

Atenuadores para controle de ruído em sistemas de ar-condicionado: estudos com a utilização de materiais reaproveitados

Felipetto, T. J.¹; Oliveira, M. F.²; Rossatto, F. C.²; Kerber, L. A.²; Heissler, R. F.²

¹ Metalurgica Sevik, São Leopoldo, RS, tais.felipetto@gmail.com

² itt Performance, Unisinos, São Leopoldo, RS, {mariaon, frossatto, lorenzoak, rheissler} @unisinos.br

Resumo

As máquinas que condicionam o ar provocam sons durante seu funcionamento, devido aos itens que as compõem e a movimentação de fluido ao longo dos ramais que distribuem o ar. Esses ruídos, quando intensos, ocasionam desgaste físico e mental nas pessoas, dependendo do nível sonoro emitido pelos aparelhos. Como estão presentes no cotidiano de inúmeros trabalhadores e estudantes, torna-se necessário um controle acústico rigoroso a fim de reduzir prejuízos causados por sua intensidade. O objetivo deste trabalho foi identificar alterações em atenuadores acústicos empregados em sistemas de HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*) para a incorporação de materiais fono-absorventes reaproveitados. Para isso, foram identificadas variáveis que indicam a eficiência de atenuadores acústicos para sistemas de ar-condicionado, além de caracterizar as principais formas de emissão e propagação do som em termos de níveis de pressão sonora e composição espectral de um sistema típico de HVAC. Também foram analisados os materiais fono-absorventes utilizados em sistemas HVAC conforme seu coeficiente de absorção. A partir das análises, pode-se concluir que com o uso de materiais fono-absorventes reaproveitados é possível ter coeficientes de absorção muito próximos aos resultados de materiais primários, além de conseguir maiores níveis de atenuação em diferentes bandas de frequência.

Palavras-chave: atenuador acústico, sistemas HVAC, material fono-absorvente.

PACS: 43.55.Rg, 43.50.Jh, 43.28.Py, 43.55.Dt.

Attenuators for noise control in air conditioning systems: case study with the use of re-used sound-absorbing materials.

Abstract

The HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) machines cause noise during their operation, due to the items that compose them and the movement of the fluid along the branches that distribute the air. These noises, when intense, cause physical and mental strain on people, depending on the sound level emitted by the devices. As they are present in the daily lives of count-less workers and students, strict sound control is necessary in order to reduce damage caused by sound intensity. This work aims to identify changes in acoustic attenuators used in HVAC systems for the incorporation of reused sound-absorbing materials. For this, variables that indicate the efficiency of acoustic attenuators for air conditioning systems were identified, in addition to characterizing the main forms of emission and propagation of sound in terms of sound pressure levels and spectral composition of a typical HVAC system. The sound-absorbing materials used in HVAC systems were also analyzed according to their absorption coefficient. From the analyses, it can be concluded that with the use of reused sound-absorbing materials it is possible to have absorption coefficients very close to the results of primary materials, in addition to achieving higher levels of attenuation in different frequency bands.

Keywords: acoustic attenuator, HVAC systems, sound absorbing material.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas centrais de ar-condicionado, ventilação e exaustão projetados para empreendimentos multifuncionais, são importantes para contribuir com o conforto térmico dos usuários. Entretanto, esses sistemas emitem e propagam ruídos significativos durante seu funcionamento. Desse modo, faz-se necessária a implantação de atenuadores acústicos posicionados estrategicamente ao longo dos ramais de distribuição do ar, com o intuito de atenuar as ondas sonoras propagadas.

O incômodo causado pelo excesso de ruído percebido é verificado em diferentes situações, sendo também relacionado com problemas de saúde [1]. Entretanto, existem parâmetros e tolerâncias a serem atendidas, o que pode minimizar a insatisfação dos usuários em relação ao ambiente sonoro. Sendo assim, as preocupações emergentes relacionadas ao ruído passaram a ser assunto de interesse comum e diretamente ligado à preservação da qualidade de vida cotidiana [2].

Os potenciais problemas de ruído dos sistemas *Heating, Ventilation and Air Conditioning* – HVAC – são evidenciados por profissionais da área, que buscam soluções a cada novo projeto. No cenário atual, os equipamentos de atenuação acústica seguem as dimensões dos dutos que direcionam o fluido para ambientes a serem condicionados e possuem células internas de um formato padrão. Contudo, entendendo que a relação espacial, volumétrica e de formas impactam sobre a capacidade de atenuação das células fono-absorventes [3], faz-se necessário um estudo aprofundado sobre o tema.

Nesse contexto, este trabalho tem como tema o controle de ruído em sistemas de ar-condicionado central, sendo sua delimitação o uso de atenuadores acústicos para redução de ruídos no sistema. O objetivo consiste em identificar alterações em atenuadores acústicos empregados em sistemas de HVAC para a

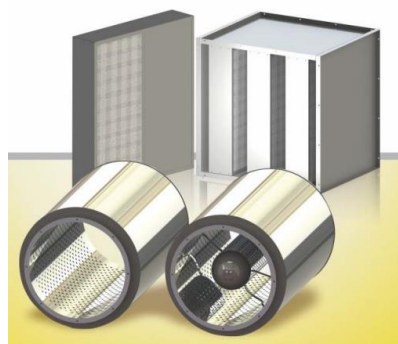
incorporação de materiais fono-absorventes reaproveitados.

2. FUNDAMENTAÇÃO

Para que os níveis de ruído não sejam prejudiciais ao ouvido humano, é indispensável cumprir os parâmetros exigidos nas normas brasileiras, além de implantar dispositivos nos equipamentos, a fim de atenuar o ruído excessivo. Atualmente, a aplicação mais usual em sistemas fechados, é a de dispositivos que reduzem o ruído em ambientes e em máquinas.

A demanda de atenuadores acústicos é atendida por projetistas especializados, que dimensionam os equipamentos conforme seu propósito.

Os atenuadores de ruído, da mesma forma que os dutos, são fabricados com chapa de aço galvanizada, podendo ser em formato retangular ou circular, [4, 5], conforme Figura 1, sendo a espessura da chapa a ser utilizada definida pela ABNT NBR 16401-1:2008 [6] que



apresenta tabelas que relacionam pressão de ar interna com as dimensões de fabricação do duto.

Figura 1: Atenuador retangular e atenuador circular.
(retirado de Berlinerluft [5]).

A conexão dos atenuadores com o ramal dos dutos é feita por meio de flanges nas suas extremidades, conforme detalhes indicados na ABNT NBR 16401-1:2008 [6]. Suas dimensões são de acordo com a frequência de som que se deseja atenuar, e a forma mais simples

de projeto é de um duto revestido internamente com material fono-absorvente incombustível [7], sendo a espessura deste material maior se a frequência do som a ser atenuado for menor [8]. A estrutura de um atenuador sonoro é autoportante, com células atenuadoras fixas ou removíveis do tipo gaveta. Dessa forma, a redução sonora ocorre durante a passagem do ar entre os vãos das células preenchidas com o material fono-absorvente [3,4].

Os sistemas de ar-condicionado são compostos por diferentes materiais que podem ter seu dimensionamento diversificado em função de algumas variáveis de projeto. O invólucro aplicado dentro do duto é comumente composto por material leve, como espumas e fibras, e tem o propósito de atenuar a transmissão do ruído [9]. O uso de atenuadores de ruído é considerado a segunda opção de maior eficiência no controle sonoro, já que esses equipamentos são empregados na trajetória do som. A primeira opção é a atuação na fonte, e a última, no receptor [10].

