

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

ANÁLISE DO ENCLAUSURAMENTO ACÚSTICO LOCAL DE UMA TRITURADORA
INDUSTRIAL

por

Felipe Araldi Kuyava

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, novembro de 2020

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Kuyava, Felipe Araldi
ANÁLISE DO ENCLAUSURAMENTO ACÚSTICO LOCAL DE UMA
TRITURADORA INDUSTRIAL / Felipe Araldi Kuyava. --
2020.
27 f.
Orientadora: Leticia Fleck Fadel Miguel.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2020.

1. nível de pressão sonora. 2. ruído. 3.
enclausuramento acústico. 4. conforto acústico. I.
Miguel, Leticia Fleck Fadel, orient. II. Título.

Felipe Araldi Kuyava

ANÁLISE DO ENCLAUSURAMENTO ACÚSTICO LOCAL DE UMA TRITURADORA
INDUSTRIAL

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. Mario Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Letícia Fleck Fadel Miguel

Comissão de Avaliação:

Prof^ª. Letícia Fleck Fadel Miguel

Prof. Edson Hikaro Aseka

Prof. Walter Jesus Paucar Casas

Porto Alegre, novembro de 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, pelo suporte e base necessária para fomentar meu crescimento profissional e pessoal;

Ao engenheiro Amarildo Tomás, pelas informações e ajuda fornecida ao longo do trajeto;

Aos meus professores de toda a graduação, pelo compartilhamento do conhecimento e apoio fornecido durante todo o curso.

Kuyava, Felipe Araldi. **Análise do enclausuramento acústico local de uma trituradora industrial**. 2020. 19 páginas. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

RESUMO

Dentro de uma indústria, máquinas são fontes de ruído que podem atrapalhar tanto o conforto das pessoas ao seu redor quanto eventualmente ocasionar problemas de saúde. O presente trabalho tem como objetivo analisar a influência de um enclausuramento acústico realizado através da instalação de uma capota anti-ruído no tanque de trabalho de uma máquina trituradora. Desta forma, foi medido o nível de pressão equivalente para o período do ciclo de trabalho da máquina, obtendo o valor de 84,7 dB(A), e subsequente realizada a análise de em quanto o ruído deve ser reduzido. Então, como medida de prevenção, visto que apesar da máquina respeitar a NR – 15 (1978) nas configurações utilizados no ensaio, o nível de ruído é próximo aos limites de tolerâncias estabelecidos, o projeto de enclausuramento é realizado. Este consiste de uma capota com uma camada interna - composta por material absorvente integrado por lã de vidro ensacada em filme plástico - e uma externa feita de chapa de aço. Assim, através do cálculo de absorção e atenuação sonora, é possível estimar que o valor do nível de pressão sonora após o enclausuramento é dado por 65,3 dB(A), representando uma redução de 22,9% do nível de ruído percebido pelos operadores.

PALAVRAS-CHAVE: nível de pressão sonora, ruído, enclausuramento acústico, conforto acústico

Kuyava, Felipe Araldi. **Analysis of a local acoustic enclosure of an industrial shredder.** 2020. 19 pages. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

ABSTRACT

Within an industry, machines are sources of noise that can disrupt both the comfort of the people around it as well as causing health problems. This work aims to analyze the influence of an acoustic enclosure performed by installing an anti-noise hood in the working tank of a shredder. In this way, the equivalent pressure level for the period of the machine's working cycle was measured, obtaining the value of 84.7 dB(A), and subsequently the analysis of how much noise should be reduced was performed. So, as a preventive measure, since although the machine complies with NR - 15 (1978) in the configurations used in the test, the noise level is close to the established tolerance limits, the enclosure project is carried out. This consists of a hood with an inner layer - composed of absorbent material integrated by glass wool bagged in plastic film - and an outer one made of steel sheet. Thus, through the calculation of sound absorption and attenuation, it is possible to estimate that the value of the sound pressure level after enclosure is given by 65.3 dB(A), representing a 22.9% reduction in the level of noise perceived by operators

KEYWORDS: sound pressure level, noise, acoustic enclosure, acoustic comfort

NOMENCLATURA

Símbolo	Definição	Unidade
NPS	Nível de pressão sonora	[dB(A)]
P	Pressão sonora	[N/m ²]
P_0	Pressão do limiar equivalente a 2×10^{-5}	[N/m ²]
L_{eq}	Nível de pressão sonora equivalente	[dB(A)]
L_{Aeq}	Nível de pressão sonora equivalente em A	[dB(A)]
A	Absorção sonora por Sabine	[m ²]
S_i	Área superficial no i-ésimo evento	[m ²]
S	Área superficial total	[m ²]
α_i	Coefficiente de absorção no i-ésimo evento	-
α_m	Coefficiente de absorção médio	-
NPS_{int}	Nível de pressão sonora interno	[dB(A)]
NPS_{ext}	Nível de pressão sonora externo	[dB(A)]
NWS	Nível de potência sonora	[dB(A)]
C	Constante da sala	[m ²]
r	Distância do ponto até a fonte sonora	[m]
f	Frequência sonora	[Hz]
f_c	Frequência crítica	[Hz]
e	Espessura da partição	[m]
ρ	Massa específica do material	[kg/m ³]
E	Módulo de Young	[N/m ²]
ν	Coefficiente de Poisson	-
η	Coefficiente de amortecimento	-
R	Perda por transmissão	[dB]
m_e	Massa específica da parede	[kg/m ³]
NPS_R	Nível de pressão sonora resultante	[dB(A)]
V	Tensão elétrica	[V]
i	Corrente elétrica	[A]
W	Potência elétrica	[kW]
m	Unidade de metro	-
mm	Unidade de milímetro	-
kg	Unidade de quilograma	-
RPM	Rotações por minuto	-
dB	Unidade de decibel	-
$dB(A)$	Unidade de decibéis ponderada em A	-
Abreviaturas		
MDF	Definição Placa de fibra de média densidade	
NR-15	Norma regulamentadora 15	
IMRR	Índice médio de redução de ruído	
STC	Classe de transmissão sonora	
NRC	Coefficiente de redução de ruído	

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Motivação	1
1.2 Revisão Bibliográfica	1
1.3 Objetivo	2
2. FUNDAMENTAÇÃO.....	2
2.1 Som e Ruído	2
2.2 Nível de Pressão Sonora.....	2
2.3 Circuitos de Compensação	3
2.4 Processo de Trituração.....	3
2.5 Emissão de Ruído da Trituradora pelo Manual de Operações	5
2.6 NR-15	5
3. METODOLOGIA.....	5
3.1 Medição de Ruído.....	5
3.2 Projeto de Enclausuramento	6
3.3 Cálculo da Absorção Sonora e do Nível de Pressão Sonora Interno.....	7
3.4 Cálculo do Isolamento Teórico e Nível de Pressão Sonora Resultante.....	8
4. RESULTADOS	9
4.1 Nível de Pressão Sonora Experimental	9
4.2 Capota Anti-ruído.....	10
4.3 Absorção Sonora e Nível de Pressão Sonora Interior	12
4.4 Perda por Transmissão e Nível de Pressão Sonora Resultante.....	13
5. CONCLUSÃO.....	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
ANEXO	18

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Motivadas pelo aumento da produtividade e atendimento da sua crescente demanda, indústrias investem em equipamentos e máquinas que automatizam e enriquecem cada vez mais o processo industrial (RIBEIRO, 2001). Entretanto, os meios produtivos podem também ser fontes de ruído, afetando, assim, os trabalhadores responsáveis por esses processos. A falta de um ambiente de trabalho propício compromete não apenas o sucesso do processo industrial, como também a saúde e conforto dos trabalhadores.

