

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANDREI REI RODRIGUES SILVEIRA

RUÍDO INDUSTRIAL – AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL E
MAPEAMENTO ACÚSTICO INTERNO COMO POTENCIAIS MEDIDAS DE
CONTROLE E PREDIÇÃO DOS NÍVEIS SONOROS

CURITIBA

2021

ANDREI REI RODRIGUES SILVEIRA

RUÍDO INDUSTRIAL – AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL E
MAPEAMENTO ACÚSTICO INTERNO COMO POTENCIAIS MEDIDAS DE
CONTROLE E PREDIÇÃO DOS NÍVEIS SONOROS

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Titular Dr. – Ing. Paulo H. T. Zannin

Coorientadora: Profa. Dra. Karina Mary de Paiva

CURITIBA

2021

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

S587r Silveira, Andrei Rei Rodrigues
Ruído industrial – avaliação da exposição ocupacional e mapeamento acústico interno como potenciais medidas de controle e predição dos níveis sonoros [recurso eletrônico] / Andrei Rei Rodrigues Silveira – Curitiba, 2021.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Trombetta Zannin
Coorientadora: Profa. Dra. Karina Mary de Paiva

1. Ruído industrial. 2. Mapeamento de ruído. I. Universidade Federal do Paraná. II. Zannin, Paulo Henrique Trombetta. III. Paiva, Karina Mary de. IV. Título.

CDD: 620.23

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
AMBIENTAL - 40001016075P3

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ANDREI REI RODRIGUES SILVEIRA** intitulada: **Ruído Industrial - Avaliação da Exposição Ocupacional e Mapeamento Acústico Interno como Potenciais Medidas de Controle e Predição dos Níveis Sonoros**, sob orientação do Prof. Dr. PAULO HENRIQUE TROMBETTA ZANNIN, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 05 de Abril de 2021.

Assinatura Eletrônica

07/04/2021 10:16:07.0

ANA FLÁVIA LOCATELI GODOI

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

11/04/2021 11:25:43.0

MARIA REGINA ALVES CARDOSO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO)

Assinatura Eletrônica

07/04/2021 18:05:43.0

PAULO HENRIQUE TROMBETTA ZANNIN

Orientador - Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Centro Politécnico da UFPR - Curitiba - Paraná - Brasil
CEP 81531-980 - Tel: (41) 3361-3012 - E-mail: ppga@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 88116

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prrpg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp> e insira o código 88116

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Universo por ter aberto essa porta para mim. No final desse processo pude entender que foi a melhor de todas e que não poderia ter sido diferente.

Gratidão queridos pai e mãe, avós e demais antepassados por terem tecido o meu caminho, imensa gratidão pela imensidão dos seus sonhos que, de alguma forma, são hoje a minha realidade. Gratidão pela tamanha energia vinda de vocês eu os honro e os agradeço, e tomo a energia vital através de vocês.

Agradeço muita pela oportunidade de receber a orientação do Prof. Dr. – Ing. Paulo Henrique Trombetta. Zannin, agora também meu amigo, por ser tão presente e disponível durante a construção do trabalho e por me possibilitar a estrutura necessária para realização plena do mesmo. À professora Karina de Paiva pela coorientação e tremenda ajuda em diversos momentos e, agradeço também ao PPGEA pela existência desse curso de mestrado.

Gratidão pela interconexão com pessoas incríveis que sem saber foram canais de comunicação direta do Universo, sugerindo orientação a cada passo e conselhos quando mais foi necessário, seus auxílios foram fundamentais.

Agradeço a tamanha disponibilidade da empresa e amizade com seus colaboradores, com quem aprendi muito e adquiri experiências que levarei para o resto da minha vida profissional.

Gratidão por todas as pessoas e ensinamentos que auxiliaram e auxiliam a minha expansão de consciência, pois dessa forma consegui construir esse trabalho dentro de um estado belo de ser na maior parte do tempo. Aprendi que realmente não importa quantas coisas se faça, mas como se faz, em um estado belo ou em um estado de sofrimento? A escolha é sempre nossa.

E agradeço a Deus pela saúde perfeita e abundância infinita permitindo que eu entregasse o meu melhor durante essa jornada.

Agradeço a CAPES pelo apoio financeiro dessa pesquisa sob o código de financiamento 001 e por fomentar no país.

RESUMO

Nas indústrias de transformação, o ruído é um dos riscos mais comuns entre as exposições ocupacionais. Nesse ramo de atividade, altos níveis de ruído tendem a ser encarados com naturalidade, podendo, porém, levar à redução da saúde dos indivíduos expostos, resultando em efeitos auditivos e não auditivos adversos. A exposição ao ruído ocupacional está entre as principais causas evitáveis de Perda Auditiva Ocupacional (PAO), zumbido e dificuldade de compreensão da fala no ruído, que além de causar perdas em qualidade de vida dos expostos, traz custos significativos aos sistemas de saúde para seu tratamento. Efeitos não auditivos da exposição ocupacional ao ruído também resguardam perigos, além de doenças crônicas, destaca-se a maior propensão de acidentes no trabalho conforme seja maior o nível sonoro em que trabalhadores são expostos durante suas jornadas. Levando em consideração essas questões, o objetivo do estudo foi realizar a caracterização do ruído interno de uma sede industrial. Para isso, duas metodologias foram desempenhadas: (i) avaliação da exposição sonora de trabalhadores por meio de audiodosímetro e, (ii) mapeamento acústico interno dos diferentes setores da indústria avaliada. A primeira permitiu o conhecimento das três fábricas que compõe a indústria, suas formas de produção, atividades laborais existentes e a definição do público alvo para a formação de Grupos Homogêneos de Exposição (GHE), que tiveram suas localizações e perfis sonoros detalhados. A segunda, envolveu a identificação dos ambientes construídos e suas propriedades acústicas, o conhecimento das fontes sonoras e a utilização do *software ODEON Industrial* para cálculo dos mapas de ruído ao longo das fábricas. Os resultados obtidos a partir das diferentes perspectivas evidenciou as magnitudes e localizações dos níveis de ruído na indústria, permitindo a caracterização precisa de quais pontos necessitam priorização nas medidas de controle; as quais puderam ser planejadas de acordo com a hierarquia de gestão de riscos visando proporcionar saúde, segurança e melhora da qualidade de vida no trabalho. Essa pesquisa forneceu abordagem científica inovadora pela utilização de ambos os métodos, dosimetria e mapas de ruído, os quais se complementaram e enriqueceram um ao outro por proporcionar autoanálise nos resultados, maior confiabilidade aos dados de exposição ao ruído e, um guia para o planejamento da empresa. Tal abordagem pode ser utilizada em diferentes tamanhos populacionais de públicos alvo e também em outros contextos de ruído ocupacional.

Palavras-chave: Indústria metalomecânica; Ruído industrial; GHE; Mapeamento de ruído; Medidas de controle.

ABSTRACT

In the manufacturing industries, noise is one of the most common risks among occupational exposures. In this line of activity, high levels of noise tend to be viewed naturally, but can lead to a reduction in the health of exposed individuals, resulting in adverse auditory and non-auditory effects. Exposure to occupational noise is among the main preventable causes of occupational hearing loss (OHL), tinnitus and difficulty in understanding speech in noise, which in addition to causing losses in the quality of life of those exposed, brings significant costs to health systems for their treatment. Non-auditory effects of occupational noise exposure also offer dangers, in addition to chronic illnesses, the greater propensity for accidents at work stands out, as the sound level at which workers are exposed during their working hours is higher. Taking these issues into consideration, the objective of the study was to characterize the internal noise in an industry. For this, two methodologies were performed: (i) evaluation by noise dosimeter of the workers' sound exposure and, (ii) indoor noise mapping of the different sectors of the evaluated industry. The first one allowed the knowledge of the three factories that make up the industry, their forms of production, existing work activities and the definition of the target audience for the formation of homogeneous group of exposure (HGE), which have their locations and sound profiles explained. The second one involved the identification of the built environments and their acoustic properties, the knowledge of the sound sources and the use of the ODEON Industrial software for the construction of noise maps throughout the factories. The results obtained from the different perspectives showed the magnitudes and locations of the noise levels in the industry, allowing the precise characterization of which points need to be prioritized in the control measures; which could be planned according to the risk management hierarchy, aiming at providing health, safety and improving the quality of life at work. This research provided an innovative scientific approach by using both methods, dosimetry and noise maps, which complemented and enriched each other by providing self-analysis of results, greater reliability of noise exposure data, and a guide for company planning. Such an approach can be used in different population sizes of the target audience and also in other contexts of occupational noise.

Keywords: Metallomechanical industry; Industrial noise; HGE; Noise mapping; Control measures.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Variação da amplitude e período de onda sonora necessários para ocasionar o som	17
Figura 2 – Variação de frequência de 10 Hz a 10 kHz e os comprimentos de onda associados	19
Figura 3 – Curvas de ponderação do nível de pressão sonora ajustadas de acordo com frequências.....	22
Figura 4 – Resumo de L_p , análise espectral por bandas de oitava e filtros ponderadores de frequência.....	23
Figura 5 – Fenômenos de reflexão, absorção e transmissão da onda sonora.....	24
Figura 6 – O tempo de reverberação (T_{60}) exemplificado como um decaimento no nível sonoro.....	25
Figura 7 – Via auditiva e componentes funcionais para a cognição da energia sonora.....	27
Quadro 1 – Regulamentos que limitam o ruído no ambiente de trabalho em diferentes países	31
Quadro 2 – Fator de duplicação da dose e sua influência no tempo de exposição ao ruído ocupacional	34
Quadro 3 – Normas de gestão de riscos auditivos e seus correlatos métodos de monitorar o ruído	36
Figura 8 – Hierarquia estabelece formas das mais às menos efetivas para o controle de ruído	38
Figura 9 – Curvas da relação do tempo de uso do EPI e decaimento na atenuação efetiva do ruído.....	40
Figura 10 – Planta baixa do recinto industrial e identificação das atividades em suas fábricas.....	49
Quadro 4 – Informações da fábrica 1 levantadas em fase exploratória	50
Figura 11 – Setores de atividades no processo industrial da fábrica 1	51
Quadro 5 – Informações da fábrica 2 levantadas em fase exploratória	51
Figura 12 – Diferentes áreas com atividades de montagem na fábrica 2.....	51
Quadro 6 – Informações da fábrica 3 levantadas em fase exploratória	52
Figura 13 – Boxes com trabalho de soldagem e caldeiraria na fábrica 3.....	52
Figura 14 – Processo industrial nas fábricas e meios com potencial ruidoso	53

Quadro 7 – Distribuição dos pontos amostrais na indústria para a medição da exposição ao ruído ocupacional	54
Quadro 8 – Configurações de medição adotadas de acordo com normatização NR 15 selecionada	56
Figura 15 – Calibração do audiodosímetro e sua equipagem junto ao usuário.....	57
Figura 16 – <i>Software</i> de análise de dados do medidor modelo 4445.....	58
Quadro 9 – Materiais com respectivas absorções sonoras e área de absorção total em cada fábrica	63
Figura 17 – Pontos de medição que contém dados reais de pressão sonora para autoajuste da modelagem	65
Figura 18 – Mapeamento evidencia a distribuição de ruído ao longo do <i>layout</i> da fábrica 1.....	73
Figura 19 – T_{30} e T_{20} em bandas de oitavas como resultado dos materiais e suas áreas na fábrica 1.....	75
Figura 20 – Mapeamento evidencia a distribuição de ruído ao longo do <i>layout</i> da fábrica 2.....	77
Figura 21 – T_{30} e T_{20} em bandas de oitavas como resultado dos materiais e suas áreas na fábrica 2.....	78
Figura 22 – Mapeamento evidencia a distribuição de ruído ao longo do <i>layout</i> da fábrica 3.....	79
Figura 23 – T_{30} e T_{20} em bandas de oitavas como resultado dos materiais e suas áreas na fábrica 3.....	81
Figura 24 – Cenário hipotético que considera novas superfícies de absorção sonora nas fábricas 1 e 3	83
Figura 25 – Mapa preditivo com os níveis de ruído na fábrica 1 após se inserir material absorvente	84
Figura 26 – Mapa preditivo com os níveis de ruído na fábrica 3 após se inserir material absorvente	85
Figura 27 – Comparação entre antes e depois da medida de controle nos mapas de ruído das fábricas	86
Figura 28 – Dinâmica de trabalho administrada quanto ao nível de ruído	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição dos resultados da avaliação da exposição de trabalhadores ao ruído industrial da fábrica 1.....	64
Tabela 2 – Distribuição dos resultados da avaliação da exposição de trabalhadores ao ruído industrial da fábrica 2.....	65
Tabela 3 – Distribuição dos resultados da avaliação da exposição de trabalhadores ao ruído industrial da fábrica 3.....	66
Tabela 4 – Índices de coeficiente de variação e incerteza expandida do conjunto de dados.....	67
Tabela 5 – Distribuição dos níveis de ruído das avaliações individuais de GHE <i>versus</i> mapeamento nesses locais da fábrica 1.....	74
Tabela 6 – Distribuição dos níveis de ruído das avaliações individuais de GHE <i>versus</i> mapeamento nesses locais da fábrica 2.....	78
Tabela 7 – Distribuição dos níveis de ruído das avaliações individuais de GHE <i>versus</i> mapeamento nesses locais da fábrica 3.....	80
Tabela 8 – Materiais característicos para absorção sonora e suas áreas totais de absorção preditiva	83
Tabela 9 – Controle a partir de tempo de exposição planejando ligado a novo nível sonoro máximo.....	88
Tabela 10 – Comparação da capacidade de atenuação de ruído entre EPIs.....	91
Tabela 11 – Exposição ao ruído atenuada pelo uso de EPI, tipo inserção e concha	91

Lista de SIGLAS

ACGIH	<i>American Conference of Governmental Industrial Hygienists</i>
CV	Coeficiente de variação
D ₈	Dose de ruído projetada para 8 horas de jornada de trabalho
D%	Dose de exposição individual ao ruído
dB	Decibel
EPI	Equipamento de Proteção Individual
FDM	<i>Full Day Measurement</i>
GHE	Grupo Homogêneo de Exposição
Hz	Hertz
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
L ₁₀	Nível sonoro excedido em 10% do tempo de medição
L ₅₀	Nível sonoro excedido em 50% do tempo de medição
L ₉₀	Nível sonoro excedido em 90% do tempo de medição
L _p	Nível de pressão sonora ambiental
L _{p,A,eq,T}	Nível de pressão sonora equivalente em dB(A) durante um intervalo de tempo T
L _{p,A,eq,T8}	Média logarítmica de exposição diária ao ruído ponderado em A
L _{p,A,eq,T,n}	Nível de pressão sonora equivalente da medição “n”
L _{p,A,eq,TF}	Nível de pressão sonora equivalente com redimensionamento
L _{p,Cpico}	Nível de pressão sonora de pico ponderado em C
NHO 01	Norma de Higiene Ocupacional n° 1
NR 15	Norma Regulamentadora 15
NRR	Nível de Redução do Ruído
NRR _A	Nível de Redução do Ruído em ponderação dB(A)
PAO	Perda Auditiva Ocupacional
SPL	Nível de pressão sonora mapeado
T ₃₀	Tempo de reverberação
T _F	Tempo de exposição que falta para concluir jornada de trabalho
T _{MÁX}	Tempo máximo de exposição individual ao ruído
T _{PLAN}	Tempo máximo de exposição planejado administrativamente
U	Incerteza expandida da série de medições

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA SOCIAL	14
1.2 OBJETIVOS	15
1.3 INSERÇÃO DESSA PESQUISA E O ESPECTRO CIENTÍFICO	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 O SOM, O RUÍDO E O NÍVEL DE PRESSÃO SONORA (NPS)	17
2.2 MEDIDORES SONOROS E FILTROS PONDERADORES.....	20
2.3 COMPORTAMENTO DO SOM E TEMPO DE REVERBERAÇÃO	23
3 ANTECEDENTES CIENTÍFICOS	27
3.1 EXPOSIÇÃO AO RUÍDO E SAÚDE HUMANA	27
3.1.1 EFEITOS AUDITIVOS.....	27
3.1.2 EFEITOS NÃO AUDITIVOS	29
3.2 MECANISMOS DE CONTROLE DO RUÍDO OCUPACIONAL	30
3.2.1 REGULAMENTAÇÃO	31
3.2.2 MONITORAMENTO DO NÍVEL DE RUÍDO	34
3.2.3 INTERVENÇÕES DE CONTROLE: NA FONTE, NO AMBIENTE E NO RECEPTOR	37
3.2.4 MAPEAMENTO SONORO	43
4 MATERIAIS E MÉTODOS	48
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO	48
4.1.1 CONHECIMENTO DOS AMBIENTES DE FABRICAÇÃO	48
4.1.2 O PROCESSO PRODUTIVO SOB A ÓTICA ACÚSTICA	53
4.2 AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO AO RUÍDO OCUPACIONAL	54
4.2.1 ANÁLISE DO TRABALHO E GRUPOS HOMOGÊNEOS DE EXPOSIÇÃO (GHE)	54
4.2.2 MEDIÇÃO DA DOSE DE EXPOSIÇÃO AO RUÍDO	55
4.2.3 VARIÁVEIS DE ESTUDO.....	59
4.2.4 ÍNDICES ESTATÍSTICOS E NÚMERO DE PICOS.....	61
4.3 MAPEAMENTO SONORO	62
4.3.1 MODELAGEM GEOMÉTRICA	62
4.3.2 MAPEAMENTO INTERNO E MÉTODO DE CÁLCULO	64
5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	67

5.1 AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO AO RUÍDO OCUPACIONAL	67
5.2 MAPAS DE RUÍDO DOS AMBIENTES INDUSTRIAIS	73
5.3 MEDIDAS DE CONTROLE PARA O CENÁRIO ATUAL DE RUÍDO INDUSTRIAL	82
5.4 LIMITAÇÕES E PONTOS FORTES DA PESQUISA	93
6 CONCLUSÃO	94
REFERÊNCIAS.....	96
APÊNDICE A.....	110
APÊNDICE B	113
APÊNDICE C	114
APÊNDICE D	115
APÊNDICE E	116

1 INTRODUÇÃO

A exposição ao ruído no ambiente de trabalho pode ser considerado um importante fator de risco para o desenvolvimento da Perda Auditiva Ocupacional (PAO), já que representa cerca de 16% das causas de perda auditiva na vida adulta (OMS, 2020). Por envolver fatores de risco modificáveis e não modificáveis, este cenário pode ser minimizado por diferentes medidas de controle para redução dos níveis de ruído nos locais de trabalho.

Além dos efeitos auditivos da exposição ao ruído ocupacional, existem ainda os efeitos não auditivos, que embora afetem de maneira diferente o organismo, representam potenciais fatores de risco para diversas doenças crônicas. Além disso, este tipo de exposição pode ser um risco à integridade física da pessoa exposta, já que graves lesões ou até mesmo a morte também podem estar associadas à exposição ao ruído, uma vez que o crescimento do nível de ruído em que pessoas são submetidas durante suas jornadas de trabalho, aumenta proporcionalmente o risco de acidentes de trabalho (ALI, 2011; YOON et al., 2015).

Estima-se que, em 2020, cerca de 466 milhões de pessoas tenham convivido com problemas relacionados a perda auditiva, ou seja, 6,1% da população mundial, o que representa mais de US\$ 750 bilhões em gastos anuais para o tratamento de perda auditiva globalmente nos sistemas de saúde (OMS, 2020). Destaca-se que o controle das condições ambientais e ocupacionais podem ser considerados como fatores modificáveis para a perda auditiva, interferindo no planejamento de ações de prevenção em busca de redução da exposição, especialmente nos ambientes de trabalho.

Tendo em vista a presença de riscos associados à poluição sonora ocupacional, métodos de avaliação do ruído nos espaços de trabalho necessitam ser considerados. A avaliação da exposição baseada em parâmetros quantitativos como os níveis de pressão sonora, ruído em termos de intensidade, localidade e frequência espectral, além do tempo de exposição podem ser convenientemente utilizados para o desenvolvimento de medidas de caráter preventivo associados à exposição ocupacional ao ruído, viabilizando intervenções administrativas e de engenharia para a diminuição e controle desse agente ambiental (GUARNACCIA; QUARTIERI; RUGGIERO, 2014).

Analogamente, o mapa acústico ou mapa de ruído é uma ferramenta pertinente para a caracterização do ruído ocupacional, sendo capaz de fornecer informações sobre as áreas mais afetadas pela incidência de ruído em caráter diagnóstico e preditivo, etapa fundamental para o dimensionamento adequado dos postos de trabalho, de medidas técnicas de modificação da infraestrutura de trabalho e até do ambiente construído (BOZKURT; DEMIRKALE, 2017).