Somado a isso, há ainda o aumento na quantidade de consumo de materiais fono-absorventes e na geração de resíduos classificados como refugo no sistema produtivo. Essa situação, além dos impactos no meio ambiente, evidencia necessidade de espaços maiores da produção e a geração de custos com logística reversa. Nos atenuadores de ruído, os materiais fono-absorventes representam uma considerável parcela do custo de construção do sistema.

Embora efetivos, a grande escala de produção desses atenuadores trouxe questionamentos e aumentou a necessidade de variações que não são contempladas nos projetos de instalações, trazendo dificuldades em adaptar os projetos a situações mais específicas.

Relativamente novos no mercado nacional, devido a exigências normativas recentes, os atenuadores acústicos são muito indicados em projetos de ar-condicionado central. Entretanto, ainda não há abertura para especificações mais diversificadas do material, visto que no país os fabricantes são regionalizados e pouco

acessíveis. A utilização de métodos que possibilitem maior agilidade no trabalho com as possíveis variações que esses atenuadores podem sofrer, garantem a resposta de uma demanda solicitada pelo mercado atual, contribuindo positivamente para o desenvolvimento deste setor.

Entendendo que os critérios usados em projeto de atenuadores acústicos nacionais são pouco flexíveis e restritos, pretende-se estudar diferentes arranjos de construção deste mecanismo, para a busca de alternativas de produção com melhor aproveitamento dos materiais aplicados.

3. DESENVOLVIMENTO

Na Figura 2 são apresentadas as etapas deste estudo, interligando-as em um fluxograma. A primeira etapa do planejamento da pesquisa experimental traz a problemática trabalhada: “Como atender os parâmetros exigidos na fabricação de atenuadores acústicos para sistemas de ar-condicionado central, alterando seu dimensionamento e reaproveitando materiais fono-absorventes?”.

Após a formulação do problema do estudo, adotou-se a premissa de se manter a espessura das células dos atenuadores e as células construídas com material fono-absorvente reaproveitado com melhor aproveitamento de matéria prima. Sendo assim, foram testadas diferentes amostras, bem como a aplicação de materiais reaproveitados, a partir de ensaios para determinação do coeficiente de absorção sonora.

Na etapa seguinte, o desenvolvimento de protótipo ocorreu em dois momentos. Inicialmente, foram feitos testes em amostras com diferentes composições de materiais que poderiam compor o preenchimento das células do atenuador e, posteriormente, executadas algumas possibilidades de atenuadores, com variações no posicionamento do material. Por fim, foi proposto um atenuador acústico que também foi testado, assim como o atenuador padrão. A coleta de dados ocorreu durante

todo o processo de execução do protótipo e

ensaios, com a posterior análise comparativa.

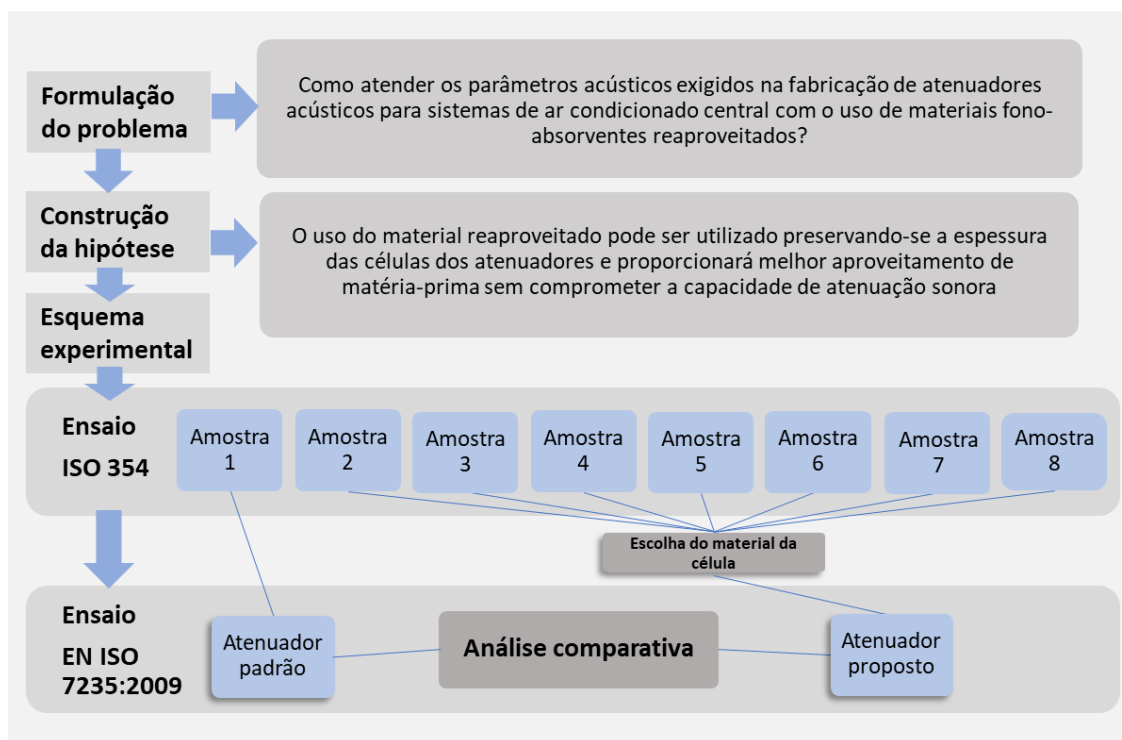


Figura 2: Fluxograma de planejamento das etapas da pesquisa experimental

3.1 Ensaio de absorção sonora

A presença de materiais de absorção aplicados no interior de cavidades de estruturas atua como meio de passagem de fluxo de ar, garantindo uma transmissão menor das ondas sonoras [11]. A espessura do material, sua densidade, bem como a presença de cavidade entre o material e a superfície aplicada são as propriedades que expressarão o desempenho de absorção de cada material, conforme cita Oiticica [12]. Sabendo o coeficiente de absorção desses materiais, é possível determinar a absorção da superfície proposta em virtude de sua área [13].


Foram ensaiadas oito possíveis composições de amostras para as células dos atenuadores acústicos. Os ensaios foram realizados no laboratório de acústica do itt Performance da Unisinos, em câmara reverberante, seguindo os procedimentos prescritos na norma ISO 354:2003 e os cálculos orientados pelas normas ISO 354:2003 e ISO 11654:1997.

A componente espectral de um sistema HVAC é variável, sendo o som emitido pelo ventilador nas bandas entre 125 Hz e 250 Hz. Ao longo dos ramais são verificados sons nas bandas de médias frequências e, na saída dos ramais, entre 1.000 Hz e 2.000 Hz. Dessa forma, a avaliação foi definida para essa gama de frequências. Sendo assim, para análise dos dados foram selecionadas as faixas de frequência por banda de oitavas (63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1.000 Hz e 2.000 Hz), que foram utilizadas para expressar os resultados.

As propostas para as amostras tiveram como base os materiais utilizados atualmente na fabricação desses equipamentos, bem como a aplicação de materiais que são descartados no processo.

Todas as amostras foram estruturadas por perfis metálicos aplicados ao longo do perímetro, de modo que a superfície lateral de cada amostra de material não ficasse exposta durante o ensaio. Foram oito composições de amostras, descritas nas Tabela 1.

Tabela 1: Descrição da composição das amostras.

