,7
800	46	43,8	42,8	45,2	43,5	44,4
1k	45,2	43,3	42	44	43,2	43,6
1,25 k	43,4	43,1	41,8	43,4	42,1	42,8
1,6 k	46,6	46,6	46,2	46,2	45,6	46,2
2 k	42,3	42	41,4	42	42,6	42,0
2,5 k	42	40,7	40,2	41,2	42,6	41,4
3,15 k	39,1	38,1	42	40,9	40	40,2

MÉDIA DE MEDIÇÕES: L_{1,2m} E L₂ (dB)										
f (Hz)	Ext. L_{1,2m}	Jan. Aber. L₂	Jan. Fech. L₂	Aber. Alinh. L₂	Pro. Fech. L₂	10 cm L₂	20 cm L₂	30 cm L₂	40 cm L₂	50 cm L₂
100	74,1	50	45,8	48,2	46,3	47,5	47,4	47,8	47,8	49,4
125	68,9	56,9	50,8	54,7	51,1	51,2	50,8	52	52,2	52,6
160	72,6	60,8	52,2	57,3	52,7	58,7	56,7	56,7	57,2	57,6
200	74,1	64,7	55,7	63,1	58,5	65,6	63,9	62,7	62,2	62,7
250	75,4	58,9	50,4	56	49,1	53,9	54,7	54,2	53,8	53,6
315	74,3	59,3	56,3	57,5	49,9	51,9	52,3	55,1	56,6	55,4
400	73,6	55,3	48,2	53,1	46,1	49,7	50,5	51,9	53	51,9
500	68,6	57,9	49	55,7	48,6	52,4	52,1	51,5	53,6	52,8
630	68,1	53,2	43,7	50,9	43,4	46,2	47	46,9	48,5	47,7
800	66,4	50,1	41	49,1	41,6	44,6	44,4	44,6	46,1	44,4
1k	63,4	50,7	40	48,9	40,1	42,2	42,7	43,1	47,4	43,6
1,25 k	64,3	51,3	40,8	49,3	39,7	40,9	41,5	42,2	48,8	42,8
1,6 k	69,5	55,2	45,7	53	43,9	45,4	44,8	45,5	49	46,2
2 k	66	51,7	41	49,2	40,1	40,4	40,8	41,5	45,6	42
2,5 k	68,1	50,6	37,2	48,7	36,6	38,4	39	40,1	45,7	41,4
3,15 k	62,2	48,7	34	47,2	34,3	35,7	37,1	37,6	42,8	40,2

DIFERENÇA DE NÍVEL: $D_{ls,2m}$ (dB)									
f (Hz)	Jan. Aber. $D_{ls,2m}$	Jan. Fech. $D_{ls,2m}$	Aber. Alinh. $D_{ls,2m}$	Pro. Fech. $D_{ls,2m}$	10 cm $D_{ls,2m}$	20 cm $D_{ls,2m}$	30 cm $D_{ls,2m}$	40 cm $D_{ls,2m}$	50 cm $D_{ls,2m}$
100	24,1	28,3	25,9	27,8	26,6	26,7	26,3	26,3	24,7
125	12	18,1	14,2	17,8	17,7	18,1	16,9	16,7	16,3
160	11,8	20,4	15,3	19,9	13,9	15,9	15,9	15,4	15
200	9,4	18,4	11	15,6	8,5	10,2	11,4	11,9	11,4
250	16,5	25	19,4	26,3	21,5	20,7	21,2	21,6	21,8
315	15	18	16,8	24,4	22,4	22	19,2	17,7	18,9
400	18,3	25,4	20,5	27,5	23,9	23,1	21,7	20,6	21,7
500	10,7	19,6	12,9	20	16,2	16,5	17,1	15	15,8
630	14,9	24,4	17,2	24,7	21,9	21,1	21,2	19,6	20,4
800	16,3	25,4	17,3	24,8	21,8	22	21,8	20,3	22
1k	12,7	23,4	14,5	23,3	21,2	20,7	20,3	16	19,8
1,25 k	13	23,5	15	24,6	23,4	22,8	22,1	15,5	21,5
1,6 k	14,3	23,8	16,5	25,6	24,1	24,7	24	20,5	23,3
2 k	14,3	25	16,8	25,9	25,6	25,2	24,5	20,4	24
2,5 k	17,5	30,9	19,4	31,5	29,7	29,1	28	22,4	26,7
3,15 k	13,5	28,2	15	27,9	26,5	25,1	24,6	19,4	22

