

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

UM ESTUDO DE CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS PARA ISOLAMENTO
ACÚSTICO DE UMA CAIXA-RECINTO PARA CÃES

por

Ana Carolina Bof

Monografia apresentada ao
Departamento de Engenharia Mecânica da
Escola de Engenharia da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, como parte
dos requisitos para obtenção do diploma de
Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, abril de 2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

CIP - Catalogação na Publicação

Bof, Ana Carolina
UM ESTUDO DE CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS PARA
ISOLAMENTO ACÚSTICO DE UMA CAIXA-RECINTO PARA CÃES /
Ana Carolina Bof. -- 2022.
24 f.
Orientador: Rogério José Marczak.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2022.

1. isolamento sonoro. 2. equação de Helmholtz. 3.
Perda na Transmissão. 4. audição canina. 5. bem-estar.
I. Marczak, Rogério José, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Ana Carolina Bof

UM ESTUDO DE CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS PARA ISOLAMENTO
ACÚSTICO DE UMA CAIXA-RECINTO PARA CÃES

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Mecânica dos Sólidos

Orientador: Rogério José Marczak

Comissão de Avaliação:

Prof./Prof^ª. Rogério José Marczak

Prof./Prof^ª. Juan Pablo Raggio Quintas

Prof./Prof^ª. Ignacio Iturrioz

Porto Alegre, abril de 2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2022

UM ESTUDO DE CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS PARA ISOLAMENTO ACÚSTICO DE
UMA CAIXA-RECINTO PARA CÃES

Bof, Ana Carolina
acbof6@gmail.com

Resumo. *Cães sofrem mais com estímulos sonoros que humanos, já que seu limiar de audição é mais baixo, assim como o limiar de desconforto. Por isso, este trabalho busca elaborar uma metodologia base para o desenvolvimento de uma caixa-recinto para cães com isolamento acústico passivo, sem uso de energia elétrica ou sensores. Para isso, define-se o material que melhor isola as ondas sonoras incidentes, principalmente em baixas frequências, por meio da estimativa teórica da Perda na Transmissão. Também se analisa diversas configurações geométricas e suas respostas a diferentes frequências, buscando maximizar a redução sonora. Esta análise é feita por meio da solução da Equação de Helmholtz pelo Método de Elementos Finitos. Conclui-se, então, que o material mais isolante dentre aqueles analisados é a fibra de vidro em resina de poliéster, e que a geometria hexaédrica plana não é uma boa solução quando se busca isolar uma ampla faixa de frequências, já que a solução ótima para a frequência de 125 Hz mostrou-se antagônica às soluções ótimas para 250 e 500 Hz. Dessa forma, fica evidente que se deve testar e analisar outras configurações geométricas para se elaborar um produto que atenda às necessidades destes animais.*

Palavras-chave: *isolamento sonoro, equação de Helmholtz, Perda na Transmissão, audição canina, bem-estar*

Study of Geometric Configurations in Sound Insulation of a Doghouse

Abstract. *Dogs have a higher sensitivity to noise than humans, having lower thresholds for hearing and discomfort. This work presents a basic methodology for the development of a sound insulated kennel, without any active noise-cancelling method nor sensors. Based on the theoretical estimate of Transmission Loss, the material that best isolates noise is chosen. Several geometric configurations and their responses to different frequencies excitations are also analyzed, in order to maximize noise reduction. That is done by solving the Helmholtz Equation using the Finite Element Method. By comparing the results, it is concluded that the most insulating material is fiberglass in polyester resin, and the flat hexahedral geometry is not a good solution for a wide range of frequencies, since the optimal configuration for a incident frequency of 125 Hz showed to be antagonistic to the optimal solutions for 250 and 500 Hz. Thereby, it is evident that other geometric configurations must be analyzed in order to develop a product that meets the need of these animals.*

Keywords: *sound insulation, Helmholtz equation, Transmission Loss, dog hearing, welfare*

NOMENCLATURA

Símbolos

a	Altura do painel	mm
A	Comprimento do cão	cm
B	Rigidez à flexão	N m
b	Largura do painel	mm
B	Comprimento das patas dianteiras do cão	cm
c	Velocidade do som	m/s
C	Largura de ombros do cão	cm
d	Coefficiente de difusão sonora	
D	Altura do cão (sobre as quatro patas)	cm
E	Módulo de Elasticidade	GPa
F	Fonte sonora dipolo	
f_c	Frequência crítica	Hz
f_r	Frequência de ressonância	Hz
L_p	Nível de pressão sonora	dB
M	Densidade superficial	kg m ⁻²
p	Pressão	Pa
p_{eficaz}	Valor eficaz de pressão	Pa
Q	Fonte sonora monopolo	
R	Coefficiente de redução sonora	
t	Espessura	mm
W	Potência sonora	W
W_i	Potência sonora incidente	W

Símbolos gregos

ρ	Densidade volumétrica	kg m ⁻³
τ	Coefficiente de transmissão sonora	
φ	Ângulo de inclinação das paredes	°
ψ	Ângulo de inclinação do teto	°
ω	Frequência angular	Hz

Abreviaturas e acrômimos

IATA	Associação Internacional de Transportes Aéreos (<i>International Air Transport Association</i>)	
NPS	Nível de Pressão Sonora	dB
NR	Redução sonora (<i>Noise Reduction</i>)	dB
PT	Perda na Transmissão	dB

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. FUNDAMENTAÇÃO	8
2.1. Percepção sonora	8
2.2. Propagação do som	9
2.3. Isolamento acústico	9
2.4. Legislação vigente para transporte aéreo de animais	12
3. METODOLOGIA	13
3.1. Escolha do material	13
3.2. Simulação numérica	14
4. RESULTADOS	18
5. CONCLUSÃO	20
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	21

1. INTRODUÇÃO

Cães possuem um alcance auditivo e espectro de frequências sonoras maiores do que os humanos. Por isso, seus limiares de dor e desconforto são muito mais baixos quando comparados aos nossos. Dessa forma, já que a dor e o desconforto surgem com níveis de pressão sonora (NPS) muito inferiores, ruídos considerados neutros para humanos podem causar danos físicos e psicológicos, momentâneos ou até permanentes, podendo se perpetuar por toda a vida do animal. Fobia, agressividade, compulsão, ansiedade e déficit cognitivo são algumas das consequências observadas em estudos experimentais e retrospectivos (BLACKWELL *et al.*, 2013; CARRIERI-ROCHA *et al.*, 2020). Sabemos que as fontes de ruído são inúmeras, mesmo em ambientes domiciliares, e alguns destes ruídos podem ser extremamente nocivos para alguns cães. Fogos de artifício, buzinas, obras e trovões são alguns exemplos mais corriqueiros que levam a traumas e acidentes, mas existem relatos de cães com medo de vento e carros em função do ruído envolvido.

Fagundes *et al.*, 2018, investigaram os efeitos colaterais da exposição excessiva de cães ao ruído. Foi realizado um experimento com 20 cães divididos em dois grupos: casos clínicos e casos controlados. No primeiro, foram selecionados cães com histórico de dor musculoesquelética, enquanto que, no segundo, os cães selecionados não apresentavam histórico de dor. Ambos os grupos foram submetidos a uma série de ruídos em diferentes NPS, por diferentes períodos, sendo observados antes, durante e após a exposição, e tendo seu comportamento registrado. Nos casos clínicos, 8 dos 10 cães apresentaram tremores e buscaram refúgio. Nos casos controlados, apenas 2 de 10 cães apresentaram os mesmos sintomas. Nove cães do grupo clínico apresentaram sinais de apreensão ou evitação em situações novas, enquanto que no grupo de controle sete tiveram as mesmas dificuldades. Outros sinais de estresse também foram relatados, como transtornos de ansiedade, ansiedade por separação, agressão com crianças, agressão entre cães, ansiedade quando com pessoas (conhecidas ou não), ansiedade quando com outros cães, e comportamento desagradável em viagens de carro. Grigg *et al.*, 2021, fizeram um estudo retrospectivo por meio de entrevistas com tutores e análises de vídeos da resposta de cães a diferentes ruídos cotidianos, e apontaram alguns sinais de estresse corriqueiros, como latidos e uivos, salivação, bocejos, orelhas para trás, escavação, cauda recolhida, entre outros.