Amostra	Materiais de composição		Imagem do ensaio
01	Painel de lã de vidro com véu de vidro em uma das faces, com espessura de 50 mm e densidade de 40 kg/m ³ . Comercialmente é conhecido como “Isosound” [18].		
02	Painel de lã de vidro com véu de vidro em uma das faces, espessura de 50 mm e densidade de 40 kg/m ³ (Isosound). Possui chapa zincada com 0,65 mm de espessura (chapa 24) em 50% da sua superfície.		
03	Material fono-absorvente reaproveitado de retalhos de lã de vidro com véu de vidro em uma das faces, espessura de 50 mm e densidade de 40 kg/m ³ (Isosound) e TNT em sua superfície.		
04	Painel de lã de vidro com véu de vidro em uma das faces, espessura de 50 mm e densidade de 40 kg/m ³ (Isosound). Possui painel perfurado em chapa galvanizada em 50% de sua superfície.		
05	Idem a amostra 4, painel perfurado em chapa galvanizada em 100% de sua superfície.		
06	Material reaproveitado de retalhos de lã de vidro, com uma camada de alumínio em uma das faces e TNT em sua superfície, com espessura de 38 mm e densidade de 30 kg/m ³ .		
07	Material reaproveitado de retalhos de painéis rígidos de lã de vidro e comercialmente é conhecido como “Climaver” [19], com espessura de 25 mm e a densidade de 80 kg/m ³ .		
08	Material reaproveitado de retalhos de espuma elastomérica, com espessura de 25 mm.		

A Amostra 01 é a composição padrão utilizada atualmente pelos fabricantes de atenuadores acústicos em todo Brasil. A Amostra 02 é produzida por alguns fabricantes quando o atenuador apresenta grandes dimensões, acima de 1 metro de comprimento, com o material fono-absorvente parcialmente exposto e parcialmente coberto pela chapa zincada.

A Amostra 03 foi testada como forma de aplicar os materiais fono-absorventes de menor dimensão, que atualmente são descartados, com revestimento de tecido TNT, para evitar o desprendimento de partículas de material. A Amostra 04 tem como base a composição padrão, com o uso de um painel perfurado na superfície do material fono-absorvente, com a finalidade de produzir o efeito de ressonador de Helmholtz para a atenuação dos sons em bandas de baixa frequência. Conforme cálculos teóricos [14], utilizou-se uma punção oblonga de 05×10 mm com distância de 7 cm entre os furos, tanto horizontalmente como verticalmente.

$$f_r = \left(\frac{10c}{2\pi}\right) \sqrt{\frac{P}{d(e + 1,6r)}} \quad (1)$$

em que c é a velocidade de propagação do som no ar (m/s); P é porcentagem de área perfurada (%); e é a espessura da placa perfurada (cm); r é o raio dos furos (cm); d é a espessura da câmara de ar (cm).

Ainda sobre a Amostra 04, também foi disposto o painel perfurado em toda a superfície da lã de vidro, a fim de verificar se haverá influência do material. A Amostra 05 teve a mesma composição da amostra 04, com 100% da superfície coberta pelo painel perfurado.

Por fim, as Amostras 06, 07 e 08 foram testadas com o intuito de utilizar os retalhos de lã de vidro aluminizado, o modelo Climaver e a espuma elastomérica, aplicadas em isolamento externo dos dutos de ar-condicionado central e que também sofrem descarte.

Para realização dos ensaios, as amostras foram montadas diretamente sobre o chão da câmara, que possui $59,80$ m² de área, sem considerar as irregularidades no piso. Aten-

tu-se para que nenhuma borda da amostra de teste ficasse a menos de 1 m de distância de qualquer superfície adjacente e que ficasse de forma não paralela às paredes da câmara. Os equipamentos empregados para realização dos ensaios de absorção sonora foram:

- fonte sonora dodecaédrica B&K modelo 4292 L;
- amplificador sonoro B&K, modelo 2734-A;
- analisador sonoro ACOEM 01 dB, Fusion;
- microfone Gras modelo 40 AO; e
- calibrador do microfone B&K, modelo 4231.

Foram realizados testes com 12 posições de microfone, em três posições diferentes de disposição de fonte sonora, ou seja, quatro disposições distintas de microfone para cada ponto estabelecido para a fonte sonora dentro da câmara reverberante. Todos os posicionamentos da fonte sonora e do microfone atenderam as distâncias especificadas pela norma ISO 354:2003 [15]. Na Figura 3 é possível verificar as posições utilizadas.

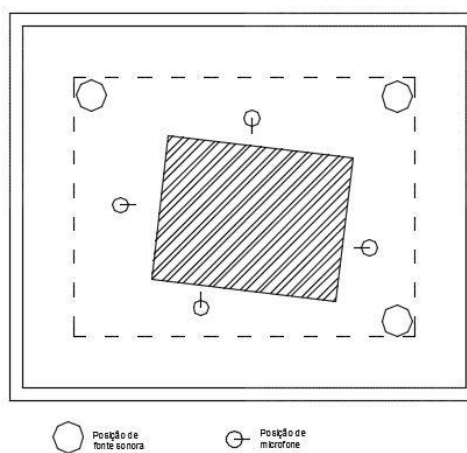


Figura 3: Posições dos equipamentos no ensaio de absorção sonora.

Os resultados serviram como dados para definição da composição do preenchimento das células do atenuador a ser testado no ensaio de nível de atenuação.

3.2 Ensaio dos níveis de atenuação

Os primeiros ensaios em laboratório foram realizados nas células que compõem os atenuadores acústicos, com o intuito de determinar o coeficiente de absorção sonora dos materiais utilizados atualmente para fabricação destes equipamentos. Além disso, desse modo, é possível analisar e propor a utilização de novos materiais.

Foram realizados outros ensaios em laboratório, em um segundo momento, para caracterização dos níveis de atenuação sonora do silenciador padrão. Para este ensaio foi disponibilizado um atenuador com seção retangular de 60 cm por 25 cm e 131 cm de comprimento, em chapa galvanizada, conforme a ABNT NBR 16401-1:2009 [6], representado na Figura 4, em vista superior e cortes.

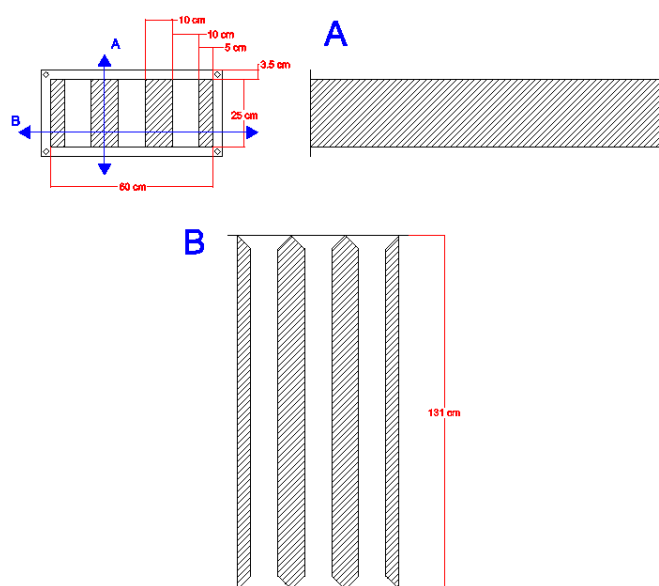


Figura 4: Vista superior e cortes do atenuador padrão 60 × 25 × 131 cm.

Na sequência, foi instalado um duto com 30 cm de comprimento entre as câmaras, junto a laje de concreto, com as dimensões do sistema (60 × 25 cm) e, assim, servindo como ligação entre o emissor de ruído, disposto na laje inferior, e o objeto de estudo, disposto na laje superior. Para fixação desse duto empregou-se um adesivo epóxi de média fluidez e alto desempenho, à base de dois componentes que, misturados, garantiram a aderência entre o elemento metálico (duto) e o elemento estrutural (laje). O vão entre o duto e a laje foi preenchido com lã de pet, para compor o isolamento do tipo “massa/mola/massa”.

