

ATENUAÇÃO SONORA PELO MÉTODO PASSIVO DE ABSORVEDOR DE SOM PARA UMA SALA EXPOSTA AO RUÍDO AERONÁUTICO

Élber Elias da Silva, elber.es6@gmail.com¹

Guilherme Cortelini da Rosa, guilherme.rosa@unilasalle.edu.br¹

¹Universidade LaSalle, BR-116-Centro, Canoas-RS, 92010-012

Resumo. Este artigo objetiva a análise do método de atenuação para uma sala exposta ao ruído aeronáutico. O conceito de ergonomia é apresentado e a variável ambiental – ruído – e sua legislação para o ambiente aeroportuário são retratadas. O efeito da exposição ao ruído é mencionado. Os conceitos do som são apresentados. A atenuação natural e métodos de controle de ruído são descritos. Uma metodologia de estudo acústico para a sala da estação meteorológica de superfície é desenvolvida, com base na NBR 12.314. A aquisição dos níveis de pressão sonora é realizada com o auxílio de um aplicativo para smartphone, o NIOSH Sound level meter, que foi desenvolvido pelo National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH) para sistemas iOS. As indicações técnicas para os elementos estruturais são expostas. Os materiais absorvedores de som clássicos são enunciados.

Palavras-chave: Absorvedor de som. Atenuação sonora. Ergonomia. NIOSH Sound level meter. Ruído aeronáutico.

Abstract. This article aims to analyze the attenuation method for a room exposed to aeronautical noise. The concept of ergonomics is presented and the environmental variable – noise – and its legislation for the airport environment are depicted. The effect of exposure to noise is mentioned. Sound concepts are presented. Natural attenuation and noise control methods are described. An acoustic study methodology for the surface weather station room is developed, based on NBR 12.314. The acquisition of sound pressure levels is carried out with the aid of a smartphone application, the NIOSH Sound level meter, which was developed by the National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH) for iOS systems. The technical instructions for the structural elements are explained. The classic sound-absorbing materials are listed.

Keywords: Sound absorbers, Sound attenuation, Ergonomics, NIOSH Sound level meter, Aeronautical noise.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Kassada (2011), “O trabalho tem um papel central na vida do homem, já que é fonte de sustento e uma forma de se sentir útil e elevar sua autoestima podendo chegar à última necessidade humana básica de acordo com Maslow que é a autorrealização.” A fim de que o exercício do trabalho não tenha resultados opostos, trazendo prejuízos ao bem-estar da pessoa, os fatores humanos ou ergonômicos devem ser considerados. Para Pheasant (1991), “Ergonomia é a aplicação de informações científicas relativas a seres humanos ao projeto de objetos, sistemas e ambientes para uso humano.”

Essa disciplina é dividida em ergonias física, cognitiva, organizacional e ambiental. A ergonomia ambiental lida com as variáveis externas e internas ao sistema (iluminação, temperatura, ruído e vibração) e suas implicações no homem durante a execução do trabalho. Segundo Karwowski e Marras (1998), “É aplicado ao design de ambientes humanos para minimizar o estresse ambiental no desempenho humano – incluindo conforto, saúde e segurança – e para aumentar a produtividade.”

Das variáveis ambientais, o ruído é correntemente utilizado nos estudos de ergonomia. Segundo Salvendy (2012), “Som junto com seu subconjunto, ruído, que muitas vezes é definido como som indesejado, é um fenômeno que confronta os profissionais de fatores humanos em muitos ambientes de aplicação.” Quando os limites estabelecidos nas Normas Regulamentadoras, elaboradas pelo Ministério do Trabalho e Emprego, e nas Normas Técnicas, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, não são respeitados, a condição acústica inadequada trará danos à saúde física e mental mas, principalmente, ao sistema auditivo. Segundo Abel (2004), “As duas principais causas da perda auditiva são o envelhecimento e a exposição ao ruído.”

Segundo Escher Boger, *et al.*, 2009, “A Perda Auditiva Induzida por Ruído (PAIR) é uma doença ocupacional, caracterizada pela diminuição gradual da acuidade auditiva decorrente da exposição continuada a níveis intensos de pressão sonora.” Logo, programas de prevenção de perda auditiva, através da realização de exames audiométricos, e correção da condição acústica pelos métodos de atenuação tornam-se importantes para a relação homem-trabalho.

2. DESENVOLVIMENTO

A acústica trata tanto dos fenômenos sonoros, que estão no espectro de frequências audíveis, mas também de infrassons e ultrassons.

2.1. Movimento oscilatório

Segundo Knight (2009), “O movimento oscilatório é um movimento repetitivo de um lado para o outro em torno de uma posição de equilíbrio.” O tempo decorrido do movimento ou um ciclo é o período T cuja relação com a frequência f é definida pela Eq. (1).