Portanto, percebe-se que o ruído tem altíssimo potencial de dano nestes animais, e o comprometimento do bem-estar de forma crônica pode levar a patologias irreversíveis. Atualmente, existem poucos trabalhos tratando deste assunto, e poucos produtos no mercado buscando reduzir esse dano, fato que incentiva ainda mais a autora a investigá-lo e pensar em uma solução como engenheira em formação.

Este trabalho é elaborado com a intenção de desenvolver uma caixa para cães que isole parte do ruído externo, servindo como um refúgio para o animal em situações de estresse, com o objetivo de melhorar o bem-estar e a saúde canina. Para isto, é escolhido o material mais eficiente para isolar ruído com base na Perda na Transmissão, e a geometria que melhor deflete as ondas sonoras incidentes, decidida a partir de um processo de otimização que leva em conta a redução do ruído incidente.

2. FUNDAMENTAÇÃO

A acústica, sendo a ciência do som, aborda diversas áreas de estudo. Bioacústica, psicoacústica, audição e acústica subaquática são alguns dos campos das ciências da saúde; as ondas sísmicas e acústica atmosférica são aspectos abordados na geofísica; e, dentro das Engenharias e Arquitetura, se estuda a acústica arquitetônica, eletroacústica, ultrassons, sons, vibrações e ruídos (BISTAFA, 2011). Isto posto, a acústica é um campo extremamente multidisciplinar, e influencia os seres vivos de diversas formas diferentes. Por isso, o estudo do som, principalmente quando se está falando de conforto acústico, deve levar em conta a percepção do observador. No campo da acústica arquitetônica, que é a base deste trabalho, o foco costuma ser o receptor e como o som pode influenciá-lo. Mais que isso, o foco normalmente está no ruído percebido pelo receptor, como este pode afetá-lo negativamente, e como eliminar ou reduzir os danos gerados, sejam estes físicos ou psicológicos.

2.1. Percepção sonora

De acordo com Bistafa, 2011, no nível fisiológico, a orelha capta as ondas sonoras e as processa, para enviar ao cérebro pelas fibras nervosas auditivas. O cérebro, então, interpreta as informações recebidas, determinando o seu significado e as transformando em sensações psíquicas.

Para avaliar estas sensações em humanos, faz-se uma avaliação audiológica. Nesta, o paciente fica dentro de uma cabine acústica, de forma que não seja afetado por nenhum som externo, utilizando fones de ouvido específicos para receber o estímulo sonoro. O avaliador sempre tem contato visual com o paciente, e toca diferentes tons em diferentes NPS. O paciente deve avisar quando escutar o som. Esta avaliação gera uma curva audiométrica, parecida com as curvas de Fletcher-Munson, adaptadas atualmente para as curvas de mesmo nível de audibilidade da ISO 226 (*Acoustics - Normal equal-loudness-level contours*), mostradas na Figura 1. Estas curvas mostram qual o nível de audibilidade humana para estímulos sonoros em diferentes frequências.

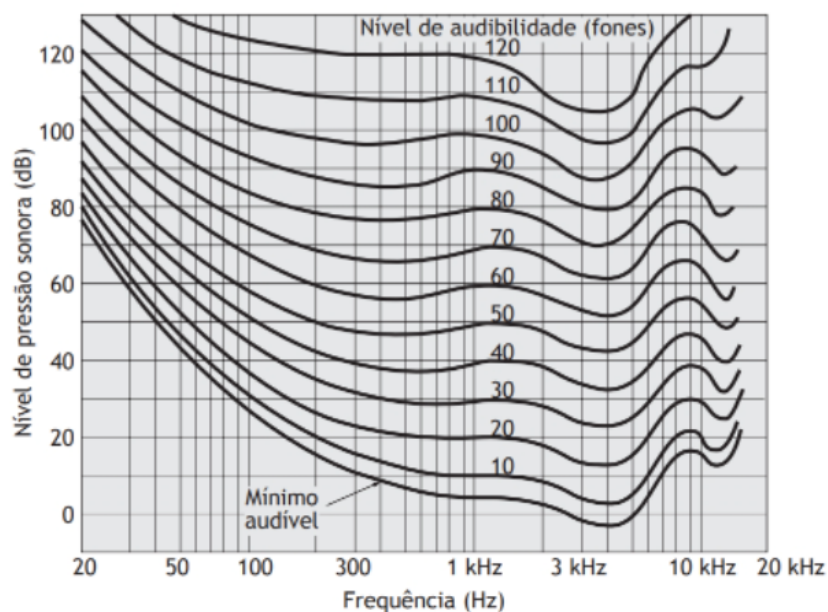


Figura 1 - Curvas de mesmo nível de audibilidade para seres humanos. Fonte: Bistafa, 2011.

Para fazer a avaliação de audibilidade em animais, entretanto, deve-se ter uma abordagem diferente, já que não é possível pedir que avisem quando escutarem o som. Segundo Barber *et al.*, 2020, pode-se determinar a faixa de audição de animais a partir da observação e estudo de respostas comportamentais aos estímulos sonoros, sejam elas condicionadas ou não, ou medindo as respostas fisiológicas, a partir de testes de potencial auditivo de tronco encefálico (PEATE). No entanto, quando se tratando de testes comportamentais, Heffner e Heffner, 2007, definem o limiar auditivo de um animal como a intensidade sonora que o animal detecta em 50% das vezes. Desta forma, sabe-se que as medições comportamentais ou fisiológicas de animais são apenas aproximações. Ainda assim, neste mesmo estudo, Heffner e Heffner fazem um levantamento do espectro de frequências audíveis para diversos animais, e encontram que, para cães, este espectro pode ir de 64 Hz a 48 kHz, enquanto que, para humanos, ele vai de 20 Hz a 20 kHz, aproximadamente.

2.2. Propagação do som

A propagação do som no domínio da frequência é descrita pela equação diferencial parcial de Helmholtz:

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho}(\nabla p(X) + F) \right) - \frac{\omega^2}{\rho c^2} p(X) = Q \quad (1)$$

aqui escrita em sua forma não-homogênea, onde ρ é a densidade do meio, ω é a frequência angular, c é a velocidade do som e F e Q são fontes monopolo e dipolo, respectivamente. Aqui, o interesse é encontrar o campo de pressão sonora $p(X)$ gerado por estas fontes.

Segundo Bistafa, 2011, o nível de pressão sonora (L_p) para uma onda sonora esférica progressiva, ou seja, uma onda sonora gerada por uma esfera pulsante sem superfícies refletoras em sua volta, pode ser definido em função da pressão sonora da onda (p_{eficaz}) e de uma pressão de referência (p_0), normalmente definida pelo limiar da audição (2×10^{-5} Pa). Neste caso, o nível de pressão sonora é calculado por:

$$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{p_{eficaz}}{p_0} \right) \quad (2)$$

No caso de uma onda esférica progressiva, ainda pode-se definir a potência sonora (W) gerada por uma esfera pulsante de raio r a partir de:

$$W = \frac{p_{eficaz}^2}{\rho c} \cdot 4\pi r^2 \quad (3)$$

2.3. Isolamento acústico

Quando uma onda sonora passa por uma barreira, uma parte de sua energia é refletida, outra é transmitida através da barreira, e outra é dissipada pela barreira, conforme mostra a Figura 2.