Segundo Araújo (2002), os fatores sonoros principais que contribuem para um impacto negativo do ruído no ser humano são: intensidade sonora, tempo de exposição, frequência, natureza do ruído e susceptibilidade individual. Dependendo desses fatores, o ruído pode causar desde uma moléstia – prejudicando atividades como a comunicação oral e o desempenho do trabalhador em sua função – até lesões temporárias e permanentes. O ruído possui potencial de causar a destruição das células ciliadas do órgão de Corti do ouvido interno, ocasionando uma lesão auditiva permanente.

Deste modo, medidas de engenharia são importantes para diminuir a influência do ruído no ser humano, já que é possível reduzir o nível de pressão sonora ou o tempo de exposição em que os trabalhadores estão submetidos. Uma dessas medidas é o enclausuramento acústico de máquinas, que consiste em confinar equipamentos que geram um ruído elevado.

1.2 Revisão Bibliográfica

Visando o estudo teórico e experimental de um enclausuramento acústico, Fernando Basso, em 2012, em sua monografia de conclusão do curso de Engenharia Mecânica, analisou o enclausuramento acústico em forma de cabine de um espaço dedicado à realização de ensaios destrutivos de peças soldadas. Assim, o estudo se propôs a calcular teoricamente o valor da atenuação decorrente do enclausuramento e mensurar experimentalmente o nível de pressão sonora antes e após sua instalação, realizando uma comparação entre resultados experimentais e teóricos. Deste modo, o nível de pressão sonora global mensurado experimentalmente antes do enclausuramento acústico foi de 118 dB(A), enquanto que após sua instalação, o nível de ruído mensurado em cada uma das quatro faces laterais da cabine em formato de paralelepípedo foram: 81 dB(A) para duas das faces, 82 dB(A) e 80 dB(A) para as restantes. No cálculo teórico, os níveis de ruído obtidos através do método de Goesele se mostraram mais próximos dos experimentais, com diferença máxima de 2 dB(A), enquanto que através do método de Lei de Massa, a diferença máxima foi de 7 dB(A) (BASSO, 2012).

Outro estudo visando a atenuação de ruído sonoro foi realizado por Rodrigo Santos Valente da Costa, em 2019, também em sua monografia de conclusão de curso, e consiste no projeto e análise de atenuação sonora de um trator agrícola proporcionada por um ressonador acústico. Logo, foi projetado um ressonador utilizando um tubo ressonante duplo com comprimentos calculados para atenuar o ruído em suas frequências críticas. Também foram realizadas as medidas dos níveis de pressão sonora antes e após sua aplicação. Assim, os resultados apresentaram uma redução média da pressão sonora total de 9,2% (COSTA, 2019).

Dentro da área de estudo da absorção sonora de materiais, Cho et al (2018) realizaram a análise de desempenho acústico de um absorvedor eletroacústico através de compartimentos com aberturas. Assim, para verificar a utilidade do sistema proposto, dois ambientes acústicos são considerados. No primeiro, a abertura do compartimento é conectada a um campo de som externo que é distinto do campo de som acoplado ao absorvedor, enquanto que no segundo

ambiente acústico, a abertura é conectada ao mesmo campo que o absorvedor. Desta forma, é confirmada as diferenças de características de desempenho do absorvedor eletroacústico para ambas situações em análise indicando principalmente suas particularidades em baixas frequências.

Tendo como objetivo a atenuação de ruído de sistemas de exaustão industrial, Papini et al (2017) estudaram uma abordagem híbrida entre controles de ruído ativos e passivos para a redução do ruído. Desta forma, foram analisadas e otimizadas diferentes hipóteses e encontradas duas principais soluções. A primeira utiliza ressonadores Helmholtz para atenuar as frequências mais baixas e silenciadores resistivos para as frequências médias e altas. A segunda solução adota silenciadores resistivos e um sistema de controle de ruído ativo.

1.3 Objetivo

O enclausuramento acústico de máquinas pode ser feito de diferentes formas. Pode consistir em confinar a máquina inteira dentro de uma cabine isolante como também pode ser realizado através do isolamento apenas da parte mais ruidosa do equipamento.

Então, tendo como objetivo a manutenção da saúde e desempenho dos trabalhadores fabris, este trabalho se propõe a mensurar o ruído produzido por uma trituradora de madeira localizada na empresa Florense e subsequente análise do seu projeto de enclausuramento. Assim, é exposto o projeto da capota anti-ruído utilizada para reduzir a emissão de ruído sonoro, então, é calculada a absorção e perda por transmissão sonora decorrente do enclausuramento. Desta forma, é estimado o nível de pressão sonora interno à capota e o nível de pressão sonora após o enclausuramento, verificando em quanto o ruído sonoro foi reduzido.

2. FUNDAMENTAÇÃO

2.1 Som e Ruído

Sons são vibrações das partículas do ar que se propagam a partir de estruturas vibrantes (BISTAFA, 2011). Para Gerges (2000), o som é a sensação produzida em um sistema auditivo enquanto ruído é um som indesejável, de conotação negativa.

Para Bistafa (2011), sons que podem ser classificados como ruídos também podem transmitir informações úteis. Por exemplo, o sistema auditivo de um mecânico pode revelar se o motor do automóvel está funcionando de maneira adequada ou não. Entretanto, na maioria dos casos, os ruídos causam efeitos indesejáveis como perda da audição, aumento da pressão arterial, stress, tensão, queda do desempenho e também pode causar efeitos mecânicos, como danos e falhas estruturais.

Desta forma, a atenuação do ruído industrial é uma área importante dentro da engenharia, já que trabalha com o desempenho e saúde dos funcionários.

2.2 Nível de Pressão Sonora

Pressão sonora é a discrepância entre a pressão local e a pressão atmosférica causada por uma onda sonora (MIGUEL; TAMAGNA, 2007). Assim, o nível de pressão sonora, tendo como sua unidade o dB, é definido pela aplicação da lei de Fechner-Weber, mostrada pela Eq. (1).

$$NPS = 20 \log \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (1)$$

A P_0 é definida como $2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$, que é a mínima pressão que o ouvido humano precisa para ser estimulado o suficiente para ouvir o som. O limiar da dor no ouvido humano é causado por uma P máxima por volta de 20 N/m^2 . Logo, a faixa de NPS admitida pelo ouvido humano é entre 0 dB e 120 dB.

Como é comum o nível de ruído variar em função do tempo, de acordo com a NHO 01 (2001), pode-se utilizar o Nível de Pressão Sonora Equivalente (L_{eq}), dado pela Eq. (2), que representa o nível médio de ruído integrado ao longo de um intervalo de tempo.

$$L_{eq} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{P(t)^2}{P_0^2} dt \right) \quad (2)$$

em que T representa o tempo de integração e $P(t)$ é a pressão sonora instantânea. Quando é utilizada a curva de compensação em A, sua nomenclatura é dada por L_{Aeq} .

2.3 Circuitos de Compensação

Para modelar a pressão sonora de acordo com o comportamento humano, foram padronizados os circuitos de compensação classificados como A, B, C e D. Assim, o circuito com ponderação em A aproxima-se das curvas de mesma audibilidade em níveis de pressão sonora mais baixos, enquanto as escalas B e C aproximam-se para médios e altos níveis, respectivamente, e a escala D é padronizada para medições de ruído em aeroportos (MIGUEL; TAMAGNA, 2007). Os valores de atenuação de percepção auditiva decorrente das curvas A, B e C são mostrados no Anexo deste trabalho.

2.4 Processo de Trituração

A máquina trituradora analisada consiste no modelo WL6, da marca WEIMA. Esta tem como objetivo a trituração de restos de madeira que após o processo serão levados através de exaustores até o silo de armazenamento, onde os restos triturados serão utilizados como combustível para geração de vapor. A Figura 2.1 mostra a estrutura em modelagem 3D da máquina enquanto a Figura 2.2 (a) apresenta sua vista frontal e a (b) sua vista lateral, com as dimensões em mm. Os dados técnicos da máquina são dados no Anexo deste trabalho.