O atenuador, composto por quatro células de lã de vidro, foi acoplado no sistema na sequência, e por fim, acrescentou-se um duto de mesma seção com 111 cm de comprimento

para que se pudesse mensurar também a quantidade de som interno ao ramal de dutos. Todos os dutos utilizados possuem acabamento TDC (*Transversal Duct Connection*), uma solução para união transversal dos dutos de ar, com 32 mm de largura e, para fixação entre estes, aplicou-se uma fita elastomérica com 19 mm de espessura ao redor do perímetro de contato entre os dutos, com intuito de minorar as vibrações dos materiais rígidos atrelados. Além disso, em cada canto TDC colocou-se um parafuso francês 5/16” × 1” zincado branco e rosca total, e uma porca 5/16”, ou seja, quatro parafusos entre dois dutos. Esses acessórios de ligação entre os dutos são utilizados usualmente em instalações de dutos HVAC. A Figura 5 mostra imagens das câmaras e do duto de ligação durante o ensaio.



Figura 5: Câmara 1, duto de ligação e câmara 2.

O ensaio do atenuador seguiu os requisitos da norma EN ISO 7235:2009 [16], que indica os seguintes itens como equipamentos necessários para teste acústico de silenciadores: (a) fonte sonora; (b) objeto de teste; e (c) sonômetro para medições em bandas de terço de oitava.

Conforme a norma, é recomendável usar transições retas para realização do ensaio, tentando evitar ressonâncias no duto em frente ao objeto de teste. O ensaio deve ser realizado inicialmente com um duto oco, com mesmas dimensões do objeto de teste, para verificação dos níveis sonoros do sistema. Dessa forma, o equipamento de fonte sonora é usado para excitar um campo sonoro em frente ao objeto de teste. A perda por inserção do atenuador é definida a partir da subtração da média dos níveis de pressão sonora, por bandas de terço de oitava, medidos no interior do sistema, sem o atenuador e com o atenuador instalado.

Os ensaios foram realizados em câmaras adjacentes sobrepostas separadas por uma laje de concreto maciço com 13 cm de espessura. As condições durante os ensaios possibilitaram o ruído residual sempre, no mínimo, 10 dB menor que os valores medidos durante os ensaios, conforme indica a norma ISO 7235:2009. Para que a transmissão do ruído ocorresse exclusivamente pela passagem de ar do sistema de dutos e não houvesse desvio de som aéreo pelos flancos, foi feita aplicação do adesivo epóxi entre o primeiro duto do sistema e

a laje, para evitar o vazamento acústico por este meio.

Para os ensaios, a primeira posição do microfone foi definida na posição central ao duto subsequente ao objeto de teste, sendo a posição interior do duto, e a segunda posição foi definida logo após a saída do duto subsequente, sendo a posição exterior ao duto, com a intenção de mensurar o ruído aéreo do meio.

Os ensaios dos níveis de atenuação sonora ocorreram em três etapas distintas, sendo que a fonte emissora permaneceu no mesmo local em todas as etapas. O primeiro ensaio foi realizado com um duto simples, sem material fono-absorvente no seu interior, acoplado entre o duto de ligação e o duto subsequente. Posteriormente o duto oco foi substituído pelo atenuador padrão para repetição do teste. Por fim, foi executado o ensaio com o atenuador proposto posicionado no local onde antes havia sido colocado o duto oco e o atenuador padrão. Sendo assim, os três itens (duto oco, atenuador padrão e atenuador proposto) ocuparam o mesmo posicionamento, cada um em uma das 3 etapas dos ensaios. A Tabela 4 apresenta síntese das etapas deste ensaio.

O duto oco é um duto de livre passagem de fluido internamente, sem interferência por não ter algum material acoplado. O atenuador padrão possui quatro células internas preenchidas com lã de vidro com véu de vidro Iso-sound fabricadas com painel primário, e o atenuador proposto possui as quatro células


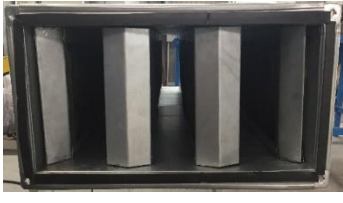

dispostas como o atenuador padrão, fabricadas com retalhos de lã de vidro com véu de vidro Isosound e entre cada uma destas células foi fixado um painel perfurado. A Figura 6 indica como foi realizado o preenchimento das células com retalhos de Isosound.

Os três itens são fabricados com chapa zincada de 0,65 mm de espessura, flanges em ambas as pontas de TDC 32 mm, isolados externamente com manta térmica, dimensões de 60 × 25 cm e comprimento de 131 cm. A Tabela 3 indica a composição dos itens ensaiados para verificação de nível de atenuação, com a imagem da condição do duto em cada etapa.



Figura 6: Vista lateral da célula atenuadora com retalhos de Isosound.

Tabela 4 – Composição das 08 amostras ensaiadas.

Etapa	1	2	3
Saída do duto	Sem atenuador	Atenuador padrão	Atenuador proposto
Composição	Sem material interno	4 células Isosound	4 células retalho Isosound + 3 painéis perfurados
Condição do duto			

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Concluídas as duas fases de testes em laboratório, compilaram-se os dados para que uma análise global dos parâmetros levantados fosse realizada, expondo os dados de absorção sonora das amostras propostas, bem como os níveis de atenuação proporcionados pelo atenuador padrão e pelo atenuador proposto.

4.1 Absorção sonora dos materiais fono-absorventes

Os primeiros ensaios em laboratório foram idealizados com os materiais aplicados atualmente para fabricação de atenuadores acústicos de sistemas de ar-condicionado central. Na Tabela 4 consta a descrição simplificada das amostras ensaiadas em laboratório.

Tabela 4 – Composição das 08 amostras ensaiadas.

Amostra	Composição
01	Lã de vidro padrão Isosound
02	Lã de vidro padrão Isosound + chapa zincada em 50% da área
03	Retalhos de lã de vidro padrão Isosound + TNT
04	Lã de vidro padrão Isosound + painel perfurado em 50% da área
05	Lã de vidro padrão Isosound + painel perfurado em 100% da área
06	Retalhos de lã de vidro fina
07	Lã de vidro Climaver
08	Espuma elastomérica

Conforme exposto no gráfico da Figura 7, as Amostras 01 e 07, com a exposição da face com a lã de vidro, apresentam um comportamento típico de material fibroso, com maior absorção sonora nas médias e altas frequências e pouca absorção nas baixas frequências, caracterizadas nas bandas de 125 Hz e 250 Hz. Pode-se afirmar que a adição de TNT não alterou significativamente as características de absorção do material, sendo verificado o mesmo perfil gráfico para as Amostras 01 e 03. Por outro lado, a adição da chapa zincada em 50% da área da amostra ensaiada reduziu os coeficientes de absorção, representando um bloqueio para a incidência das ondas sonoras no material fibroso. Também foi verificada a redução dos coeficientes com o uso da espu-

ma elastomérica na Amostra 08, com valores que caracterizam o material como de reflexão acústica.