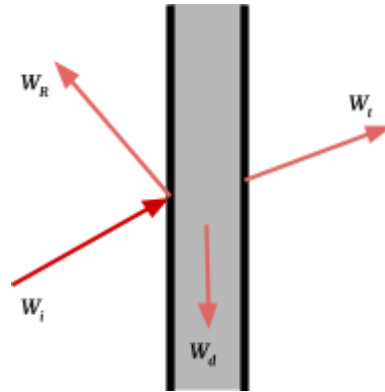


Figura 2 - Parcelas da potência sonora passando por uma barreira. Fonte: elaborado pelo autor.

Estas três parcelas são representadas pelos coeficientes de reflexão (R), difusão (d) e transmissão (τ), respectivamente. Assim, a potência sonora incidente W_i (ou a energia sonora gerada na unidade de tempo) pode ser descrita como (BISTAFA, 2011):

$$W_i = R \cdot W_i + d \cdot W_i + \tau \cdot W_i \quad (4)$$

ou, de forma equivalente

$$1 = R + d + \tau \quad (5)$$

Dessa forma, para aumentarmos o isolamento acústico de uma parede, devemos minimizar a parcela da energia que é transmitida e conseqüentemente, seu coeficiente de transmissão. No entanto, quando lidamos com a isolação sonora de uma parede, o parâmetro utilizado é uma grandeza que deriva de τ , chamada de Perda na Transmissão Sonora (PT), dada por:

$$PT = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{\tau} \right) \quad (6)$$

O método para encontrar a estimativa teórica deste parâmetro é baseado naquele descrito por Bistafa, 2011. Assim, considera-se um modelo idealizado, com um painel sólido e homogêneo, em formato de paralelepípedo reto, simplesmente apoiado nos quatro cantos, definido por suas dimensões geométricas, rigidez à flexão (B), e densidade superficial (M), como mostra a Figura 3.

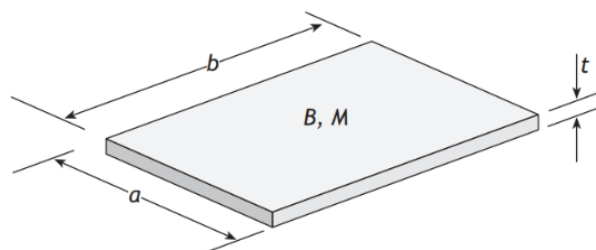


Figura 3 - Painel idealizado, de dimensões a , b e t , com rigidez à flexão B e densidade superficial M . Fonte: Bistafa, 2011.

Os cálculos da rigidez à flexão do painel são baseados na teoria clássica de placas finas, e esta é calculada como

$$B = \frac{E \cdot t^3}{12} \quad (7)$$

onde E é o módulo de elasticidade do material do painel, e t é a espessura do painel. A densidade superficial é

$$M = \rho \cdot t \quad (8)$$

onde ρ é a densidade do material do painel.

Ainda, a estimativa da perda na transmissão deve levar em conta a frequência do som incidente (f), e as frequências crítica (f_c) e de ressonância (f_r) do painel, dadas em Hz. Esses parâmetros são essenciais para se determinar qual a propriedade do painel com maior contribuição para a perda na transmissão, dentre a ressonância, a massa e a coincidência. A Figura 4 ilustra bem as regiões de controle, e mostra que, para baixas frequências, o isolamento é sempre menor.

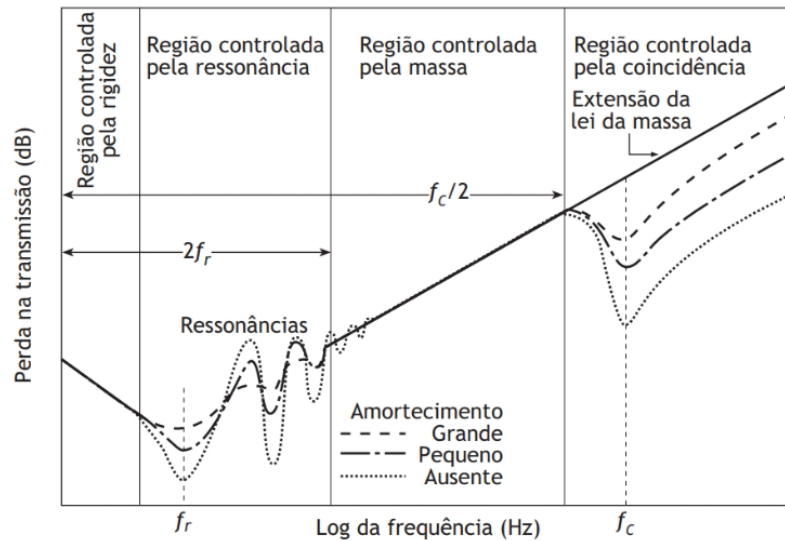


Figura 4 - Curva típica de perda na transmissão em função da frequência do som incidente para painéis sólidos e homogêneos. Fonte: Bistafa, 2011.

Os limites de cada região são definidos em função da primeira frequência de ressonância, definida para um painel simplesmente apoiado por (BISTAFA, 2011):

$$f_r = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{B}{M}} \cdot \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right) \quad (9)$$

e a frequência crítica é calculada por:

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{M}{B}} \quad (10)$$

Para um painel engastado nas bordas, f_c será igual ao dobro daquela obtida pela Eq.(9).

Isto posto, para ondas sonoras incidentes de baixas frequências, o melhor para controlar o ruído é reduzir a frequência de ressonância, de forma a reduzir a região controlada pela ressonância do painel. A partir de $2f_c$, a PT mostra que quanto maior a massa do material, mais isolante é o painel, e é dada pela Lei da Massa:

$$PT = 20 \cdot \log_{10}(f \cdot M) - 47 \quad (11)$$

Finalmente, para altas frequências, deve-se reduzir a rigidez à flexão do painel, de forma a aumentar a frequência crítica, e reduzir a região controlada pela coincidência.

É importante ressaltar que estas equações são aplicadas apenas para o caso de painéis simplesmente apoiados, que não é o caso deste trabalho. No entanto, ao fazer uma comparação entre diferentes materiais, estes parâmetros são aplicáveis, uma vez que não se está preocupado em chegar em um valor específico de perda na transmissão, e sim maximizar este valor pela escolha do material e sua espessura.

Além do isolamento por aumento da massa, também pode-se utilizar paredes duplas, que necessitam de menos massa para produzir o mesmo isolamento, mas devem ser construídas de forma que os dois painéis da parede sejam isolados um do outro (BIES; HANSEN, 2003). Bistafa, 2011, faz uma análise da perda na transmissão em paredes duplas para diversos tipos de fixação entre os painéis, mas este assunto não será abordado aqui, por não ser essa a estratégia utilizada neste trabalho.

2.4. Legislação vigente para transporte aéreo de animais

Como não há regulamentação para tamanhos de “casas” para cães, este estudo utiliza as dimensões de caixas de transporte aéreo mínimas propostas pela Associação Internacional de Transportes Aéreos (IATA), 2022, conforme mostra a Figura 5.

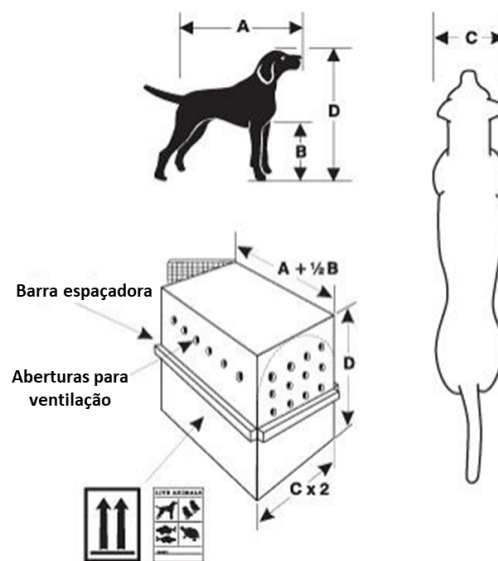


Figura 5 - Dimensões mínimas de caixas de transporte aéreo para cães. Fonte: IATA, 2022.