Figura 2.1 - Estrutura da máquina trituradora.

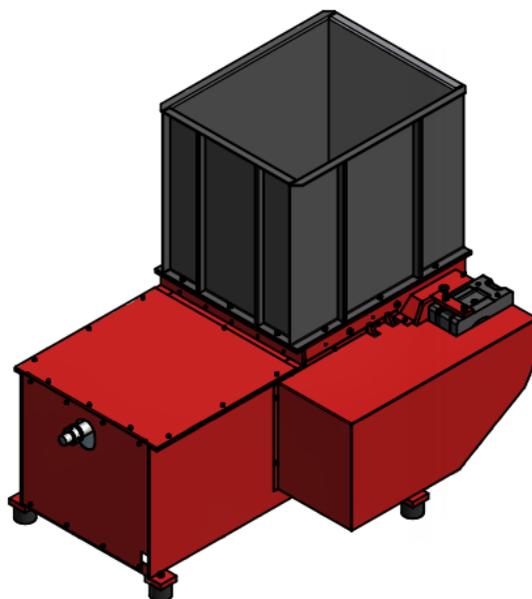
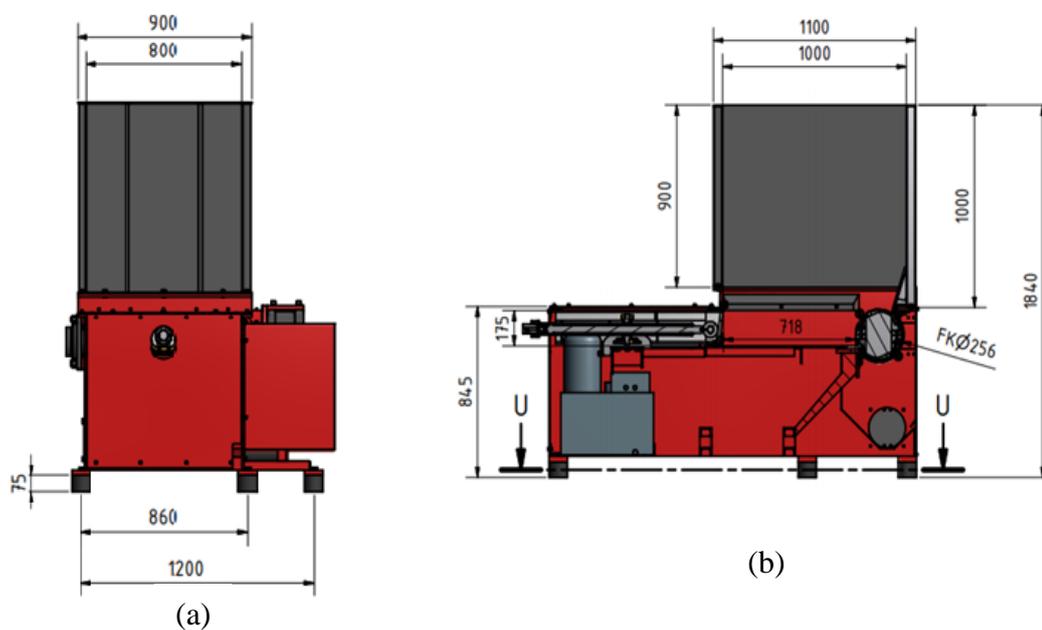


Figura 2.2 (a) - Vista frontal da estrutura da trituradora; (b) - Vista lateral da estrutura da trituradora, dimensões em milímetros.



O processo de trituração ocorre primeiramente com o material de madeira sendo introduzido no espaço de trabalho - também chamado de tanque da trituradora - através de uma esteira, assim um batente acionado hidráulicamente empurra o material para o rotor. Os materiais de madeira são triturados entre as lâminas que se encontram no rotor e as contra-lâminas. Desta forma, o processo é repetido até o material se tornar suficientemente pequeno para cair para o compartimento de saída através da peneira presente. Este é um processo ruidoso, logo é necessário coletar informações sobre o nível de ruído causado pela máquina tendo em consideração a saúde e o desempenho dos funcionários presentes.

2.5 Emissão de Ruído da Trituradora pelo Manual de Operações

De acordo com o manual de operações da máquina, seus valores de emissão de ruído são dados de acordo com a Tabela 2.1. Os valores foram determinados de acordo com a Norma de medição de ruído DIN 45635-1 sob implementação das normas básicas ISO 3744:2011 para o nível de potência sonora e ISO 11204:2010 para o nível de pressão sonora. Os valores de incerteza foram fornecidos também pelo manual de operações e obtidos através da análise de diferentes ensaios.

Tabela 2.1 - Valores de emissão de ruído da trituradora de acordo com o manual de operações.

Configuração da máquina	Marcha em vazio	Carga
Nível de potência sonora (dB(A))	92	106
Incerteza da potência sonora (dB(A))	4	4
Nível de emissão de pressão sonora no posto de trabalho (dB(A))	75	89
Incerteza do nível de pressão sonora (dB(A))	4	4

Para a obtenção destes dados, foi utilizado um veio triturador em funcionamento lento e filtro perfurado, enquanto os materiais triturados foram diferentes restos de madeira com uma humidade de aproximadamente 12%.

Tendo em consideração as particularidades do processo de trituração na fábrica da Florense, torna-se relevante sua medição experimental, a qual será exposta em seções futuras.

2.6 NR-15

Atentando para a saúde e segurança dos trabalhadores, é estabelecida a Norma Regulamentadora 15 ou NR-15 (1978), definindo as atividades e operações consideradas insalubres. A norma estabelece definições para classificar o tipo de ruído e as configurações necessárias do equipamento para sua medição correta. Também define os limites de tolerância do nível de pressão sonora de acordo com o tipo de ruído e o tempo de exposição dos trabalhadores. Assim, para o ruído considerado contínuo ou intermitente, os limites de tolerância são apresentados no Anexo deste trabalho.

3. METODOLOGIA

3.1 Medição de Ruído

A medição do ruído foi realizada através do dosímetro de modelo DOS-700 e calibrador acústico de modelo CAL-5000, ambos da marca Instrutherm. Para a realização da medição, o dosímetro foi colocado em um tripé a uma distância horizontal de 1 m em relação a fonte de ruído e 1,8 m em relação ao piso, posição representativa da localização do operador da máquina. A Figura 3.1 apresenta o dosímetro utilizado para a medição.

Figura 3.1 - Dosímetro DOS-700.



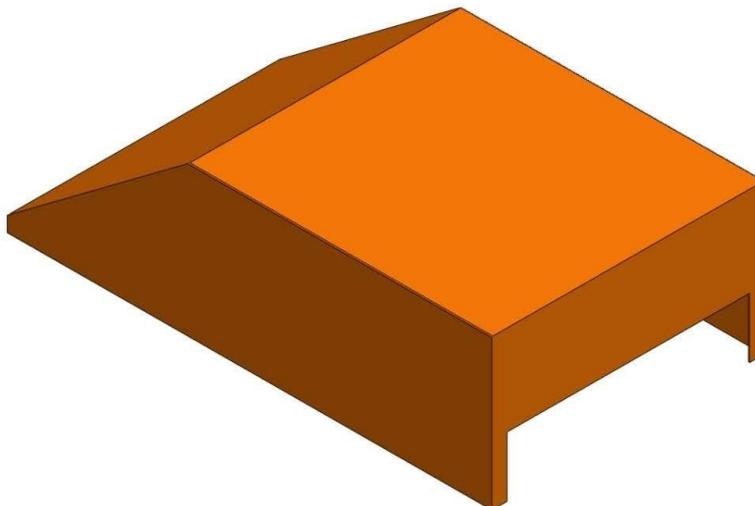
O ruído é classificado como contínuo devido à baixa variação de nível de intensidade sonora em função do tempo. Logo, conforme instruções da NR-15 (1978), o dosímetro operou no circuito de compensação A e de resposta lenta (*SLOW*). O período de medição foi de 48 minutos, visto que este representa o ciclo de trabalho da máquina, repetindo-se ao longo do dia. Os materiais triturados no ensaio foram peças de MDF.