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

A unidade de frequência é o Hertz (Hz) ou ciclo por segundo(ciclo/s). As ondas são fenômenos físicos oscilatórios e podem ser classificadas, quanto à natureza, como ondas mecânicas, eletromagnéticas ou materiais. Segundo Tipler e Mosca (2015): “As ondas se propagam através de vários meios, tais como água, ar e terra, e se propagam pelo espaço onde não existe meio de propagação.” As ondas mecânicas são produzidas através da perturbação de um meio e deslocam-se de maneira longitudinal ou transversal. As ondas sonoras são ondas mecânicas longitudinais.

2.2. Onda sonora

Segundo Rossing e Fletcher (2004), “A sensação que chamamos de som é produzida principalmente por variações na pressão do ar que são detectados por seu efeito mecânico no tímpano de nosso sistema auditivo.” As variações de pressão são relativas à pressão atmosférica (equilíbrio). Para Jacobsen (2011), “Ondas sonoras são distúrbios oscilatórios compressionais que se propagam em um fluido.” Segundo Fahy (2001), “O fenômeno do som em um fluido envolve essencialmente mudanças de densidade dependentes do tempo, com a qual estão associadas mudanças de pressão, temperatura e posições das partículas de fluido dependentes do tempo.” O som consiste da rarefação e compressão do ar Fig. 1 e é um processo adiabático.

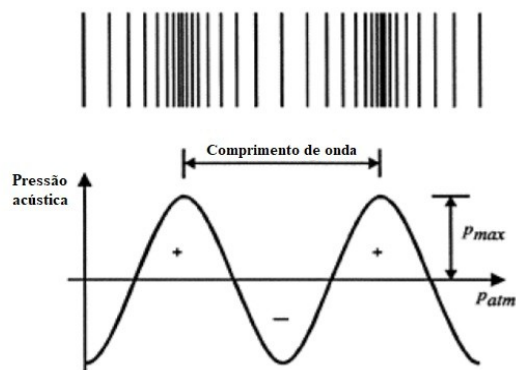


Figura 1. Representação da onda sonora
(Adaptado de Bies e Hansen, 2004)

2.3. Velocidade do som

Segundo Bell (1994), “Em suma, a velocidade de uma onda sonora é quase independente da pressão ambiente, mas depende da raiz quadrada da temperatura absoluta de primeira ordem.” Além da relação com a temperatura, a velocidade do som é diretamente proporcional à umidade relativa do ar. A velocidade do som em um meio gasoso é definida pela Eq. (2).

$$c = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T_0}{M_{mol}}} \quad [\text{m/s}] \quad (2)$$

Onde γ é adimensional e dependente do gás; R , a constante universal do gases; T_0 , a temperatura absoluta em escala Kelvin e M_{mol} , a massa molar do gás.

2.4. Comprimento de onda

Segundo Brüel e Kjør (1978), “O comprimento de onda, λ , é a distância entre dois máximos de pressão sucessivos ou entre mínimos sucessivos em uma onda plana.” O comprimento de onda é definido pela Eq. (3).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [\text{m}] \quad (3)$$

Onde c é a velocidade do som no ar e f , a frequência.

2.5. Pressão sonora

Segundo Möser (2006), “De fato, os humanos podem perceber pressões de som na faixa de $20 \cdot 10^{-6} \text{ N/m}^2$ a aproximadamente 200 N/m^2 , onde o limite superior é o limiar da dor.” O volume é caracterizado pela pressão; o timbre, pela frequência. A pressão sonora é a propriedade física amplamente utilizada na acústica pela facilidade de detecção por microfones.

2.6. Banda de frequência

Dependendo da resolução pretendida para as medições de espectro de frequências, aplicam-se filtros. Segundo Möser (2006), “Esses filtros são circuitos eletrônicos que permitem que uma tensão fornecida passe apenas em uma determinada faixa de frequência.” Na acústica, utilizam-se duas bandas de largura constante – as bandas de oitava e de terceira oitava.

2.7. Níveis de audição

As curvas de níveis de audição Fig. 2 foram construídas com base em testes audiométricos e mostram que para frequências acima de 1 kHz, existe maior sensibilidade na percepção do som; e para valores de frequência inferiores a 1 kHz, menor sensibilidade.

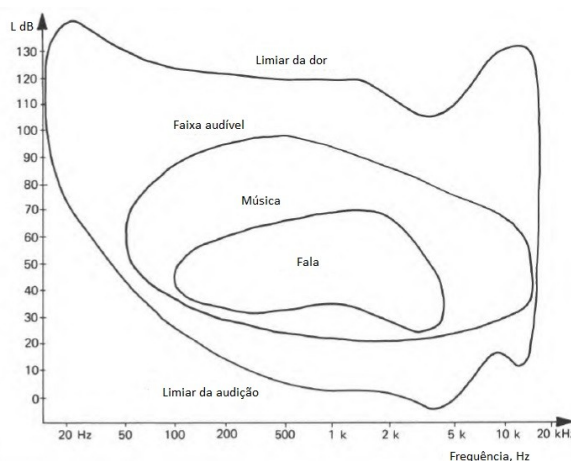


Figura 2. Níveis de audição
(Adaptado de Brüel e Kjør 1978)

2.8. Comportamento do ouvido humano

Com o objetivo de representar os aspectos básicos da sensibilidade do ouvido humano, aplica-se a ponderação A de frequência. Segundo Möser (2006), “As características do filtro A representam aproximadamente o inverso da curva do nível de audição com 30 dB a 1kHz.”