Nesse sentido, o presente trabalho buscou valer-se dos dois procedimentos, tanto a avaliação por medição da exposição ocupacional quanto o mapeamento acústico, para obter a caracterização sonora no ambiente industrial, como uma potencial medida de controle das situações de risco.

As técnicas de medição empregadas e os mapas computacionalmente calculados, de acordo com as características experimentais em campo, fornecem os resultados finais. A partir desses resultados, pode-se caracterizar o ambiente como: (i) totalmente ruidoso (poluído); (ii) com níveis aceitáveis de ruído ou; (iii) uma situação intermediária que transite entre os dois extremos. Parâmetros acústicos com base científica foram então utilizados, os quais são os responsáveis pela confirmação de cenários de alto risco, ou indicação de um cenário alternativo, com níveis intermediários e assim, riscos aceitáveis de exposição. A delimitação da pesquisa se aplica ao ambiente interno de uma sede industrial e aos postos de trabalho avaliados para análise e determinação dos perfis sonoros estudados.

1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA SOCIAL

A justificativa deste estudo vem do anseio de oferecer suporte intelectual à indústria, algo que se encaixa no rol de funções sociais a serem exercidas por uma Universidade. Tendo como possíveis impactos o apoio de engenharia para a futura tomada de decisões técnicas na empresa, a criação de um inventário de ruído industrial, auxiliando na quitação das exigências legais e padronização normativa, fomentando uma mentalidade pautada nos preceitos de prevenir os riscos ocupacionais associados à execução das atividades de trabalho. Além disso, poderá proporcionar uma abordagem de soluções em prol da melhoria direta e indireta do ambiente de trabalho, o que constitui a grande motivação para a realização da atual pesquisa. Assim, tem-se clara a ideia de que a pesquisa pode apoiar questões

técnicas e de engenharia, mas também, evidencia sua interrelação direta com a saúde pública e a qualidade de vida no trabalho.

1.2 OBJETIVOS

- Objetivo geral

Caracterizar o ruído industrial interno por meio da avaliação da exposição sonora de trabalhadores durante suas atividades laborais, como também pelo mapeamento acústico dos diferentes setores da indústria em estudo.

- Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Avaliar os níveis de ruído aos quais os trabalhadores estão expostos para identificação das áreas de risco para saúde e segurança do trabalho;
- b) Realizar o mapeamento acústico dos ambientes industriais por modelagem computacional, a partir de pontos de medição, afim de estabelecer uma caracterização da qualidade acústica nos ambientes avaliados;
- c) Fornecer a predição do ruído em toda a extensão das áreas de trabalho, indicando os setores de maior risco, com embasamento nos passos precedentes;
- d) Apresentar cenários preditivos para gestão dos possíveis riscos provenientes do ruído industrial.

1.3 INSERÇÃO DESSA PESQUISA E O ESPECTRO CIENTÍFICO

Afim de posicionar a atual pesquisa no espectro científico de suas áreas correlatas em função do tema abordado e indicar sua parcela de inovação científica, bem como, em quais discussões melhor proveito poderia ser obtido pela sua utilização, confrontar a presente proposta com o que há de mais comum nesse campo de estudo se torna pertinente.

Muitos trabalhos científicos, assim como este, dedicaram-se ao estudo do ruído industrial. Contudo, uma parte deles foram voltados para a quantificação do ruído industrial *outdoor*, os quais acabam se relacionando mais com a área de ruído ambiental, o que de certa forma requer um menor envolvimento e conhecimento de campo da(s) fonte(s) de ruído industrial e do ambiente industrial interno propriamente dito (BOZKURT; DEMIRKALE, 2017; CASAS et al., 2014). Enquanto outros tiveram em seu escopo a engenharia para minimização do ruído no recinto industrial, voltados para o estudo das particularidades acústicas da(s) fonte(s) de ruído (PAPINI et al., 2017; CHATILLON, 2007); ou desenvolvimento de materiais de melhor desempenho acústico e controle acústico de ambientes internos (BAKHSH, 2019; DUCOURNEAU; PLANEAU, 2003; MORZYŃSKI; SZCZEPAŃSKI 2018; DUPONT; GALLAND, 2009).

Em relação ao viés ocupacional, diversos estudos preocuparam-se com os efeitos na saúde correlacionados com a exposição ao ruído (CHANG et al., 2013; ALI, 2011; MOHAMMADI, 2008; HOSSEINABADI et al., 2019; ZAW et al, 2020; RUBI-ROMERO, 2018) e/ou aqueles que tiveram a avaliação ocupacional pela quantificação dos níveis sonoros de exposições diárias individuais consideradas também em ambiente industrial e outras formas de trabalho, em que não raro puderam ser vistos altos níveis de ruído ocupacional (KARANDAGH et al., 2021; AREZES; BERNARDO; MATEUS, 2012; FERNÁNDEZ et al., 2009; ZANNIN, 2008; PARK et al., 2020; SAYLER et al., 2019; TAO et al., 2016);

Outros foram inovadores ao estudar a forma de realizar o mapeamento de ruído com mecanismo computacional ou modelo matemático (OVSIANNIKOV; OVSIANNIKOV, 2017; BILLON et al., 2012; KERÄNEN; HONGISTO 2010; HODGSON, 2003); e a quantificação e predição do ruído através dos mapas sonoros, ainda que em ambientes fechados estes sejam escassos (GUARNACCIA et al., 2014; MAJIDI et al., 2019; ANIZAR et al., 2018; HASSANVAND et al, 2018).

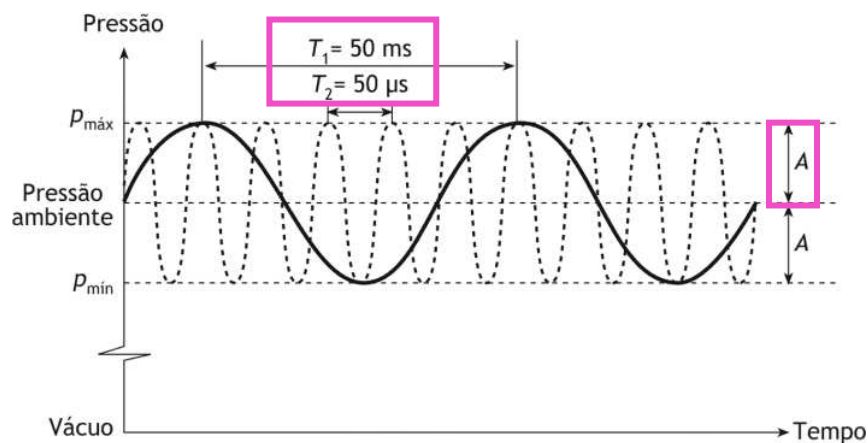
Porém, a fraca integração destes com as questões ocupacionais é perceptível nesse contexto científico. É justamente nesse ponto que o trabalho oferece a maior inovação, pois situa-se ao potencialmente suprir a lacuna do estudo do ruído industrial *indoor* unindo os métodos de avaliação de ruído ocupacional já existentes há algum tempo e amplamente utilizados cientificamente, com a forma de mapeamento de ruído, que quando juntos podem potencialmente ampliar as perspectivas da forma de caracterização do ruído no ambiente de trabalho industrial.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O SOM, O RUÍDO E O NÍVEL DE PRESSÃO SONORA (NPS)

O entendimento do som e da sua natureza pode ser traduzido como a resultante de uma equação matemática em termos de variações de pressão no ambiente. Uma variação de pressão, na qual o sistema auditivo será capaz de interpretá-la toda vez em que sua amplitude for $\geq 2 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$, e ocorrer de forma cíclica para que possa ser detectada como som. A propagação da pressão devido a excitação vibracional das moléculas de ar é transmitida então uma a uma por choques repetidos em diferentes regiões do espaço à velocidade de propagação do som no ar, por isso fica evidente que no vácuo não haverá som. A outra condição além da amplitude, envolve o período da variação de pressão ambiente que deve corresponder às frequências dentro da faixa de audibilidade, fora isso, estariam sendo produzidos ultra ou infrassons (BISTAFA, 2018). A Fig.1 conseguinte ilustra esse pressuposto:

Figura 1 – Variação da amplitude e período de onda sonora necessários para ocasionar o som



Fonte: Adaptado de Bistafa (2018).

Ainda que se fale da ocorrência do mesmo fenômeno físico que manifesta tanto o som quanto o ruído, há uma tênue diferença que é capaz de diferenciá-los enormemente. Fatores objetivos, como a produção do som organizadamente por frequências, podem resultar em uma percepção agradável do mesmo, enquanto que a produção desordenada de som pode causar uma sensação desagradável, podendo ser interpretada como incômodo. Assim, o som é tudo aquilo que é audível

e o ruído é um som indesejado, no qual sua rejeição irá depender do ouvinte e das circunstâncias em que está sendo ouvido (CCOHS, 2019).

Dadas as variações da magnitude de sons não puros, como o ruído, que seguem uma grande oscilação de onda, é necessário conhecer um indicador representativo da onda sonora. Nesse intuito, o nível de pressão sonora expresso em (3) é o mais utilizado pela sua facilidade de medição e por se relacionar com a sensação mínima de audibilidade a cerca de 1000 Hz. O surgimento de seu equacionamento se deve justamente à sensação de audibilidade ou “unidade de sensação” em (1), descrito pela primeira vez por Harvey Fletcher (1884–1981), que relacionou a escala logarítmica com o mínimo de potência sonora detectável pelo ouvido humano, introduzindo a escala do decibel (FLETCHER, 1926). Para expressar a relação de (1) em termos de pressões sonoras, é usado a relação de potência e intensidade sonora em ondas esféricas, que obedece à lei do inverso do quadrado da distância. Ao aplicar esta escala para a medição da pressão sonora, pressupõe-se que essa potência é proporcional ao quadrado da pressão sonora como o descrito em (2), e a escala logarítmica é então usada. Assim, relacionando as equações (1) e (2) é obtido o indicador ambiental de interesse, o nível de pressão sonora em decibéis, que objetiva avaliar o perigo e a perturbação por fontes de ruído (LONG, 2014a):

$$\text{unidade de sensação} = 10 \log \left(\frac{W'}{W_0} \right) \quad (1)$$

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho c} \quad (2)$$

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} \quad (3)$$

Onde:

W' – potência sonora registrada [W];

W_0 – potência sonora de referência [W], igual a 1 dB que é igual a $W' = 1,26 \cdot W_0$;

r – distância da onda a partir do centro de uma fonte sonora esférica [m];

ρc – impedância característica de propagação do som no ar à temperatura ambiente [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$];

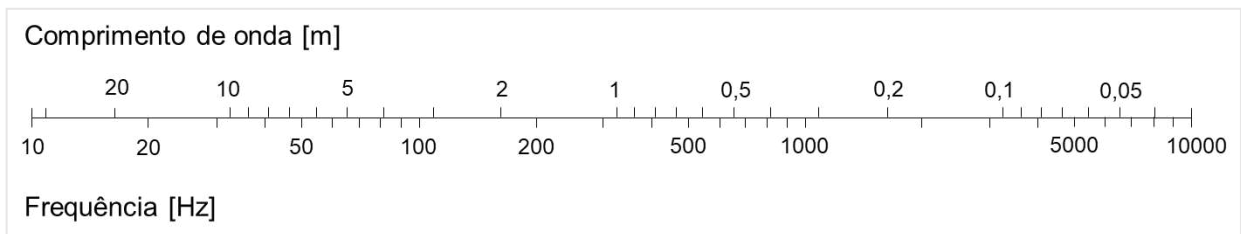
p – pressão sonora [Pa];

p_0 – pressão sonora de referência, igual a $20 \mu\text{Pa}$;

L_p – nível de pressão sonora (NPS) ambiental [dB].

A depender das variações de frequência em um mesmo nível de pressão sonora ambiental, sua percepção pode ser de maior ou menor magnitude, e ainda, como um estímulo grave para menores frequências, ou agudo em altas frequências. A Fig. 2 traz as variações de frequência da onda sonora com seus respectivos comprimentos de onda.

Figura 2 – Variação de frequência de 10 Hz a 10 kHz e os comprimentos de onda associados



Fonte: Adaptado de Kuehn (2010).

Pelo entendimento do ruído não mais como um valor único, mas por uma “análise espectral”, ou seja, como a onda sonora se distribui em um espectro de frequência, informações úteis podem ser disponibilizadas a partir desse passo em um estudo acústico. Essa análise se torna fundamental para compreensão de como o ruído afeta os seres humanos; tanto para a avaliação de risco de perda auditiva e outros efeitos na saúde em decorrência da exposição ao ruído; como em decisões de projetos para medidas de controle do ruído por meio de tecnologias ou por barreiras físicas e em mapeamento de fontes sonoras como forma de reduzir o impacto negativo do ruído no ambiente. De acordo com o objetivo e a complexidade do ruído estudado é julgado as larguras de bandas de frequência apropriadas a serem usadas na medição de ruído, sendo as mais comumente utilizadas, bandas de um e de um terço de oitava (KUEHN, 2010).

A explicação para bandas de oitava decorre de que a largura dessa banda será em função da frequência central e suas frequências limítrofes, dado por $1/n$, nas quais por exemplo, bandas de $1/3$ de oitava corresponderão a 23% das frequências centrais, enquanto que bandas de 1 oitava têm essa correspondência em 71%. Quanto maior for o “n”, mais detalhada será a análise espectral que contém

a energia sonora analisada. A menor largura das bandas implica no maior poder de discriminação da frequência de um espectro de ruído. Assim, ao tomar a frequência central de 1000 Hz para expressão da ideia mencionada, em bandas de frequência de uma oitava os limites inferiores e superiores seriam, respectivamente, 701 Hz e 1.420 Hz, ao passo que bandas de 1/3 de oitava possuiriam limites de 891 Hz e 1.122 Hz. Isso significa que maior precisão estaria sendo fornecida para análise do comportamento do ruído no segundo caso. Além disso, possibilitaria a definição de bandas críticas, que em outras palavras são as quais estão concentradas maior parte da intensidade do som dependente do NPS (ISO 532-1, 2017).

2.2 MEDIDORES SONOROS E FILTROS PONDERADORES

Existem diversos tipos de equipamentos aptos à captação do NPS no ambiente, dentre eles o audiodosímetro e o medidor de pressão sonora, os quais estão inseridos no contexto deste estudo, e portando ganham maior detalhamento no capítulo 4. Contudo, aqui serão abordados seus conceitos e o necessário entendimento dos filtros ponderadores temporais e de frequência.

Os equipamentos medidores de pressão sonora ou simplesmente medidores de nível sonoro são classificados de acordo com padronização feita pela *International Electrotechnical Commission* (IEC) em sua norma 60651:1979 e suas graduais substitutas IEC 61672-1:2002 e IEC 61672-1:2013, que definem estes equipamentos em quatro classes: 0, 1, 2 e 3, diferindo pelo número e qualidade de recursos que o equipamento fornece, assim como, a precisão das medições e as características ambientais para aplicação. O padrão da *American National Standards Institute* (ANSI) por meio da norma ANSI S1.4:1983 também elenca os medidores em diferentes classes: 0, 1 e 2. Em ambas normatizações a precisão da medição é reduzida conforme o número da classe aumenta, influenciando diretamente nos custos de comercialização:

- Classe 0: é um equipamento de referência laboratorial para a calibração de demais medidores;
- Classe 1: precisão para uso em laboratórios ou medições em campo que as condições do ambiente possam ser controladas;
- Classe 2: é aplicado para uso geral de campo possuindo precisões inferiores;

- Classe 3: fornece uma estimativa preliminar e aproximada dos níveis de pressão sonora no ambiente.

Apesar do uso mais frequente dos instrumentos do tipo 1 em laboratório, no qual as condições de medição podem ser controladas, esta classe de equipamento é indicada também para medições de campo, principalmente por se tratar de equipamentos leves e versáteis para esse fim, além de garantir uma boa qualidade de precisão nas medições, adequados para trabalhos de caráter científico. Contudo, as condições de campo podem vir a exercer influências na qualidade de medição.

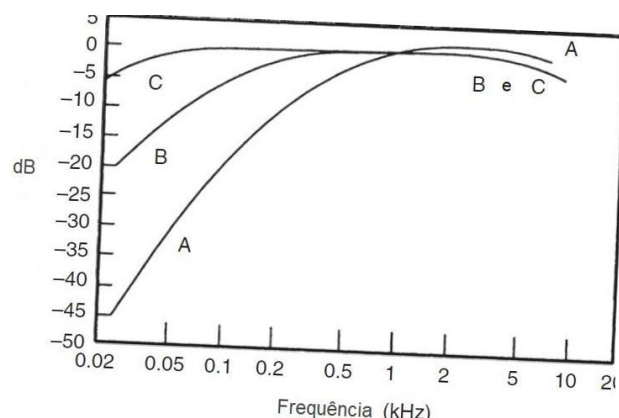
Em relação ao filtro ponderador temporal, trata-se de um dos componentes internos dos medidores sonoros. Possui a função de reduzir as flutuações da forma de onda irregular dos sons, visando a facilitação das leituras de ondas sonoras pelo olho humano. Além disso, trata-se de uma configuração baseada em uma constante de tempo selecionável nos equipamentos, podendo ser “*slow*” ou “*fast*”, onde essas nomenclaturas estão associadas à rapidez em que o dispositivo acompanha as flutuações do NPS medido. Na escala *slow* o tempo de resposta dos medidores é de 1 segundo, havendo uma suavização da variação do valor médio medido, mais adequado para ruídos de comportamento contínuo; enquanto que na escala *fast* o tempo de resposta varia entre 200 e 125 ms, a depender do tipo de equipamento, sendo útil para medições de eventos transitórios e não contínuos em pequenos intervalos de tempo. Para sons impulsivos ou de pico existe uma escala própria “*impulse*” onde o tempo de resposta poderá ser da ordem de 35 μ s (LAMANCUSA, 2000).

Esses tempos de resposta são importantes porque os medidores de nível sonoro realizam cálculos através da média exponencial, em que os novos valores são integrados com valores antigos dentro da medição, que são ponderados para reduzir o peso de sua influência à medida que são combinados. A taxa na qual os dados antigos são suprimidos para determinar o comportamento da média indicada é fornecida pelas escalas *fast* e *slow*. Assim, quando a soma que está se medindo é estável, as duas taxas tendem a produzir o mesmo resultado, mas se o som mudar rapidamente de nível as duas taxas irão diferir substancialmente na faixa de muitos decibéis, por isso a importância da escolha adequada da ponderação temporal de medição (PETERSON, 1980; GRUBEŠA et al., 2020).

Com relação aos filtros ponderadores de frequência, geralmente integrantes dos equipamentos de medição sonora, permitem a captação da energia sonora em bandas de frequências específicas, funcionando com um princípio de seletividade a partir de ressoadores eletrônicos. Assim, certas frequências são ressoadas e terão uma resposta de sinal intenso, enquanto simultaneamente, outras são rejeitadas ou penalizadas, gerando sinais de baixa magnitude nessas. A modificação do espectro sonoro é essencial para se obter uma resposta que tenta se aproximar à forma como o ouvido humano responde à sonoridade das intensidades do som, aplicando essas alterações na entrada do sinal sonoro em determinadas frequências (LAMANCUSA, 2000; BISTAFÁ, 2018). Na Fig. 3 estão ilustrados como os filtros ponderadores agem, alterando o sinal sonoro de entrada, que está representado no eixo vertical. Cada um dos filtros possuem as seguintes particularidades:

- A – penaliza baixas frequências comportando-se como um filtro que passa altas frequências; é simbolizado por dB(A)
- B – raramente utilizado em medições, é considerado o filtro mediano para penalizar baixas frequências; representado por dB(B)
- C – utilizado para NPS de grande magnitude e de rápida duração, faz um contorno de intensidade quase linear das frequências; expresso em dB(C)
- D – não mostrado pela figura, é um caso particular de aplicação para ruídos de aeronaves; quando utilizado é representado por dB(D)
- dB(lin.) – utilizado em equipamentos que não possuem os filtros ponderadores; substitui a ponderação (C) e é expresso simplesmente por dB.