3.2 Projeto de Enclausuramento

Observando que o valor de ruído exposto pelo manual de operações é próximo dos limites estabelecidos por Norma, surgiu o interesse em realizar um projeto de enclausuramento para a máquina como medida de prevenção, ainda antes da medição experimental realizada dentro da fábrica. Este interesse também decorreu da ocorrência de constantes problemas de comunicação entre os funcionários devido à localização da trituradora.

O enclausuramento então se trata de uma capota anti-ruído de cinco faces, sendo uma delas a porta de acesso. A geometria foi estabelecida de maneira que a capota é parafusada imediatamente acima do tanque de trabalho da trituradora, enclausurando-a acusticamente. É necessária uma abertura na face frontal à esteira industrial, visto que é preciso espaço para os restos de madeira caírem dentro do tanque de trabalho e serem subsequentemente triturados. Os materiais e espessuras são definidos para que se tenha uma atenuação adequada. A Figura 3.2 apresenta a modelagem em CAD 3D da capota.

Figura 3.2 – Modelagem em CAD 3D da capota anti-ruído.



Assim, é calculada a perda por transmissão sonora decorrente do enclausuramento e também sua absorção sonora. Desta forma, é possível estimar em quanto o ruído é reduzido devido à instalação da capota.

3.3 Cálculo da Absorção Sonora e do Nível de Pressão Sonora Interno

A absorção sonora por Sabine realizada através das cinco faces da capota é calculada através da Eq. (3). Os coeficientes de absorção foram fornecidos pelo fabricante e estão expostos no Anexo deste trabalho.

$$A = \sum S_i \alpha_i \quad (3)$$

Para o eventual cálculo do nível de pressão sonora resultante após o enclausuramento, é necessário obter o nível de pressão sonora interno dentro da capota. O nível de pressão sonora interno, NPS_{int} , é calculado através da Eq. (4), considerando a pressão sonora tanto do campo direto, isto é, de ondas que se propagam diretamente da fonte à superfície, quanto do campo reverberado, ou seja, de ondas que batem uma ou mais vezes contra as superfícies da capota. A Eq. (5) e Eq. (6) apresentam o cálculo da constante da sala e do coeficiente de absorção sonoro médio, respectivamente.

$$NPS_{int} = NWS + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{C} \right) \quad (4)$$

Onde:

$$C = \frac{S \alpha_m}{1 - \alpha_m} \quad (5)$$

$$\alpha_m = \frac{\sum S_i \alpha_i}{\sum S_i} \quad (6)$$

sendo que Q , o fator direcional da fonte, é dado por $Q = 1$, já que é considerada uma fonte que irradia igualmente em todas as direções, e r , a distância do ponto até a fonte, é considerado neste caso como 1 m. C é a constante da sala, em m^2 , e α_m o coeficiente de absorção médio.

O nível de potência sonora é calculado através do nível de pressão sonora externa medido experimentalmente, equação mostrada através da Eq. (7).

$$NWS = NPS_{ext} + 20 \log(r) + 8 \quad (7)$$

Assim, através destes dados, é possível calcular o nível de pressão interna ao enclausuramento.

3.4 Cálculo do Isolamento Teórico e Nível de Pressão Sonora Resultante

Para o cálculo da perda sonora por transmissão, foi utilizado o conceito de parede simples. Este conceito foi utilizado devido ao fato da estrutura da capota anti-ruído ser composta por um material isolante unido a uma chapa de aço, sem a existência de camada de ar ou outro material absorvente entre ambos, existindo uma ligação rígida entre os materiais.

A Eq. (8) apresenta o cálculo da frequência crítica da parede.

$$f_c = \frac{63733,5}{e} \sqrt{\frac{\rho(1 - v^2)}{E}} \quad (8)$$

Desta forma, em um gráfico em que o eixo das abcissas é em escala logarítmica, para valores abaixo de $f_c/2$, utiliza-se a Eq. (9) para obtenção da perda por transmissão.

$$R = 20 \log(m_e \times f) - 53 \quad (9)$$

Esta equação representa a Lei de Massa aplicada para parede leves, já que a massa específica neste caso é abaixo de 100 kg/m^2 .

Para frequências entre $f_c/2$ e f_1 , o valor da perda por transmissão é definido pelo valor de R para $f_c/2$. A Eq. (10) apresenta a expressão para definir a frequência f_1 em paredes leves.

$$f_1 = 10^{\log(f_c) - 0,33 \log(\eta) - 0,433} \quad (10)$$

Logo, para frequências acima de f_1 , utiliza-se a Eq. (11) para a perda por transmissão.

$$R = 20 \log(m_e \times f) + 10 \log\left(\frac{\eta \times f}{f_c}\right) - 45 \quad (11)$$

Assim, é possível definir a o nível de pressão sonora resultante, NPS_R , através da simplificação mostrada pela Eq. (12).

$$NPS_R = NPS_{int} - R \quad (12)$$

Como se possui informação do valor de NPS_{int} global apenas, já que não se tem dados da potência sonora para diferentes bandas de frequência, é necessário um único valor de perda por transmissão que represente todo o espectro de frequências para que seja possível aplicar a Eq. (8). Desta forma, de acordo com o Índice Médio de Redução de Ruído (IMRR) e a Classe

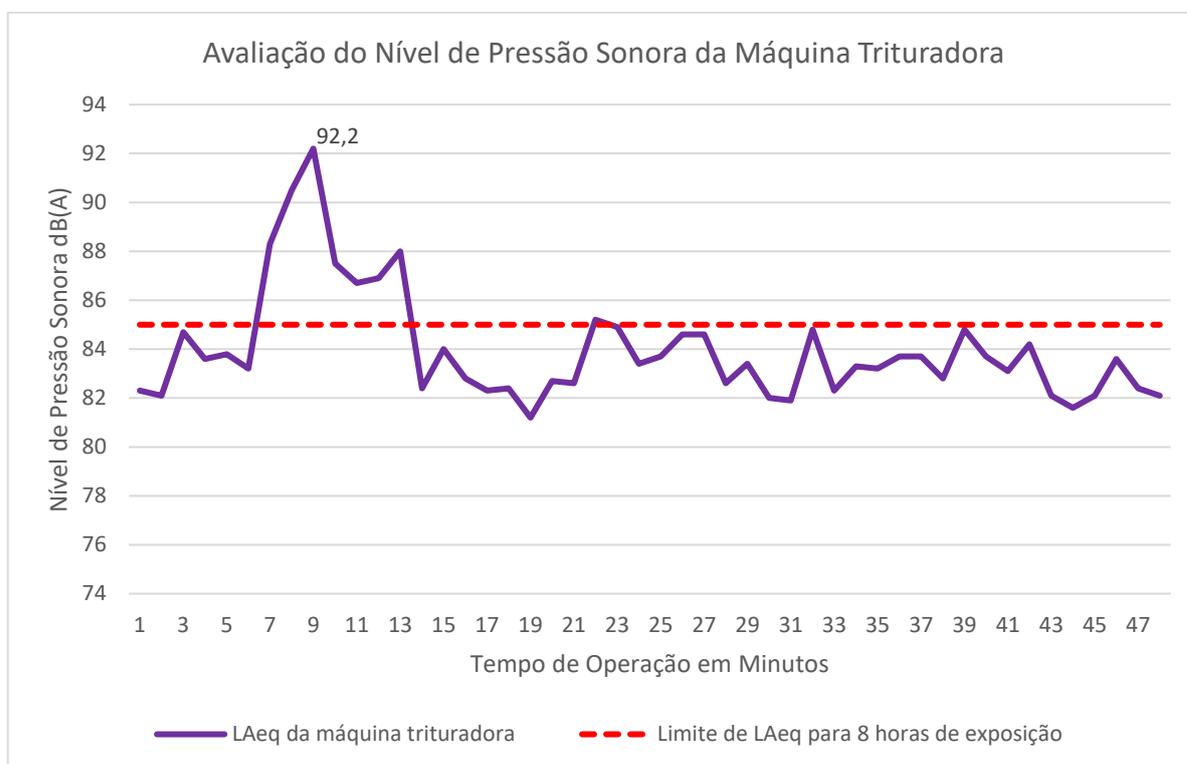
de Transmissão Sonora (STC), para se ter um único valor de R , é indicada a utilização do valor da perda por transmissão para a frequência de 500 Hz.