A maior eficiência na absorção dos sons graves foi verificada com o uso de chapas perfuradas nas Amostras 04 e 05, sendo notado um comportamento típico de um ressonador de Helmholtz, conforme comentado por Patrício [2]. Em relação ao uso dos retalhos de lã de vidro na Amostra 06, pode-se afirmar que as características típicas de um material fibroso foram preservadas, mas ocorreu a redução nos coeficientes de absorção para todas as bandas de frequência analisadas, devido a menor espessura e densidade da lã. A comparação das características de absorção sonora por bandas de oitava dos materiais testados pode ser analisada a partir dos resultados da Figura 7.

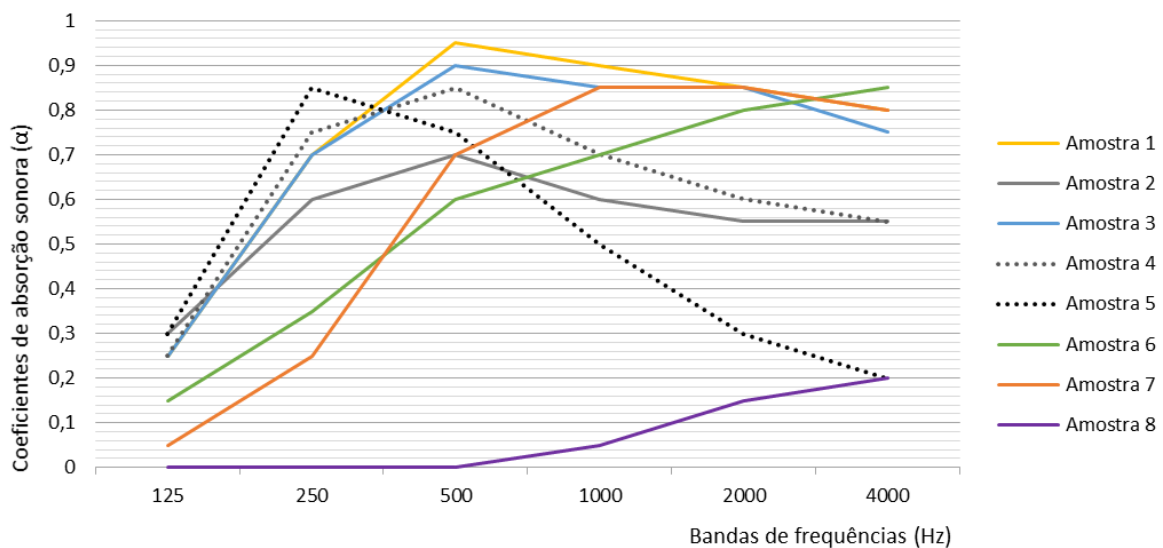


Figura 7: Resultados comparativos dos coeficientes de absorção por bandas de oitava.

Reunindo os dados dos ensaios realizados, apresenta-se a Figura 8, com os coeficientes de absorção sonora ponderados de cada uma das amostras testadas.

Observando-se a Figura 8, fica claro que o material com maior coeficiente de absorção sonora é a lã de vidro com véu de vidro Isosound (Amostra 01), já utilizada atualmente para produção dos silenciadores para sistemas HVAC.

A utilização de retalhos do mesmo material com aplicação de TNT (Amostra 03) é o segundo maior coeficiente, com diferença de 0,05 em relação a Amostra 01.

Já a Amostra 02, que também é utilizada em projetos atuais de atenuadores, apresentou resultados de absorção sonora menores comparados aos outros fibrosos. A concepção da Amostra 04 é inovadora e teve valores mais eficientes

nas baixas frequências, que não são atendidas de forma satisfatória pelo Isosound.

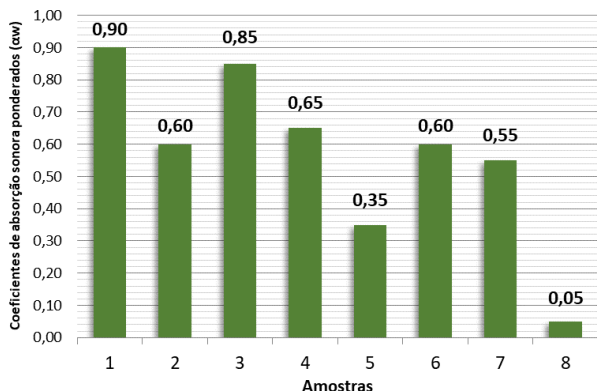


Figura 8: Coeficientes de absorção sonora ponderado das amostras

Explorando-se as informações obtidas com os ensaios, nota-se que a Amostra 01, com lã de vidro padrão Isosound, é o material com maior coeficiente de absorção sonora ponderado. Entretanto a Amostra 03, composta por retalhos de Isosound e adição de TNT, também apresenta um índice de absorção elevado e próximo aos parâmetros do material primário, tornando seu uso um projeto viável e promissor.

Além disso, os coeficientes de absorção apresentados pela Amostra 05 nas baixas frequências são relevantes, uma vez que essas são as frequências não atendidas de forma aceitável atualmente. Sendo assim, entende-se que as composições da Amostra 03 e da Amostra 05 sejam uma alternativa interessante para uso, principalmente no que se refere ao objetivo de reaproveitar os retalhos gerados, além de otimizar os índices de absorção para atendimento nas baixas frequências.

Embora os níveis de pressão sonora em altas frequências sejam mais sentidos pelo ouvido humano, os sons em baixas frequências também podem causar prejuízos e incômodo aos usuários, sendo necessária uma solução para essas frequências. Como citado por meio da revisão bibliográfica, para baixas frequências é indicada a aplicação de ressonadores de Helmholtz no projeto. Dessa forma, foi utilizada a composição da Amostra 5 do ensaio de absorção sonora para o preenchimen-

to das células do atenuador proposto. Sendo assim, as células do atenuador proposto foram construídas com painel perfurado e retalhos de lã de vidro com véu de vidro Isosound.

4.2 Resultados com os atenuadores

Após a definição da composição usada no preenchimento das células do atenuador proposto, os ensaios nos atenuadores acústicos foram idealizados com o intuito de quantificar a perda por inserção por bandas de terço de oitava. Dessa forma, foram executadas as medições das 3 diferentes etapas, conforme indicado na Tabela 4.

As medições realizadas com o duto padrão, podem ser verificadas na Figura 9, sendo os valores referentes ao interior e ao exterior do duto. O maior nível de pressão sonora (NPS) medido no interior do duto, com o atenuador padrão, foi de 102 dB na banda de 125 Hz, e o menor valor foi de 50 dB na banda de frequência de 2.000 Hz. No exterior do duto com o atenuador padrão, foram verificados, comparativamente, valores menores nas baixas frequências, sendo medido 92 dB na banda de 125 Hz, e 50 dB em 1.600 Hz. Pode-se perceber que não ocorreram alterações significativas na componente espectral do som medido dentro e fora do duto, sendo mantidos os maiores valores nas baixas frequências com o decaimento dos níveis sonoros até a banda de 1.600 Hz. A partir desse ponto, ocorre o aumento gradual até a banda de 3.150 Hz.

Os níveis de pressão sonora medidos com o atenuador proposto, com preenchimento de retalhos de Isosound nas células, podem ser verificados na Figura 10. Assim como registrado nas medições com o atenuador padrão, a composição espectral dos sons no exterior e no interior do duto expressaram um som grave, com maiores níveis de pressão sonora nas baixas frequências, decaimento até o início da região das altas frequências, e posterior aumento até a banda de 4.000 Hz. O maior nível de pressão sonora medido no exterior do duto, com o atenuador proposto, foi de 90 dB na banda de 125 Hz, e o menor valor foi de 47 dB na banda de frequência de 2.000 Hz. No interior do duto com o atenuador proposto, foram verificados 101 dB na banda de 125 Hz, e 49 dB em 2.000 Hz.