2.9. Nível de pressão sonora

De acordo com Kinsler, *et al.*, 2000, “É comum descrever as pressões e intensidades do som usando escalas logarítmicas conhecidas como níveis de som.” Por praticidade, utiliza-se o nível de pressão sonora com ponderação A (proximidade com o comportamento do ouvido humano) definida pela Eq. (4).

$$L = 10 \log \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 \quad [\text{dB(A)}] \quad (4)$$

Onde p é a flutuação de pressão e p_0 , a pressão atmosférica.

2.10. Fontes de som em uma aeronave

Durante a performance de uma aeronave, o som é gerado na fuselagem e trem de pouso pelo mecanismo denominado força de aceleração ou flutuação no fluido; e no motor, que é o somatório dos ruídos produzidos no ventilador, compressores, câmara de combustão, turbinas e bocal. Quando o gás da combustão proveniente do motor entra em contato com o ar atmosférico, na interface entre os fluidos, há a formação de turbulência que se transforma em energia sonora. Tal mecanismo é chamado de tensão de cisalhamento de fluido flutuante.

2.11. Atenuação sonora

O nível de pressão sonora possui um valor instantâneo e diferente que depende do espaço-tempo em virtude de mecanismos de atenuação natural.

2.11.1. Perda por espalhamento

A perda por espalhamento está relacionada com a forma geométrica da onda sonora e as distâncias de dois pontos distintos de observação da fonte sonora. Segundo Harris (1966), “Esta é a atenuação devido à divergência esférica, que é 6 dB para cada duplicação da distância da fonte, de modo que às vezes é referido como atenuação excessiva.”

2.11.2. Atenuação por absorção atmosférica

É a mais significativa devido a dois meios, a perda clássica e o relaxamento molecular. Conforme Sutherland (2000), “Esses componentes de perda também variam com a temperatura, pressão atmosférica e, o mais importante, com a frequência da onda sonora.” A atenuação por absorção atmosférica é definida pela Eq. (5).

$$A_{abs} = \frac{\alpha r}{100} \quad [\text{dB}] \quad (5)$$

Onde α é o coeficiente de absorção, em dB/m, e r , a distância entre a fonte sonora e o ponto de percepção do som, em m. O coeficiente de absorção é inversamente proporcional à umidade relativa e à temperatura do ar; e diretamente proporcional à frequência.

2.11.3. Atenuação sobre o solo

A atenuação sobre o solo é complexa pela forma geométrica da onda sonora ser esférica e o principal parâmetro na avaliação da influência desse mecanismo de atenuação é a impedância acústica específica. Para Rossing e Fletcher (2004), “Árvores e folhagens adicionam pouco à atenuação em baixas frequências, mas contribuem para a redução da intensidade por espalhamento quando o comprimento de onda do som se torna comparável às dimensões dos troncos ou folhas de árvores, normalmente acima de cerca de 1 kHz.”

2.11.4. Refração

As condições meteorológicas também exercem influência através do vento e da temperatura, podendo criar regiões de sombra onde não há som. Segundo Lamancusa (2009), “Este processo é chamado de refração, em que o caminho das curvas das ondas sonoras seguem na direção da velocidade do som mais baixa.” O mesmo ocorre quando há um gradiente de temperatura, os raios de som seguem na direção da menor temperatura.

2.11.5. Difração

A difração tem como principal mecanismo a turbulência. Segundo Ghinet (2019), “Essas variações aleatórias (refração) ou turbulência afetam a integridade das frentes de ondas acústicas, resultando em flutuações de fase e amplitude, com o aumento da distância de propagação.”

2.12. Métodos de atenuação

Além da atenuação causada por fatores ambientais, existem métodos de controle de ruído os quais possuem duas classificações básicas, os métodos passivos (barreiras sonoras, silenciadores e absorvedores de som) e o método ativo (controle ativo de ruído).

2.12.1. Absorvedores de som

Segundo Bell (1994), “Os materiais absorventes são geralmente resistivos por natureza, sejam fibrosos, porosos ou, em casos bastante especiais, ressonadores reativos.” Cada material possui uma resistividade de fluxo que depende da densidade de fibras e orientação relativa para a onda sonora incidente. Devido à viscosidade do ar, há atrito entre as paredes do material absorvente e o fluxo de ar, que transporta o som, assim transformando energia aerodinâmica em energia térmica. O coeficiente de absorção α descreve a capacidade do material em reter energia sonora.