Figura 3 – Curvas de ponderação do nível de pressão sonora ajustadas de acordo com frequências

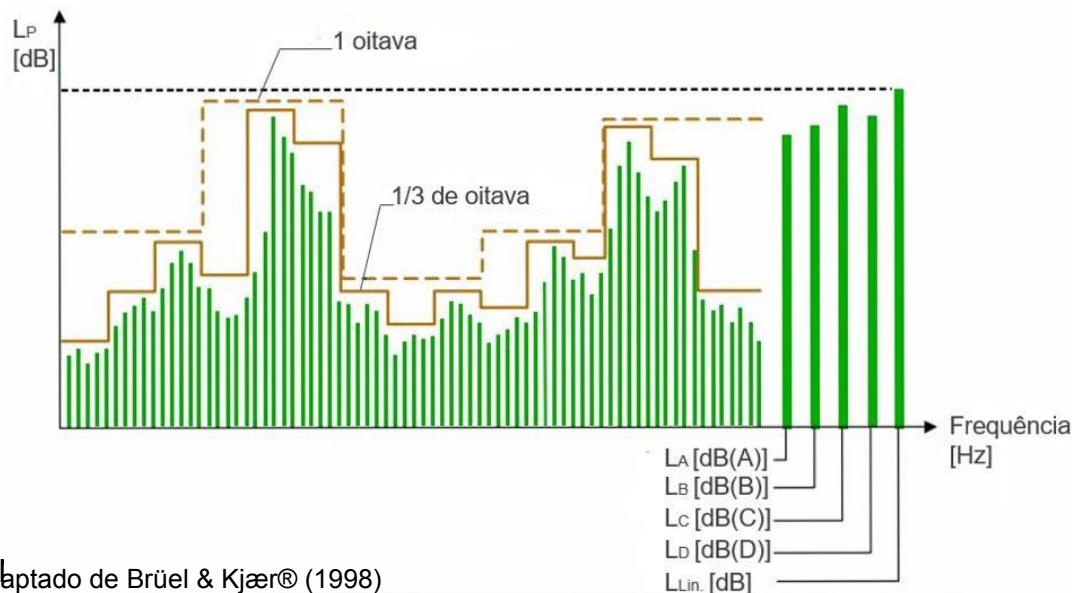


Fonte: adaptado de Martyr; Plint (2012).

Entre os filtros de ponderação, os que possuem maior aplicabilidade são os filtros A e C, sendo que este último, aproxima a resposta auditiva para níveis sonoros de grande magnitude, sendo recomendada por algumas normas para utilização em sons de impacto. Já o filtro A, é indicado para níveis sonoros intermediários que são os que geralmente ocorrem na maior parte do tempo, é portanto, o mais utilizado. Contudo, as suas limitações devem ser observadas para que a equivalência das distribuições das frequências do som medido seja a mais conveniente de acordo com o objetivo do respectivo estudo acústico (KUEHN, 2010).

A Fig. 4 a seguir faz alusão à série de conceitos abordados até agora, exemplificando quais informações são obtidas após uma medição de ruído.

Figura 4 – Resumo de L_p , análise espectral por bandas de oitava e filtros ponderadores de frequência



Fonte: Adaptado de Brüel & Kjær® (1998)

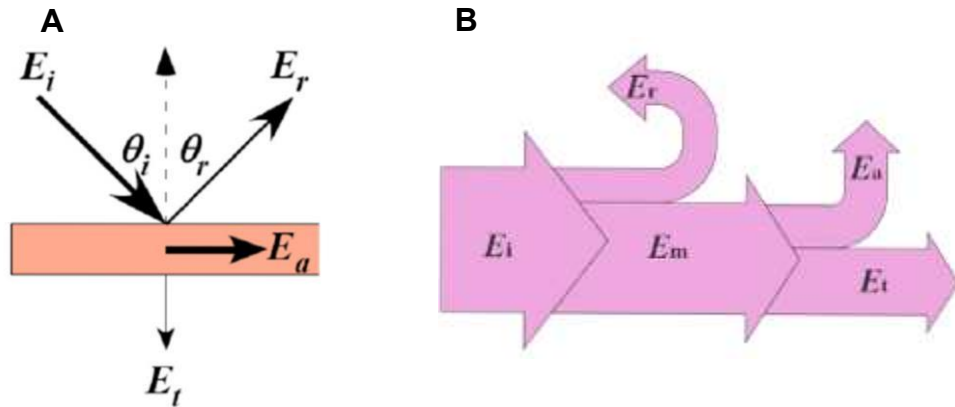
Nota-se a utilização do indicador L_p para expressão do nível de pressão sonora, conforme apresentado no capítulo 2.1; o detalhamento da análise espectral utilizando diferentes larguras de bandas de oitava e, os ajustes sofridos pela medição em função dos filtros ponderadores de frequência aplicados.

2.3 COMPORTAMENTO DO SOM E TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Existem diversos fenômenos físicos que afetam a propagação da onda sonora no ambiente, esse atribui certas particularidades em seu campo livre, fazendo com que o ruído assuma diferentes direções e sentidos, vindo a influenciar também em seu nível, especialmente em ambientes fechados, como um recinto

industrial. A Fig. 5 demonstra os fenômenos de reflexão, absorção e transmissão da energia sonora incidente em sua jornada de propagação.

Figura 5 – Fenômenos de reflexão, absorção e transmissão da onda sonora



A: Processo de propagação do som. Fonte: adaptado de Bujoreanu et al. (2017);

B: Ilustração do fluxo de conservação da energia sonora. Fonte: adaptado de Zhang et al. (2020).

A energia incidente (E_i) é a propagação da onda em seu sentido frontal, que mediante a um obstáculo poderá mudar sua direção, voltando ao meio original, ou seja, tudo o que não adentra o material (E_m), sendo absorvido (E_a) e/ou transmitido (E_t), é totalmente refletido (E_r) (ZHANG et al., 2020).

O tipo de material do obstáculo, portanto, irá definir a ocorrência desses fenômenos, em que o coeficiente de absorção é o parâmetro acústico de interesse. Esse varia com a frequência e com o ângulo de E_i , sendo expresso como a razão da energia E_a em relação a E_i , como evidenciado em (4). A absorção do som e as características físicas do ambiente definem ainda outro parâmetro acústico, o tempo de reverberação (5), indicador acústico de ambientes internos (BUJOREANU et al., 2017; SABINE, 1922).

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i} = 1 - \left(\frac{E_r + E_t}{E_i} \right) \quad (4) \quad T_{60} = 0,161 \frac{V}{A_T} \quad (5)$$

Onde:

α – coeficiente de absorção sonora [adimensional];

E_a – energia sonora absorvida por superfícies e ambiente [dB];

E_i – energia sonora total incidente [dB];

E_r – energia sonora refletida por superfícies e ambiente [dB];

E_t – energia sonora transmitida [dB];

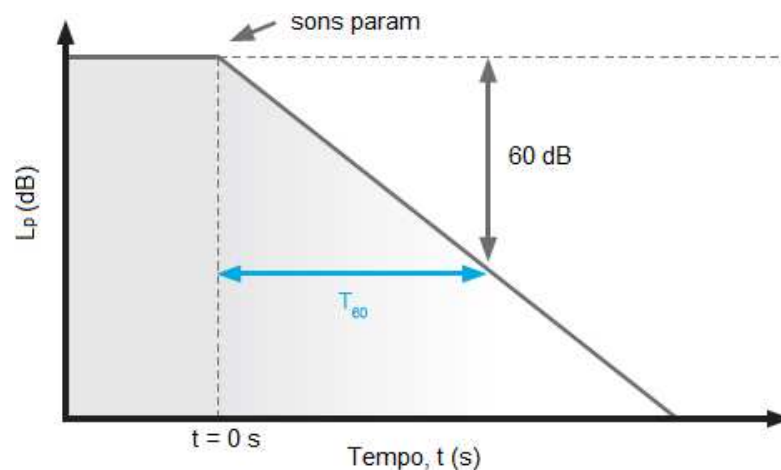
T_{60} – tempo de reverberação de Sabine [s] (SABINE, 1922);

V – é o volume do ambiente interno [m^3];

A_T – absorção sonora de um espaço interno, dado por $\sum S_i \cdot \alpha_i$, em que S_i é a área superficial do material absorvente e α_i seu respectivo coeficiente de absorção sonora [m^2].

Conceitua-se o tempo de reverberação (T_{60}), sendo ilustrado pela Fig. 6, como o tempo necessário para que a densidade média da energia contida num dado volume físico caia do seu valor inicial, de 60 dB, a partir do instante em que a fonte de excitação for extinta. Sua importância deve-se ao fato de ser um dos principais responsáveis pela qualificação da acústica de determinado recinto fechado como boa ou ruim; superfícies reflexivas aumentarão nesses recintos o T_{60} , enquanto superfícies de absorção fazem o tempo de reverberação menor. Muitas vezes pode ser difícil notar um decaimento de -60 dB, então os resultados são assumidos para decaimentos de -20 e -30 dB, representados por T_{20} e T_{30} (ISO, 2017).

Figura 6 – O tempo de reverberação (T_{60}) exemplificado como um decaimento no nível sonoro



Fonte: adaptado de ©Stil Acoustics Limited (2020).

Foi Wallace Sabine (1868–1919) que originou a ideia de um tempo característico para o som “morrer”, medindo esse tempo para quantidades variáveis de materiais absorventes, o que o fez chegar à fórmula empírica (5), recomendável quando o coeficiente de absorção médio é $< 0,2$. A fórmula de Sabine assume que a

energia sonora se difunde igualmente através de uma sala (isotrópica e homoganeamente). De fato, porém, essa condição raramente é atendida, já que as grandes áreas de uma sala são caracterizadas por diversas absorções (LONG, 2014c).

Quando o coeficiente médio de absorção for $> 0,30$, indica-se a fórmula de Norris-Eyring para reverberação, existindo ainda, tantas outras fórmulas para determinação do tempo de reverberação como as de Millington-Sette, Fitzrov, Tohyama-Suzuki, Kuttruff, Pujolle, Nilsson e outros (NEUBAUER; KOSTEK, 2001; DUCOURNEAU; PLANEAU, 2003;). Essas fórmulas produzem melhores resultados de acordo com as características da sala em questão, e de um bom conhecimento dos materiais de absorção, no entanto, a precisão das fórmulas podem ser as mesmas quando os coeficientes de absorção adequados são usados.

Com isso, foram apresentados ao longo do capítulo 2 as grandezas que descrevem o som direta e indiretamente para que o mesmo possa ser mensurado e tenha a sua dinâmica compreendida. O capítulo 3 a seguir não deixa de explorar os conceitos aqui apresentados, porém, não se deteve exclusivamente em uma exposição conceitual, mas sim, buscou elucidar antecedes científicos com os quais se acredita fornecer a contextualização dos conceitos enriquecidos com o que há de atual nas discussões científicas, os relacionando com a problemática investigada por essa pesquisa.

3 ANTECEDENTES CIENTÍFICOS

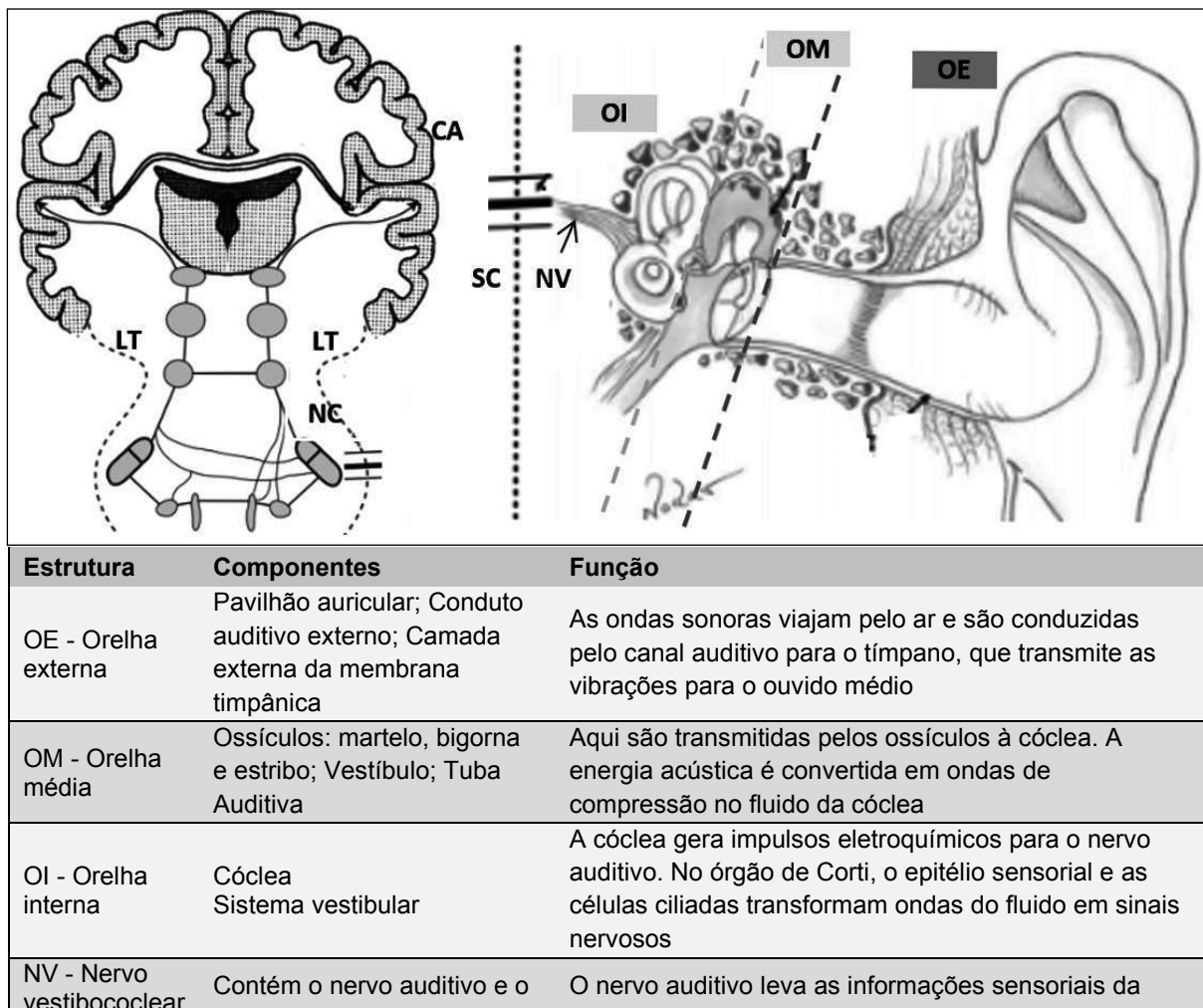
3.1 EXPOSIÇÃO AO RUÍDO E SAÚDE HUMANA

Os efeitos da exposição ao ruído na saúde humana podem ser divididos em duas categorias – efeitos auditivos e não auditivos; seus riscos para a saúde são comentados, respectivamente, nos itens 3.1.1 e 3.1.2

3.1.1 EFEITOS AUDITIVOS

Antes de relacionar as possíveis consequências da exposição ao ruído, é preciso entender o processo da audição. A via auditiva, que faz a transmissão da energia sonora ambiental para o organismo, tem a sua estrutura anatômica mostrada na Fig. 7 a seguir.

Figura 7 – Via auditiva e componentes funcionais para a cognição da energia sonora



Estrutura	Componentes	Função
	nervo vestibular	cóclea para o tronco cerebral. O nervo vestibular transmite as informações
SC - Sistema cerebral	Lobo temporal (LT); Núcleo coclear (NC), Córtex auditivo (CA)	Transmissão contínua de energia elétrica para os lobos temporais onde os sons são processados e interpretados como linguagem, ruído, etc.

Cérebro em vista frontal. Fonte: Adaptado de Musiek; Baran (2018) e Vohr (2018).

Quaisquer alterações na cadeia de eventos apresentada, podem levar à uma perda da integração, o que pode levar a uma perda auditiva do tipo condutiva, envolvendo a orelha externa e média; ou do tipo neurossensorial, com o comprometimento na orelha interna (FUCHS; TUCKER 2015). O sistema demonstrado permite a audibilidade humana na faixa de frequência de 20 Hz a 20 kHz, com intensidades que variam de -10 dB(A) a 120 dB(A), sendo o último o limiar de dor (DAVIES, 2016).

A perda auditiva pode ser também resultado de um processo natural de envelhecimento, denominado presbiacusia, resultado de predisposições genéticas e da exposição à fatores ambientais, incluindo a exposição ao ruído ao longo da vida (EGGERMONT, 2019; LAUER et al., 2019; SHA et al., 2020).

Sendo o ruído a principal causa evitável de perda auditiva, a Perda Auditiva Ocupacional (PAO), destaca-se entre os efeitos auditivos negativos. O zumbido e a dificuldade na compreensão da fala são também outros fatores associados à esta exposição.

A PAO pode ser causada por exposição a um som impulsivo de grande intensidade, ou contínuo, por exposições em longo prazo sob pressões sonoras iguais ou superiores à faixa de 75–85 dB(A). Quanto à sua origem, a herdabilidade explica até 50% do aparecimento de PAO, indicando ser resultado de uma combinação de fatores ambientais e genéticos. Embora estudos definitivos são necessários nessa direção, é incontestável que a exposição ao ruído está diretamente vinculada a uma gama de prejuízos de funcionalidades anatômicas que favorecem o seu surgimento. Além disso, o tempo de exposição tem se mostrado determinante para a PAO, de modo que a exposição ao longo da vida possui caráter cumulativo, e não seletivo de determinadas faixas etárias. (BASNER et al., 2014; SLIWINSKA-KOWALSKA; PAWELCZYK, 2013).

O zumbido também pode ser um dos sintomas advindos da exposição aguda ou crônica ao ruído por longos períodos de tempo. (BASNER et al., 2014). Essa

percepção sonora na ausência de estímulos físicos, ocorre em até 15% da população mundial, sendo a superexposição ao ruído um fator determinante para a associação com o zumbido, mas que não necessariamente levará a este. É amplamente aceito que o zumbido está associado à efeitos da exposição ao ruído e que esses fenômenos estão relacionados, sendo a PAO geralmente considerada um gatilho que leva a origem do zumbido, apesar de não ser possível precisar os níveis de pressão sonora que levem ao zumbido, tampouco o tempo de exposição (SHORE; WU, 2019; XIONG et al., 2019; GUEST et al., 2016).

3.1.2 EFEITOS NÃO AUDITIVOS

A exposição ao ruído pode representar um importante fator de risco para doenças cardiovasculares, distúrbios do sono, comprometimento cognitivo, esgotamento, risco à saúde mental por estresse, sensação de incômodo e aborrecimento, raiva e outros distúrbios emocionais – são estes os mais relatados efeitos não auditivos decorrentes da exposição ao ruído (WHO, 2018). Tanto a exposição ao ruído ocupacional quanto ao ruído de tráfego e ao ruído aéreo, estão significativamente associados ao aumento na pressão arterial; à privação do sono e o seu desencadear de níveis aumentados de hormônios que potencialmente reduzem a produtividade e a atenção (EGGERMONT, 2014).

As características do som, por sua vez, interferem nos efeitos não auditivos. Além do incômodo, independentemente da intensidade do som, estudos apontam que frequências específicas de ruído podem impactar nas atividades cerebrais (ALLAHVERDY; JAFARI, 2016); assim como frequências tonais também tendem a piorar a sensação de conforto acústico em comparação aos sons que variam frequencialmente. Uma vez que as frequências sejam mensuradas, é possível conhecer o tipo de incômodo e o impacto não auditivo causado, como nos aspectos de saúde ocupacional, em que os resultados desse monitoramento no local de trabalho, podem ser determinantes para aplicação do controle de ruído e na distribuição de funcionários para trabalhar nesses centros (JEON et al., 2011; HANSEN et al., 2011; DI et al., 2011).

De forma semelhante, o som impulsivo pode ser mais incômodo que o contínuo. Principalmente se a taxa de início do impulso excede $10 \text{ dB}\cdot\text{s}^{-1}$ e seu ponto final de impulso (primeiro ponto em que a diferença entre dois níveis sonoros

consecutivos é inferior a $10 \text{ dB}\cdot\text{s}^{-1}$) ocorrer rapidamente (RAJALA; HONGISTO, 2020).

Em se tratando de saúde ocupacional são amplas as as implicações não auditivas, um exemplo é a Hipertensão Arterial Sistêmica (HAS), dado que fora do ambiente de trabalho, a medida de pressão arterial frequentemente é inferior àquela durante o expediente (níveis sonoros $> 85 \text{ dB}$) (ISMAILA; ODUSOTE, 2014). Um estudo (WANG et al., 2018) afirma ainda que a exposição ao ruído ocupacional é um fator potencial para o aumento do risco de HAS, já que os resultados mostraram que o risco de HAS foi significativamente maior para homens, com perda auditiva bilateral e com tempo de exposição superior a 20 anos.

Para estudar o efeito do estresse induzido por ruído, o hormônio cortisol vem sendo empregado como biomarcador para satisfazer esta premissa, observando-se que seu valor médio de concentração pode apresentar aumentos significativos entre grupos expostos a ruídos acima de 85 dB(A) sugerindo que o aumento do nível de ruído leva a um aumento de cortisol (ZARE et al., 2019; YAGHOUBI et al, 2020).