DIFERENÇA DE NÍVEL PADRONIZADO: $D_{ls,2m,nT}$ (dB)										
f (Hz)	T (s)	Jan. Aber. $D_{ls,2m,nT}$	Jan. Fech. $D_{ls,2m,nT}$	Aber. Alinh. $D_{ls,2m,nT}$	Pro. Fech. $D_{ls,2m,nT}$	10 cm $D_{ls,2m,nT}$	20 cm $D_{ls,2m,nT}$	30 cm $D_{ls,2m,nT}$	40 cm $D_{ls,2m,nT}$	50 cm $D_{ls,2m,nT}$
100	0,57	23,5	27,7	25,3	27,2	26	26,1	25,7	25,7	24,1
125	0,51	11,9	18	14,1	17,7	17,6	18	16,8	16,6	16,2
160	0,52	11,6	20,2	15,1	19,7	13,7	15,7	15,7	15,2	14,8
200	0,62	8,4	17,4	10	14,6	7,5	9,2	10,4	10,9	10,4
250	0,78	14,5	23	17,4	24,3	19,5	18,7	19,2	19,6	19,8
315	0,92	12,3	15,3	14,1	21,7	19,7	19,3	16,5	15	16,2
400	0,65	17,1	24,2	19,3	26,3	22,7	21,9	20,5	19,4	20,5
500	0,65	9,5	18,4	11,7	18,8	15	15,3	15,9	13,8	14,6
630	0,6	14,1	23,6	16,4	23,9	21,1	20,3	20,4	18,8	19,6
800	0,63	15,2	24,3	16,2	23,7	20,7	20,9	20,7	19,2	20,9
1k	0,58	12	22,7	13,8	22,6	20,5	20	19,6	15,3	19,1
1,25 k	0,61	12,1	22,6	14,1	23,7	22,5	21,9	21,2	14,6	20,6
1,6 k	0,58	13,6	23,1	15,8	24,9	23,4	24	23,3	19,8	22,6
2 k	0,61	13,4	24,1	15,9	25	24,7	24,3	23,6	19,5	23,1
2,5 k	0,61	16,6	30	18,5	30,6	28,8	28,2	27,1	21,5	25,8
3,15 k	0,64	12,4	27,1	13,9	26,8	25,4	24	23,5	18,3	20,9

APÊNDICE B – PLANILHA DE CÁLCULOS DE VENTILAÇÃO

TESTE DE VENTILAÇÃO (DECAIMENTO DE CO ₂ EM PPM)							
Tempo (Min)	Janela Aberta	POSIÇÃO DO PROTÓTIPO COM A JANELA					
		Aberturas Alinhadas	50 cm	40 cm	30 cm	20 cm	10 cm
1	432	528	409	581	345	419	514
2	442	497	410	495	348	415	539
3	425	535	400	487	336	415	534
4	427	1.851	456	472	330	409	1.892
5	425	2.262	463	474	333	402	5.000
6	422	2.803	1.607	466	329	460	5.000
7	450	3.416	2.604	429	388	595	5.000
8	422	3.972	3.074	712	402	2.546	5.000
9	397	4.447	3.392	3.517	404	3.413	5.000
10	429	4.625	3.511	5.000	439	3.895	5.000
11	892	5.000	3.550	5.000	1.615	4.156	5.000
12	2.392	5.000	3.656	5.000	2.486	4.335	5.000
13	3.551	5.000	4.383	5.000	3.055	4.388	5.000
14	4.349	5.000	4.402	5.000	3.308	4.479	5.000
15	5.000	5.000	4.550	5.000	3.424	4.571	5.000
16	5.000	5.000	4.472	5.000	3.427	5.000	5.000
17	5.000	5.000	4.388	5.000	3.441	5.000	5.000
18	5.000	5.000	4.765	5.000	3.418	5.000	5.000
19	5.000	5.000	4.916	5.000	3.621	5.000	5.000
20	5.000	5.000	5.000	5.000	4.091	5.000	5.000
21	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
22	4.934	4.824	4.983	4.986	4.983	4.552	4.941
23	4.763	4.667	4.781	4.911	4.887	4.590	4.636
24	4.529	4.478	4.441	4.845	4.792	4.518	4.597
25	4.334	4.327	4.518	4.774	4.656	4.351	4.495
26	4.111	4.141	4.606	4.728	4.592	4.240	4.390
27	3.983	4.005	4.471	4.623	4.529	4.459	4.250
28	3.773	3.906	4.509	4.575	4.481	4.351	4.212
29	3.563	3.760	4.165	4.527	4.362	4.327	4.083
30	3.420	3.568	4.111	4.463	4.293	4.327	4.078
31	3.215	3.485	4.058	4.431	4.178	4.235	4.021
32	3.059	3.375	4.116	4.305	4.160	4.216	3.948
33	2.948	3.252	4.142	4.282	4.076	4.021	3.892
34	2.770	3.137	3.890	4.282	3.924	3.904	3.842
35	2.649	2.987	3.941	4.186	3.861	3.775	3.805
36	2.528	2.863	3.870	4.132	3.733	3.713	3.721
37	2.407	2.780	3.976	4.088	3.709	3.593	3.689
38	2.254	2.685	3.959	3.953	3.616	3.620	3.578