2.12.1.1. Impedância acústica específica

A impedância acústica específica é obtida experimentalmente com auxílio do tubo impedante. Conforme Bies e Hansen (2003), “É importante para descrever a reflexão e transmissão do som em um revestimento absorvente em um duto ou na parede ou teto de uma sala.”

2.12.1.2. Perda de transmissão e classe de transmissão de som

Segundo Ermann (2015), “A perda de transmissão (TL) quantifica as propriedades de isolamento acústico do ar de um elemento de construção.” Diferentemente da perda de transmissão, que apresenta valores para cada banda de frequência, a classe de transmissão de som (STC) sintetiza em um único valor, facilitando o comparativo entre materiais e configurações. De acordo com Long (2006): “Embora dados de perda de transmissão em bandas de terceira oitava ou oitava completa sejam usados para o cálculo de transmissão de som entre espaços adjacentes, é conveniente ter um único número sistema de classificação para caracterizar as propriedades de um elemento de construção.”

2.12.2. Barreiras sonoras

De acordo com Reynolds (1981), “Barreiras sólidas colocadas no caminho das ondas sonoras que se propagam é um dos métodos mais comuns de controle a transmissão do som de uma área para outra.” Ainda que exista a interposição de um obstáculo, a onda sonora continua sendo percebida no lado protegido pela barreira pelo princípio de Huygens-Fresnel.

2.12.3. Silenciadores

Definido por Möser (2006), “De um modo geral, silenciadores são dispositivos técnicos que atenuam um campo sonoro viajando através deles ao longo de seu caminho de propagação.”

2.12.4. Controle ativo de ruído

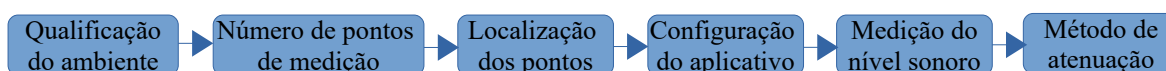
Método desenvolvido e patenteado por Paul Lueg em 1934, trata-se do cancelamento do som indesejado através de uma onda secundária com oposição de fase e sentido. Segundo Möser (2006), “[...] as emissões de energia de ruído podem ser mais ou menos reduzidas colocando duas fontes em fase inversa a uma pequena distância de um outro.”

2.13. Ambiente aeroportuário e sua legislação específica

Tratando-se de ruído aeronáutico, a NBR 12.314:1997 – Critérios de ruídos para recintos internos nas edificações submetidas ao ruído aeronáutico – estabelece o procedimento para um estudo acústico e os níveis sonoros adequados para cada ambiente.

3. Metodologia

O estudo acústico foi desenvolvido com base no fluxograma a seguir:



3.1. Qualificação do ambiente

O ambiente alvo do estudo acústico é a sala da Estação Meteorológica de Superfície – EMS que está na torre de controle Fig. 3 cuja distância para a pista principal é de 400 m. Os valores de nível de pressão sonora com ponderação A estão presentes na NBR 12.314:1997, Tabela 2 – Critérios de ruído ambiente para recintos internos. Para torres de controle, o nível de conforto é 38 dB(A), e o nível aceitável para a finalidade, 48 dB(A).



Figura 3. Vista aérea da localização da torre de controle em relação à pista principal (Google Earth)

3.2. Determinação do número de pontos de medição

A quantidade de pontos para a medição dos níveis sonoros, conforme a NBR 12.314:1997, é obtida pela Eq. (6).

$$N = \sqrt{\frac{S}{8}} \tag{6}$$

Onde N é o número de pontos de medição e S, a área do ambiente, em m². Resultando em um valor fracionário, deve-se arredondar para o valor inteiro imediatamente superior. Aplicando a Eq. (4), para um valor de S=8,79 m², obtém-se dois pontos de medição.

3.3. Localização dos pontos de medição

A NBR 12.314:1997 versa acerca das distâncias relativas que devem ser respeitadas no posicionamento do instrumento de medição. Em relação às superfícies refletoras, a distância mínima de 1 m é recomendada; para superfícies transmissoras, 1,5 m; e a altura indicada é de 1,2 m à 1,5 m. Pela limitação do espaço físico da sala, os critérios não puderam ser atendidos plenamente, ficando a configuração conforme mostrado na Fig. 4.

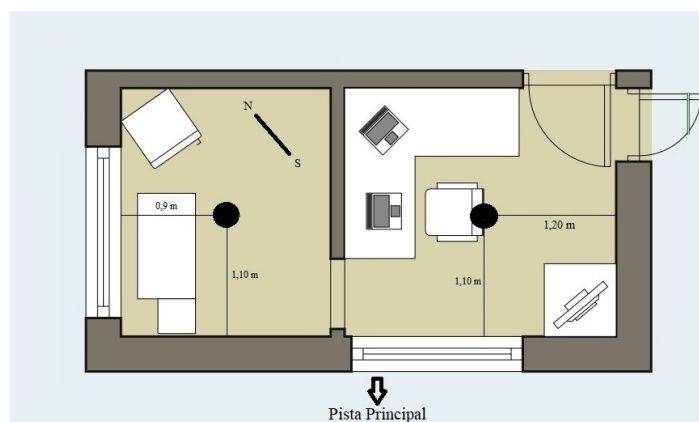


Figura 4. Localização relativa do instrumento de medição para a posição de acesso ao guarda-volumes (esq.) e de operação da estação meteorológica (dir.) (Autoria própria, 2020)