Além desses, outros riscos à saúde em função da exposição ao ruído se sobressaem, como alterações significativas no peso corporal, na medida da circunferência de cintura, na ureia e/ou ácido úrico, no colesterol e na creatinina. Por fim, lesões corporais e morte estão igualmente nesta categoria, em função do aumento do risco de acidentes por trabalhadores conforme o aumento dos níveis de exposição ao ruído ao qual estão expostos (LAI; HUANG, 2019; HOSSEINABADI et al., 2019; ALI, 2011; YOON et al., 2015).

Mediante as evidências científicas supramencionadas tanto sobre efeitos auditivos quanto não auditivos, reforça-se que a exposição humana a diferentes níveis de ruído e em distintas condições de exposição, oferecem diversos riscos à saúde, e por isso demandam esforços para minimizar seus riscos.

3.2 MECANISMOS DE CONTROLE DO RUÍDO OCUPACIONAL

Explicações conceituais são encontradas neste capítulo sem perder a amplitude científica do texto. As medidas de controle de ruído destacadas compreendem o cumprimento da legislação e de formas de monitoramento. Outras perspectivas reativas e preditivas, como o mapeamento acústico, são também documentadas.

3.2.1 REGULAMENTAÇÃO

Na expectativa de fornecer padrões limites de exposição ao ruído e direcionar a avaliação dos riscos para a proteção da saúde auditiva no trabalho, regulamentos próprios surgiram em muitos países como um mecanismo de controle (Quadro 1).

Tornar esses níveis oficiais e fiscalizáveis constitui-se em uma lógica de controle e planejamento, como nos países europeus, nos quais uma vez verificados os níveis de ação, obrigatoriamente há uma sequencial priorização de medidas a serem tomadas pela entidade patronal destinadas a reduzir a exposição ao ruído.

Quadro 1 – Regulamentos que limitam o ruído no ambiente de trabalho em diferentes países

País	Nível limite 8-hr [dB(A)]	Fator de duplicação dose [dB]	Limite máximo [contínuo, pico]	Nível ação ⁽¹⁾ [dB(A)]	Nível audiometria ⁽²⁾ [dB(A)]
África					
África do Sul, 1993	85	3	—	85	85
Egito, 1994	90	5	—, 135 dB	—	—
Etiópia ⁽³⁾	—	—	—	—	—
Nigéria, 1991	90	5	—, 140 dB	—	—
América ⁽⁴⁾					
Argentina, 2003	85	3	124 dB(A), 140 dB(C)	—	85
Brasil, 2011	85	5	115 dB(A), 120 dB(C)	80	85
Canadá, 2012	87	3	120 dB(A), 140 dB	87	84
Chile, 1999	85	3	115 dB(A), 140 dB(C)	82 e 135 dB(C)	82
Cuba, 2011	85	3	135 dB(A), 135 dB	85	85
Equador, 1986	85	5	115 dB(A), 140 dB(A)	—	85
EUA, 1983	90	5	115 dB(A), 140 dB	90	85
México, 2001	90	3	105 dB(A), —	90	85
Nicarágua, 2007	—	—	—, 140 dB(C)	85 e 140 dB(C)	—
Paraguai, 1992	85	5	115 dB(A), 140 dB	—	—
Ásia					
China, 1985 ^(5, 6)	70 – 90	3	115 dB(A), —	—	—
Índia, 2000	90	—	115 dB(A), 140 dB	—	—
Japão, 1992 ⁽⁷⁾	90	3	—	85	85
País	Nível limite 8-hr [dB(A)]	Fator de duplicação dose [dB]	Limite máximo [contínuo, pico]	Nível ação ⁽¹⁾ [dB(A)]	Nível audiometria ⁽²⁾ [dB(A)]
Europa					
Alemanha, 2017	80 – 85	3	—, 135 – 137 dB(C)	80 e 135 dB(C)	80
Espanha, 2006	87	3	—, 140 dB(C)	80 e 135 dB(C)	80
França, 2008	87	3	—, 140 dB(C)	80 e 135 dB(C)	80
Itália, 2006	87	3	—, 140 dB(C)	80 e 135 dB(C)	80
Portugal, 2006	87	3	—, 140 dB(C)	80 e 135 dB(C)	80
Reino Unido, 2005	87	3	—, 140 dB(C)	80 e 135 dB(C)	80
Suécia, 2005 ⁽⁸⁾	35 – 85	3	115 dB(A), 135 dB(C)	80 e 135 dB(C)	80

Quadro 2 – Continuação

País	Nível limite 8-hr [dB(A)]	Fator de duplicação dose [dB]	Limite máximo [contínuo, pico]	Nível ação ⁽¹⁾ [dB(A)]	Nível audiometria ⁽²⁾ [dB(A)]
Oceania					
Austrália, 2011 ⁽⁹⁾	50 – 85	3	—, 140 dB	—	85
Nova Zelândia, 2016	85	3	—, 140 dB	—	—

¹ Nível de ruído para adoção preventiva de medidas de controle, desde ações administrativas até intervenções de engenharia no trabalho; ² Nível de ruído para acompanhamento com exames audiométricos do indivíduo exposto; ³ Adaptado de Ramutsindela; Mickler (2019); ⁴ Adaptados de Arenas; Suter (2014); ⁵ Adaptado de OIT (2011); ⁶ Os níveis exigidos variam conforme atividade; ⁷ Limites não obrigatórios; ^{8,9} Valores inferiores a 85 dB(A) são apenas diretrizes para avaliações caso a caso pelo tipo de trabalho; Nota: todos os regulamentos dos demais países apresentados no quadro estão dispostos no capítulo referências.

Começando por medidas administrativas de realocação do posto de trabalho e nova escolha dos equipamentos de trabalho, até a concepção de medidas técnicas, redução de ruído na fonte ou no ambiente físico construído são alguns exemplos, e em última instância, disponibilizar protetores auditivos apropriados aos expostos. Ainda sobre os países europeus, muitos de seus níveis limitantes se equiparam em virtude de serem oriundos da mesma regra – Diretiva 2003/10/CE – para estados membros da união europeia, onde as regras internas podem até serem mais restritivas, porém nunca mais permissivas. Alemanha e Suécia analogamente sobrepuseram a diretiva europeia com limites mais rígidos (OIT, 2011a; UNIÃO EUROPEIA, 2003).

Pontos comuns a todos os locais pesquisados são que abaixo dos níveis de ação nenhum tipo de proposta corretiva é exigida e que os registros desses níveis e os de acompanhamento audiométrico se aplicam independentemente do uso de EPI¹. Em outras legislações observa-se que o limite de exposição sonora, deve levar em consideração no seu cálculo a atenuação proporcionada pelos protetores auditivos utilizados. Essa penalização não é considerada pelo Brasil, onde interessa apenas aquele nível que pode ser medido no ambiente; o país ainda possui o nível máximo de pico – 120 dB(C) – mais baixo entre todos do Quadro 1, e portanto é o mais protetivo nesse sentido, contudo, não considera a quantidade de picos sonoros

¹ Equipamento de Proteção Individual: termo genérico designado a qualquer equipamento de uso pessoal e intransferível contra agentes ambientais que apresentem riscos à saúde. A partir daqui ganha conotação específica de protetores contra riscos auditivos.

ao longo da jornada, como ocorre na Índia, Cuba e Egito (ARENAS; SUTER 2014; ÍNDIA, 2000; EGITO, 1994).

Vale destacar que esses limites são concebidos visando a proteção da maioria dos expostos, mas não todas as pessoas. Na Austrália, mesmo cumprindo a legislação, onde há entre 28 e 32% da força de trabalho exposta a altos ruídos no trabalho, verificou-se 65,3 mil reclamações de PAO no período 2001–2015 sendo mais de 35% oriundas da indústria de transformação. Isso representou um custo econômico total estimado em torno de US\$ 240 milhões destinados a indenizações. De forma semelhante, 22 milhões de trabalhadores correm o risco de perder a audição devido aos riscos de ruído no local de trabalho todos os anos nos Estados Unidos, custando anualmente às empresas cerca de US\$ 242 milhões em compensações. No Brasil, informações insuficientes e subnotificações de PAO não permitem realizar estimativas parecidas, ainda assim, foram registradas 1.872 casos desde 2007 até 2012 com predomínio também nas indústrias de transformação com mais de 58% dos incidentes (AUSTRÁLIA, 2020; OSHA, 2016; BRASIL, 2016).

Formando a base para a aplicação dos limites de exposição nas legislações, o fator de duplicação da dose (q), que assumiu valores de 3 ou 5 conforme mostrou o Quadro 1 anteriormente, é um influente parâmetro no controle da exposição sonora.

Como o próprio nome diz, este fator consiste no valor fixo em dB para o qual o limite de exposição em dB(A) poderá ser o dobrado sucessivamente. Em outras palavras, é a “taxa” na qual um limite de exposição é duplicado. Por exemplo, partindo de um limite sonoro de 85 dB(A) para uma jornada de trabalho de 8 horas, com $(q) = 3$, o dobro permitido seria 88 dB(A), enquanto para um $(q) = 5$, o dobro seria 90 dB(A). Porém, é necessário salientar que toda vez que a exposição máxima é duplicada, o tempo de exposição máximo cai para a metade de uma jornada de trabalho padrão, isto é, 4 horas de exposição. Assim, os valores fixos de (q) determinam de quanto em quanto um limite de exposição na legislação poderá ser transgredido, respeitando o novo tempo de exposição. Sua dinâmica é também esclarecida pelo Quadro 2.

Quadro 2 – Fator de duplicação da dose e sua influência no tempo de exposição ao ruído ocupacional

Fator de duplicação de dose (q)			
3 dB		5 dB	
Limite exposição dB(A)	Tempo de exposição	Limite exposição dB(A)	Tempo de exposição
85	8 horas	85	8 horas
86	6,3 horas	86	7 horas
87	5 horas	87	6 horas
88	4 horas	88	5 horas
89	3,2 horas	89	4,5 horas
90	2,5 horas	90	4 horas

Fonte: Adaptado de BRASIL (2011) e CCOHS (2020).

O uso do fator de duplicação da dose poderia proporcionar maior segurança ocupacional à medida que fossem selecionadas taxas que melhor se adaptam na faixa $q = 0-11$ dB ao critério de tempo de exposição, tipo de atividade e frequência do ruído em cada situação específica. Contudo, na prática seria pouco viável executar tamanha especificidade em termos regulamentares, que devem ser universais. Considerando, porém, que nenhum fator de duplicação protege perfeitamente todos os trabalhadores de todos os tipos de exposição ao ruído, a tendência é que um fator de duplicação mais conservador (mais baixo) tenha melhor potencial para reduzir a exposição ao ruído e o ônus da perda auditiva por ele induzida. Assim, arrastar o limite para maior restrição é perfeitamente praticável e poderia ser considerado um mecanismo de controle. (BISTAFA, 2018; SAYAPATHI et al., 2014; MORATA et al., 2015),

3.2.2 MONITORAMENTO DO NÍVEL DE RUÍDO

O monitoramento de um risco deve ser pautado na técnica de gerenciamento de riscos, implementável como ferramenta integrante de sistemas de segurança e saúde ocupacional, que desempenha um especial papel para os indivíduos, pela gestão eficaz dos riscos à saúde, e para organizações, por iminentemente reduzir custos relacionados a acidentes e doenças, como, assistência médica e benefício por incapacidade. O seu resultado ajuda a estabelecer o nível de risco de uma determinada situação, permitindo melhor planejamento e controle da situação de risco (TAPPURA et al., 2015; PAPAZOGLU et al., 2017; POPESCU, 2015).

Nesse sentido, o monitoramento é um trabalho preventivo de identificação para além do cumprimento das legislações (AHMAD; RAZALI, 2019). Consiste no

conjunto de métodos quantitativos usado para avaliar ou melhorar a conformidade e sucesso de programas de proteção auditiva de uma empresa, a fim de acompanhar as metas dos programas implementados, usando a métrica de energia sonora para determinar o perigo em ambientes de alto nível de ruído. Então, o gerenciamento de ruído ocupacional no local de trabalho parte do monitoramento e depende dele. A norma ISO 9612/2009, além de outras principais representantes normativas consideram métodos quantitativos, conforme o Quadro 3 a seguir.

Os benefícios diretos do monitoramento periódico do ruído são: possibilitar a atenuação mais rápida e eficiente das emissões sonoras de maquinários (engenharia de controle); planejar políticas destinadas a mitigar a superexposição dos funcionários (controles administrativos); na indicação de níveis audiométricos e de uso de proteção auditiva (controle pessoal) e o concentrar de esforços no pilar de eliminação dos níveis mais perigosos (MOROE; KHOZA-SHANGASE, 2020).

Conforme mostrado no Quadro 3, as normas possibilitam o uso de medidores integradores de uso pessoal, também conhecidos como audiodosímetros, ou a utilização de medidores de pressão sonora como veículos responsáveis pela performance do monitoramento. Em medições com viés ocupacional o dosímetro vem sendo extensivamente empregado (RABBANI et al., 2011; KANG et al., 2013; JOHN et al., 2014; STUMPF et al., 2020). Entretanto, existem debates sobre a precisão de um audiodosímetro convencional, como também de medidores de pressão sonora, sendo o último um equipamento portado pelo avaliador e que conseqüentemente permanece distante do posto sob avaliação, de modo que quando os trabalhadores se mudam com frequência no local de trabalho, torna-se complicado os seguir ao longo da mensuração.

Em relação às limitações dos dosímetros padrões, destaca-se a influência da fala e movimentações, além das dificuldades ao avaliar a atenuação imposta pela utilização de EPIs, visto que é desejável conhecer a quantidade exata de ruído que chega ao exposto para planejar adequadamente sua proteção.

Dosímetros intra-auriculares têm viabilizado medias de exposição individual ao ruído sugerindo resultados mais válidos tanto quanto aos níveis de ruído do ambiente, quanto na atenuação efetiva proporcionada (BONNET et al., 2019; BONNET et al., 2020). No entanto, esse método pode necessitar correções acústicas se houver interesse em as comparar com medições de campo livre ou

difuso, já que a maioria dos critérios de ruído são expressos de acordo com essas circunstâncias (HUGUES et al., 2018).

Quadro 3 – Normas de gestão de riscos auditivos e seus correlatos métodos de monitorar o ruído

Objetivo	Característica	Utilização neste trabalho	Forma de monitorar
ISO 1999/2013: <i>Estimation of noise-induced hearing loss</i>			
•	•	•	••
ISO 9612/2009: <i>Acoustics – Determination of occupational noise exposure – engineering method</i>			
••	•	••	••
ANSI S12.19-1996 (R2016): <i>Measurement of occupational noise exposure</i>			
••	•	•	••
Norma Regulamentadora n° 15 (NR 15) – Atividades e operações insalubres			
•••	••	••	•
Norma de higiene ocupacional (NHO 01) – Avaliação da exposição ocupacional ao ruído			
••	••	••	••
Legenda:			
• Estima as mudanças nos limiares auditivos esperadas em populações expostas ao ruído			
•• Especifica formas de medir e calcular a exposição ao ruído em um ambiente de trabalho			
••• Define limites de exposição com aplicabilidade legal em todo território brasileiro			
• Caráter preventivo. Utiliza-se no gerenciamento de programas de prevenção auditiva			
•• Caráter compulsório. É uma imposição legal			
• Não diretamente			
•• Sim			
• Não especificado			
•• Uso de medidores integradores de uso pessoal ou medidores de pressão sonora ambiental			

No que diz respeito às avaliações realizadas por medição direta ante duas formas com dosímetro, um de turno completo e outro baseado em tarefas, todas elas para trabalhos fixos, indicaram que as duas formas de medição com dosagem concordaram bem, com diferenças entre 0,16–0,33 dB(A). Já a variação entre as medições diretas e o dosímetro de turno completo foi de 2,93–3,07 dB(A), sendo atribuída pelos erros sistemáticos da medição direta, na qual o instrumento permanece com o pesquisador (TAO et al., 2016).

Seguindo esse paralelo, ao considerar amostras em 23 empresas do ramo industrial, os métodos baseados em tarefas e de medição de dia inteiro a partir de dosímetros apresentaram resultados muito próximos, com uma leve tendência de valores mais altos para o segundo, mas com incertezas menores. Os procedimentos

experimentais sugeridos pela norma ISO 9612:2009, ainda se mostraram ser significativamente os mais sensatos para aplicações específicas, de acordo com as particularidades que o tipo de trabalho impunha. Os métodos mais demorados considerando os tempos de preparação, análise do trabalho e medição, com poucas exceções, levaram a valores mais baixos de incertezas expandidas²; demonstrando certa confiabilidade na utilização das orientações normatizadas (AREZES; BERNARDO; MATEUS, 2012).

Divergências maiores que 5 dB(A), por sua vez, foram observadas ao confrontar medidores de pressão sonora e dosímetros. Os dosímetros apresentaram maiores coeficientes de validação para a mesma finalidade; sugerindo que essa seja a abordagem preferida no monitoramento ocupacional (NEITZEL et al., 2016).

Percebe-se que os resultados científicos apontam diferenças entre as estratégias de monitoramento em termos da avaliação da exposição ao ruído ocupacional, e que os dosímetros de uma forma geral são mais seguros. Utilizar os medidores de pressão sonora, porém, pode ser da mesma forma indicado, desde que sejam observadas cuidadosamente sua viabilidade de aplicação.

3.2.3 INTERVENÇÕES DE CONTROLE: NA FONTE, NO AMBIENTE E NO RECEPTOR

Evitar que o som chegue até o receptor e provoque possíveis danos auditivos e não auditivos é o foco principal de programas de melhoria da qualidade acústica ocupacional. Para isso, intervenções são voltadas à eliminação do som na fonte, impedindo sua propagação; no meio (trajetória) controlando os níveis sonoros que chegam até o receptor; ou controlados no próprio exposto, cobrindo-o do ruído que não foi eliminado na fonte nem controlado na trajetória.

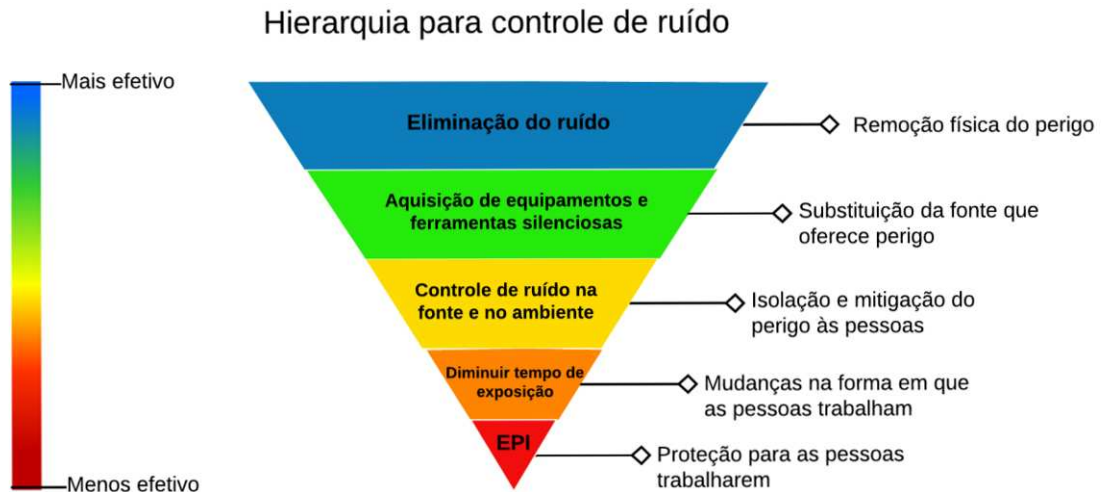
Essas ações devem ser executadas hierarquicamente pelo princípio de gerenciamento de riscos. Tal dinâmica tem de ser idealmente planejada conforme mostra a Fig. 8.

Embora sendo a eliminação o método mais eficaz, existe uma dominante falta de ênfase no controle de ruído por esse meio, que emerge pelas dificuldades operacionais práticas e pelos frequentes altos investimentos que essa medida requer. Durante muito tempo, soluções de controle de ruído foram amplamente

² Estatística da incerteza nas medições. Expressa na equação (11), página 60.

negligenciadas, devido à falta de aplicação regulamentar e uma suposição geral de que os controles de ruído em sua maioria são muito difíceis e caros para serem viáveis em uma relação custo-benefício, o que na prática acabou voltando as atenções para o uso de EPIs (MORATA; MEINKE, 2016).

Figura 8 – Hierarquia estabelece formas das mais às menos efetivas para o controle de ruído



Fonte: Adaptado de Morata; Meinke (2016).