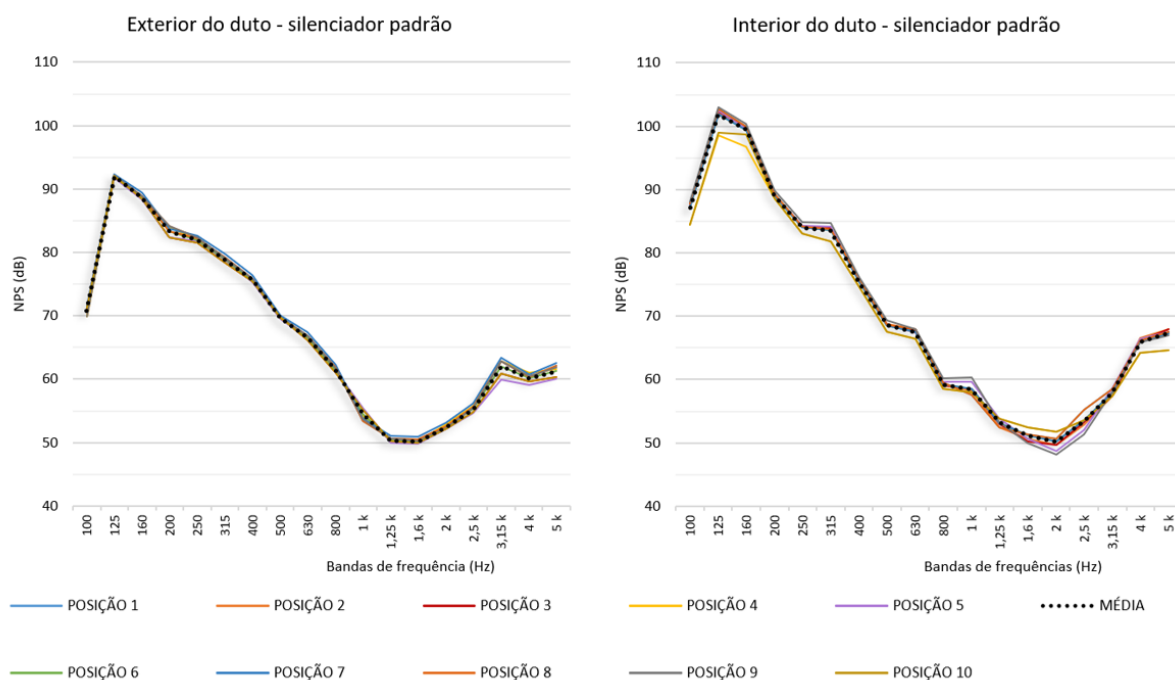


Figura 9: Resultados das medições com o silenciador padrão.

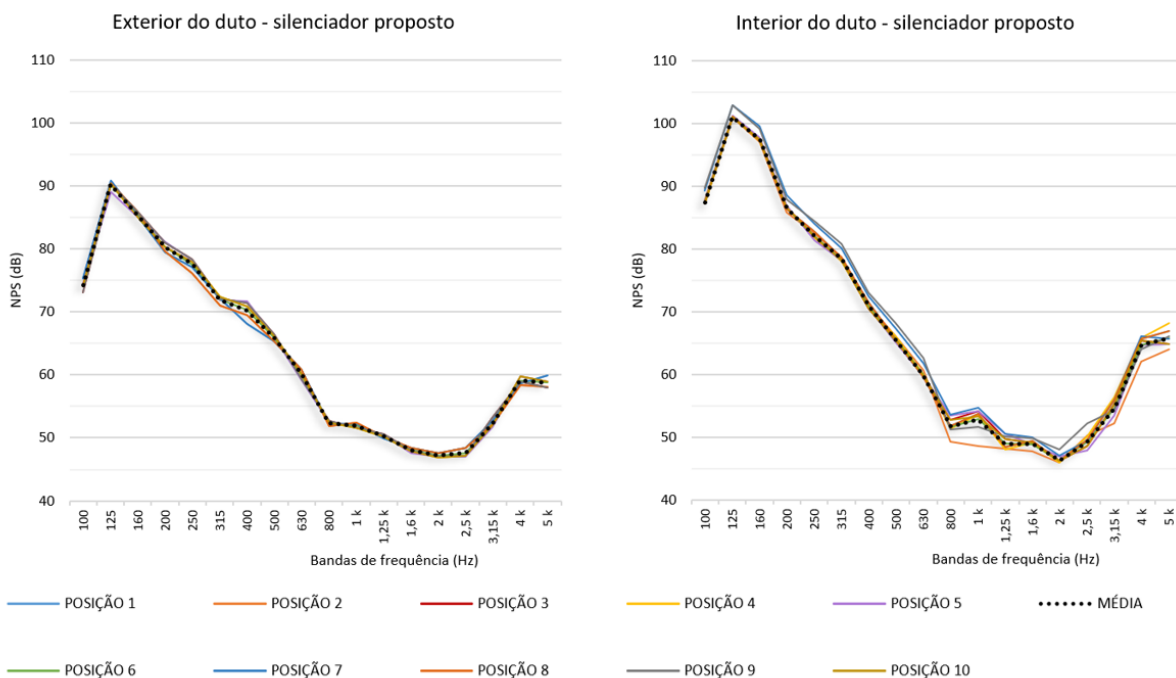


Figura 10: Resultados das medições com o silenciador proposto.

Comparando-se os resultados das Etapas 1, 2 e 3 do ensaio de atenuação sonora, pode-se notar que os níveis de atenuação alcançados com a inserção dos atenuadores é significativa, conforme o gráfico da Figura 11. Os níveis de pressão sonora medidos com o sistema sem atenuador, tanto no exterior quanto no interior do duto, apresentam pouca variação em sua composição espectral, sem decaimento significativo em alguma sequência das bandas de terço de oitava do ensaio.

Com a implantação dos atenuadores acústicos os níveis de pressão sonora foram reduzidos gradualmente a partir da banda de 250 Hz.

Na Figura 11, com as três etapas (1, 2 e 3) e as medições no interior e no exterior do duto, verifica-se a diferença entre cada momento mensurado. Conforme já analisado, os resultados das medições no interior do duto, são maiores em relação aos níveis de pressão sonora registrados no exterior do

duto. Mesmo o ensaio tendo sido realizado em câmara reverberante, os resultados das medições no exterior do duto indicam a elevada eficiência da inserção de um atenuador acústico em sistemas HVAC.

Com a instalação do atenuador proposto, pode-se perceber que a componente espectral do som medido não é alterada significativamente, em relação ao ruído medido com o atenuador padrão. Assim, destaca-se que mesmo com a alteração na estrutura da caixa do atenuador, o conjunto continuou rígido e sem vazamentos de ruído. No entanto, esperavam-se resultados com maior atenuação nas bandas de baixas frequências, já que o atenuador proposto foi projetado com painéis perfurados em sua composição. Entretanto, os resultados com ambos os atenuadores foram semelhantes. O benefício identificado, portanto, é que para a construção do atenuador proposto, foram utilizados materiais fono-absorventes reaproveitados, com garantia de uma atenuação eficiente com este novo atenuador.