3.4. Configuração do aplicativo

Após dois estudos conduzidos pelo Instituto Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional (NIOSH), *Evaluation of smartphone sound measurement applications* (Kardous e Shaw, 2014) e *Evaluation of smartphone sound measurement applications (apps) using external microphones* (Kardous e Shaw, 2016), os quais foram publicados no *Jornal de Acústica da Sociedade Americana*, revelou-se que o valor de nível sonoro obtido por um *smartphone* pode ser muito próximo do valor obtido por um instrumento de referência, quando utilizado um microfone externo, apresentando uma diferença de ± 1 dB. Visando proporcionar uma ferramenta confiável e de fácil acesso ao indivíduo que esteja em exposição ao ruído excessivo, a NIOSH, em parceria com a EA LAB, desenvolveu um aplicativo para *smartphone*, o *NIOSH Sound level meter*, disponível para sistemas iOS. O *app* vem sendo submetido à avaliações, como em *Smartphone-based sound level measurement apps: Evaluation of compliance with international sound level meter standards* (Celestina, Hrovat, Kardous, 2018), a fim de atender as exigências da *IEC 61672/ANSI S1.4 standard: Sound Level Meters – Part 3: Periodic Tests*, para medidores Tipo 2. Além desses trabalhos citados, tem-se *So how accurate are these smartphone sound measurement apps?* (Kardous e Shaw, 2014); *Improving the accuracy of smart devices to measure noise exposure* (Roberts, Neitzel, e Kardous, 2016) e *New NIOSH Sound Level Meter App* (Kardous e Celestina, 2017).

As configurações disponíveis seguem os padrões estabelecidos tanto pela Administração de Segurança e Saúde Ocupacional (OSHA) como também pelo Instituto Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional (NIOSH). Os parâmetros adotados foram de acordo com a NIOSH cujo limite de exposição recomendada (REL) é 85 dB(A) com base no nível limite de 80 dB(A), utilizando uma taxa de câmbio de 3 dB. Segundo a NBR 12.314 (1997), “As medições devem ser efetuadas utilizando-se o circuito da resposta rápida (fast) do instrumento.” e os níveis de pressão sonora ponderada A. Buscando uma proximidade com situações reais nas quais o indivíduo que esteja exposto ao ruído ocupacional queira medi-lo, utilizando apenas o aparelho celular, sem estar de posse de um microfone externo e um calibrador, o microfone utilizado foi o interno. O *smartphone* utilizado foi um iPhone SE (2016).

3.5. Medição do nível sonoro

As verificações dos níveis sonoros foram realizadas nos dois ambientes definidos e tiveram duração média de 25 min. O *smartphone* foi fixado em um tripé, mantendo inclinação de 40°, microfones internos direcionados para a fonte de ruído e evitando contato com o conjunto para não interferir nos valores da medição.

3.6. Método de atenuação

Posterior a quantificação dos níveis sonoros no ambiente analisado, a proposição do método de atenuação mais adequado será realizada, considerando as características do ruído, objetivando a adequação dos níveis sonoros obtidos com as normas específicas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O ruído a que está exposta a sala alvo da análise é descontínuo por haver uma diferença entre os valores mínimo e máximo de nível de pressão sonora superior a 6 dB(A). Segundo NBR 12.314 (1997), “[...] se o ruído for descontínuo, utiliza-se o valor do L_{eq} no período de tempo considerado.” Os valores coletados foram inseridos em gráficos Fig. 5 em cujo eixo das ordenadas está o nível sonoro e das abscissas, a fonte de som (aeronave), e são representativos do nível de pressão sonora durante os procedimentos de decolagem, pouso e arremetida das aeronaves. A aeronave F-5EM é equipada com turbojato; KC-130M, C-130M e P-95BM, com turbohélices.

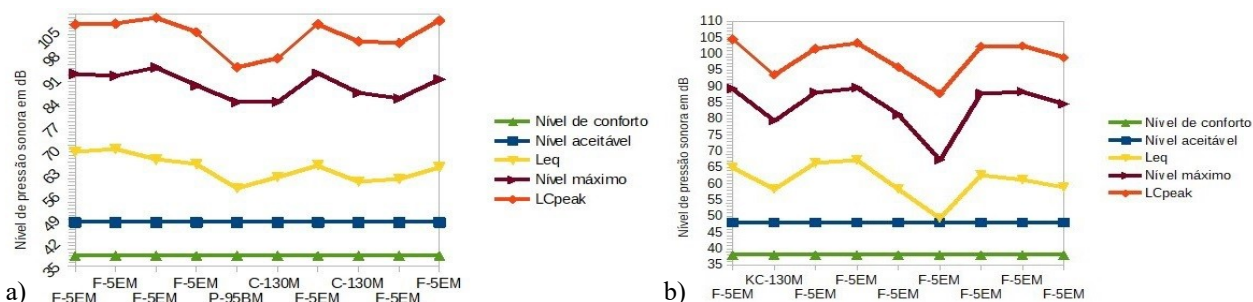


Figura 5. Níveis sonoros obtidos na posição de operação da estação meteorológica (a) e acesso ao guarda-volumes (b) (Autoria própria, 2020)