Esta configuração foi pensada para que o cão consiga sentar, deitar, ficar de pé e dar uma volta em si mesmo dentro da caixa, garantindo o conforto em longas viagens.

3. METODOLOGIA

Nesta seção será descrita a metodologia empregada para o desenvolvimento de um recinto com isolamento acústico para cães. Este estudo é feito em duas partes, começando pela definição do material, a partir da estimativa teórica da Perda na Transmissão, conforme o procedimento descrito na seção 2.3. A segunda parte consiste em realizar uma otimização paramétrica da geometria do recinto, tendo os ângulos das paredes e teto como variáveis de projeto, e resolvendo a Equação de Helmholtz através do Método de Elementos Finitos, utilizando um software comercial (ANSYS, 2022).

3.1. Escolha do material

Para definir o material, a primeira análise a ser feita é a decisão da faixa de frequências a ser isolada. Para isso, é feita a medição aproximada do espectro sonoro gerado em um dia de chuva, com carros passando na rua (Fig. 6). Para obter o espectro, foi utilizado o aplicativo para celular Spectroid, desenvolvido por Carl Reinke.

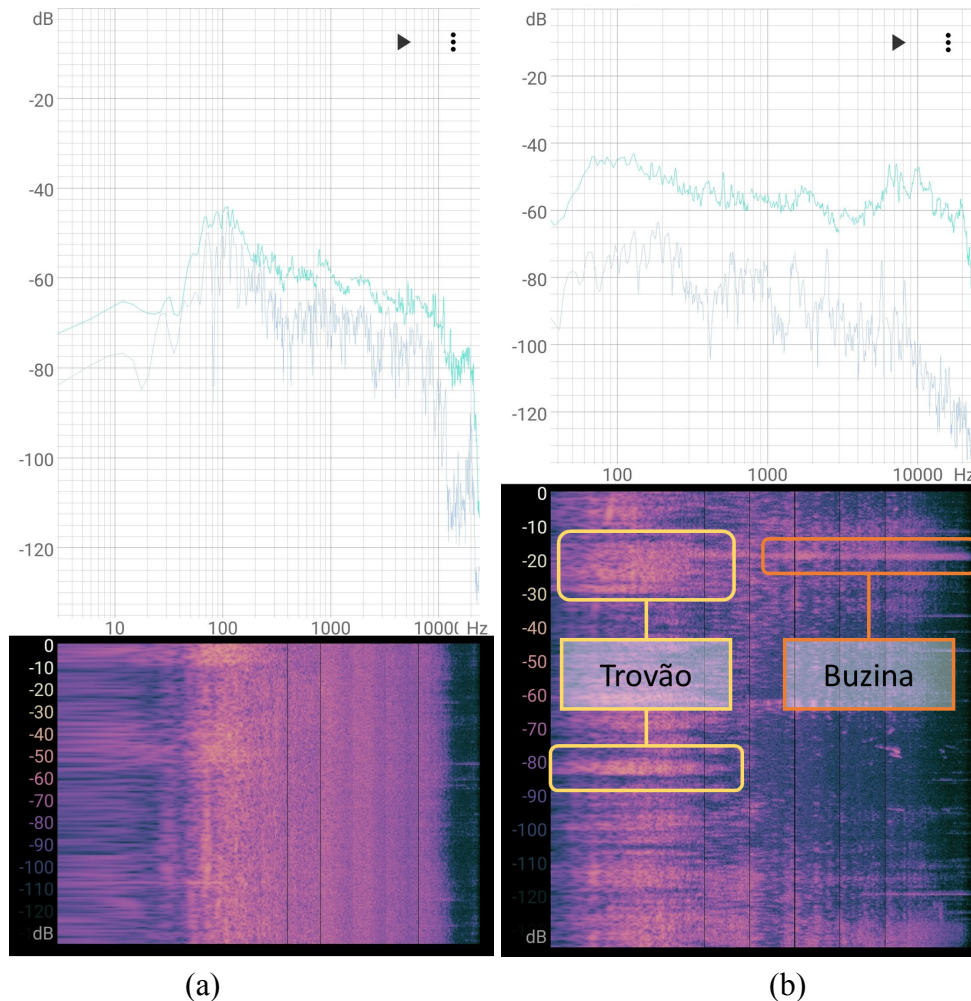


Figura 6 - Espectro de frequências (a) sem trovões e (b) com trovões e buzina. Fonte: elaborado pelo autor.

Assim, o estudo aqui proposto é direcionado para isolamento de baixas a médias frequências (100 a 500 Hz), por ser esta a faixa mais presente nos ruídos do dia-a-dia, e também em tempestades, momento em que muitos cães são afetados.

A escolha do material da caixa é baseada na comparação da perda na transmissão de um painel de dimensões conforme a Tabela 1, fabricado em cinco materiais: madeira de carvalho, aço comum, poliestireno, fibra de vidro em resina de poliéster e fibra de vidro em resina epoxy, priorizando o isolamento em baixas frequências. O módulo de elasticidade e a densidade de cada um destes materiais foram retirados de diversas fontes (ANSYS, 2022; ENGINEERING TOOLBOX, 2005 e 2009), e são mostrados na Tabela 2. Destes materiais, o poliestireno é conhecido como isopor, quando em sua forma expandida. As resinas de poliéster e epoxy são resinas líquidas que endurecem ao serem misturadas com um catalisador. A resina de poliéster é muito utilizada para revestimento de piscinas, enquanto que a epoxy é comumente utilizada para fabricação de objetos decorativos.

Tabela 1 - Dimensões do painel analisado.

Dimensão	Valor
a (cm)	60
b (cm)	80
t (mm)	3

Tabela 2 - Módulo de Elasticidade e densidade dos materiais analisados.

Material	E (GPa)	ρ (kg/m ³)
Madeira de carvalho	22,78	935,7
Aço simples	200,00	7850,0
Poliestireno	3,40	1050,0
Fibra de vidro em poliéster	15,70	2000,0
Fibra de vidro em epoxy	25,00	1900,0

Com estes dados, calcula-se a rigidez à flexão (B) e a densidade superficial (M) pelas Equações (7) e (8), respectivamente. Dessa forma, pode-se calcular as frequências de ressonância (f_r) e crítica (f_c), com as Equações (9) e (10), respectivamente, e se delimitar a região de aplicação da Lei da Massa (Eq. (11)). Finalmente, esta é utilizada para determinar a perda na transmissão deste painel.

A partir de PT , pode-se selecionar o material mais adequado, considerando ainda sua viabilidade de uso e fabricação e o peso do painel.

3.2. Simulação numérica

A definição das dimensões internas mínimas é baseada em um cão da raça Pitbull, com dimensões estimadas conforme o *United Kennel Club UKC*, 2017. As dimensões aproximadas do cão são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 - Dimensões do cão-modelo.

Dimensão	Valor
A (cm)	75
B (cm)	30
C (cm)	40
D (cm)	65

Isto posto, as dimensões internas mínimas da caixa são determinadas conforme a Figura 5, e são mostradas na Tabela 4. Todas as paredes da caixa possuem espessura de 3 mm.

Tabela 4 - Dimensões internas da caixa, baseadas em IATA, 2022.