Surgem como alternativas, as possibilidades de isolamento acústico e a absorção sonora no meio. O isolamento acústico refere-se à capacidade de reduzir a transmissão de ruído usando barreiras na fonte, como painéis de fibra para isolamento, paredes de *drywall*, barreiras densas e pesadas, e cortinas acústicas, compostos geralmente por materiais amortecedores e selantes acústicos que proporcionem o isolamento da fonte sonora. A absorção sonora refere-se principalmente à redução das reflexões do ruído. Os materiais de absorção sonora são geralmente de natureza macia, são leves e porosos como espumas acústicas, lã mineral e fibras de vidro, responsáveis pela dissipação da energia sonora por atrito devido ao movimento das moléculas de ar no interior do material, viabilizando assim, o aumento do coeficiente de absorção sonora de um recinto (BAKHSH, 2019).

Barreiras acústicas sendo instaladas no teto, nas paredes ou por painéis em suspensão, geralmente apresentam bons resultados em termos de melhora da qualidade acústicas dos ambientes internos, refletidas sobretudo na diminuição da pressão sonora, do tempo de reverberação e na melhoria de índices que expressam a qualidade de transmissão e entendimento de fala (RAJAGOPALAN; LEUNG 2013;

IANNACE et al., 2019; RYU et al., 2018; PASSERO; ZANNIN 2012). Na indústria podem ser incorporados com o mesmo princípio, valendo-se da combinação do som que é emitido pelas fontes e refletidos pelas superfícies do espaço físico.

Ao especificar as qualidades de absorção do som de um material para controle na trajetória, é necessário um estudo junto ao seu comportamento em função da frequência, variando também o coeficiente de absorção de acordo com o ângulo de incidência da onda sonora. A seleção deve se orientar então em um material de absorção de som com base em suas características para um ruído específico, a espessura do material também se altera segundo as frequências, além do seu desempenho acústico ser influenciado por um correto posicionamento em planta e seu dimensionamento adequado de acordo com as características sonoras verificadas em cada caso de aplicação (FAROOQ, 2015).

Sobre o isolamento na fonte, comumente usado para redução de ruído na indústria, o enclausuramento das máquinas pode apresentar propriedades isolantes fracas para ruídos de baixa frequência. Isso pode ser melhorado aumentando a massa (SHARMA; SARKAR, 2019); e as dimensões da barreira, o que é inaceitável em muitas aplicações. O chamado controle acústico estrutural ativo, interfere nas propriedades de isolamento acústico das paredes do enclausuramento, como no emprego de estruturas com painel duplo para controle de transmissão. Reduções do sinal acústico global e na maioria das regiões da câmara podem ficar entre 10–20 dB. O painel duplo pode ser uma solução eficaz para o problema em caso de ruído com componentes tonais, permitindo obter alta redução de sinal de baixa frequência (MORZYŃSKI; SZCZEPAŃSKI 2018). Esse controle de ruído ativo pode ser integrado a *softwares*, possibilitando a grande vantagem de modelar as melhores configurações para o enclausuramento, levando em consideração os custos, o tamanho, a simulação entre os materiais absorventes, e frequências específicas (RAO; KIRTHANA, 2016).

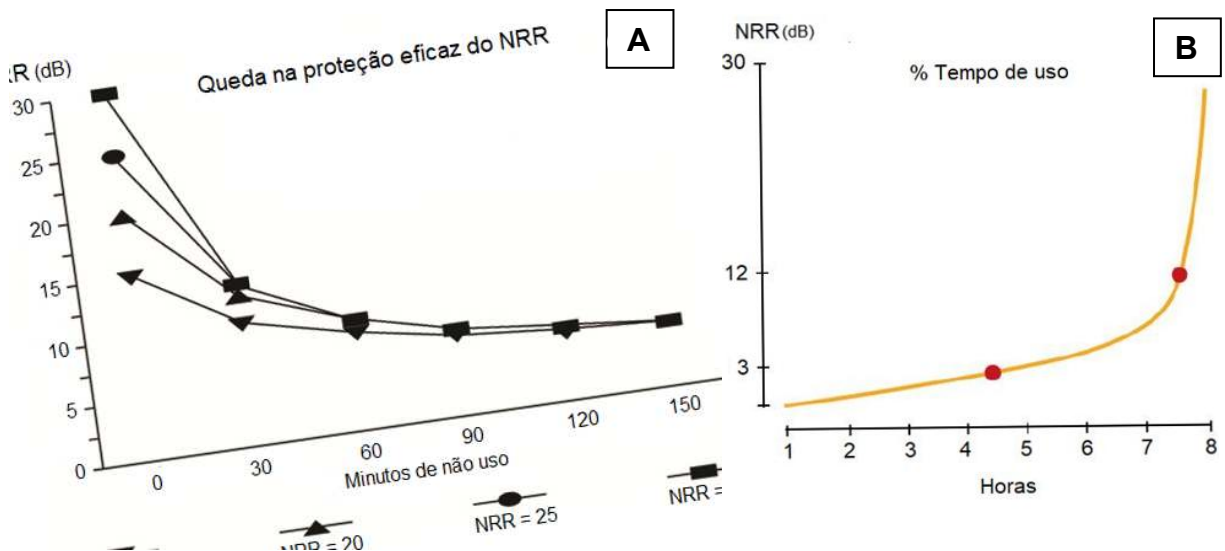
A redução do ruído na fonte pode ser a melhor opção para o tratamento acústico, ao passo que, diminuir a reverberação pela inserção de materiais absorventes também pode reduzir o nível sonoro ao qual os trabalhadores estão submetidos. Destaca-se, entretanto, que o controle de ruído e a redução do ruído não são sinônimos. Por vezes, uma solução de controle de ruído pode ser a modificação no espectro das frequências dominantes, sem ocasionar diminuições no

valor global do nível de pressão sonora, importando uma correta interpretação do contexto para elaborar a melhor solução (CREMONESI, 2013).

Penúltimo na hierarquia, os controles administrativos são realizados sob os aspectos de redução no horário de trabalho e alteração do sistema de trabalho. Prestando mais atenção à manutenção e gerenciamento de equipamento, mudanças nas máquinas ou processos, nos equipamentos e *layout* de distribuição das máquinas que possa ser mais favorável no controle de ruído do ponto de propagação até o destinatário. Todas essas alternativas de controle devem ser tomadas juntas, quando necessário, aos de isolamento e absorção de ruído (CANFENG et al., 2012).

No que concerne ao controle por EPIs, essa forma frequentemente é a mais utilizada para proteger os trabalhadores contra a exposição ao ruído. No entanto, a eficácia dessa prática pode ser comprometida quando os trabalhadores periodicamente removem seus protetores auditivos, ainda que por pequenos lapsos temporais, o que afeta muito a atenuação dos dispositivos, como o que evidencia a Fig. 9. Mesmo porque, enquanto expostos, acreditam que permanecem com o EPI em uso por tempos maiores do que realmente ficam (AREZES; MIGUEL, 2013):

Figura 9 – Curvas da relação do tempo de uso do EPI e decaimento na atenuação efetiva do ruído



A: Comportamento potencial de EPIs com diferentes NRR mediante minutos de não uso;

B: Comportamento de um EPI com NRR = 30 dB;

Fonte: Adaptado de OIT (2011b) 9A; e UNE-EN: 458 (2016) 9B.

Em ambos os gráficos ocorrem decaimentos do que seria a atenuação ideal, expresso por reduções no Nível de Redução de Ruído (NRR) que os EPIs originalmente possuem. Na imagem A, trata-se de diferentes protetores auditivos e na imagem B, outro com atenuação de 30 dB. A proteção efetiva cai a uma taxa logarítmica, evidentemente por retratar a grandeza dos decibéis. Em poucos minutos de não uso, a perda de atenuação pode ser grave. Como demonstrado, que um não uso de 30 minutos representa uma perda de mais de 18 dB em atenuação (segundo círculo vermelho), enquanto que um não uso de apenas 15 minutos interfere em 5 dB de atenuação. Até mesmo utilizando o protetor auditivo por 99% do tempo, perdas na ordem de 3 dB em atenuação já começam a ser verificadas, bem como, utilizar o EPI tão logo que mais da metade da jornada de trabalho (primeiro círculo vermelho), praticamente extingue a capacidade protetiva de seu uso. Isso significa que grandes perdas na eficácia dos protetores podem ocorrer em períodos de tempo extremamente curtos de sua não utilização.

Muitos aspectos podem estar relacionados ao uso contínuo dos protetores auditivos. A prevalência do uso por homens pode estar mais intrinsecamente vinculada conforme seja maior o seu nível socioeconômico e seu precedente envolvimento com testes audiométricos, enquanto que mulheres são mais propensas a usar quando há um nível de segurança perceptível, especificamente relacionada à presença de supervisores comprometidos com a segurança e à existência de regras claras no local de trabalho. Existe assim um possível viés de gênero em relação ao uso dos dispositivos de proteção (MEIRA et al., 2015).

O conforto que um EPI pode proporcionar também pode estar ligado à proteção fornecida, porque diretamente influencia no comprometimento de seu uso. Em uma comparação do protetor tipo inserção com o tipo concha, observou-se que os índices de conforto estatisticamente incluíram uma série de questões opinativas, sobre os quais os protetores tipo inserção obtiveram resultado de 65,7% de índice de conforto contra 87,1% dos abafadores. Destaca-se, porém, que altos níveis de ruído podem aumentar a sensação geral de desconforto, expressa em várias características do dispositivo. Estudos como estes conduzidos antes da aquisição e entrega dos EPIs aos funcionários poderiam aumentar sua aderência de uso (SVIECH et al., 2013).

Uma comparação mais ampla incluiu EPIs que são dependentes de nível, ou seja, que oferecem amplificação automática para fala e outros sinais em níveis mais

baixos, e grandes atenuações para ambientes mais ruidosos. Examinando as percepções de trabalhadores industriais sobre dois EPIs de nível, um com comunicação via rádio integrada e outro sem, comparados entre si e com os EPIs comuns habituais, foi visto que os dois EPIs tecnológicos ofereciam melhor comunicação e consciência situacional que os EPIs comuns, no entanto, foram inferiores a esses em termos de usabilidade e conforto. Contudo, como desvantagem, os EPIs comuns possibilitam a mesma atenuação independentemente do nível do som, e ainda, trabalhadores podem usá-lo incorretamente, por exemplo, inserindo apenas parcialmente os tampões nos ouvidos, ou inconsistentemente levantando o protetor auditivo temporariamente para ouvir um colega. Por isso usar o EPI dependente do nível pode ser valioso, além de que todos os sons desejáveis são mais fáceis de ouvir do que com os EPIs comuns (TUFTS et al., 2011).

Os aspectos organizacionais podem estimular práticas de conservação auditiva, sendo o uso de EPI consistentemente relatado maior em estabelecimentos onde há controles e até sanções para o não uso. A percepção de risco dos trabalhadores quanto aos níveis de ruído exerce certa influência, mas é menos impactante no uso final que a cultura de segurança, sugerindo que a elaboração de políticas – adequadas – realmente pode passar para as rotinas de trabalho. Essas descobertas enfatizam as responsabilidades e oportunidades da administração em criar um ambiente saudável (BOCKSTAEEL et al., 2013).

Outros desafios para eficácia devem ser considerados. Como em situações nas quais medições reais de atenuação divergem significativamente daquelas informados pelo fabricante, com valores maiores por vezes em todas as bandas de frequência do que aqueles verificados por medições da atenuação. Em adição a este cenário, a eficácia da inserção do protetor auditivo geralmente não é avaliada, o que contribui para a falta de conhecimento sobre as incertezas das ações desenvolvidas nos programas de prevenção auditiva (ROCHA et al., 2016).

Medições experimentais objetivas são realizadas para caracterizar o desempenho de atenuação de EPIs. São calculadas as atenuações nas frequências de 0,125 a 8 kHz, chegando-se então ao NRR_A – comentado na Fig. 9 subscrito A significa que foi medido em ponderação dB(A) –, resultado da subtração entre o nível de ruído em dB(A) medido sem o protetor auditivo e aquele medido com o EPI. Em uma avaliação desse parâmetro entre 15 EPIs muitos dos destacáveis em atenuação, em um ambiente de ruído contínuo e/ou impulsivo, estavam entre os

piores para localizar e detectar sons. Em outras palavras, foram EPIs que causaram superatenuação, podendo ser tão negativo quanto uma proteção muito baixa. É mais aconselhável escolher um dispositivo com melhor desempenho na frequência crítica do ambiente ocupacional (GALLAGHER et al., 2014).

Assim, testes de adaptação em programas de conservação auditiva, a fim de evitar más atenuações e ao mesmo tempo, selecionar o melhor EPI segundo a opinião do trabalhador, minimizando o não uso e seus possíveis efeitos negativos, podem melhor garantir a segurança nessa forma de controle (SAYLER et al., 2019).

3.2.4 MAPEAMENTO SONORO

A determinação de um nível sonoro médio como representativo de um ambiente é suficiente na solução de muitos problemas. Contudo, para a caracterização sonora de um espaço maior, as análises estáticas baseadas em valores médios estão caindo em desuso. O mapeamento acústico dessas situações fornece um conjunto de dados mais amplo e preferível na maioria dos casos (GOZALO et al, 2019). A despeito de consistir em um método mais comumente encontrado em predições urbanísticas de tráfego rodoviário, ferroviário e aéreo, e outros ruído ambientais, relaciona-se bem para o estudo de casos industriais.

Ao fazer parte do controle do ruído ambiental e industrial, o mapeamento acústico se torna determinante em projetos de isolamento acústico e no desenvolvimento de áreas urbanas. Por vezes, pode haver uma forte relação entre o nível de ruído emitido a partir de uma sede industrial e a forma como o edifício é planejado e utilizado (BOZKURT; DEMIRKALE, 2017).

Além de ser a forma mais visível para apresentação dos dados, os mapas auxiliam no experimento de diferentes medidas de proteção contra ruídos. Dá suporte para a tomada de decisões na etapa de projeto, seleção e instalação de barreiras de proteção acústica, evitando por exemplo, que essas barreiras sejam fixadas em locais pouco eficientes. A maneira para construir os mapas, a partir de *softwares* é modelar com uma sequência de etapas que compreende: a inserção de uma geometria de sala com suas dimensões; informações geográficas; quantidade e características acústicas dos elementos internos com *layout* das instalações; atribuição das potências sonoras das fontes de ruído e sua matemática de propagação; espessura e isolamento sonoro dos materiais ou superfícies; e a grade

(*grid*) de resultados, que é a área na qual são determinados pontos de espalhamento dos níveis de ruído. Depois de determinados os pontos da grade, os níveis de mesma magnitude são conectados para então se chegar à cognição visual de um mapa dos dados e a partir daí, possibilitar o projeto de medidas de controle para a redução dos níveis de ruído (BUTORINA et al., 2019).

Sabendo-se disso, é perceptível que a forma de cálculo do mapa acústico é um dos principais componentes para a obtenção do mesmo. Os *softwares* comerciais são geralmente baseados nos métodos de rastreamento de raios (*ray-tracing method*) e no método de fonte de imagem (*image source method*), em que as reflexões sonoras iniciais podem ser calculadas usando uma mistura de ambos os métodos, enquanto que as reflexões tardias – as secundárias, irradiadas localmente pelas superfícies das paredes – são calculadas por método especial de rastreamento de raios que geram essas fontes secundárias. Todas essas informações relacionam-se com a geometria e dimensões, as propriedades de absorção sonora e de dispersão das superfícies, a posição, orientação, a diretividade das fontes de ruído e as posições de medição em campo que alimentam o programa (ODEON®, 2011).

Diversos modelos matemáticos empíricos podem ser utilizados para descrição do comportamento do som e geração dos mapas acústicos de espaços industriais fechados, em substituição aos *softwares* acústicos, chegando a resultados comparáveis aos de medições reais realizadas em uma planta industrial.

Para esse propósito, modelos como o da equação de difusão podem ser válidos. Neste, o nível de pressão sonora pode ser a solução da equação, que ainda se mostra conveniente para investigar a propagação do som entre salas acopladas, geralmente localizadas ao lado da planta industrial, tais como salas administrativas, significando aparente vantagem mediante ao difundido método de rastreamento de raios, que tem dificuldades em considerar transmissões por parede comuns. Pode-se também ao empregar a equação de difusão, estabelecer as condições de contorno que expressam os limites da sala com a absorção acústica de suas superfícies, em que por analogia, seu coeficiente de absorção sonora funciona como se fosse o coeficiente de convecção em problemas de transferências de calor. Fora outras considerações definidoras do cálculo, no modelo de difusão, as condições de contorno variam pela faixa de frequência considerada na modelagem, o que passa a alterar os valores dos coeficientes de absorção dos materiais, podendo vir a

representar outra vantagem em relação a teoria clássica, em que a absorção é descrita localmente a cada superfície. Os resultados desse método concordam tanto em tempo de reverberação quanto em nível de pressão sonora com medições de campo, podendo ser utilizado para investigar o comportamento de um número arbitrário de fontes sonoras em diferentes espaços fechados (BILLON et al., 2012).

No entanto, outras diferentes equações encontradas na literatura frequentemente preveem níveis de ruídos inferiores aos níveis medidos em campo. Fatores geométricos de proporções e formas, da distribuição de móveis, máquinas, linhas de produção e painéis absorventes, causam influência no campo sonoro idealizado na sala modelada. Esse fato dificulta – talvez impeça – o uso de uma análise analítica geral por uma equação para prever com precisão o nível de pressão sonora para um caso específico. Isso é particularmente interessante, pois, resultados de modelos podem prever níveis inferiores em até 10 dB daqueles medidos, e como consequência de uma variação dessa magnitude, podem retirar zonas de real perigo de exposição das áreas a serem protegidas, assim como evidentemente, ocasionar equívocos nas demais medidas de controle. Essas discrepâncias são atribuídas a não consideração das distribuições de *layout* nem dos efeitos de difração ocorrida na geometria local, de modo que a pressão sonora em um ponto é determinada como uma superposição das fontes existentes. Isso evidencia a relevante contribuição da geometria local e das reflexões sonoras nos modelos de predição acústica (OTERO et al., 2013).

O mapeamento da poluição sonora em uma instalação industrial pode também ser conduzida por interpolações a partir das medições dos níveis de som. A interpolação bidimensional, pode ser usada em um conjunto limitado de medições de campo consistindo na sua interpolação para a área interna das instalações industriais, podendo resultar em informações sobre os níveis de ruído entre os diferentes pontos onde as medições foram realizadas. É uma técnica relativamente simples que pode ser usado para mapeamento, desde que os pontos medidos ao longo do perímetro do local estejam dentro de um intervalo de 5 dB entre si e com varredura entre as principais fontes, para que essa abordagem possa fornecer valores consistentes. Por não observar, porém, os efeitos de reflexos acústicos, requer um uso cuidadoso e preferencialmente junto à algoritmos de projeção de raios sonoros, fornecendo assim uma solução simples no mapeamento das

principais fontes e delimitações física dos níveis de som (OVSIANNIKOV; OVSIANNIKOV, 2017).

Ao comparar as simulações dos modelos empíricos e o modelo de rastreamento de raios com as medições de campo, é verificável a maior precisão do modelo de rastreamento de raios. Modelos empíricos apresentam boa aceitabilidade para o nível de pressão sonora e tempo de reverberação, ainda que se mostrem discordando em muitos pontos do que é medido no local de trabalho. Pode-se dizer que os modelos simples fornecem precisão suficiente para prever a eficácia da inserção de barreiras acústicas ou materiais de absorção de som, no entanto, para maiores detalhes ou projeto acústico de uma sala, são recomendados programas sofisticados de modelagem acústica, os quais, incluem a técnica *ray-tracing* (KERÄNEN; HONGISTO 2010).

Em relação às medições práticas, uma das etapas mais desafiadoras do mapeamento de espaços industriais é a determinação do nível de ruído interno ou a definição de uma fonte regular pelo seu nível de pressão sonora e posteriormente o converter no nível de potência sonora. Pois, é a potência sonora que é utilizada para definir uma fonte para propagação e extrapolação nos modelos, de modo que, sendo conhecido apenas dados de medição da pressão sonora é preciso converter a medição da pressão sonora em potência sonora. Muitas vezes, é muito difícil medir a potência do som porque a fonte sonora está em um contexto industrial inacessível e/ou muito próxima a outras fontes que não podem ser desligadas, o que torna quase impossível medir o nível de potência do som (SOUNDPLAN®, 2015).

Conveniente solução, consiste na simulação com pontos fixos resumidos por medições de pressão sonora confiáveis, os quais podem servir para ajustes e calibrações do modelo. Algo perfeitamente exequível e comparável com o que é abordado pela série de normas ISO 3740:2019 *Acoustics — Determination of sound power levels of noise sources*. Caso contrário, o pesquisador pode realizar a caracterização das fontes ao estabelecer a escolha dos pontos fixos de acordo com o *layout* da fábrica e os demais pontos medidos ao redor da fonte de acordo com a acessibilidade da fonte sob análise, testando os valores de pressão sonora obtidos para chegar à potência sonora da mesma (GUARNACCIA et al., 2014).