Os resultados de nível de pressão sonora equivalente (L_{eq}) apresentaram que o nível sonoro presente na sala da EMS está acima do indicado pela NBR 12.314:1997, deste modo, reclamando um tratamento acústico. Segundo Kinsler, *et al.*, 2000, “Um objetivo importante do projeto arquitetônico é fornecer isolamento acústico suficiente para evitar que o ruído interfira com o uso designado de um espaço.” De acordo com Bell (1994), “O isolamento acústico trata da privacidade acústica e concentra a atenção no projeto de construção de edifícios para reduzir a transmissão de ruído através das paredes, pisos, tetos, etc.” Recentemente, Lamounier (2008), “A primeira preocupação que existe com qualquer sala é a sua relação com o exterior, do ponto de vista do isolamento.” Entretanto, esse método, geralmente, não garante o conforto acústico.

Segundo Bell (1994), “O som viaja de maneira estrutural através de paredes, pisos e construções de teto ou de maneira aérea por meio de caminhos flanqueadores ao ar livre.” Para Kinsler, *et al.*, 2000, “Os caminhos mais proeminentes são o ruído aéreo fora da sala que coloca a parede comum em vibração, que por sua vez, irradia som para a sala e o ruído originado na vibração de uma estrutura sólida (máquinas, pegadas, etc.) que se propaga ao longo da estrutura e coloca as superfícies da sala em vibração.” A transmissão do som aéreo pode ser atacada através da seleção criteriosa dos elementos construtivos, eliminação das passagens de ar e aplicação de materiais absorventes. Logo, o método passivo de absorvedor de som foi escolhido para o tratamento acústico da sala.

As paredes são elementos construtivos com capacidade de transmissão de energia sonora baixa. Segundo Fernandes (2002), “Quanto mais rígida e densa (pesada) for a superfície, menor será a energia transmitida.” Como descrito por Bell (1994), “A chave para um desempenho ideal está na eliminação de vazamentos acústicos e, portanto, as paredes de alvenaria devem ser vedadas com tinta ou gesso.” Os efeitos provocados na perda de transmissão (TL) por vazamentos podem ser vistos na Fig. 6. O controle de ruído aéreo em pisos e tetos seguem as mesmas considerações feitas para as paredes, quando o ruído é estrutural, o controle torna-se mais difícil. Em dissertação, Lamounier (2008), “Para o revestimento da fachada em locais com índices de até 65 dB(A), janelas e paredes comuns são suficientes para isolar o ruído. Porém, para índices maiores, superiores a 65 dB, deve-se ter uma precaução maior.”

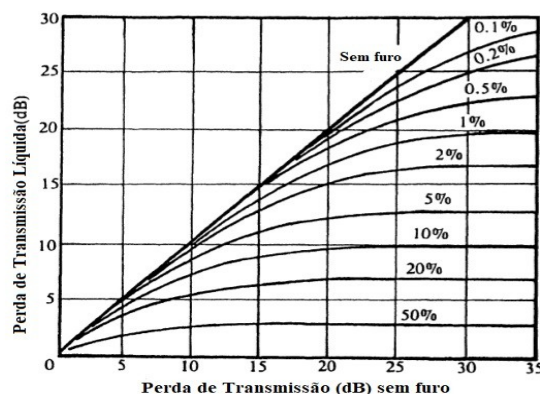


Figura 6. O efeito de um furo na perda de transmissão (Adaptado de Rossing e Fletcher, 2004)

Os elementos móveis, como portas, tem capacidade de transmissão de som significativa pois a vedação obtida pelo seu simples fechamento ainda permite a passagem de ar e, conseqüentemente, do som. Em sua obra, Ermann (2015), “Como regra, se dois espaços compartilham ar, eles compartilham um ambiente acústico comum.” Uma forma de vedação simples, de acordo com Beranek (1996), é “[...] uma junta de borracha extrudada, com 1,27 cm a 2,54 cm de largura. A junta pode funcionar continuamente em torno da porta. A principal desvantagem é que uma soleira elevada é necessária, com a necessidade de uma soleira inclinada em um dos lados dela.” Segundo Bell (1994), “Um método prático de aumentar o desempenho acústico de uma porta é incluir uma ou mais camadas de folha de chumbo nas superfícies internas. Além disso, preencher a cavidade com material absorvente também melhora o desempenho do isolamento.” Para Long, “Outros caminhos de transmissão em portas incluem aberturas com venezianas, soleiras de corte inferior e painéis de visão leves.”