Dimensão	Valor
Comprimento (cm)	100
Largura (cm)	800
Altura (cm)	800

Então, a partir de um modelo de caixa padrão, em formato hexaédrico (ou “caixa de sapato”) com uma abertura para passagem do cão, de forma a não comprometer a liberdade do mesmo, varia-se o ângulo ψ ($-15^\circ(15^\circ)15^\circ$) do teto e o ângulo φ ($-15^\circ(15^\circ)15^\circ$) de duas paredes opostas, conforme mostrado na Figura 7, sempre respeitando as dimensões mínimas (Tab. 4). Ou seja, a escolha da geometria é baseada em um conjunto discreto de configurações, que podem ser vistas no Apêndice A deste trabalho.

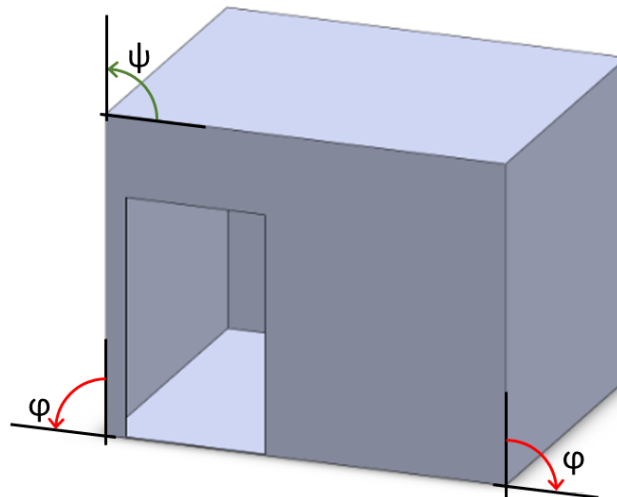


Figura 7 - Ângulos variantes nas configurações de geometria. Fonte: elaborado pelo autor.

As nove configurações são simuladas em um software de elementos finitos que resolve a Equação de Helmholtz (Eq. (1)). Para isso, define-se uma geometria de clausura hexagonal, de dimensões conforme a Tabela 5, definidas a partir dos limites da caixa simulada, onde y é o eixo vertical.

Tabela 5 - Dimensões da clausura.

Dimensão	Valor
-x (m)	3,00
x (m)	0,50
-y (m)	0,01
y (m)	0,50
-z (m)	0,50
z (m)	0,50

A clausura tem seu material definido como ar, e cinco das suas faces são definidas como fronteiras radiantes, de forma a transmitir o som sem perdas. A face inferior, simulando o chão, é definida como uma parede rígida, refletindo o som. A caixa é composta por paredes rígidas, e sua face inferior é engastada. Finalmente, cria-se uma fonte sonora do tipo monopolo, representando uma esfera pulsante, a 3 m do centro da caixa, sendo esta uma esfera pulsante com diâmetro de 10 cm, emitindo som a uma pressão de 2 Pa, de forma a gerar aproximadamente 100 dB, conforme a Equação (2). Dessa forma, a configuração fica como mostra a Figura 8.

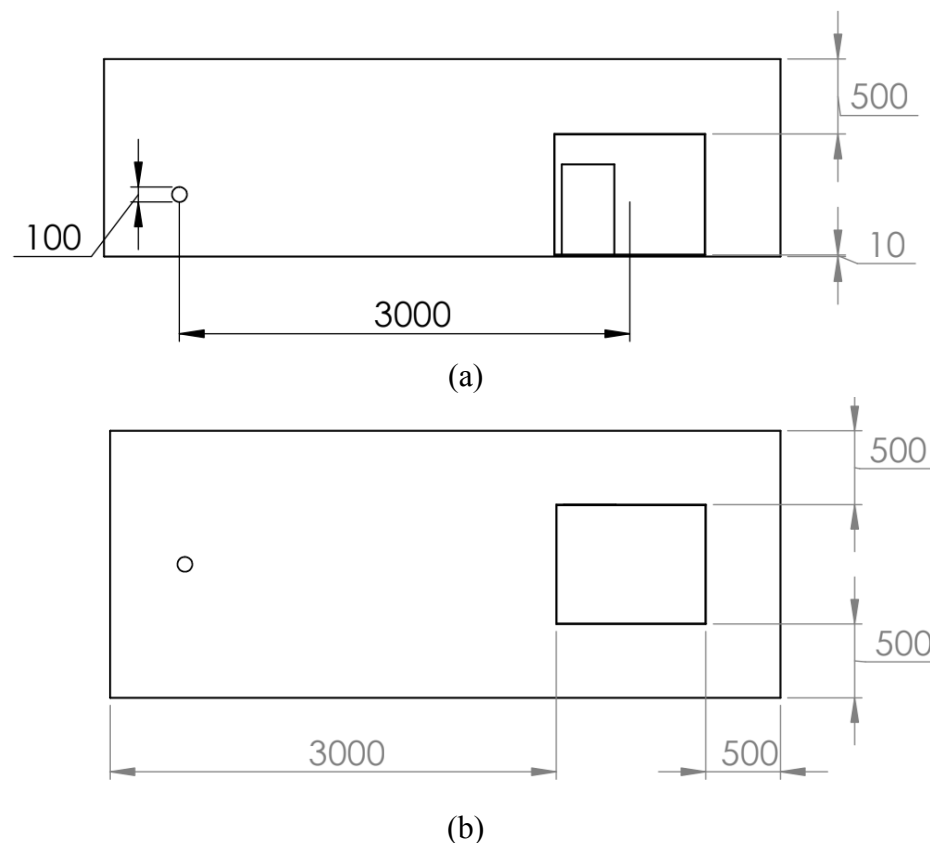


Figura 8 - Configuração para simulação. (a) vista frontal e (b) vista superior. (Dimensões em mm). Fonte: elaborado pelo autor.

A malha do elemento de clausura, onde será calculado o campo de níveis de pressão sonora, tem elementos de 150 mm (Fig. 9), enquanto a malha da caixa, importante para a influência das paredes, é formada por elementos de 100 mm (Fig. 10). Ambas são definidas

pelo método de tetraedros. Outras malhas foram testadas, mas os valores não mudaram significativamente.

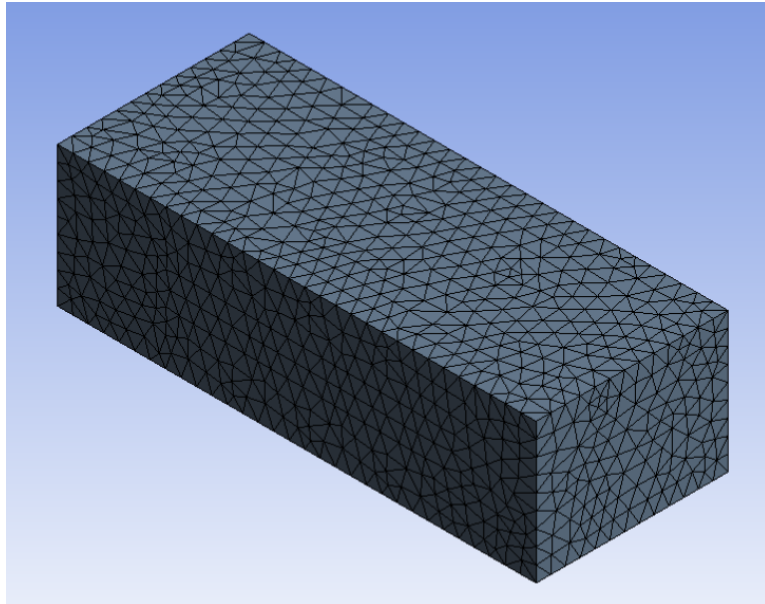


Figura 9 - Malha da geometria de clausura, com elementos tetraédricos de 150 mm. Fonte: elaborado pelo autor.