Antes de iniciar o processo de modelagem, contudo, boas práticas devem ser conhecidas. O conhecimento do usuário sobre as normas vigentes; a clareza da documentação da norma; o correto entendimento das funções do *software*; a análise

do usuário sobre a qualidade e o impacto dos dados de entrada, são os principais elementos a serem estudados. Em particular, é essencial o conhecimento do usuário sobre o *software*, e como diferentes configurações podem exercer influência na qualidade dos resultados ou otimizar seu desempenho. Sobre esse, um desvio de até 3 dB é considerado um erro aceitável entre o resultado de campo e aquele modelado. Devido à complexidade do processo de modelagem, o usuário por fim, precisa analisar a qualidade da saída dos dados e seu potencial impacto na realidade. Inspeções visuais dos resultados, comparando os resultados com o nível de som das medições ou avaliação da precisão dos dados usando técnicas de avaliação da incerteza, podem garantir um bom desempenho final como uma medida viável para o controle de ruído (MANVELL; VAN BANDA, 2011).

Como foi visto ao longo do capítulo 3.2, muitas são os meios de controle de ruído. Desde padrões legais até técnicas de predição por mapas sonoros. Mais interessante que escolher (quando há essa opção) por uma forma ou outra, suas utilizações devem entender cada caso para que além da segurança ocupacional, possam proporcionar maior eficiência na aplicação de recursos econômicos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

O desenvolvimento da atual pesquisa se deu no período de 2019 a 2020 em ambiente interno de uma sede industrial localizada no município de Curitiba-PR que por motivos de confidencialidade optou por manter sua identificação sob sigilo. Ademais, todos os acessos sejam de informações técnicas ou para a execução de quaisquer dos estágios de estudo foram amplamente disponibilizados.

A atuação da empresa estudada é voltada à fabricação de máquinas e equipamentos que são destinados em grande parte para a indústria alimentícia. Seus principais produtos são máquinas necessárias em diferentes etapas do processo produtivo de diversos tipos de bolachas, para o processamento e tratamento de grãos e cereais, padarias industriais, fabricantes de produtos de chocolate, entre outros; ou seja, trata-se de manipulação de peças e acessórios metálicos usuais da incorporação metalomecânica à cadeia de suprimentos na qual o contexto desta organização está inserido.

No presente cenário a empresa conta com 179 funcionários atuantes diretamente nas áreas de fábrica, engenharia, recursos humanos, informática, etc; e mais 25 funcionários terceirizados sobretudo no ambiente fabril. Destaca-se aqui que o foco da pesquisa é direcionado acerca dos colaboradores que exercem suas atividades nas áreas das fábricas, já que são estes os que interagem em maior medida com o agente ambiental pesquisado. O mapeamento acústico também se restringiu a essas áreas de fábricas. Esse trabalho cobre a exposição do total de 54 colaboradores que compõem o público alvo da pesquisa como é detalhado nos Quadros do capítulo 4.1.1 a seguir; sendo que desse total, todos estão representados pela organização de grupos homogêneos de exposição como também é explicado pelo capítulo 4.2.1 adiante.

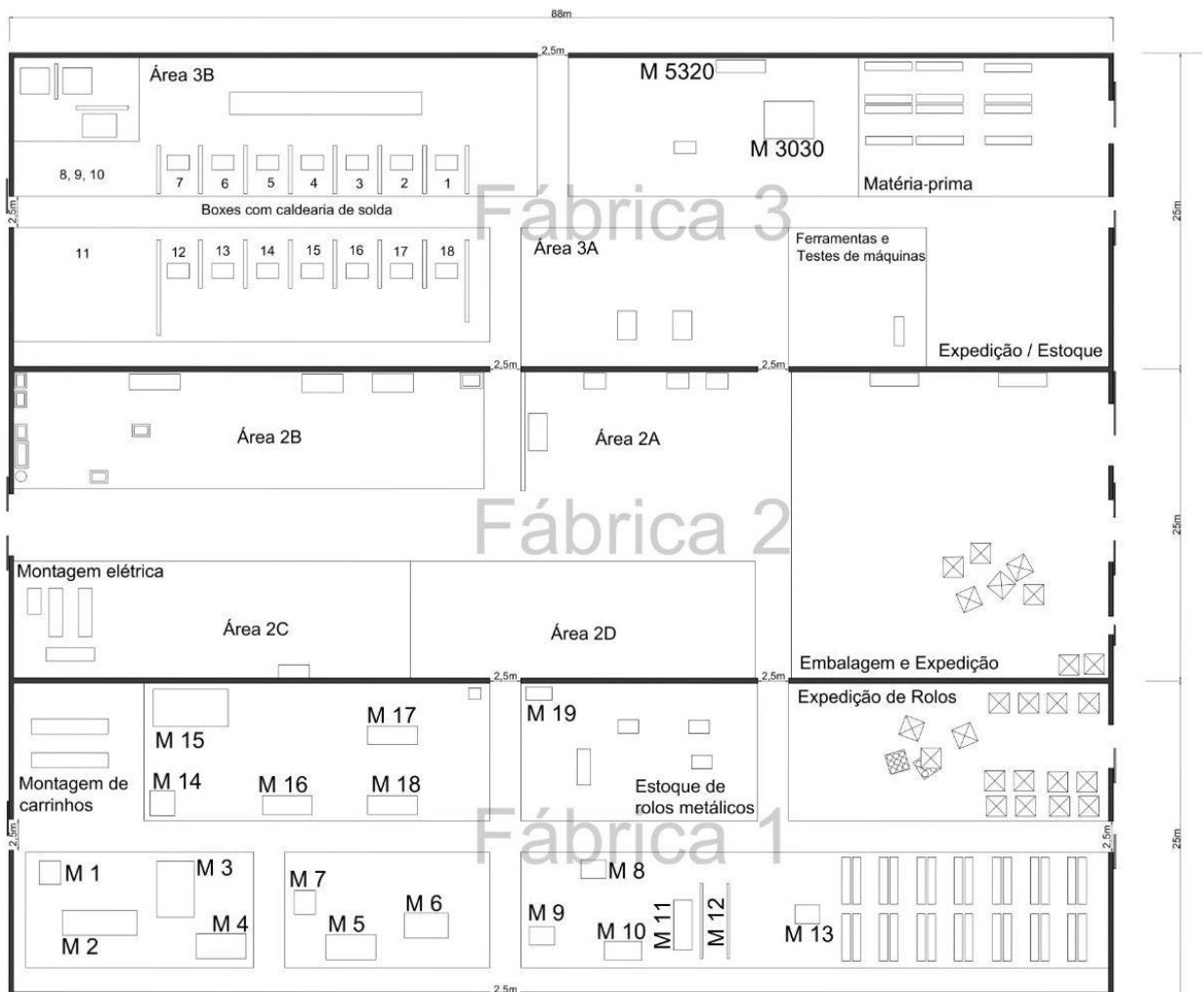
4.1.1 CONHECIMENTO DOS AMBIENTES DE FABRICAÇÃO

Foi usado o método denominado passeios exploratórios, que compreendeu à identificação e à localização das máquinas existentes, bem como sua dinâmica de funcionamento no processo, os postos de trabalho e os aspectos construtivos do

local. A Fig. 10 exibe a planta baixa construída a partir dessa etapa, evidenciando o arranjo físico e funcional da fábrica e o maquinário presente.

Toda a área destinada à produção é dividida em três fábricas principais que se localizam em uma única indústria, separadas por paredes e conectadas por portões internos, o que pode causar particularidade sonora em cada uma delas. São locais que recebem a denominação de fábricas, portanto, para as diferenciar quanto às atividades de produção, que acontecem separadamente e por via de regra não necessariamente seguem continuações interligadas do ciclo de fabricação, ainda que isto possa acontecer. O reconhecimento de cada uma delas é apresentado pelos próximos subitens, onde por correspondência, as tabelas mostradas complementam as informações daquilo que está representado no croqui da Fig. 10.

Figura 10 – Planta baixa do recinto industrial e identificação das atividades em suas fábricas



- **Fábrica 1:** destina-se à usinagem industrial de rolos metálicos capazes da moagem de grãos; manutenção de peças de clientes, montagem de bases transportadoras de biscoitos e área de cortes gerais. O Quadro 4 traz a lista de máquinas atuantes na fábrica e seus tempos de operação, e a Fig. 11 faz a ilustração de algumas delas.

Quadro 4 – Informações da fábrica 1 levantadas em fase exploratória

Identificação	Descrição	Atividade (h)	Número de operadores
M1	máquina de jateamento	24	1
M2, M3	centro de usinagem horizontal	24	1
M4	retífica plana	8 ⁽²⁾	—
M5 M6 M7	centro de usinagem vertical	16	3
M8	torno universal	16	1
M9 M10 M11	tornos multitarefa	16	4
M12	furadeira de coluna	8	1
M13	serra fita	8	1
M14	máquina jateadora própria	esporádico	—
M15	máquina retífica	16	1
M16	torno convencional	8	— ⁽³⁾
M17 M18	máquinas raiadoras	16	1
M19	máquina balanceamento	esporádico	—
Carrinhos	ferramentas elétricas/manuais	8	4
Total: 19 máquinas e 20 ⁽¹⁾ postos de trabalho			

¹ É o número total de postos, maior que o número de operadores pois dependendo do ritmo de produção nem todos estarão ocupados em seus postos; ² Tempo vigente à época de medição; ³ O mesmo operador da M15.

Destaca-se que grande parte das máquinas opera em dois turnos, das 6 às 15hs e das 15 às 23hs, ou das 8 às 17hs, sendo que um número reduzido opera sem interrupção. Essa informação se torna pertinente, uma vez que em uma avaliação acústica, o número de máquinas em atividade em um período específico pode causar influência nos resultados obtidos (Quadro 4).

- **Fábrica 2:** destina-se à montagem final de máquinas, desde sua interface elétrica até mecânica e estrutural. Trabalhos são realizados manualmente, e por essa razão, nessa fábrica estão presentes apenas máquinas de bancada e de menor porte. Nos subsequentes Quadro 5 e Fig. 12 estão dispostos, respectivamente, a natureza dos postos de trabalho e suas ilustrações.

Figura 11 – Setores de atividades no processo industrial da fábrica 1



Da esquerda para direita: plataforma de montagem de bases transportadoras (carrinhos); máquina M10 e rolos metálicos a serem usinados.

Quadro 5 – Informações da fábrica 2 levantadas em fase exploratória

Identificação	Descrição	Atividade (h)	Número de montadores
Área 2A	montagem peças metálicas	8 ⁽¹⁾	4
Área 2B	montagem de fornos	8	4
Área 2C	montagem elétrica	8	5
Área 2D	montagem laminação	8	2
Expedição	embalagem	8	2
Total: 20 ⁽²⁾ postos de trabalho			

¹ Nos períodos de maior demanda pode haver turno extra; ² Nos períodos de maior demanda pode se chegar a um número total superior.

Figura 12 – Diferentes áreas com atividades de montagem na fábrica 2



Da esquerda para direita: vistas pelo corredor peças para montagem na área A e área D. Área D vazia com palete à espera de peça/máquina, e ao fundo em azul, bancadas com ferramentas de trabalho da área A e B. Máquinas finalizadas e embaladas.

Nessa fábrica o número de operadores varia consideravelmente de acordo com a produção, que quando em ritmo mínimo de trabalho a distribuição de trabalhadores se dá conforme o disposto no Quadro 5. No período de medições verificou-se 17 postos de trabalho ativos. O regime de funcionamento de todas as áreas acontece das 8 às 17hs, com exercício de horas extras conforme demanda.

- **Fábrica 3:** destina-se aos processos metalúrgicos essenciais para a construção de máquinas a partir de peças e chapas metálicas. Envolve um conjunto de serviços de caldeiraria e soldagem de componentes metálicos. Há também a montagem da estrutura base de máquinas, dobra e corte a laser e montagem final pré-expedição de máquinas. O Quadro 6 e Fig. 13, descrevem e ilustram as áreas de caldeiraria e soldagem industrial.

Quadro 6 – Informações da fábrica 3 levantadas em fase exploratória

Identificação	Descrição	Atividade (h)	Número de operadores
M5320	máquina dobradeira	8	1
M3030	máquina laser corte e dobra	8	1
Box 1–7	montagem solda ou caldeiraria	8	4
Box 8–10	montagem de componentes inox	8	3
Box 11	caldeiraria de tubulação	8	— ⁽¹⁾
Box 12–18	montagem solda ou caldeiraria	8	4
Área 3A	acabamento de montagem	8	6
Área 3B	montagem estrutura da máquina	8	0
Total: 2 máquinas e 20 ⁽²⁾ postos de trabalho			

¹ Utilizado por todos os funcionários conforme necessidade; ² Quando boxes estão ocupados e com áreas em pleno trabalho.

Figura 13 – Boxes com trabalho de soldagem e caldeiraria na fábrica 3

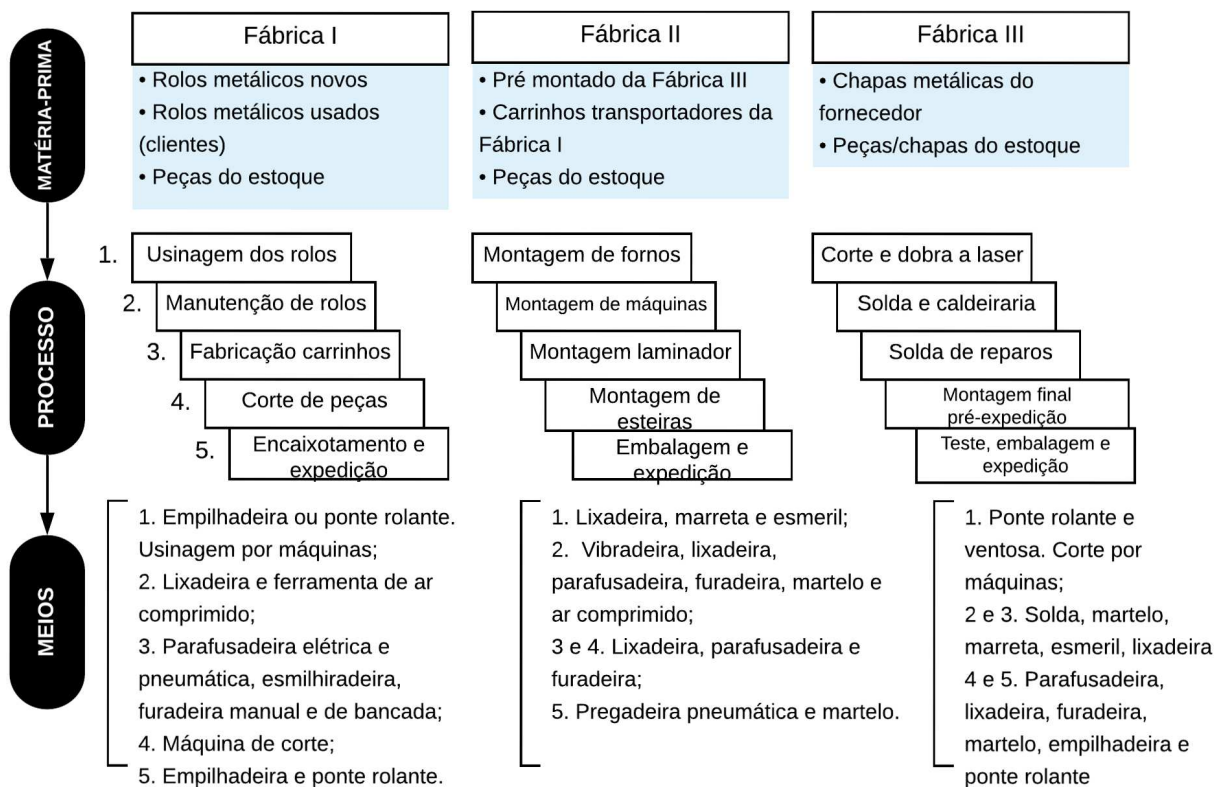


As duas únicas máquinas presentes na fábrica funcionam durante 8 horas (6 às 15hs), enquanto todos os demais postos de trabalho exercem sua jornada de 8 horas, das 8 às 17hs. A área 3B, pode comportar normalmente 5 trabalhadores, porém como reflexo do momento produtivo da empresa em meio ao cenário econômico atual de pandemia mundial, encontrava-se sem demanda e, portanto, sem produção. Dificilmente todos os postos em todas as fábricas estariam com trabalho pleno em todas as épocas do ano, por isso a atual pesquisa buscou superar a sazonalidade ao descrever precisamente as condições da realização das sucessivas medições, algo fundamental para o diagnóstico sonoro.

4.1.2 O PROCESSO PRODUTIVO SOB A ÓTICA ACÚSTICA

O fluxograma abaixo visa fornecer uma visão macro dos processos produtivos da indústria (Fig. 14):

Figura 14 – Processo industrial nas fábricas e meios com potencial ruidoso



O mesmo expõe o detalhamento das atividades, matérias-primas, procedência, e seus meios de trabalho, elencando aqueles com ferramentas e máquinas que possivelmente produzem consequências maiores para a emissão de

ruído. Essa metodologia consistiu passo fundamental na observação preliminar dos pontos de interesse a serem medidos na avaliação ocupacional, funcionando ainda como critérios de inclusão de algo que viria a embasar o item 4.2.1 da atual pesquisa.

4.2 AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO AO RUÍDO OCUPACIONAL

A metodologia dedicada à avaliação ocupacional é apresentada no presente capítulo, passando por todos os materiais, critérios, premissas e equações para obtenção dos resultados.

4.2.1 ANÁLISE DO TRABALHO E GRUPOS HOMOGÊNEOS DE EXPOSIÇÃO (GHE)

O conceito de Grupos Homogêneos de Exposição (GHE) viabiliza a formação de grupos de exposição com um ou mais representantes, sem o uso de técnicas de amostragem em cada exposição individual ao ruído. Para isso, o critério para a formação do grupo é que os integrantes precisam estar sujeitos a mesma função operacional de trabalho, e ainda, apresentarem as mesmas condicionantes ambientais, no que diz respeito à exposição ao ruído, segundo normativas de referência (ISO, 2009; BRASIL, 2011; FUNDACENTRO, 2001). Dessa forma, com os 54 colaboradores expostos no atual estudo, foram estabelecidos 18 GHE. O Quadro 7 na sequência reúne suas categorizações.

Quadro 7 – Distribuição dos pontos amostrais na indústria para a medição da exposição ao ruído ocupacional

Fábrica I		
GHE	Representante da amostra	Critérios e considerações
1P1	máquina de usinagem M2	máquinas de mesma função, representa postos de M1 a M4
1P2	trabalho na máquina M7	usinagem vertical possui semelhantes atividades em M5 a M7
1P3	operador M10	célula com condições semelhantes de exposição, representa de M8 a M11
1P4	operação única de M12	uma pessoa, sujeito a condições exclusivas de exposição
1P5	operação única de M13	formado por apenas um integrante, o único a desempenhar respectivo trabalho
1P6	trabalhador em M14 e M15	representa também o responsável pela operação da M16 a M18; embora máquinas diferentes, os indivíduos estão próximos e sujeitos a condições muito semelhantes
1P7	montador de carrinhos	representa os demais trabalhadores da mesma plataforma mostrada na Fig. 11

Quadro 7 – Continuação

Fábrica II		
GHE	Representante da amostra	Critérios e considerações
2P1	montagem mecânica área 2A	inclusos montadores de mesma função na área especificada
2P2	representante área 2B	colaboradores que desempenham as mesmas atividades
2P3	montador elétrico área 2C	representa também a área 2D, pois compartilham diariamente suas áreas
2P4	trabalho em embalagens	representa os demais trabalhadores da área de embalagem e expedição
Fábrica III		
GHE	Representante da amostra	Critérios e considerações
3P1	operação única M5320	trabalhador dedicado somente a esta máquina
3P2	operação única M3030	trabalhador dedicado somente a esta máquina
3P3	caldeireiro box 3	trabalhador exerce atividades alternadamente entre dois boxes, representa ainda, todos os demais de mesma função
3P4	soldador box 13	embora próximo à 3P3, as atividades são distintas, além de representar os demais soldadores
3P5	montador box 10	exclusivo ao setor de montadores de peças inox
3P6	operações na área 3A	todos aqueles responsáveis pelas montagens finais de máquinas, localizados na área 3A
3P7	expedição área 3A	optou-se por subdividir a área 3A, pois dois colaboradores deste grupo se expõem a atividades não verificadas pelos demais do grupo 3P6

Uma seleção adequada de GHE é capaz de refletir no cálculo da incerteza expandida (índice estatístico abordado no item 4.2.3). Realizar modificações na configuração desses grupos pode, contudo, trazer os resultados para dentro ou fora de melhores faixas de incertezas (AREZES; BERNARDO; MATEUS, 2012), da mesma forma, a obtenção de bons resultados segundo as mesmas incertezas é capaz de indicar a interrelação com uma escolha correta destes grupos.