Outro ponto fraco na acústica arquitetônica é a janela. Um dos componentes do conjunto – o vidro – é um grupo de cerâmicas. Segundo Bell (1994), “O vidro deve ser emoldurado hermeticamente em uma montagem resiliente e ser calafetado para garantir a eliminação de vazamentos acústicos.” De acordo com Long, “Se o vidro da janela for instalado em uma moldura operável, pode haver uma degradação significativa no desempenho de perda de transmissão devido ao vazamento de ar através das vedações, bem como direto transmissão através do próprio quadro.” Além da vedação entre a esquadria e o vidro, a utilização de vidros duplos contribuem consideravelmente para o isolamento acústico. Segundo *Joint Departments of the Army and Air Force* (1996), “Um espaço aéreo de 5,08 cm entre painéis de vidro proporcionam melhor redução de ruído. O vidro laminado possui recursos superiores de redução de ruído.” A Figura. 7 mostra a melhora da capacidade de isolamento proporcionada pelo vidro.

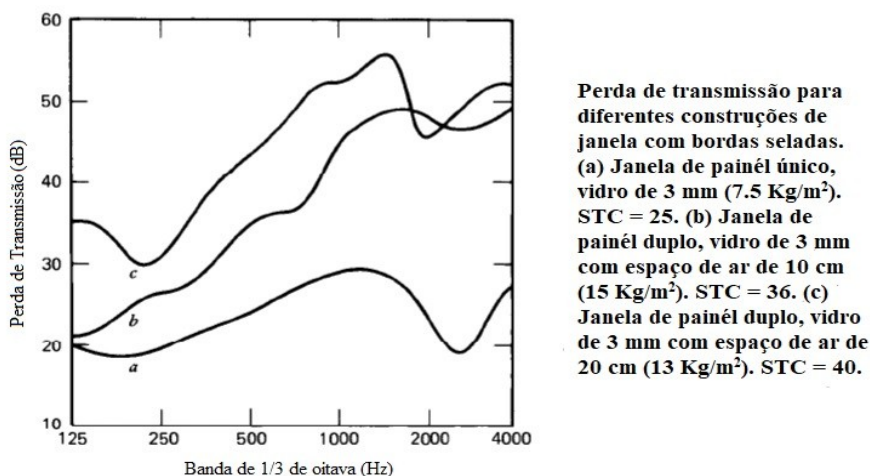


Figura 7. Perda de Transmissão para diferentes configurações de vidros
(Adaptado de Kinsler, 2000)

Os materiais absorvedores de som clássicos são a lã mineral, fibra de vidro, feltro e espuma acústica. Segundo Toole (2008), “Fibra de vidro e lã mineral existem por causa de suas propriedades de isolamento térmico, então eles estão disponíveis em muitas formas de mantas flexíveis a placas rígidas comprimidas de densidades diferentes.” A espuma acústica de poliuretano é comercializada em painéis com superfícies geométricas para aumentar a área de contato com o som, assim gerando maior perda de energia sonora. A Figura 8 mostra a capacidade de absorção da espuma acústica.

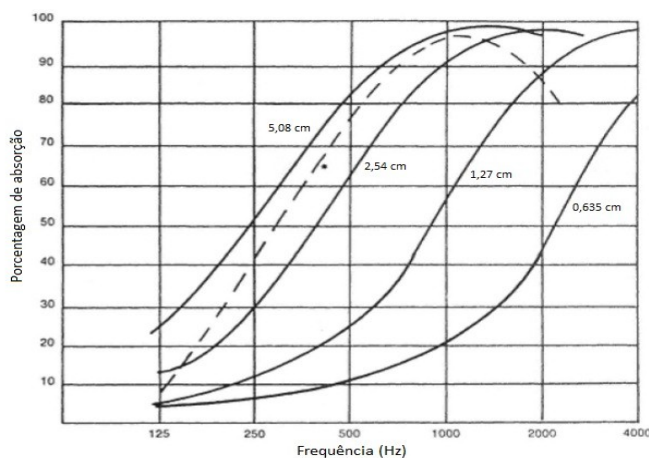


Figura 8. Percentual de absorção para diversas espessuras de espuma, * representa uma espuma de 2,54 cm com filme protetor
(Adaptado de Bell, 1994)

5. CONCLUSÕES

Ante o cenário exposto, o revestimento das paredes e teto com espuma acústica, a substituição dos quadros comuns das janelas e portas por elementos de maior densidade, a duplicação dos vidros com espaçamento entre camadas e a instalação de vedações tanto nas janelas como também nas portas proporcionarão redução do nível sonoro presente no ambiente.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ainda que o projeto inicial da torre de controle não tenha proporcionado um conforto acústico por isolamento, segundo os níveis sonoros obtidos via *smartphone*, a correção do nível de pressão sonora no ambiente é possível com o auxílio de uma análise detalhada e implementação do método passivo de absorvedor de som que melhor corresponda às exigências do ambiente, aliadas às indicações técnicas para cada elemento construtivo.