4. RESULTADOS

4.1 Nível de Pressão Sonora Experimental

A Figura 4.1 apresenta os valores de medição do L_{Aeq} ao longo de 48 minutos - representando um ciclo produtivo da máquina trituradora - também sendo plotado no gráfico o limite do nível de pressão sonora equivalente dado pela NR-15 para o tempo de exposição de 8 horas. O número de ciclos diário em que a máquina repete esse processo não é fixo, variando conforme a disponibilidade de material reciclável decorrente do grau de produtividade. Todavia, a trituradora não se mantém em funcionamento por mais de 8 horas diárias.

Figura 4.1 – Medição do nível de pressão sonora equivalente ao longo de um ciclo de produção da máquina.



É possível observar que o valor de L_{Aeq} ultrapassa o valor de 85 dB(A) no intervalo de tempo entre 6 e 14 minutos após o início da medição e também aos 22 minutos. O valor máximo de 92,2 dB(A) ocorre aos 9 minutos. Entretanto, os tempos de exposição permitidos para os diferentes valores de L_{Aeq} ainda estão dentro do permitido pela NR-15. O L_{Aeq} que representa toda a operação é de 84,7 dB(A).

Observando os valores de nível de pressão sonora apresentados através do manual de operação, é possível notar uma leve discrepância em relação aos valores experimentais, conforme mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Comparação entre o nível de emissão de ruído obtido pelo manual de operações e através da medição experimental.

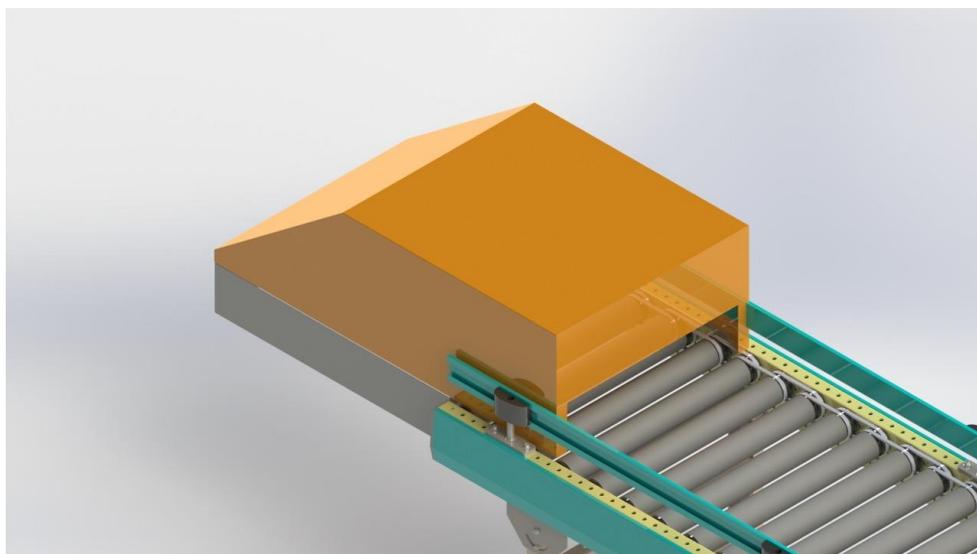
L_{Aeq} , com carga, de acordo com o manual de operações (dB(A))	89,0
L_{Aeq} medido experimentalmente (dB(A))	84,7

Isto ocorre principalmente devido ao fato de o material utilizado para a trituração neste ensaio ter sido restos de peças de MDF. Porém, outros tipos de madeira são também recicladas e diferentes configurações da máquina são utilizadas, logo, os valores de ruído podem ser maiores. Deste modo, o projeto do enclausuramento foi realizado como mecanismo de prevenção.

4.2 Capota Anti-ruído

A geometria da capota anti-ruído é modelada em CAD 3D e apresentada através da Figura 4.2. Na figura também é mostrada a esteira industrial em que os restos de madeira são levados até o tanque de trabalho da trituradora. A face oblíqua, traseira, trata-se da porta de acesso do enclausuramento ao espaço de trabalho.

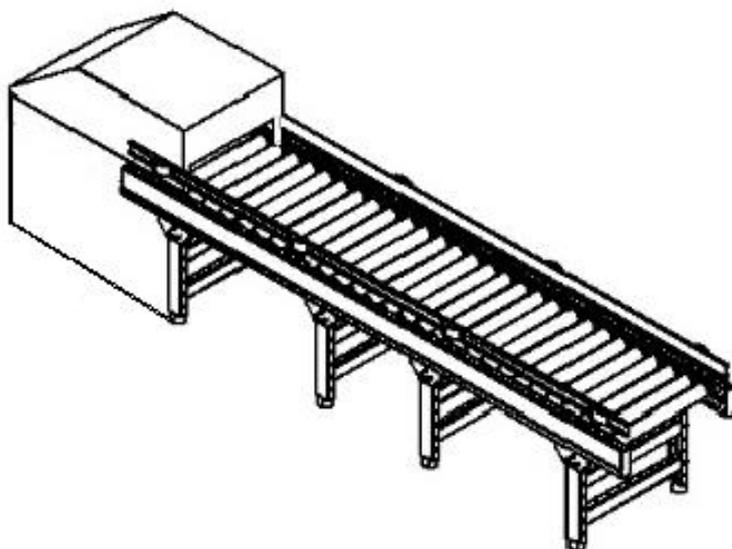
Figura 4.2 – Modelagem em CAD 3D da capota anti-ruído a frente da esteira por onde o material é transportado até a trituradora.



A capota possui 0,4 m de altura, 0,8 m de largura e 1 m de profundidade, com uma abertura retangular na face frontal à esteira industrial de 0,7 x 0,2 m, devido à necessidade de espaço para que os restos de madeira vindo da esteira entrem no tanque de trabalho da trituradora.