39	2.169	2.588	3.950	3.885	3.467	3.669	3.472
40	2.107	2.460	3.941	3.832	3.403	3.693	3.328
41	1.979	2.370	3.870	3.761	3.358	3.644	3.317
42	1.939	2.244	3.640	3.672	3.287	3.518	3.253
43	1.855	2.164	3.672	3.615	3.253	3.467	3.213
44	1.765	2.033	3.668	3.560	3.184	3.402	3.177
45	1.727	1.945	3.672	3.504	3.081	3.444	3.110
46	1.662	1.879	3.589	3.424	3.092	3.354	3.072
47	1.533	1.822	3.463	3.368	3.029	3.357	3.002
48	1.454	1.764	3.290	3.330	2.953	3.156	3.009
49	1.348	1.705	3.220	3.278	2.910	3.093	2.941
50	1.303	1.634	3.294	3.237	2.830	3.124	2.931
51	1.224	1.566	3.242	3.183	2.761	3.114	2.914
52	1.210	1.530	3.357	3.118	2.738	3.099	2.858
53	1.187	1.492	3.257	3.129	2.685	3.079	2.799
54	1.178	1.428	3.033	3.073	2.634	3.005	2.808
55	1.136	1.383	3.150	3.052	2.563	2.964	2.775
56	1.108	1.349	3.114	2.966	2.538	2.947	2.717
57	1.057	1.305	3.131	2.942	2.511	2.913	2.711
58	1.028	1.255	3.159	2.885	2.460	2.848	2.623
59	995	1.238	3.103	2.808	2.428	2.765	2.593
60 (1 HORA)	968	1.218	3.097	2.799	2.396	2.724	2.556
61	946	1.175	2.999	2.755	2.370	2.699	2.477
62	902	1.135	2.940	2.685	2.335	2.677	2.467
63	888	1.085	2.664	2.678	2.304	2.629	2.419
64	860	1.067	2.718	2.597	2.221	2.605	2.396
65	843	1.045	2.743	2.579	2.204	2.486	2.338
66	816	1.024	2.649	2.551	2.171	2.427	2.341
67	808	969	2.705	2.529	2.129	2.486	2.295
68	790	954	2.544	2.514	2.035	2.448	2.245
69	776	933	2.559	2.415	2.081	2.410	2.247
70	747	905	2.501	2.421	2.017	2.331	2.206
71	734	890	2.430	2.371	1.957	2.277	2.154
72	719	839	2.475	2.330	1.977	2.309	2.114
73	701	821	2.454	2.318	1.857	2.291	2.120
74	688	794	2.498	2.295	1.693	2.261	2.085
75	687	766	2.472	2.287	1.669	2.218	2.030
76	661	739	2.479	2.230	1.673	2.137	2.019
77	620	727	2.443	2.212	1.633	2.119	2.014
78	618	703	2.394	2.194	1.662	2.087	1.986
79	615	698	2.295	2.129	1.579	2.052	1.956
80	608	665	2.286	2.123	1.542	2.013	1.914
81	608	654	2.322	2.113	1.532	2.021	1.919
82	595	655	2.244	2.053	1.534	1.908	1.883