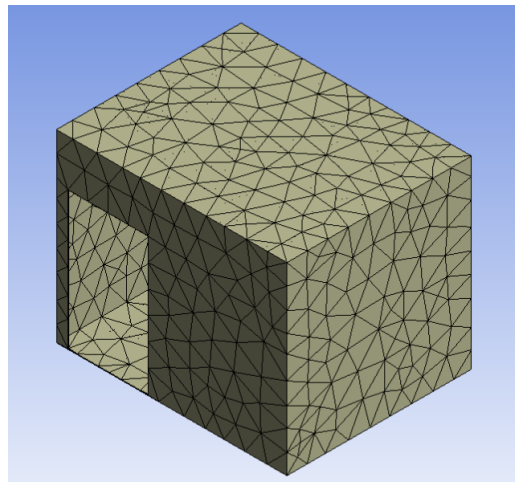


Figura 10 - Malha da caixa, com elementos tetraédricos de 100 mm. Fonte: elaborado pelo autor.

Para definir a geometria ótima, extrai-se o nível de pressão sonora de 6 pontos internos à caixa (Fig. 11), e faz-se uma média logarítmica destes. Então, subtrai-se do NPS gerado pela fonte para encontrar a redução sonora (NR) da caixa. Isso deve ser feito para cada frequência de interesse - neste caso, 125 Hz, 250 Hz e 500 Hz, sendo a mais relevante a de 125 Hz.

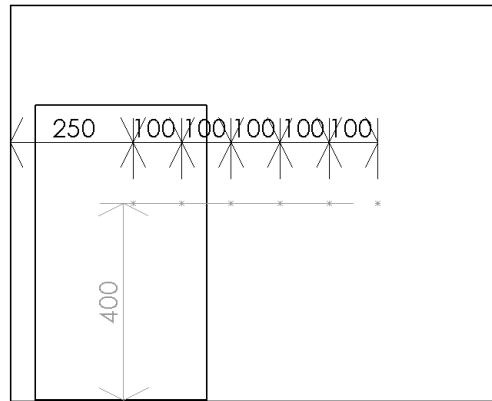


Figura 11 - Pontos de extração de dados. (Dimensões em mm). Fonte: elaborado pelo autor.

4. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados pertinentes ao desenvolvimento do recinto com isolamento acústico para cães. Primeiramente, os valores de Perda na Transmissão calculados para painéis de iguais configurações mas diferentes materiais, de forma a definir o melhor material - dentre aqueles analisados - para garantir um bom isolamento, e posteriormente, os valores de redução sonora encontrados a partir da solução da Equação de Helmholtz para o recinto pronto, definido por paredes rígidas.

A Figura 12, então, mostra a variação da Perda na Transmissão para frequências de 0 a 7 kHz, para painéis simplesmente apoiados de 600 mm de altura por 800 mm de largura e 3 mm de espessura, de diversos materiais. Os valores são apresentados no Apêndice B deste trabalho.

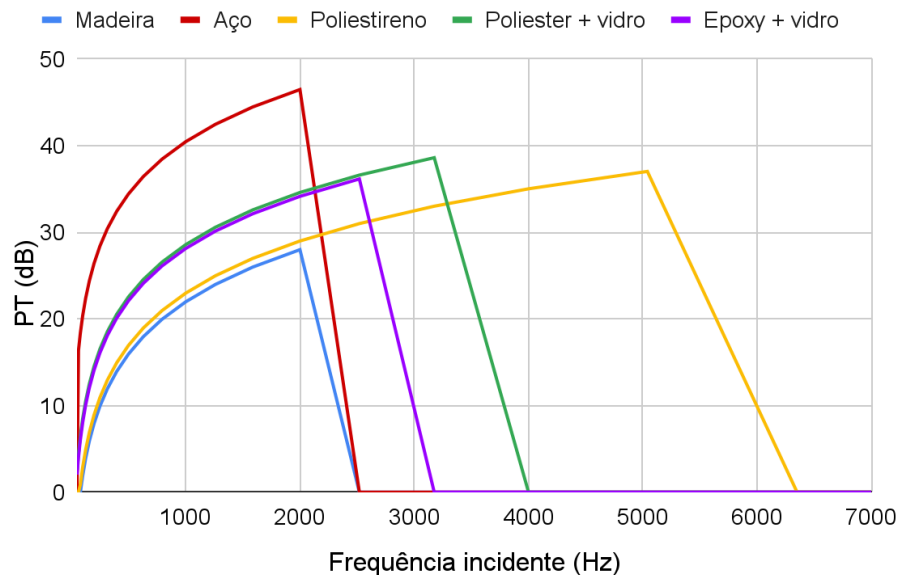
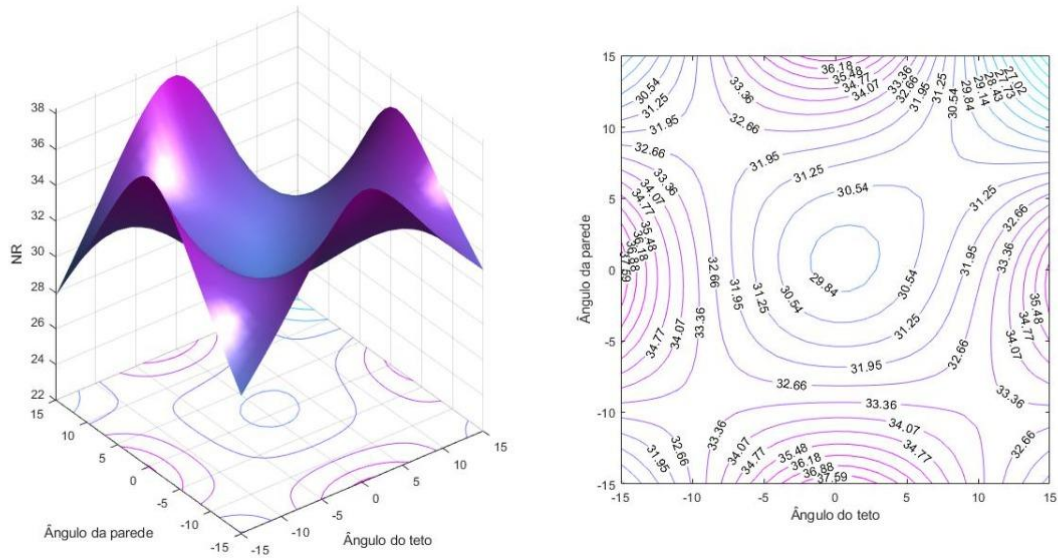


Figura 12 - Perda na Transmissão para um painel simplesmente apoiado de diversos materiais. Fonte: elaborado pelo autor.