7. AGRADECIMENTOS

A todos aqueles que contribuíram, de alguma forma, para a realização deste trabalho.

8. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. “ABNT NBR 12.314: Critérios de ruídos para recintos internos nas edificações submetidas ao ruído aeronáutico”. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- Bell, Lewis H. e Bell, Douglas H. *Industrial noise control: fundamentals and applications*. 2. ed. Marcel Dekker, Inc. 1994.
- Beranek, Leo L. *Acoustics*. Acoustical Society of America. 1996.
- Bies, David A. e Hansen, Colen H. *Engineering noise control: theory and practice*. 3. ed. Spon Press. 2003.
- Brüel & Kjør. *Architectural acoustics*. 2. ed. 1978.
- Ermann, Michael. *Architectural Acoustics Illustrated*. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey. 2015.
- Escher Boger, Marlene; BARBOSA-BRANCO, ANADERGH; CANHA OTTONI, Aurea. “A influência do espectro de ruído na prevalência de Perda Auditiva Induzida por Ruído em trabalhadores”. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*, vol. 75, n. 3, p. 328-334, Associação Brasileira de Otorrinolaringologia e Cirurgia Cervico-Facial, Sao Paulo, Brasil, mai./ jun. 2009.
- Fahy, Frank. *Foundations of Engineering Acoustics*. Elsevier Academic Press. 2000.
- Fernandes, João Candido. “Acústica e ruídos”. UNESP – Câmpus de Bauru – Faculdade de Engenharia. 2002.
- Ghinet, Sebastian. *Atmospheric propagation of aircraft acoustic signature from high altitude*. *Inter. noise*. Madrid. 2019.
- Harris, Cyril M. *Absorption of Sound in Air versus Humidity and Temperature*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 40, n. 1, p. 148-159. Department of Electrical Engineering, Columbia University, New York, 1966.
- ICAO. *Environmental Report*. Environmental Unit of the International Civil Aviation Organization (ICAO). 2007.
- Jacobsen, Finn. *An elementary introduction to acoustics*. Acoustic Technology, Department of Electrical Engineering. Technical University of Denmark. 2011.
- Joint Departments of the Army and Air Force. *Noise and Vibration Control*. TM 5-8054/AFJMAN 32-1090 Washington, DC, 1995.
- Long, Marshall. *Architectural Acoustics*. Elsevier Academic Press. 2006.
- Karwowski, Waldemar; Marras, William S. *The occupational ergonomics handbook*. CRC Press. 1998.
- Kassada, Danielle Satie. “Ergonomia: atividades que comprometem a saúde do trabalhador”. VIII EPCC – Encontro Internacional de Produção Científica Cesumar, CESUMAR – Centro Universitário de Maringá, Editora CESUMAR. Maringá. 2011.
- Kinsler, Lawrence E; Frey, Autin R; Coppens, Alan B; SANDERS, James V. *Fundamentals of acoustics*. 4. John Wiley & Sons, Inc. 2000.
- Knight, Randall D. “Física 1: Uma abordagem estratégica”. 2. ed. Bookman. 2009.
- Lamancusa, J. S. *Noise Control: Outdoor Sound Propagation*. Chapter 10. Penn State. 2009.
- Lamounier, Mônica Mesquita. “Critérios para seleção de materiais acústicos utilizados em recintos fechados para diferentes tipologias”. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT, Ouro Preto, 2008.
- Möser, Michael. *Engineering Acoustics – An Introduction to Noise Control*. 2. ed. Springer. 2009.
- NIOSH. *NIOSH Sound Level Meter Application (app) for iOS devices*. National Institute for Occupational Safety and Health. Disponível em: <https://www.cdc.gov/niosh/topics/noise/pdfs/NIOSH-Sound-Level-Meter-Application-app-English.pdf>. Acesso em: 18 out. 2020.
- Pheasant, Stephen. *Ergonomics, work and health*. Palgrave Macmillan. 1991.
- Reynolds, Douglas D. *Engineering Principles of Acoustics: Noise and Vibration Control*. Allyn and Bacon, Inc. 1981.
- Rossing, Thomas D. e Fletcher, Neville H. *Principles of Vibration and Sound*. 2. ed. Springer. 2004.
- Salvendy, Gavriel. *Handbook of Human Factors and Ergonomic*. 4. ed. John Wiley & Sons, INC. 2012.
- Sutherland, L. C. *Overview of outdoor sound propagation*. The 29th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering. Nice, France. 2000.
- Tipler, Paul A. e Mosca, Gene. “Física para cientistas e engenheiros”. 6. ed. LTC. 2015.
- Toole, Floyd. *Sound Reproduction: Loudspeakers and Rooms*. Elsevier Ltd. United States of America. 2008.

9. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.