83	588	644	2.250	2.009	1.558	1.837	1.871
84	581	628	2.209	2.022	1.534	1.863	1.868
85	569	621	2.170	1.962	1.524	1.889	1.854
86	554	615	2.176	1.942	1.505	1.872	1.849
87	548	594	2.117	1.913	1.496	1.880	1.809
88	542	594	2.125	1.891	1.468	1.844	1.781
89	507	583	2.059	1.872	1.451	1.757	1.781
90	526	575	2.014	1.860	1.413	1.661	1.751
91	503	572	2.014	1.809	1.394	1.610	1.704
92	496	561	1.964	1.786	1.370	1.641	1.674
93	510	564	1.989	1.777	1.354	1.586	1.657
94	503	550	1.934	1.716	1.342	1.576	1.646
95	505	533	1.931	1.738	1.350	1.599	1.606
96	489	541	1.907	1.716	1.310	1.599	1.595
97	489	527	1.869	1.677	1.290	1.520	1.604
98	485	518	1.838	1.680	1.275	1.490	1.574
99	477	517	1.827	1.649	1.254	1.505	1.558
100	478	506	1.791	1.637	1.216	1.488	1.537
101	473	511	1.766	1.591	1.194	1.494	1.522
102	466	496	1.743	1.560	1.172	1.488	1.516
103	459	493	1.718	1.541	1.157	1.447	1.495
104	462	494	1.689	1.511	1.135	1.455	1.466
105	462	481	1.698	1.509	1.108	1.453	1.460
106	461	484	1.647	1.468	1.104	1.440	1.433
107	448	480	1.636	1.446	1.082	1.426	1.397
108	452	477	1.595	1.456	1.082	1.388	1.397
109	444	489	1.608	1.415	1.082	1.369	1.377
110	444	477	1.575	1.434	1.067	1.375	1.374
111	434	466	1.580	1.375	1.050	1.289	1.350
112	438	455	1.553	1.342	1.038	1.286	1.337
113	429	460	1.521	1.346	1.043	1.270	1.323
114	431	460	1.515	1.309	1.034	1.287	1.284
115	431	459	1.483	1.303	986	1.297	1.290
116	432	461	1.473	1.300	1.001	1.279	1.261
117	416	448	1.459	1.277	960	1.224	1.255
118	421	442	1.438	1.275	954	1.143	1.231
119	417	461	1.418	1.248	920	1.174	1.196
120 (2 HORAS)	407	441	1.408	1.242	915	1.206	1.194
121	411	445	1.383	1.211	885	1.193	1.172
122	409	427	1.367	1.205	887	1.163	1.161
123	406	432	1.359	1.168	895	1.161	1.145
124	398	438	1.338	1.150	877	1.156	1.119
125	391	436	1.334	1.120	876	1.152	1.111
126	399	426	1.334	1.141	873	1.138	1.098

127	403	432	1.306	1.098	859	1.132	1.094
128	395	431	1.319	1.107	845	1.116	1.103
129	392	437	1.283	1.088	827	1.116	1.056
130	392	426	1.279	1.065	796	1.091	1.063
131	389	422	1.281	1.058	794	1.086	1.045
132	379	425	1.271	1.047	807	1.079	1.009
133	394	415	1.250	1.011	805	1.095	994
134	386	410	1.266	994	802	1.060	987
135	382	409	1.237	997	799	1.060	977
136	386	407	1.224	971	766	1.039	962
137	379	407	1.217	949	765	1.024	948
138		416	1.218	942	754	1.037	936
139		411	1.185	950	766	1.007	915
140		410	1.169	928	750	1.010	904
141		408	1.169	911	740	961	899
142		396	1.156	906	731	982	895
143		410	1.152	884	736	965	871
144		413	1.147	856	713	985	858
145		404	1.124	881	706	949	852
146		408	1.139	856	704	955	848
147		418	1.121	849	706	938	831
148		403	1.112	834	698	922	839
149		414	1.090	817	687	928	818
150		416	1.088	794	693	892	794
151		409	1.092	799	674	884	796
152		410	1.064	783	671	876	783
153		400	1.070	778	665	843	770
154			1.079	770	665	854	756
155			1.064	765	655	876	737
156			1.042	745	647	852	734
157			1.033	734	641	816	722
158			1.033	731	631	791	719
159			1.007	749	629	762	709
160			1.009	726	637	771	706
161			999	693	640	764	709
162			991	702	629	764	687
163			979	699	641	744	688
164			974	683	615	770	672
165			969	683	628	770	674
166			967	669	608	779	656
167			969	674	611	765	652
168			957	661	582	724	648
169			937	645	594	727	648
170			935	652	590	744	638
171			918	634	572	701	635