4.2.2 MEDIÇÃO DA DOSE DE EXPOSIÇÃO AO RUÍDO

Para a mensuração da exposição ao ruído ocupacional, foi utilizada a medição da dose ruído ($D\%$) com o uso de um medidor integrador de uso pessoal, também chamado de audiodosímetro. Este é responsável pela quantificação dos níveis sonoros através da integração da série de medições durante uma faixa de tempo de medição ($L_{p,A,eq,T,n}$). O resultando é então calculado para uma exposição diária ($D_{(8)}$), baseada em uma jornada de trabalho de 8 horas. Esse tipo de metodologia é uma das aplicáveis pela NHO 01, e uma das três estratégias

recomendadas pela ISO 9612:2009, sendo que nesta última, a escolha por uma delas deve ser de acordo com as situações de trabalhos específicas do local de medição e com o objetivo da investigação. Assim, a estratégia denominada *Full Day Measurement* (FDM) foi a escolhida por possuir maior compatibilidade com os métodos de trabalho verificados, já que a mesma é indicada para postos de trabalho quando padrões e tarefas de trabalho típicos são difíceis de descrever ou imprevisíveis, o que se encaixa com o regime de trabalho da indústria estudada que obedece justamente a uma demanda que é sazonal.

O audiodosímetro utilizado para obtenção das amostras foi o modelo 4445 da Brüel & Kjær®, número de serial: 188467 e microfone modelo MM 0111, os quais atendem os requisitos das normas ANSI S1.25/1991 e revisão de 2017, e IEC 61252/2002, como classe 1. O calibrador da mesma marca, modelo 4231, número serial: 2147030, corresponde à norma IEC 60942/2003. Requisitos esses para a conformidade com as orientações seguidas na NHO 01 e sua norma diretriz ISO 1999/2013, assim como para a aplicabilidade da estratégia FDM da ISO 9612:2009.

Os diversos parâmetros a serem configurados no equipamento para a medição da dose estão reunidos do Quadro 8, e geralmente são definidos de acordo com o país da realização do estudo, visando atender as legislações nacionais. Foram selecionados: nível limite de 85 dB(A); filtro de ponderação com detector média quadrática (*Root Mean Square – RMS*) em frequência (A) e filtro de ponderação (C) para ruídos de impacto; ponderador temporal na escala *slow*; faixa dinâmica de medição de 50–120 dB; fator de duplicação da dose $q = 5$ dB; e *loggin time* = 1 minuto, ou seja, a cada minuto o medidor realiza a integração de todas as flutuações ocorridas nesse intervalo.

Quadro 8 – Configurações de medição adotadas de acordo com normatização NR 15 selecionada

Parâmetro	NHO 01/ ACGIH ⁽¹⁾	OSHA ⁽²⁾	NR 15
Nível de critério dB(A) – 100% dose	85	90	✓ 85
Ponderador de frequência	(A)	(A)	✓ (A)
Ponderador temporal	<i>slow</i>	<i>slow</i>	✓ <i>slow</i>
Ponderador ruído impulsivo	linear	linear	✓ C / linear
Faixa dinâmica de medição dB	80-115 / 70–140	70 - 140	✓ 50 - 120
Fator de duplicação de dose (q)	3	5	✓ 5
Tempo entre medições	≥ 1 min	≥ 1 min	✓ ≥ 1 min

¹ ACGIH, (2020). ² OSHA 29 CRF n° 1910.95 (2008).

É necessário ressaltar que NR 15 e NHO 01 divergem no fator de duplicação da dose (q). Embora a NHO 01 contenha a metodologia para avaliações de ruído ocupacional, para fins legais no Brasil, é reconhecido apenas $(q) = 5$. Nessa pesquisa sempre foi considerado, portanto, o fator de duplicação de 5 pois dessa forma entende-se estar seguindo o fator oficial brasileiro vigente da NR 15. Quanto ao valor limite, a exposição a 85 dB(A) durante o período de trabalho de 8 horas é considerado 100% da dose diária de exposição.

É ilustrado pela Fig. 15, o procedimento operacional de calibração e posicionamento do equipamento em todas as medições. Etapa na qual o microfone era acoplado ao calibrador, que produz um nível de pressão sonora de 94,0 dB ou 114,0 dB com precisão de $\pm 0,2$ dB em uma frequência de 1 kHz – referência para padrões internacionais das redes de ponderação para correta calibração. Estando o equipamento calibrado, o microfone era equipado no lado oposto da mão dominante, afim de reduzir possíveis interferências de movimentação, e a aproximadamente 10 cm do ouvido. As medições eram iniciadas após o bloqueio do equipamento para impedir que o usuário viesse a interromper a medição ou alterar as configurações pré-estabelecidas.

Figura 15 – Calibração do audiodosímetro e sua equipagem junto ao usuário

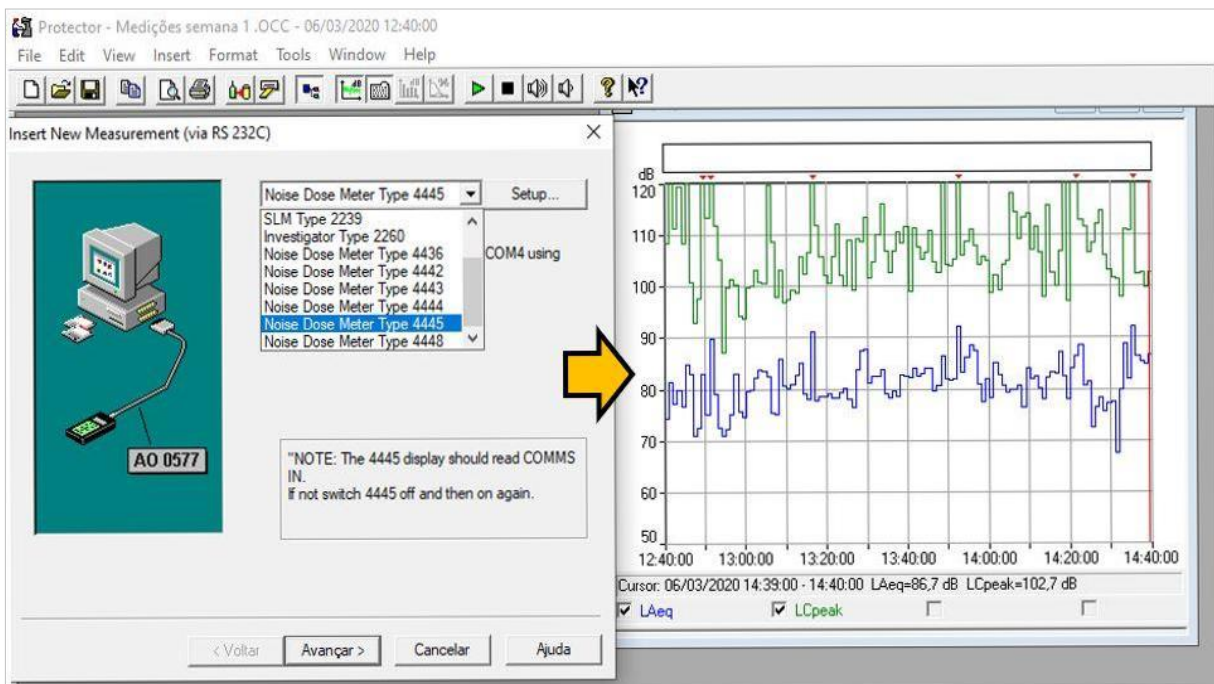


À esquerda: audiodosímetro com microfone inserido no calibrador; à direita: simulação da distância de posicionamento do microfone no decorrer das medições.

As medições tiveram duração de duas horas por amostra, pois esse período é representativo das atividades laborais de acordo com o que foi evidenciado na fase exploratória. Além disso, essas duas horas de medição foram distribuídas ao longo da jornada de trabalho, nos diferentes dias, para maior representatividade e assim, rigor científico. Tal critério complementa o proposto metodológico normativo, que apenas indica que medições devem ser feitas na maior parte do dia possível, cobrindo todos os períodos significativos de exposição ao ruído (ISO 9612:2009; FUNDACENTRO, 2001).

Os dados registrados pelo equipamento em campo foram inseridos no *software*, de livre acesso *Protector type 7825*[®] versão 5.2, para o processamento das informações, etapa a qual é mostrada pela Fig. 16 a seguir:

Figura 16 – *Software* de análise de dados do medidor modelo 4445



Entrada das medições no *software* e interface para visualização da avaliação.

Essa etapa permitiu posterior armazenagem definitiva dos registros, obtenção das variáveis quantificadas, bem como das suas flutuações ao longo do tempo, e ainda a visualização gráfica da pressão sonora a qual os trabalhadores, representados pelo seu GHE, foram expostos.

4.2.3 VARIÁVEIS DE ESTUDO

As variáveis acústicas do estudo ocupacional, ou seja, as variáveis dependentes pesquisadas, têm suas expressões matematicamente descritas conforme as equações apresentadas. Destas, as equações de 6 a 9 são automaticamente calculadas pelo audiodosímetro. As demais são usadas paralelamente de acordo com as normas utilizadas por essa pesquisa.

$$D_{\%} = \frac{T}{480} \cdot 2^{(L_{p,A,eq,T} - L_T)/q} \cdot 100 \quad (6)$$

Onde:

$D_{\%}$ – dose de exposição individual ao ruído, 100% é a média diária de 85 dB(A) por 8 horas [%];

T – tempo de duração da medição [minutos];

$L_{p,A,eq,T}$ – nível de pressão sonora equivalente ponderado em A [dB(A)];

L_T – nível sonoro limite segundo NR 15 = 85 dB(A).

$$D_8 = \frac{480 \cdot D_{\%}}{T} \quad (7)$$

Onde:

D_8 – dose de ruído projetada para 8 horas de jornada de trabalho [%];

$D_{\%}$ – dose de exposição individual ao ruído [%];

$$L_{p,C,pico} = 10 \log \frac{p_{C,pico}^2}{p_0^2} \quad (8)$$

Onde:

$L_{p,C,pico}$ – nível de pressão sonora de pico ponderado em C [dB(C)], (ISO 9612:2009);

$p_{C,pico}$ – pressão sonora causada pelo deslocamento da massa de ar captada em C [Pa];

p_0 – pressão sonora de referência, igual ao limiar de audibilidade 20 μ Pa.

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} \xrightarrow{t} L_{p,A,eq,T} = 10 \log \frac{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} p_A^2(t) dt}{p_0^2} \quad (9)$$

Onde:

$L_{p,A,eq,T}$ – nível de pressão sonora equivalente ponderado em A durante um intervalo de tempo $T = t_2 - t_1$ [dB(A)], (ISO 1999:2013; ISO 9612:2009);

p – pressão sonora causada pelo deslocamento da massa de ar [Pa];

p_A – pressão sonora causada pelo deslocamento da massa de ar ponderada em A [Pa];

p_0 – pressão sonora de referência, igual ao limiar de audibilidade 20 μ Pa.

$$PAO \propto p_A^2 \cdot T = \int_0^t 10^{L_{p,A,eq,T} \cdot 0,1} (t) dt \rightarrow L_{p,A,eq,T_8} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^t 10^{L_{p,A,eq,T,n} \cdot 0,1} (t) dt$$

$$\therefore L_{p,A,eq,T_8} = 10 \log \frac{1}{N \Delta T} \sum_{i=1}^N 10^{L_{p,A,eq,T,n} \cdot 0,1} \Delta T = 10 \log \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{L_{p,A,eq,T,n} \cdot 0,1} \quad (10)$$

Onde:

$PAO \propto p_A^2 \cdot T$ – proporcionalidade entre pressão sonora e tempo de exposição que originou equações do nível médio de exposição ao ruído em ambientes de trabalho relacionada a perda auditiva;

$L_{p,A,eq,T}$ – nível de pressão sonora equivalente ponderado em A durante um intervalo de tempo $T = t_2 - t_1$ [dB(A)], (ISO 1999:2013; ISO 9612:2009);

$L_{p,A,eq,T,n}$ – nível de pressão sonora equivalente da medição “n” [dB(A)];

N – número total de dias amostrados;

L_{p,A,eq,T_8} – média logarítmica de exposição diária ao ruído representante das médias durante as jornadas de trabalho ponderado em A [dB(A)]. Adaptado de (LONG, 2014b; BISTAFA, 2018).

$$U = ku \quad (11)$$

Onde:

U – incerteza expandida da série de medições [dB(A)], (ISO 9612:2009);

k – fator de cobertura unilateral em função do intervalo de confiança considerado 95% ($k=1,65$);

u – incerteza padrão combinada, ligada a outras contribuições de incertezas individuais [dB(A)].

$$u^2(L_{p,A,eq,T_8}) = c_1^2 \cdot u_1^2 + c_2^2 (u_2^2 + u_3^2) \quad (12)$$

Onde:

u_1 – desvio padrão utilizando a média aritmética da série de medições;

u_2 – incerteza padrão associada ao instrumento utilizado, conforme IEC 61252 = 1,5 dB para medidor integrador de uso pessoal;

u_3 – incerteza padrão devido à posição do microfone (1,0 dB);

c_1 – fator tabelado que varia de acordo com o número N de medições e o valor de u_1 ;

c_2 – coeficiente de sensibilidade = 1;

Adaptado de ISO 9612 (2009).

Em (10) sabe-se que N assumirá valores de 3 ou 5, pois pela metodologia adotada, as amostras devem ser feitas em triplicata, e quando os valores de $L_{p,A,eq,T,n}$ divergirem entre si por ± 3 dB(A) é necessário repetir pelo menos mais duas amostras, de modo que o valor da exposição média diária $L_{p,A,eq,T8}$, será o resultado de uma quintuplicata exercida no mesmo ponto amostral. Ainda sobre essa variável, a mesma é concebida baseada no nível médio de energia sonora equivalente, obtido durante todas as medições, que são extrapoladas para as 8 horas de jornada de trabalho, considerando que as condições de exposição se manterão constantes pelo restante do tempo em cada dia. Quanto à incerteza expandida, seu intervalo de confiança significa que os trabalhadores estão sujeitos a um nível diário de exposição ao ruído de $(L_{p,A,eq,T8} + U)$, isto é, uma probabilidade de 95% dos valores em possíveis futuras medições não ultrapassando esse limite.

4.2.4 ÍNDICES ESTATÍSTICOS E NÚMERO DE PICOS

Fazem parte da análise de uma mensuração de ruído, seus índices estatísticos, como L_{10} , L_{50} e L_{90} , mais comumente encontrados em estudos de poluição sonora ambiental e normatizados pelas ISOs da área (BOROIU et al, 2016; BENOCCI et al, 2020; HUNASHAL, 2012; LI et al, 2016; ISO 1996-1:2016). Representam, respectivamente, os níveis de ruídos que foram excedidos em 10%, 50% e 90% do tempo de medição, ou seja, quantis estatísticos do histograma resultante das medições, incluídos pela pesquisa por fornecerem perspectivas adicionais na interpretação da exposição ao ruído no posto de trabalho. Os coeficientes de variação dos níveis de pressão sonora ($CV_{L_{p,A,eq,T,n}}$), também foram incluídos para explorar possíveis erros e flutuações ambientais do conjunto de dados.

Não somente a magnitude dos picos de ruído ($L_{p,Cpico}$), mas quantas vezes esses picos aparecem durante a jornada (N° picos), também foi considerado nos resultados de pesquisa.

4.3 MAPEAMENTO SONORO

A metodologia responsável pelos resultados do mapeamento acústico é aqui evidenciada. O *software* de modelagem de salas Odeon® Versão 11 Industrial, foi usado para projetar as variáveis de estudo: tempo de reverberação (T_{30}) e nível de pressão sonora mapeado (SPL). O equipamento de medição sonora no ambiente interno das fábricas foi o modelo 2250 da Brüel & Kjær®, o qual forneceu os dados de entrada para o *software*.

4.3.1 MODELAGEM GEOMÉTRICA

O *software Google SketchUp Make 2017* foi o utilizado para construção do modelo geométrico da indústria. Esse processo consiste em tornar os elementos físicos do ambiente construído, como mostrado pela planta da Fig. 10, em um modelo 3D realístico, devendo-se assegurar que o modelo geométrico da sala seja um modelo fechado. Não são recomendados o uso de mais superfícies do que o necessário para imitar a geometria, modelar muitas superfícies pequenas (mesas, bancadas, nichos e ferramentas de trabalho, são exemplos) para obter alta fidelidade geométrica não melhora a qualidade dos resultados, mas aumenta o tempo de cálculo. O que certamente pode causar grandes interferências é a inclinação de uma superfície para o significado da acústica da sala (ODEON, 2011); assim, atenção especial foi dada a este ponto.

Optando-se por superfícies planas evitando as curvas no modelo, as áreas das fábricas então puderam ser bastante simplificadas sem comprometer a qualidade dos resultados. Assim, chegou-se aos modelos que podem ser encontrados no Apêndice A (página 109). As máquinas foram aproximadas à blocos retangulares com dimensões fidedignas às dimensões reais.

Os materiais construtivos do local são os elencados no Quadro 9 a seguir, que também evidencia suas dimensões reais de área no local de trabalho e seus respectivos coeficientes de absorção sonora. Esses dados foram estabelecidos de acordo com inspeções visuais de campo, informações disponíveis em literatura e pela biblioteca Odeon® onde consta uma lista de tipos de materiais construtivos e seus dados de absorção sonora, os quais são capazes de exercer influência direta nos resultados sonoros do ambiente industrial e etapa obrigatória para que os mapas de ruído possam ser obtidos.

Quadro 9 – Materiais com respectivas absorções sonoras e área de absorção total em cada fábrica

Materiais Fábrica 1	Coeficientes de absorção sonora em bandas de oitava (α_i) ¹								Área (S_i) [m ²]
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Componentes metálicos	0,40	0,30	0,25	0,20	0,10	0,10	0,15	0,15	3222,7
Concreto liso do piso	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	2190,7
Concreto pintado – paredes	0,10	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	0,08	1397,2
Embalagens de madeira	0,15	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07	0,07	158,8
Portões externos abertos	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	47,1
Portões internos	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	31,7
Ar a 25°C [m ²] ²	1,7	6,1	17,5	36,0	62,8	136,9	417,1	1478,1	-
AT TOTAL³	1540,8	1222,9	997,0	866,7	602,4	702,8	1131,8	2192,8	7048,2
Materiais Fábrica 2	Coeficientes de absorção sonora em bandas de oitava (α_i)								Área (S_i) [m ²]
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Componentes metálicos	0,40	0,30	0,25	0,20	0,10	0,10	0,15	0,15	2494,7
Concreto liso do piso	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	2125,6
Concreto pintado – paredes	0,10	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	0,08	1317,1
Embalagens de madeira	0,15	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07	0,07	310,8
Portões externos abertos	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	58,4
Portões internos	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	37,5
Áreas com madeira	0,25	0,25	0,15	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	19,9
Ar a 25°C [m ²]	1,5	5,5	18,0	42,8	75,9	140,1	363,5	1225,6	-
AT TOTAL	1282,8	1037,3	844,8	753,9	562,4	649,7	987,5	1849,0	6364,0
Materiais Fábrica 3	Coeficientes de absorção sonora em bandas de oitava (α_i)								Área (S_i) [m ²]
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Componentes metálicos	0,40	0,30	0,25	0,20	0,10	0,10	0,15	0,15	3060,8
Concreto liso do piso	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	2190,7
Concreto pintado – paredes	0,10	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	0,08	1411,6
Portões externos abertos	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	47,1
Forro – tecido nos boxes	0,04	0,04	0,23	0,14	0,57	0,53	0,40	0,40	23,7
Forro macio – bancadas	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	17,3
Embalagens de madeira	0,15	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07	0,07	14,3
Áreas com madeira	0,25	0,25	0,15	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	9,1
Ar a 25°C [m ²]	1,5	5,7	18,4	43,8	77,7	143,5	372,1	1254,6	-
AT TOTAL	1445,6	1144,0	935,1	812,6	579,8	683,0	1107,3	2199,3	6774,6

¹ Variável adimensional. ² Absorção sonora do ar ambiente nas bandas de frequência à temperatura de 25°C. ³ Absorção sonora de um espaço interno, dado por $\sum S_i \cdot \alpha_i$, em que S_i é a área superficial do material absorvente e α_i seu respectivo coeficiente de absorção sonora [m² · Sabine].