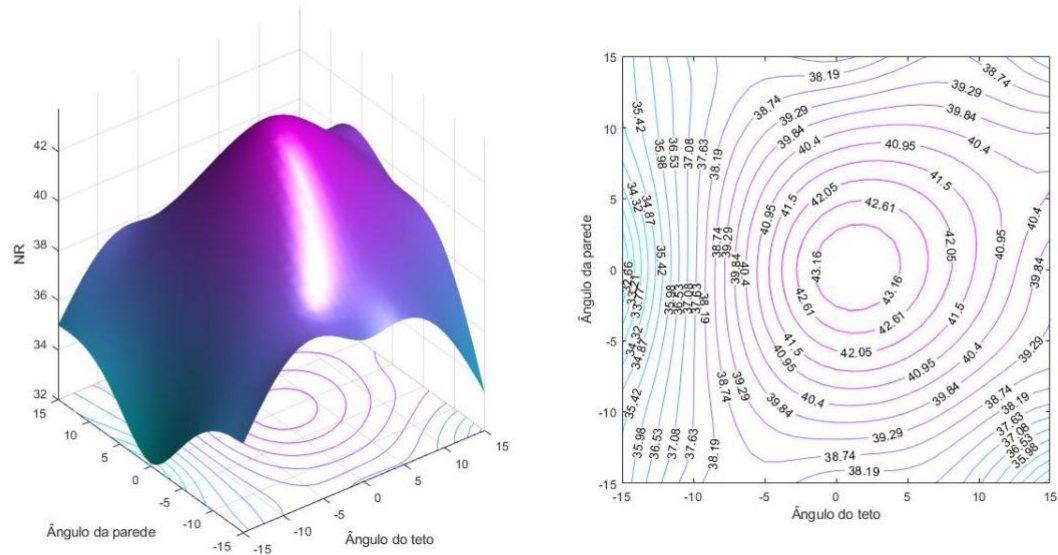
Pelo gráfico, fica evidente que o Aço é o material que melhor isola o som em baixas e médias frequências, o que é esperado, visto que é o material mais denso. No entanto, um

painel de aço com as dimensões dadas possui uma massa de 22,6 kg, um valor proibitivamente alto. Por isso, este material será descartado das possibilidades. O segundo material mais eficiente é a fibra de vidro com resina de poliéster, muito próximo da fibra de vidro em resina epoxy (a diferença da PT entre os dois é de menos de 1 dB). Como a Lei da Massa é aplicável para uma faixa de frequências maior para o poliéster com fibra de vidro, este é o material escolhido para a fabricação da caixa.

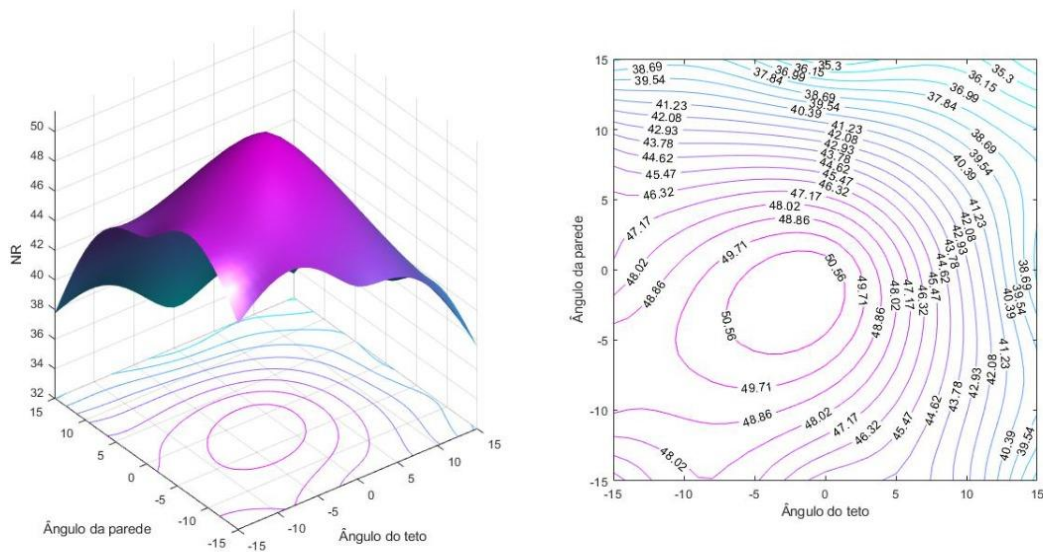
Dadas as nove configurações definidas pelos ângulos ψ do teto e φ das paredes, a estimativa da redução sonora, em dB, para frequências incidentes de 125, 250 e 500 Hz é apresentada na Figura 13. Estes valores são apresentados no Apêndice C deste trabalho.



(a)



(b)



(c)

Figura 13 - Redução sonora para diferentes configurações geométricas analisadas, com frequência incidente de (a) 125 Hz, (b) 250 Hz e (c) 500 Hz. Fonte: elaborado pelo autor.

Pela Figura 11(a), fica evidente que as configurações que mais reduzem o ruído gerado pela fonte a 125 Hz são aquelas nas bordas, ou seja, quando $\psi = 0^\circ$ e $\phi = \pm 15^\circ$ ou quando $\psi = \pm 15^\circ$ e $\phi = 0^\circ$. Nos casos em que $\psi = \phi$, a redução sonora é mais baixa. No entanto, para as Figuras 11(b) e 11(c), onde a frequência incidente é de 250 e 500 Hz, respectivamente, a configuração ótima se inverte, quando $\psi = \phi = 0^\circ$. Inclusive, neste caso, NR é maior que aquela da configuração ótima para 125 Hz.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho analisou, por meio da estimativa teórica da Perda na Transmissão sonora, o isolamento sonoro de cinco materiais disponíveis no mercado e comumente utilizados na fabricação de produtos para animais, e, por meio da solução por Elementos Finitos da Equação de Helmholtz, a redução sonora causada por alterações na geometria de uma caixa-recinto.

Dessa forma, através dos resultados mostrados na seção 4, verificou-se que os melhores materiais para isolamento são a fibra de vidro em resina de poliéster ou resina epoxy, visto que o aço é um material pesado demais para este produto, e abrange uma faixa de frequências menor que os outros materiais. A madeira, material extremamente comum na construção de casas para cães, se mostrou o pior em termos de isolamento, inclusive na faixa de aplicabilidade. Quanto à geometria, para este posicionamento de fonte e condições de contorno, a configuração ótima para uma frequência de 125 Hz se mostrou antagônica às configurações para 250 e 500 Hz. Por isso, concluiu-se que a geometria hexaédrica plana não é recomendada para isolamento sonoro em uma ampla faixa de frequências, e deve-se buscar alternativas - geometrias com mais faces, ou faces curvas, por exemplo.