172			933	631	575	688	612
173			916	628	572	707	624
174			893	615	563	711	617
175			894	609	571	724	609
176			891	611	568	704	590
177			890	602	577	682	592
178			885	598	560	692	603
179			882	609	552	701	600
180 (3 HORAS)			875	572	555	711	576
181			869	584	548	701	584
182			861	566	544	701	569
183			856	560	552	694	576
184			846	568	542	644	563
185			846	564	545	634	573
186			833	572	538	645	569
187			827	559	531	641	561
188			835	555	545	631	566
189			814	543	537	624	561
190			810	543	529	627	551
191			810	533	541	627	559
192			811	533	526	622	555
193			813	533	523	614	565
194			799	525	529	624	550
195			788	534	525	626	551
196			779	525	519	624	550
197			781	530	502	613	550
198			776	489	510	624	553
199			795	512	514	622	559
200			753	518	502	597	545
201			762	526	510	609	541
202			750	511	514	601	542
203			735	512	510	617	534
204			735	517	484	604	546
205			729	504	497	597	524
206			734	490	498	586	523
207			726	490	487	567	530
208			705	493	492	563	528
209			699	488	496	554	537
210			705	495	487	570	523
211			713	489	489	564	524
212			696	483	470	562	526
213			693	490	484	550	520
214			693	484	479	566	519
215			676	475	476	542	512

216			680	475	485	556	521
217			677	475	480	566	521
218			669	460	475	558	528
219			665	474	477	529	526
220			645	486	472	547	563
221			644	469	482	535	519
222			652	454	475	518	508
223			638	453	477	517	504
224			641	465	473	525	509
225			637	467	463	527	515
226			635	463	462	539	499
227			619	452	472	534	506
228			621	465	471	529	499
229			621	470	460	538	490
230			612	455	471	520	490
231			603	453	457	518	483
232			599	453	471	517	490
233			603	449	458	525	497
234			590	475	457	524	504
235			588	454	460	531	490
236			583	459	456	525	486
237			588	450	450	522	483
238			575	454	456	517	483
239			579	458	455	520	489
240 (4 HORAS)			575	448	463	517	486
241			579	440	452	512	484
242			566	450	448	517	484
243			559	442	453	508	475
244			563	429	465	517	479
245			555	438	447	500	483
246			556	450	447	504	471
247			545	443	450	503	470
248			546	433	452	501	471
249			537	432	451	498	469
250			533	435	437	509	477
251			533	447	442	498	464
252			523	418	445	500	470
253			533	425	447	490	474
254			515	438	448	500	465
255			510	432	448	493	476
256			518	412	436	504	458
257			508	434	460	486	466
258			501	433	443	484	477
259			501	435	441	487	470

260			489	430	436	489	467
261			492	434	441	487	454
262			489	439	435	487	453
263			476	425	436	482	462
264			479	434	440	478	448
265			471	424	442	485	448
266			467	418	427	476	461
267			475	433	435	486	453
268			473	424	435	476	448
269			467	434	427	476	454
270			458	425	421	476	445
271			471	419	425	475	444
272			455	408	432	475	439
273			452	422	430	466	450
274			457	409	435	458	434
275			455	414	410	466	450
276			457	429	427	465	445
277			457	424	420	462	442
278			438	419	432	466	446
279			443	413	419	471	445
280			433	405	433	466	451
281			442	418	415	461	438
282			435	417	416	466	451
283			438	414	421	463	441
284			424	409	430	455	443
285			428	409	413	456	441
286			441	400	408	468	433
287			435	415	411	455	448
288			435	405	413	466	443
289			431	414	414	455	438
290			420	423	416	453	430
291			431	405	411	458	436
292			427	422	409	447	437
293			418	413	416	451	437
294			433	410	405	458	430
295			426	414	420	450	432
296			426	400	415	441	437
297			427	407	407	447	431
298			433	410	409	451	443
299				405	407	450	437
300 (5 HORAS)				405	409	437	433
301				391	420	443	433
302					415	432	435
303					424	432	438

304					409	433	440
305					419	453	433
306					420	443	437
307					414	433	445
308					411	443	431
309					411	445	443
310					410	438	451
311					407	440	435
312					419	440	426
313					408	429	426
314					407	431	432
315					407	424	433
316					408	444	430
317					400	444	430
318					399	434	433
319					405	431	423
320					398	435	430
321					396	432	428
322						434	409
323						431	422
324						423	422
325						428	417
326						426	421
327						433	422
328						418	416
329						417	415
330						424	417
331						427	421
332						416	405
333						429	432
334						423	415
335						417	409
336						421	422
337						436	410
338						418	409
339						432	406
340						422	413
341						429	405
342						426	414
343						427	409
344						426	415
345						423	421
346						432	415
347						418	417
348						427	415

349						427	404
350						429	408
351						431	405
352						423	405
353						427	398
354						427	
355						427	
356						427	
357						427	
358						428	
359						434	
360 (6 HORAS)						429	