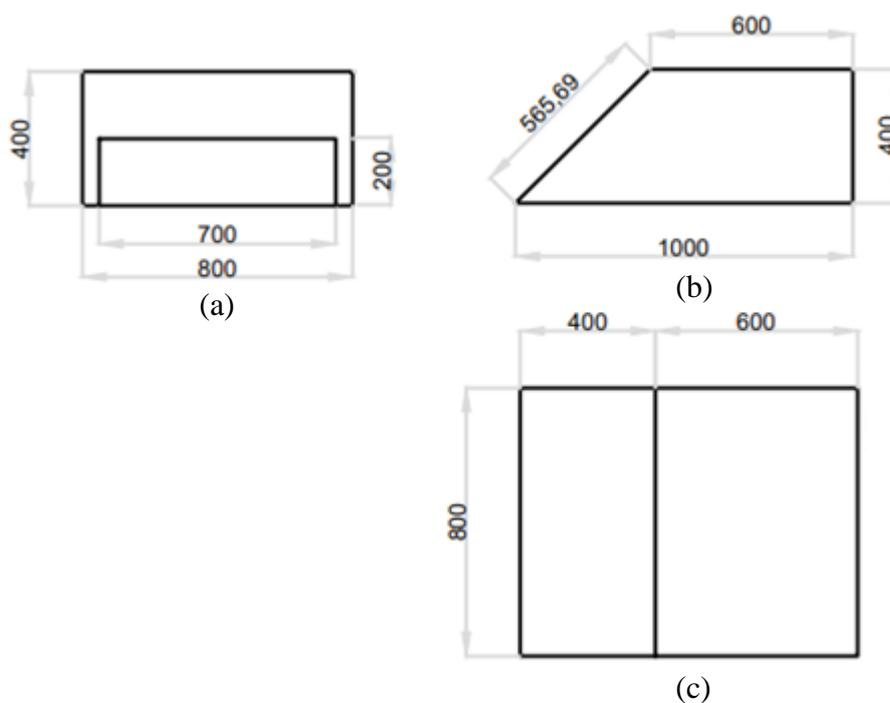
A Figura 4.3 mostra a vista em perspectiva da capota anti-ruído instalada acima do tanque de trabalho da trituradora, omitindo detalhes da máquina para facilitar a visualização do enclausuramento.

Figura 4.3 - Vista em perspectiva da capota anti-ruído instalada acima do tanque de trabalho da trituradora.



A Figura 4.4 (a) apresenta a vista frontal da capota enquanto a (b) mostra a vista lateral e a (c) apresenta a vista superior, com as dimensões dadas em milímetros.

Figura 4.4 – (a) vista frontal; (b) vista lateral esquerda; (c) vista superior da capota anti-ruído, com dimensões dadas em milímetros.



A capota é construída através de uma camada interna, composta por material absorvente, e uma externa. Os materiais utilizados para a construção do enclausuramento e suas espessuras são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Materiais e espessuras da capota anti-ruído.

	Material	Espessura
Camada interna	Rollisol	50 mm
Camada externa	Chapa de aço	4 mm

Estes materiais foram escolhidos tendo em consideração o custo e a quantidade de redução de ruído necessária de ser obtida através do enclausuramento. O Rollisol, que consiste em um feltro em lã de vidro ensacado com filme plástico, é um material absorvente utilizado em enclausuramentos, logo, é colocado na camada interna da capota anti-ruído. A camada externa é composta por uma chapa de aço, devido as suas propriedades mecânicas.

4.3 Absorção Sonora e Nível de Pressão Sonora Interior

A Tabela 4.3 apresenta os valores de absorção sonora por Sabine decorrentes das cinco faces do enclausuramento para diferentes bandas de frequências.

Tabela 4.3 – Valores de absorção sonora por Sabine de cada face do enclausuramento.

Face	S (m ²)	S.α (125 Hz)	S.α (250 Hz)	S.α (500 Hz)	S.α (1000 Hz)	S.α (2000 Hz)	S.α (4000 Hz)	S.α (NRC)
Lateral Direita	0,32	0,05	0,14	0,24	0,29	0,22	0,20	0,22
Lateral Esquerda	0,32	0,05	0,14	0,24	0,29	0,22	0,20	0,22
Porta de Acesso Oblíqua	0,45	0,07	0,20	0,34	0,40	0,31	0,28	0,32
Frontal	0,18	0,03	0,08	0,13	0,16	0,12	0,11	0,13
Superior	0,48	0,07	0,22	0,36	0,43	0,33	0,30	0,34
A (m²)		0,27	0,78	1,31	1,57	1,20	1,09	1,23

Assim, através dos valores de absorção e potência sonora, é calculado o nível de pressão sonora dentro do enclausuramento, NPS_{int} , conforme mostra a Tabela 4.4. O valor de potência sonora, NWS , é calculado através dos dados experimentais. Como não se possui dados da potência sonora da trituradora para todo o espectro de frequências, é calculado apenas o NPS_{int} global com base no valor de absorção para NRC.

Tabela 4.4 – Nível de pressão sonora global estimado dentro do enclausuramento.

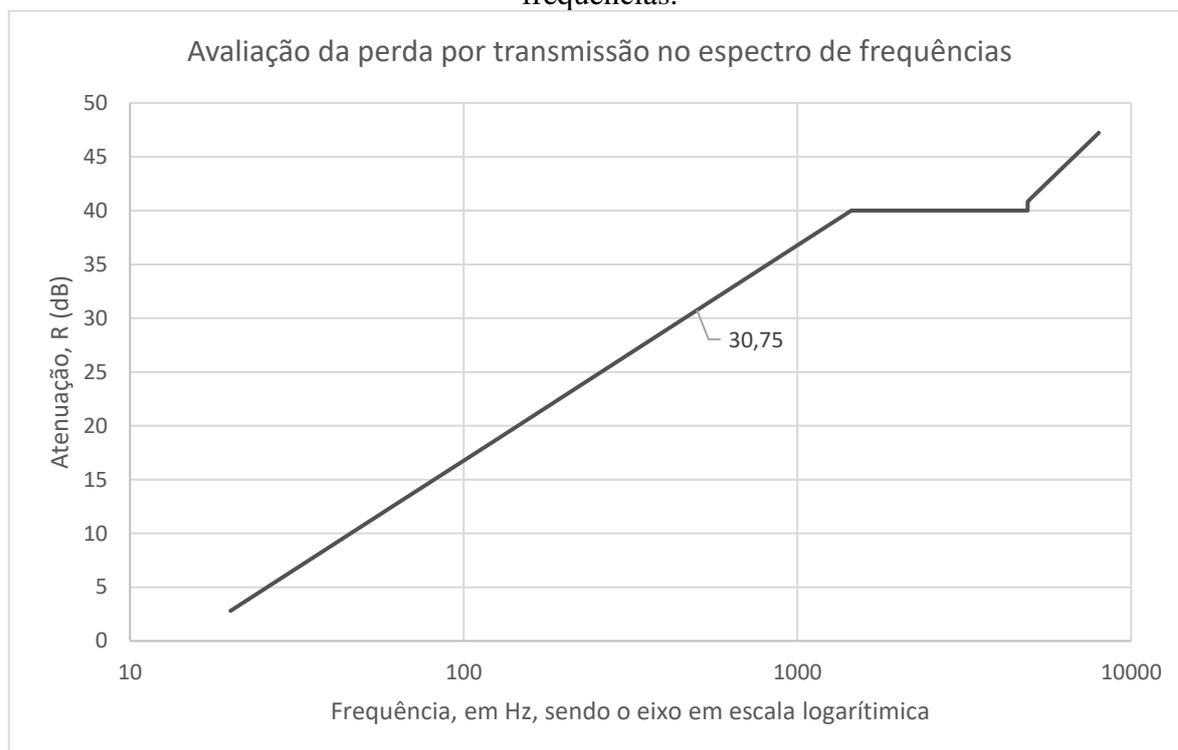
Frequência	Global
Nível de pressão sonora dentro da capota (dB(A))	92,9

Devido à existência do campo reverberado decorrente do enclausuramento acústico em adição ao campo direto, é esperado que o NPS_{int} seja maior do que o nível de pressão sonora exterior.

4.4 Perda por Transmissão e Nível de Pressão Sonora Resultante

A perda por transmissão, R , decorrente da capota anti-ruído para o espectro de frequências é apresentada pelo gráfico mostrado na Figura 4.5, em que o eixo das abscissas está em escala logarítmica. Como todas as faces do enclausuramento possuem a mesma composição e espessura, o isolamento acústico é considerado uniforme ao longo da capota.