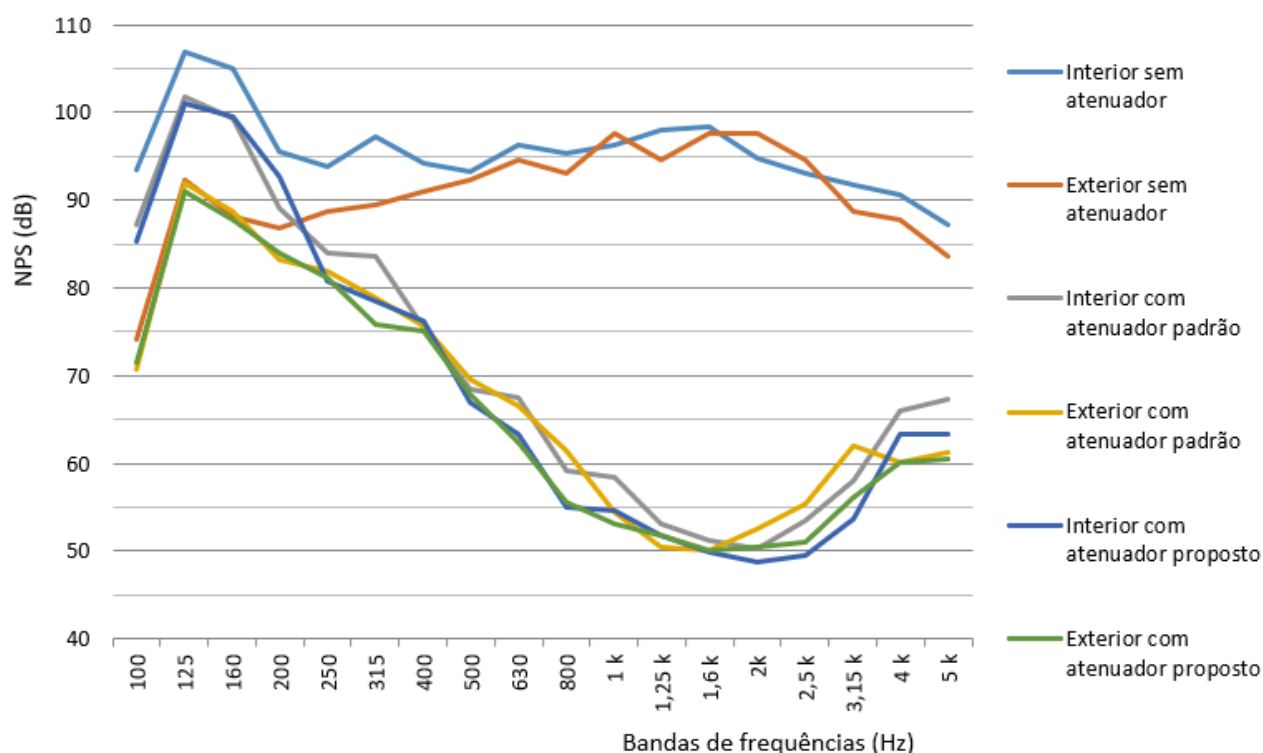


Figura 11: Comparativo entre as etapas 1, 2 e 3 nas duas posições de microfone.

As perdas por inserção do atenuador padrão e do atenuador proposto foram determinadas com a diferença entre os níveis de pressão sonora, por bandas de terço de oitava, medidos no interior do sistema, sem o atenuador e com o atenuador instalado.

Na Tabela 5 são apresentados os resultados das médias das medições no interior do duto para as três situações deste estudo e da perda por inserção dos dois atenuadores.

Tanto no atenuador padrão, quanto no atenuador proposto, as maiores perdas por inserção foram verificadas nas bandas de frequências entre 1.250 Hz e 2.000 Hz (Figura 12), com valores superiores a 44 dB. De modo geral, a atenuação proporcionada pela instalação de um silenciador é variável, sendo indicados valores de até 30 dB em níveis de pressão sonora [8,17]. O comportamento típico dessa atenuação, por bandas de frequências, apresenta maiores valores nas altas frequências,

sendo, essa atenuação maior, quanto menor for a influência de barreira internas para a passagem do ar [20].

Comparando-se as perdas por inserção dos dois atenuadores, podem ser verificadas diferenças positivas, no atenuador proposto, maiores que 3 dB nas bandas entre de 630 Hz, 800 Hz, 1.000 Hz, 2.500 Hz, 3.150 Hz e 5.000 Hz (Tabela 5).

A solução pensada para as bandas de baixa frequência não foi confirmada, mesmo tendo um pequeno ganho de atenuação nestas bandas de frequência, não houve alteração na componente espectral da perda por inserção. Os materiais fono-absorventes reaproveitados apresentaram bons resultados e podem ser classificados como eficientes, assim como o material de primeira produção, sendo viável a reutilização dos retalhos resultantes da produção de atenuadores acústicos.

Tabela 5 – Resultados das medições e da perda por inserção dos atenuadores padrão e proposto.

Bandas de frequência (Hz)	Níveis de pressão sonora (dB)				
	Interior do duto sem o atenuador	Interior do duto com o atenuador padrão	Interior do duto com o atenuador proposto	Perda por inserção com o atenuador padrão	Perda por inserção com o atenuador proposto
100	93,5	87,1	85,3	6,4	8,2
125	106,9	101,9	101,0	5,0	5,9
160	105,0	99,4	99,5	5,6	5,5
200	95,6	89,1	92,7	6,5	2,9
250	93,9	84,0	80,9	9,9	13,1
315	97,2	83,6	78,5	13,7	18,8
400	94,2	75,4	76,3	18,8	17,9
500	93,2	68,5	67,0	24,7	26,2
630	96,3	67,5	63,4	28,7	32,9
800	95,4	59,2	55,0	36,2	40,4
1 k	96,3	58,5	54,7	37,8	41,7
1,25 k	97,9	53,2	51,8	44,7	46,1
1,6 k	98,4	51,2	50,0	47,6	48,4
2 k	94,8	50,2	48,8	44,6	46,0
2,5 k	93,0	53,5	49,6	39,5	43,4
3,15 k	91,8	57,9	53,8	33,9	38,1
4 k	90,6	66,0	63,3	24,6	27,3
5 k	87,2	67,3	63,3	19,9	23,9

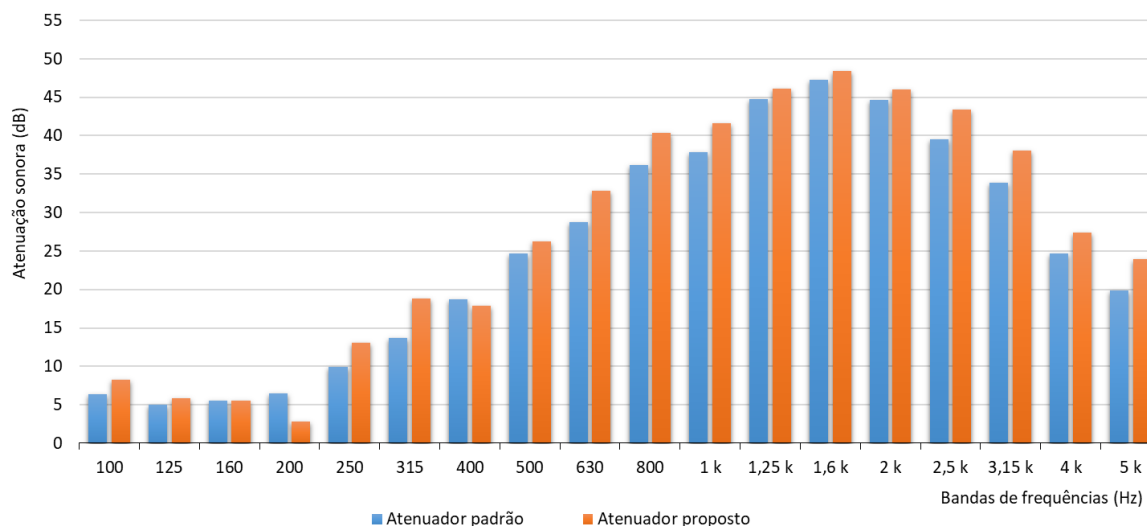


Figura 12: Atenuação sonora por bandas de frequências do atenuador padrão e do atenuador proposto.