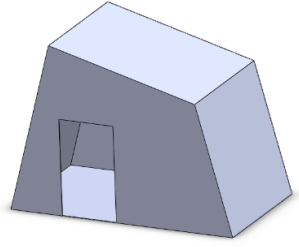
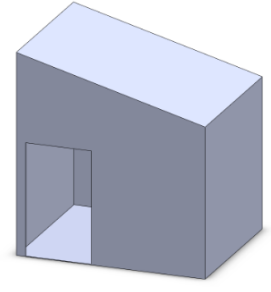
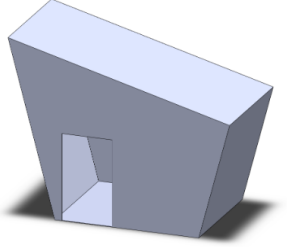
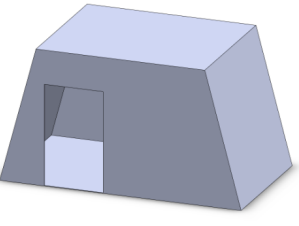
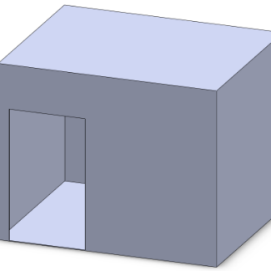
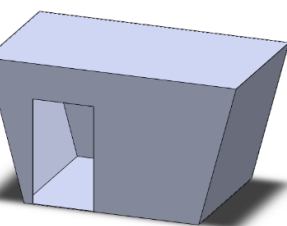
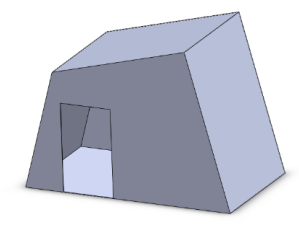
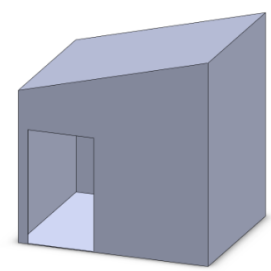
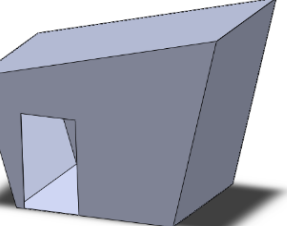
Este trabalho serve como proposta de metodologia base para desenvolvimento de produtos similares, além de reunir um arcabouço intelectual para futuros trabalhos. Recomenda-se a análise de outras configurações geométricas e condições de contorno para o desenvolvimento de um protótipo, que possa atender às necessidades daqueles que possuem comprometimento de bem-estar frente a situações cotidianas, como a chuva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSYS. **Workbench User's Guide**. Disponível em: <https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v212/en/wb2_help/wb2_help.html>. Acesso em: 20 abr. 2022.
- Acoustics in the Frequency Domain—Wolfram Language Documentation**. Disponível em: <<https://reference.wolfram.com/language/PDEModels/tutorial/Acoustics/AcousticsFrequencyDomain.html>>. Acesso em: 16 abr. 2022.
- BARBER, A. L. A. et al. A Comparison of Hearing and Auditory Functioning Between Dogs and Humans. **Comparative Cognition and Behavior Reviews**, v. 15, p. 1–50, 2020.
- BIES, D. A.; HANSEN, C. H. **Engineering noise control : theory and practice**. [s.l.] Taylor & Francis, 2003.
- BLACKWELL, E. J.; BRADSHAW, J. W. S.; CASEY, R. A. Fear responses to noises in domestic dogs: Prevalence, risk factors and co-occurrence with other fear related behaviour. **Applied Animal Behaviour Science**, v. 145, n. 1–2, p. 15–25, 1 abr. 2013.
- CARRIERI-ROCHA, V. M.; HENRIQUES LAGE DUARTE, M.; DA SILVA VASCONCELLOS, A. Acoustic stress in domestic dogs (*Canis familiaris*) living around football stadiums. **Journal of Veterinary Behavior**, v. 37, p. 27–35, 1 maio 2020.
- ENGINEERING TOOLBOX. **Stress, Strain and Young's Modulus**. Disponível em: <https://www.engineeringtoolbox.com/stress-strain-d_950.html>. Acesso em: 10 abr. 2022.
- ENGINEERING TOOLBOX. **Solids - Densities**. Disponível em: <https://www.engineeringtoolbox.com/density-solids-d_1265.html>. Acesso em: 10 abr. 2022.
- FAGUNDES, A. L. L. et al. Noise sensitivities in dogs: An exploration of signs in dogs with and without musculoskeletal pain using qualitative content analysis. **Frontiers in Veterinary Science**, v. 5, n. FEB, 13 fev. 2018.
- GRIGG, E. K. et al. Stress-Related Behaviors in Companion Dogs Exposed to Common Household Noises, and Owners' Interpretations of Their Dogs' Behaviors. **Frontiers in Veterinary Science**, v. 8, p. 760845, 8 nov. 2021.
- HEFFNER, H. E.; HEFFNER, R. S. Hearing Ranges of Laboratory Animals. **Journal of the American Association for Laboratory Animal Science**, 2007.
- INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA). **Chapter 8 - Container Requirement Live Animals Regulations, 48ed**, 2022. Disponível em: <<https://www.iata.org/contentassets/b0016da92c86449f850fe9560827bbea/pet-container-requirements.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2022
- UNITED KENNEL CLUB. **AMERICAN PIT BULL TERRIER Official UKC Breed Standard**, 2017. . Acesso em: 10 abr. 2022

APÊNDICE A - CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS ANALISADAS

Tabela A.1 - Configurações geométricas analisadas, variando-se os ângulos do teto (ψ) e das paredes (ϕ).

		ϕ [°]		
		-15	0	15
ψ [°]	-15			
	0			
	15			

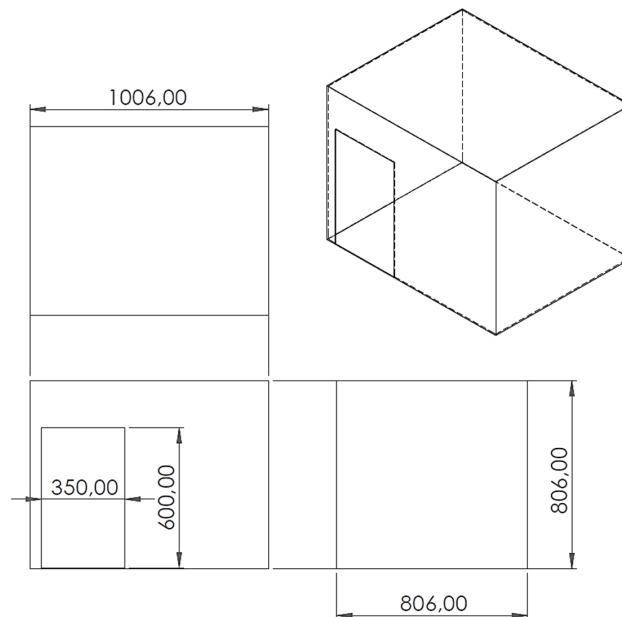


Figura A.1 - Dimensões da caixa padrão ($\phi = \psi = 0^\circ$), em mm.

APÊNDICE B - VALORES DE PT PARA DIFERENTES MATERIAIS

Tabela B.1 - Valores de Perda na Transmissão para diferentes materiais, de um painel simplesmente apoiado, em dB.

f (Hz)	Madeira	Aço	Poliestireno	Poliéster + fibra de vidro	Epoxy + fibra de vidro
50	0	0,00	0,00	2,47	2,03
63	0,00	16,36	0,00	4,48	4,04
80	0,00	18,36	0,89	6,49	6,04
100	1,90	20,37	2,90	8,49	8,05
125	3,90	22,38	4,90	10,50	10,06
150	5,91	24,38	6,91	12,51	12,06
200	7,92	26,39	8,92	14,51	14,07
250	9,92	28,40	10,93	16,52	16,08
315	11,93	30,41	12,93	18,53	18,08
400	13,94	32,41	14,94	20,54	20,09
500	15,94	34,42	16,95	22,54	22,10
630	17,95	36,43	18,95	24,55	24,10
800	19,96	38,43	20,96	26,56	26,11
1000	21,97	40,44	22,97	28,56	28,12
1250	23,97	42,45	24,97	30,57	30,12
1600	25,98	44,45	26,98	32,58	32,13
2000	27,99	46,46	28,99	34,58	34,14
2500	0,00	0,00	30,99	36,59	36,14
3150	0,00	0,00	33,00	38,60	0,00
4000	0,00	0,00	35,01	0,00	0,00
5000	0,00	0,00	37,01	0,00	0,00

APÊNDICE C - VALORES DE NR PARA DIFERENTES CONFIGURAÇÕES

Tabela C.1 - Valores de redução sonora para as configurações geométricas analisadas
(M_{φ}^{ψ}), em dB.

f (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
M_{-15}^{-15}	29,7	45,9	35,6	34,5	18,5	22,9
M_0^{-15}	38,2	47,3	32,1	33,7	26,8	19,1
M_{+15}^{-15}	27,8	37,7	35,0	38,0	25,8	22,4
M_{-15}^0	38,3	45,0	37,7	40,3	18,9	18,1
M_0^0	29,5	51,1	43,7	40,0	33,5	16,9
M_{+15}^0	37,3	34,7	37,4	40,5	22,0	24,8
M_{-15}^{+15}	31,0	37,5	33,5	40,6	21,0	21,5
M_0^{+15}	36,4	37,6	39,4	38,6	22,3	21,7
M_{+15}^{+15}	23,5	33,6	37,1	33,8	22,3	13,5