Figura 4.5 – Perda por transmissão decorrente do enclausuramento para o espectro de frequências.



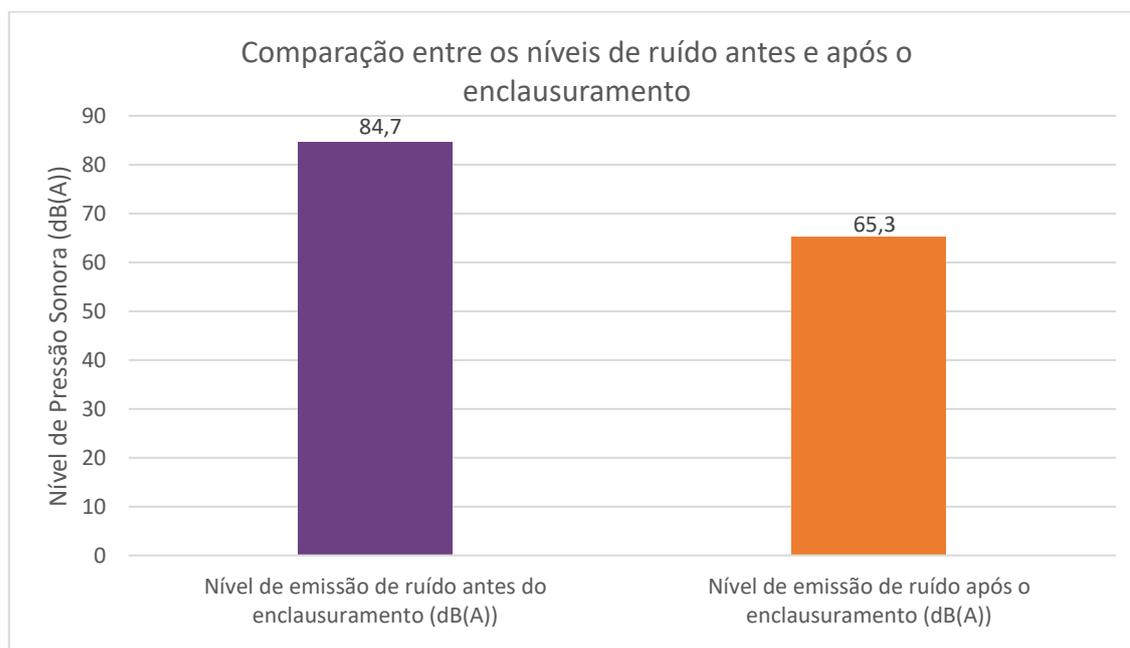
Para a frequência de interesse de 500 Hz, o valor de atenuação é de 30,75 dB. Logo, após realizar sua compensação em A, chegando ao valor de 27,55 dB(A), é possível estimar o nível de pressão sonora global em que o trabalhador estará submetido após o enclausuramento da máquina. Este valor é apresentado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Nível de emissão de ruído estimado em que o operador estará submetido após o enclausuramento.

Frequência	Global
Nível de pressão sonora após o enclausuramento (dB(A))	65,3

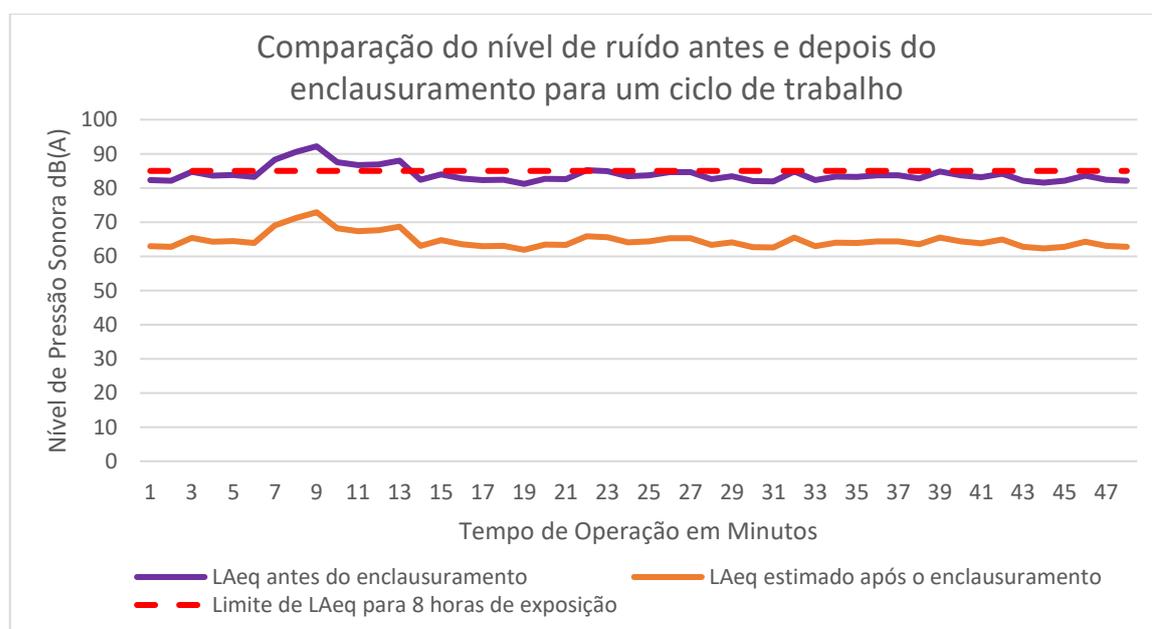
A Figura 4.6 apresenta a comparação entre os valores de nível de ruído antes e após o enclausuramento acústico realizado através da capota anti-ruído.

Figura 4.6 – Avaliação do nível de emissão de ruído antes e após o enclausuramento.



Desta forma, o enclausuramento acústico da trituradora possibilita reduzir o nível de emissão de ruído percebido pelo operador em 22,9%. A Figura 4.7 apresenta a comparação entre os níveis de pressão sonora equivalentes antes do enclausuramento e o estimado após sua instalação para um ciclo de trabalho da máquina.

Figura 4.7 – Comparação antes e após o enclausuramento do nível de emissão de ruído para um ciclo de trabalho



Assim, é possível observar que a instalação da capota anti-ruído acima do espaço de trabalho da máquina trituradora possibilita levar o nível de emissão de ruído a níveis mais seguros durante todo o ciclo produtivo.

5. CONCLUSÃO

Este presente trabalho analisou a influência de um enclausuramento acústico - realizado através de uma capota - na redução de ruído de uma máquina trituradora utilizada para a reciclagem de restos de madeira. Através da medição do ruído da máquina, foi possível obter o L_{Aeq} para o período do seu ciclo de trabalho e analisar em quanto o nível de pressão sonora deveria ser reduzido. Então, foi exposto o projeto de enclausuramento criado como medida preventiva para diminuir o nível de ruído e calculado sua absorção sonora, atenuação e estimado o novo nível de pressão sonora da máquina após sua instalação.

A medição de ruído indicou um nível de pressão sonora equivalente de 84,7 dB(A), mostrando que para o material utilizado no ensaio, MDF, a trituradora ainda está de acordo com a NR-15. Entretanto, o projeto de enclausuramento teve continuidade como medida de prevenção, visto que diferentes tipos de madeira são triturados pela máquina, o que pode ocasionar um ruído maior, e sua localização na fábrica compromete a comunicação de parte do ciclo produtivo.

Assim, a capota anti-ruído é instalada logo acima do tanque de trabalho da trituradora e é composta por duas camadas: uma interna constituída por Rollisol (material absorvente integrado por lã de vidro ensacada em filme plástico) e uma externa feita de chapa de aço. A capota dispõe de uma porta de acesso na parte traseira e possui 0,4 m de altura, 0,8 m de largura e 1 m de profundidade, com uma abertura retangular na face frontal à esteira industrial de 0,7 x 0,2 m, visto a necessidade de espaço para que os restos de madeira vindo da esteira entrem no espaço de trabalho da máquina.