Os resultados obtidos nos ensaios com os atenuadores durante este trabalho, indicam que o material fono-absorvente Isosound, utilizado atualmente na produção dos atenuadores acústicos para sistemas HVAC, é o material com maior nível de absorção sonora. Sobretudo, o Isosound pode ser modelado junto a outros materiais de forma a atingir um número maior de faixas sonoras, contemplando não somente as médias e altas frequências, conforme as características deste material, mas também atingindo as faixas de baixa frequência.

O equilíbrio entre materiais que atinjam diferentes bandas de frequência, com a inclusão de materiais tidos como resíduo, traz benefícios para toda a cadeia produtiva de atenuadores acústicos.

5. CONCLUSÕES

O conhecimento adequado é um dos fatores que influenciam no aumento da eficiência na aplicação e especificação de produtos. Entretanto, informações parciais muitas vezes são insuficientes para o gerenciamento diário de uma produção. O objetivo geral deste trabalho foi entender quais as alterações que podem ser aplicadas na fabricação de atenuadores acústicos para sistemas de ar-condicionado central,

com o intuito de incorporar materiais fono-absorventes reaproveitados, já que a logística reversa presente atualmente é dispendiosa.

Através da revisão bibliográfica pode-se concluir que a composição do material fono-absorvente, bem como sua espessura, distância e forma de instalação, influenciam diretamente no coeficiente de absorção sonora. Estes quesitos foram trazidos para a idealização do primeiro ensaio em laboratório realizado, que conferiu o coeficiente de absorção de oito amostras distintas.

As formas de emissão e propagação do som em termos de níveis de pressão sonora e composição espectral de um sistema típico HVAC auxiliaram na elaboração dos ensaios de nível de atenuação sonora pelos silenciadores. Verificou-se que o desempenho de atenuadores acústicos implantados em sistemas de ar-condicionado central é influenciado pela componente espectral do som emitido nas diferentes partes do sistema, bem como pelas formas de instalação e posicionamento desses equipamentos.

Os resultados dos ensaios de absorção sonora indicaram que o material usado nos projetos atuais apresenta o maior coeficiente de absor-

ção, mas não atende as baixas frequências que também estão presentes nos sistemas HVAC, devido ao ruído gerado pelos equipamentos que compõem o conjunto formado por ventiladores. A utilização de retalhos da lã de vidro com véu de vidro Isosound apresentou resultados de absorção muito próximos ao material primário, o que indicou que seu uso é eficiente e pode ser aplicado junto com a camada de TNT sem perder as características acústicas. Assim, o material considerado refugio torna-se matéria prima novamente e o material fono-absorvente é reaproveitado.

Destacaram-se os resultados obtidos com os painéis perfurados, dispostos sobre a lã de vidro com véu de vidro Isosound, que apresentaram um desempenho satisfatório nas bandas de baixas frequências.

Os resultados dos ensaios de perda por inserção indicaram que o atenuador padrão, utilizado atualmente, apresenta resultados que atingem até 48 dB de atenuação, quando implantado no sistema de dutos de ar-condicionado central utilizado neste estudo. Porém, esses níveis de atenuação, assim como os coeficientes de absorção sonora, são maiores nas médias e altas frequências. A instalação do atenuador proposto, composto por materiais fono-absorventes em baixas, médias e altas frequências, com retalhos de lã de vidro com véu de vidro, TNT e painel perfurado, teve resultados semelhantes ao atenuador padrão, alcançando reduções de até 48 dB. Mesmo com a incorporação da solução indicada, para bandas de baixas frequências não se conseguiu resultados expressivos nesta faixa.

Assim, conclui-se que com o uso de materiais fono-absorventes reaproveitados é possível ter coeficientes de absorção muito próximos aos resultados de materiais primários, além de conseguir maiores níveis de atenuação com a agregação de materiais fono-absorventes que atendem diferentes bandas de frequência.

REFERÊNCIAS

1. WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). *Burden of disease from environmental noise*. 2011.
2. PATRÍCIO, JORGE. *Acústica nos edifícios*. 7ª Edição. Engebook. Lisboa, 2018. ISBN: 9789897232626.
3. EGAN, M. David. *Architectural acoustics*. Four Lauderdale, Florida: J Ross Publishing, 2014. ISBN: 9780070191112.
4. BALLOU, G. R. *Handbook for Sound Engineers*. 5ª Edição. Florianópolis: Routledge, 2015. ISBN: 9780415842938.
5. BERLINERLUFT. *Catálogo do site de fabricante de atenuadores acústicos*, 2017. Disponível em: http://www.berlinerluft.com.br/files/file_592739b8b34c0.pdf
6. NBR 16401-1: *Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários – Parte1: Projetos das instalações*. Rio de Janeiro, 2008.
7. INSTITUTE OF NOISE CONTROL ENGINEERING (INCE). *Noise & Vibration Control – Principles and Applications*. Revista da INCE Foundation – Virgínia, EUA, Gráfica Ingemansson, 2000.
8. SÃO LUIZ. *Catálogo do site de fabricantes de atenuadores acústicos*, 2014. Disponível em: <http://www.acusticasaoluiz.com.br/produto/atenuadores-de-ruído/>
9. CAVALHEIRO, Thiago. *Avaliação de atenuadores acústicos dissipativo de dutos de sistemas de ar-condicionado de aeronaves*, 2015. 229f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/169414>

10. BISTAFA, Sylvio R. *Acústica aplicada ao controle do ruído*. 3ª Edição. São Paulo: Blucher, 2018. ISBN: 9788521212836.
11. BERTOLI, S. R.; OITICICA, M. L. G. da R. Contribuição acústica de materiais absorvedores aplicados na parede da edificação de peitoris ventilados fabricados com materiais refletores. In: *XI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído – ENCAC 2011*. Búzios, Brasil.
12. OITICICA, Maria L. G. da R. *Desempenho acústico de diferentes tipologias de peitoris ventilados*, 2010. 240f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo). Programa de Pós-Graduação da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), São Paulo, 2010.
13. BRANDÃO, E. *Acústica de salas: projeto e modelagem*. São Paulo: Blucher, 2016. ISBN: 9788521210078
14. BALLOU, Glen M. *Handbook for sound engineers*. 4ª Edição. Burlington, MA: Elsevier Inc, 2009.
15. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 354: *Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room*. 2003.
16. BRITISH STANDARD INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 7235: *Acoustics – Laboratory measurement procedures for ducted silencers and air-terminal units – Insertion loss, flow noise and total pressure loss*. 2009.
17. BERLINERLUFT. *Catálogo do site de fabricante de atenuadores acústicos*, 2017. Disponível em: http://www.berlinerluft.com.br/files/file_592739b8b34c0.pdf
18. ISOSOUND – *Painel acústico para paredes* <https://www.isover.com.br/isosound-painel-acustico-para-paredes>
19. CLIMAVER – *Lã de vidro para dutos de ar condicionado* - <https://www.isover.com.br/climaver-la-de-vidro-para-dutos-de-ar-condicionado>
20. POHLMANN, Ken C., EVEREST, F. Alton. *Master Handbook of Acoustics*. 7ª Edição. Reino Unido: McGraw-Hill Education, 2021. ISBN: 9781260473599.