Desta forma, foi calculada a absorção em Sabine decorrente da capota para diferentes bandas de frequência, resultando em um valor de 1,23 m² para NRC. Então, o nível de pressão sonora interno ao enclausuramento foi possível de ser estimado como 92,9 dB(A), valor maior do que o NPS exterior devido à adição do campo reverberado ao campo direto. A perda por transmissão sonora foi calculada para o espectro de frequências, sendo a frequência de 500 Hz escolhida para representar a atenuação em um número único de isolamento acústico, de acordo com o IMRR e STC. Assim, o isolamento sonoro compensado em A é dado por 27,55 dB(A) e o nível de pressão sonora após o enclausuramento é estimado como 65,3 dB(A), ocasionando redução do nível de emissão de ruído percebido pelo operador em 22,9%.

É importante salientar que os métodos de cálculos propostos e realizados estão fortemente baseados em equações empíricas e dados de tabelas provenientes de ensaios experimentais, o que ocasiona uma particularidade para cada aplicação e pode trazer resultados não estritamente precisos. Também foram realizadas simplificações no trabalho decorrentes da falta de dados. Como não foi possível obter os valores do nível de pressão sonora da máquina para o espectro de frequências, foi necessário realizar uma análise mais aproximada do problema.

Para trabalhos futuros, sugere-se levar em consideração o valor de potência sonora em todo o espectro de frequência e fazer uma estimativa do nível de pressão sonora para todo o espectro. Também se recomenda realizar a medição experimental do ruído após o enclausuramento para comparar com os resultados obtidos teoricamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, S. A. Perda auditiva induzida pelo ruído em trabalhadores de metalúrgica. **Revista Brasileira de Otorrinolaringologia**, São Paulo, v. 68, n. 1, p. 47-52, Maio 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10151**: Acústica - Medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas - Aplicação de uso geral. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 25 p.

BASSO, F. **Estudo teórico e experimental de um enclausuramento acústico**. 2012. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

BISTAFA, S. R. **Acústica Aplicada ao Controle do Ruído**, 2. ed. [S.l.]: Blucher, 2011.

CHO, Y. *et al.* Analysis of sound absorption performance of an electroacoustic absorber using a vented enclosure. **Journal of Sound and Vibration**, Southampton, v. 417, n. 1, p. 110-131, Mar 2018.

COSTA, R. S. V. **Projeto e análise da efetividade de um ressonador acústico na atenuação do ruído de admissão um trator agrícola**. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 45635-1**: Measurement of noise emitted by machines; airborne noise emission: enveloping surface method; basic method, divided into 3 grades of accuracy. Berlin: DIN, 1984. 35 p.

FUNDACENTRO. **Norma de Higiene Ocupacional – Procedimento Técnico – Avaliação da Exposição Ocupacional do Ruído – NHO 01**. 2001.

GERGES, S. N. Y. **Ruído: Fundamentos e Controle**. 2. ed. [S.l.]: NR Consultoria e Treinamento, 2000.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11204:2010**: Noise emitted by machinery and equipment — Determination of emission sound pressure levels at a work station and at other specified positions applying accurate environmental corrections. Geneva: ISO, 2010. 37 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3744:2010**: Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure — Engineering methods for an essentially free field over a reflecting plane. Geneva: ISO, 2010. 78 p.

MIGUEL, L. F. F.; TAMAGNA, A. **Tópicos de Acústica Aplicada**: Notas de Aula de ENG03015 – Acústica Aplicada. 2007. 149 p. Notas de aula.

MINISTÉRIO DO TRABALHO. **Norma Regulamentadora 15 – NR 15**. Atividades e operações insalubres. Portaria N° 1.084, 1978.

PAPINI, G. S. *et al.* Hybrid approach to noise control of industrial exhaust systems. **Applied Acoustics**, [S.l.], v. 125, n. 1, p. 102-125, Oct 2017.

RIBEIRO, Marco A. **Automação Industrial**, 4. ed. Salvador: [s.n.], 2001. *E-book*. Disponível em: https://www.academia.edu/19988593/Automacao_Industrial_Marco_Antonio_Ribeiro. Acesso em: 14 set. 2020.

WEIMA AMERICA, INC. **Trituradora com um veio WL6**: Manual de Instruções. [S.l. : s.n.], 2018. 205 p.

ANEXO

Figura A.1 - Atenuação da percepção auditiva para as curvas de compensação A, B e C.

Frequência (Hz)	Curva A dB(A)	Curva B dB(B)	Curva C dB(C)
10	-70,4	-38,2	-14,3
12,5	-63,4	-33,2	-11,2
16	-56,7	-28,5	-8,5
20	-50,5	-24,2	-6,2
25	-44,7	-20,4	-4,4
31,5	-39,4	-17,1	-3,0
40	-34,6	-14,2	-2,0
50	-30,2	-11,6	-1,3
63	-26,2	-9,3	-0,8
80	-22,5	-7,4	-0,5
100	-19,1	-5,6	-0,3
125	-16,1	-4,2	-0,2
160	-13,4	-3,0	-0,1
200	-10,9	-2,0	0,0
250	-8,6	-1,3	0,0
315	-6,6	-0,8	0,0
400	-4,8	-0,5	0,0
500	-3,2	-0,3	0,0
630	-1,9	-0,1	0,0
800	-0,8	0,0	0,0
1000	0,0	0,0	0,0
1250	0,6	0,0	0,0
1600	1,0	0,0	-0,1
2000	1,2	-0,1	-0,2
2500	1,3	-0,2	-0,3
3150	1,2	-0,4	-0,5
4000	1,0	-0,7	-0,8
5000	0,5	-1,2	-1,3
6300	-0,1	-1,9	-2,0
8000	-1,1	-2,9	-3,0
10000	-2,5	-4,3	-4,4
12500	-4,3	-6,1	-6,2
16000	-6,6	-8,4	-8,5
20000	-9,3	-11,1	-11,2

Tabela A.1 - Dados técnicos da máquina trituradora.

Modelo da máquina	WL6
Número de série	510-2974
Mês e ano de fabricação	Novembro de 2018
Tensão de operação [V]/[Hz]	380/60
Segurança [A]	63
Corrente atribuída [A]	49
Potência do motor do acionamento principal [kW]	18,5
Consumo de corrente do acionamento principal [A]	34,9
Potência do motor do sistema hidráulico [kW]	0,75
Consumo de corrente do sistema hidráulico [kW]	1,78
Rotação do rotor [RPM]	90
Diâmetro do rotor [mm]	256
Peso [kg]	1750

Figura A.2 - Máxima exposição permissível em função do nível de ruído conforme a NR-15.

NÍVEL DE RUÍDO dB (A)	MÁXIMA EXPOSIÇÃO DIÁRIA PERMISSÍVEL
85	8 horas
86	7 horas
87	6 horas
88	5 horas
89	4 horas e 30 minutos
90	4 horas
91	3 horas e 30 minutos
92	3 horas
93	2 horas e 40 minutos
94	2 horas e 15 minutos
95	2 horas
96	1 hora e 45 minutos
98	1 hora e 15 minutos
100	1 hora
102	45 minutos
104	35 minutos
105	30 minutos
106	25 minutos
108	20 minutos
110	15 minutos
112	10 minutos
114	8 minutos
115	7 minutos

Tabela A.2 – Coeficientes de absorção sonora para o material do enclausuramento.

Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	NRC
Coeficiente de absorção	0,15	0,45	0,75	0,90	0,69	0,63	0,70