Esses dados são aqueles originais, ou seja, refletem sobre como estão no presente momento os aspectos construtivos dos locais, sendo que os resultados do

capítulo 5.2 os levam em consideração. Já o capítulo 5.3 ao realizar predições, altera alguns desses materiais, quando por exemplo, promove-se algumas substituições de um tipo de revestimento por outro que apresente melhores características sonoras, afim de que se melhore os resultados dos parâmetros acústicos em um ambiente industrial.

4.3.2 MAPEAMENTO INTERNO E MÉTODO DE CÁLCULO

Com o modelo geométrico e os selecionados coeficientes de absorção, os parâmetros que caracterizam acusticamente o recinto foram satisfeitos. Agora os parâmetros que caracterizam as fontes sonoras também são necessários ao programa ODEON. Para isso, dados de potência sonora em todas as fábricas foram estimados a partir da medição da pressão sonora como aparece em (13).

$$L_p = L_w + 10 \log \left(\frac{Q_\theta}{\Omega r^2} + \frac{4}{A_T} \right) \quad (13)$$

Onde:

L_p – nível de pressão sonora [dB(A)];

L_w – nível de potência sonora [dB(A)];

Q_θ – fator de diretividade da fonte, generalizado para fonte omnidirecional = 1;

Ω – ângulo sólido para livre propagação do som a partir da fonte sonora;

r – distância fonte-medidor [m];

A_T – absorção sonora de um espaço interno, dado por $\sum S_i \cdot \alpha_i$, em que S_i é a área superficial do material absorvente e α_i seu respectivo coeficiente de absorção sonora [$m^2 \cdot$ Sabine].

Adaptado de Long (2014c); Bistafa (2018).

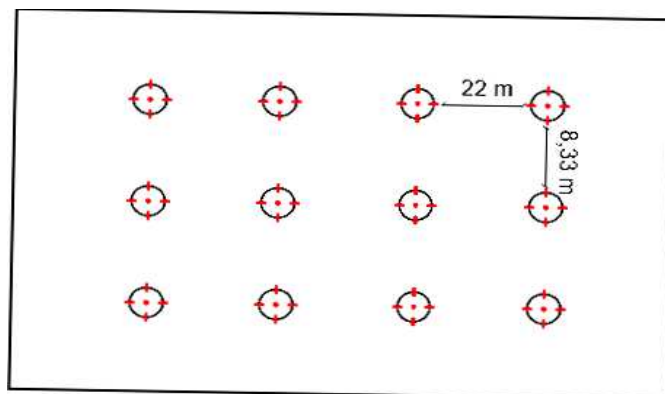
Utilizando somente o descrito em (13) com suas generalizações e as intrínsecas incertezas da equação para propagação do som em recintos, os dados de entrada de L_w poderiam conter erros em algumas unidades de dB. Contudo, para superar essa questão, com as medições de L_p reais, estimativas melhoradas e autoajustáveis de L_w podem ser produzidas, de forma que o mapa acústico venha a reproduzir melhor aquilo que é realmente verificável na prática. Esse processo consiste na etapa de calibração dos dados de entrada no ODEON conforme é ilustrado pela Fig.17, na qual consta todos os pontos em que o medidor sonoro 2250

Brüel & Kjær® foi posicionado em campo, distanciados 22m na longitudinal e 8,33m de extensão latitudinal, realizando as medições de L_p por todos os pontos indicados.

Para cada ponto foi conduzida uma medição de 5 minutos, totalizando uma hora de varredura por fábrica, em ponderação temporal “slow” e filtro de 1/3 de oitava, com faixa dinâmica de 40 a 120 dB(A), equipamento classe 1 modelo 2250 da Brüel & Kjær® posicionado a 1,2 m do solo e calibrado antes do início das medições.

Em relação ao método de cálculo, o *software* Odeon (2011) utiliza o método híbrido o qual considera os métodos de traçado de raios e o método de fonte de imagem.

Figura 17 – Pontos de medição que contém dados reais de pressão sonora para autoajuste da modelagem



Nota: Figura com pontos de medição distanciados a cada 22m em comprimento e 8,33m em relação a sua largura. Planta da fábrica meramente ilustrativa, fora de escala.

O primeiro método é encarregado das últimas reflexões, a previsão envolve traçar raios sonoros da fonte conforme eles refletem no recinto com base em sua energia emitida, a posição do receptor, as características de absorção sonora e obstáculos, e a forma como refletem nas superfícies de forma especular pela Lei de Snell e difusa seguindo a Lei de Lambert. No segundo, as primeiras reflexões são calculadas, criam-se fontes virtuais depois de a fonte física original ser espelhada para outra direção de cada superfície; a contribuição na energia total de cada fonte virtual varia de acordo com a distância e as atenuações ocorridas nas várias reflexões, podendo ser adicionada as contribuições de todas as fontes de imagem, o que requer grande capacidade computacional que nesse caso podem processar de 100 mil a 1 milhão de reflexões por cada fonte (ODEON, 2011).

Especificamente para se chegar ao SPL, seus resultados aparecem seguindo a relação de (14)

$$\text{SPL} = 10 \log (E_{0-\infty}) \quad (14)$$

Onde:

SPL – nível de pressão sonora mapeado [dB(A)];

$E_{0-\infty}$ – soma das contribuições de energia em um intervalo de tempo após o som direto [dB(A)].

O termo $E_{0-\infty}$ assume que a fonte de som com sua potência sonora arbitrará um SPL nas diferentes posições do mapa, investigando o quanto a acústica e reflexos contribuem para sua magnitude, pois espaços muito reflexivos terão alta contribuição, ao passo que em espaços com grande absorção haverá baixa contribuição em seu valor, que em suma haverá de ser uma subtração do nível sonoro da fonte original do raio sonoro.

O cálculo de T_{30} por sua vez segue o padrão da série ISO 3382. As partículas de som são enviadas em direções aleatórias da fonte, o Odeon registra a perda de energia em cada partícula por causa da absorção nas superfícies e no ar. Uma função de decaimento de energia para o recinto é obtida, a curva de decaimento de energia que é perdida até a interrupção da curva. Durante o decair, o nível de energia diminui tanto nas reflexões como nas absorções em função dos materiais e resistência do ar, sendo interrompida a sua propagação até o limite mínimo de energia a ser alcançado. Este limite depende do parâmetro calculado, no cálculo de tempo de reverberação nesse caso, o decaimento é de até 30 dB. O processo é feito para cada frequência uma vez que a absorção do ar e das superfícies disso dependem.

5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO AO RUÍDO OCUPACIONAL

As medições nos postos de trabalho dos 18 GHE totalizaram mais de 121 h para obtenção das variáveis de pesquisa. Para melhor organização na disposição dos resultados, optou-se por não apresentar todos os resultados das avaliações, no entanto, os mesmos podem encontradas nos Apêndices B, C e D, que se referem respectivamente às Tabelas 1, 2 e 3.

A Tabela 1 dispõe dos dados fornecidos pelas avaliações na fábrica 1, onde os níveis de pressão sonora equivalente, variaram entre 76,5 e 86,3 dB(A). Os valores que correspondem a essas médias logarítmicas, por sua vez, registraram uma amplitude de níveis sonoros entre 50,6 e 110,5 dB(A). Essa heterogeneidade dentro das médias e entre os diferentes pontos medidos revelam que a magnitude do ruído não é uniforme e que variou com o decorrer da jornada em função das atividades laborais desenvolvidas, havendo momentos em que ocorria elevação crítica dos níveis sonoros assim como a diminuição dos mesmos em outros. Isso se torna verificável pelos quantis estatísticos (Apêndice B), pois altos valores de pressão sonora em pequenos intervalos de tempo mostrados por L_{10} tiveram maior impacto na definição da média.

Sobre os diferentes grupos avaliados, nenhum deles resultou em 100% da dose, ou seja, exposição diária de 85 dB(A) para ruído contínuo conforme legislação nacional (BRASIL, 2011). Para o ruído de pico, no entanto, o limite de 120 dB(C) foi superado em 84% das amostras, incluindo ainda um número considerável de picos nos pontos 1P7 e 1P5, indicando que as áreas de montagem de carrinhos e serra de componente metálicos produzem de maneira frequente esses ruídos de impacto. Por mais que essa quantidade de picos não seja considerada para fins legais, é um parâmetro relevante em termos de riscos ocupacionais, pois quanto maior o número de picos, maiores serão as energias sonoras que o trabalhador estará sujeito.

No ponto 1P3 o nível sonoro de 86,3 dB(A) registrado levaria a 119% de dose de exposição, contudo, o nível médio de 81,78 dB(A) é o ruído representativo da exposição no ponto amostral, ocasionando neste caso, uma dose de 63,5%.

Com exceção dos pontos 1P2 e 1P4, nos demais, o nível sonoro de 80 dB(A) foi superado, o qual consiste no nível de ação, isto é, o nível para o qual se

adotam preventivas medidas de controle, desde ações administrativas até intervenções de engenharia no trabalho.

Tabela 1 – Distribuição dos resultados da avaliação da exposição de trabalhadores ao ruído industrial da fábrica 1

Amostra	$L_{p,A,eq,T,n}^{(1)}$ [dB(A)]	$D_8^{(2)}$ [%]	$L_{p,C,pico}^{(3)}$ [dB(C)]	Nº Picos	$L_{p,A,eq,T_8}^{(4)}$ [dB(A)]	
1	84,1	88,3	122,8	2		
1P1	2	82,2	67,8	122,8	1	83,55
	3	84,1	88,3	122,6	4	
1P2	1	80,4	53,0	117,8	0	
	2	79,1	43,9	122,9	3	79,55
	3	79,0	43,8	118,2	0	
1P3	1	76,5	30,8	122,0	1	
	2	80,0	50,0	118,1	0	
	3	86,3	119,7	123,0	7	81,78
	4	78,1	38,4	112,8	0	
	5	80,7	55,1	121,8	1	
1P4	1	78,7	41,7	122,6	1	
	2	77,8	36,9	121,4	3	78,22
	3	78,1	38,4	122,5	1	
1P5	1	78,1	38,4	127,8	2	
	2	78,9	42,9	123,1	4	
	3	83	75,8	123,1	11	81,70
	4	81,1	58,2	122,9	5	
	5	84,3	90,7	122,9	15	
1P6	1	81,8	64,2	124,1	12	
	2	81,5	61,6	123,3	1	81,92
	3	82,4	69,7	123,3	2	
1P7	1	83,6	82,4	123,1	12	
	2	82,0	66,0	122,6	16	83,49
	3	84,5	93,3	122,4	14	

¹ Nível de pressão sonora equivalente ponderado em A durante um intervalo de tempo $T = t_2 - t_1$ da medição "n"; ² Dose de ruído projetada para 8 horas de jornada de trabalho; ³ Nível de pressão sonora de pico ponderado em C; ⁴ Média logarítmica representante de exposição diária ao ruído ponderado em A.

Em relação aos resultados das avaliações na fábrica 2, de modo geral, as médias de pressão sonora equivalente variaram entre 79,0 e 89,6 dB(A); estando inseridas nessas médias uma amplitude de 52,3 a 113,6 dB(A), tendências essas semelhantes com o ocorrido na fábrica 1, e que também demonstram diferenças nos níveis de ruído entre os locais e ao longo do tempo, sendo para esse último L_{10} o quantil mais impactante para a definição da exposição média diária $L_{p,A,eq,T8}$ (Tabela 2).

Tabela 2 – Distribuição dos resultados da avaliação da exposição de trabalhadores ao ruído industrial da fábrica 2

Amostra	$L_{p,A,eq,T,n}$ ⁽¹⁾ [dB(A)]	D_8 ⁽²⁾ [%]	$L_{p,C,pico}$ ⁽³⁾ [dB(C)]	Nº Picos	$L_{p,A,eq,T8}$ ⁽⁴⁾ [dB(A)]	
2P1	1	80,1	50,7	122,9	2	
	2	81,6	62,4	122,7	5	80,37
	3	79,0	43,7	123,2	1	
2P2	1	83,5	81,2	122,5	2	
	2	81,3	59,9	122,5	5	82,06
	3	80,9	56,6	111,1	0	
2P3	1	80,5	53,7	122,6	1	
	2	81,8	64,2	122,8	3	81,42
	3	81,8	64,4	124,8	2	
2P4	1	84,4	92,0	123,1	33	
	2	82,9	74,7	123,1	10	
	3	89,0	174,1	125,2	36	87,12
	4	86,0	114,9	123,2	44	
	5	89,6	189,2	123,3	52	

¹ Nível de pressão sonora equivalente ponderado em A durante um intervalo de tempo $T = t_2 - t_1$ da medição "n"; ² Dose de ruído projetada para 8 horas de jornada de trabalho; ³ Nível de pressão sonora de pico ponderado em C; ⁴ Média logarítmica de exposição diária ao ruído ponderado em A.

Nesse grupo de amostras, porém, além de todos os pontos atingirem o nível de ação, em 2P4 três das cinco amostras superaram o valor limite de 85 dB(A), resultando em uma média de exposição diária de 87,12 dB(A), o que acarretaria em uma sobredose de exposição de 134,16% em caso da não disponibilidade de nenhuma forma de controle. Em apenas um dia amostrado entre todos os pontos medidos, os 120 dB(C) não foram superados, destacando os ruídos de impacto como característicos da forma de produção na fábrica.

Contudo, observa-se que as médias de exposições diárias de 2P1 a 2P3 obtiveram níveis muito próximos, sugerindo que em toda a extensão da fábrica a magnitude de ruído seja uniforme. A diferença nesses níveis pode ser atribuída aos locais de trabalho de embalagem e expedição, classificados no Quadro 7 e Fig. 10; revelando que as atividades nesse setor com o uso de furadeiras pneumáticas, martelos, trânsito de empilhadeiras e serragem de madeira para as embalagens, foi definidor no aumento do nível de ruído, bem como, no número de picos em comparação aos outros postos de trabalho.

Na Tabela 3 a seguir são vistas as informações das avaliações na fábrica 3.

Tabela 3 – Resultados da exposição de trabalhadores ao ruído industrial da fábrica 3

Amostra	$L_{p,A,eq,T,n}^{(1)}$ [dB(A)]	$D_8^{(2)}$ [%]	$L_{p,Cpico}^{(3)}$ [dB(C)]	Nº Picos	$L_{p,A,eq,T_8}^{(4)}$ [dB(A)]	
3P1	1	87,4	139,5	122,8	31	86,55
	2	85,9	113,3	122,6	33	
	3	86,2	118,1	122,8	30	
3P2	1	83,7	83,1	122,6	23	83,32
	2	83,8	84,5	122,7	12	
	3	82,4	69,6	122,9	8	
3P3	1	85,7	110,0	123,0	35	85,16
	2	86,0	114,7	123,1	31	
	3	83,4	80,0	123,0	27	
3P4	1	84,3	90,7	122,9	7	84,58
	2	84,4	92,0	123,2	13	
	3	85,0	100,0	123,5	5	
3P5	1	94,5	373,2	123,0	42	91,13
	2	93,9	343,4	122,9	39	
	3	82,9	74,7	123,0	9	
	4	88,0	151,6	123,3	28	
	5	85,9	113,3	123,2	4	
3P6	1	81,2	59,0	122,7	6	85,43
	2	86,0	114,9	123,1	12	
	3	82,3	68,8	122,9	3	
	4	88,5	162,4	123,1	16	
	5	85,3	104,2	123,2	12	

Tabela 3 – Continuação

Amostra	$L_{p,A,eq,T,n}^{(1)}$ [dB(A)]	$D_8^{(2)}$ [%]	$L_{p,Cpico}^{(3)}$ [dB(C)]	Nº Picos	$L_{p,A,eq,T_8}^{(4)}$ [dB(A)]
1	86,4	121,4	122,6	21	
3P7 2	84,8	97,3	122,5	7	85,49
3 3	85,1	101,4	122,6	12	

¹ Nível de pressão sonora equivalente ponderado em A durante um intervalo de tempo $T = t_2 - t_1$ da medição “n”; ² Dose de ruído projetada para 8 horas de jornada de trabalho; ³ Nível de pressão sonora de pico ponderado em C; ⁴ Média logarítmica de exposição diária ao ruído ponderado em A.

Os resultados das avaliações na fábrica 3 apresentam níveis de pressão sonora equivalente de 81,2 até 94,5 dB(A), com amplitudes computadas para formulação desses valores entre 45,6 e 117,6 dB(A), expondo que as maiores variações nos níveis de ruído ocorreram nessa fábrica. Outra particularidade é que os delimitadores máximos nos níveis de pressão sonora médio e instantâneo foram os maiores em relação as duas anteriores fábricas, sugerindo que essas sejam áreas de maior risco ocupacional, em função da maior magnitude de pressão sonora. Novamente, o quantil L_{10} explicou melhor o peso de altos valores de ruído em pequenos tempos para a composição do resultado logarítmico quantificado; L_{50} e L_{90} seriam mais participativos caso os níveis de ruído apresentassem maior regularidade.

Ao se analisar os resultados das médias de exposição diária, percebe-se que de forma global os postos de trabalho são expostos a altos níveis de ruído, com 60% de todas as medições indo além do valor limite. Pontualmente, apenas os locais de 3P2 e 3P4 não ultrapassaram os 85 dB(A), mas sim somente o nível de ação de 80 dB(A), gerando respectivas doses de 78,3% e 94,3%. No ponto 3P5 foram capturados os trabalhos mais ruidosos registrados por esse estudo, com dose de exposição que chegou a 234,2%. Em todas as amostras de todos os pontos de medição, o ruído de impacto foi maior que o valor teto, incluindo nesse cenário, a maior quantidade de número de picos em diferentes postos de trabalho.

Para a confiabilidade dos resultados na representatividade das exposições durante o trabalho, tem-se: a média $L_{p,A,eq,T,n}$ que integra os diferentes níveis de som no decorrer do tempo; L_{p,A,eq,T_8} que já cobre as variações entre os dias; e os possíveis erros e incertezas contidos nos dados. A Tabela 4 traz variáveis estatísticas que auxiliam na compreensão dessas questões.

Tabela 4 – Índices de coeficiente de variação e incerteza expandida do conjunto de dados

GHE	1P1	1P2	1P3	1P4	1P5	1P6	1P7	2P1	2P2
CV $L_{p,A,eq,T,n}$ [%]	1,3	1,0	4,6	0,6	3,2	0,6	1,5	1,6	1,7
U [dB(A)]	4,31	3,56	8,68	3,09	5,27	3,09	3,92	5,05	5,49
GHE	2P3	2P4	3P1	3P2	3P3	3P4	3P5	3P6	3P7
CV $L_{p,A,eq,T,n}$ [%]	0,9	3,3	0,9	0,9	1,7	0,4	5,7	3,5	1,0
U [dB(A)]	3,48	5,92	3,56	3,53	5,56	3,03	14,62	6,04	3,67

Interpretado como a variabilidade dos dados em relação à média, um menor coeficiente de variação demonstra um conjunto de dados distribuídos de forma mais homogênea (DIEGGLE; CHETWYND, 2011). Médias que se mantiveram próximas aliadas a CVs que se equipararam indicam que dentro de uma mesma fábrica não há uma atividade que se destaque em termos de elevação dos níveis de ruído. Por outro lado, CVs maiores podem indicar atividades que particularmente contribuem para o aumento do ruído e/ou que erros de amostragem e de instrumentação estão influenciando os resultados do ponto amostral. Nota-se também que, ao contrário dos resultados obtidos para esse parâmetro, CVs muito altos tornariam inconclusiva a quantificação da exposição em um ponto, de modo que aquele valor não seria capaz de expressar com representatividade uma exposição diária baseada no tempo de amostragem abordado por esse estudo.

Nas amostras de triplicata foram aceitáveis os valores de desvio padrão de até 2 dB(A) e de até 3,5 dB(A) para quintuplicata, sendo estes associados aos erros e incertezas, resultariam respectivamente, em incertezas expandidas de 6,6 e 7,5 dB(A) nas medições, os quais são os valores máximos indicados, a menos que haja uma clara justificativa para uma alta ocorrência de incerteza. Foram os casos de 1P3 e 3P5, únicos pontos amostrais a estarem fora da faixa aceitável, não indicando necessariamente erros de seleção de GHE ou nas medições e instrumentação, mas sim perceptíveis variações nas atividades de trabalho desencadeadoras de diferentes níveis e ruído (AREZES; BERNARDO; MATEUS, 2012). Assim, com os valores de U foi determinado um intervalo de confiança de 95% para os resultados de $L_{p,A,eq,T8}$, de modo que em futuras medições, o resultado estará dentro do intervalo de confiança com probabilidade de 95 em 100 amostras realizáveis (ISO, 2009).

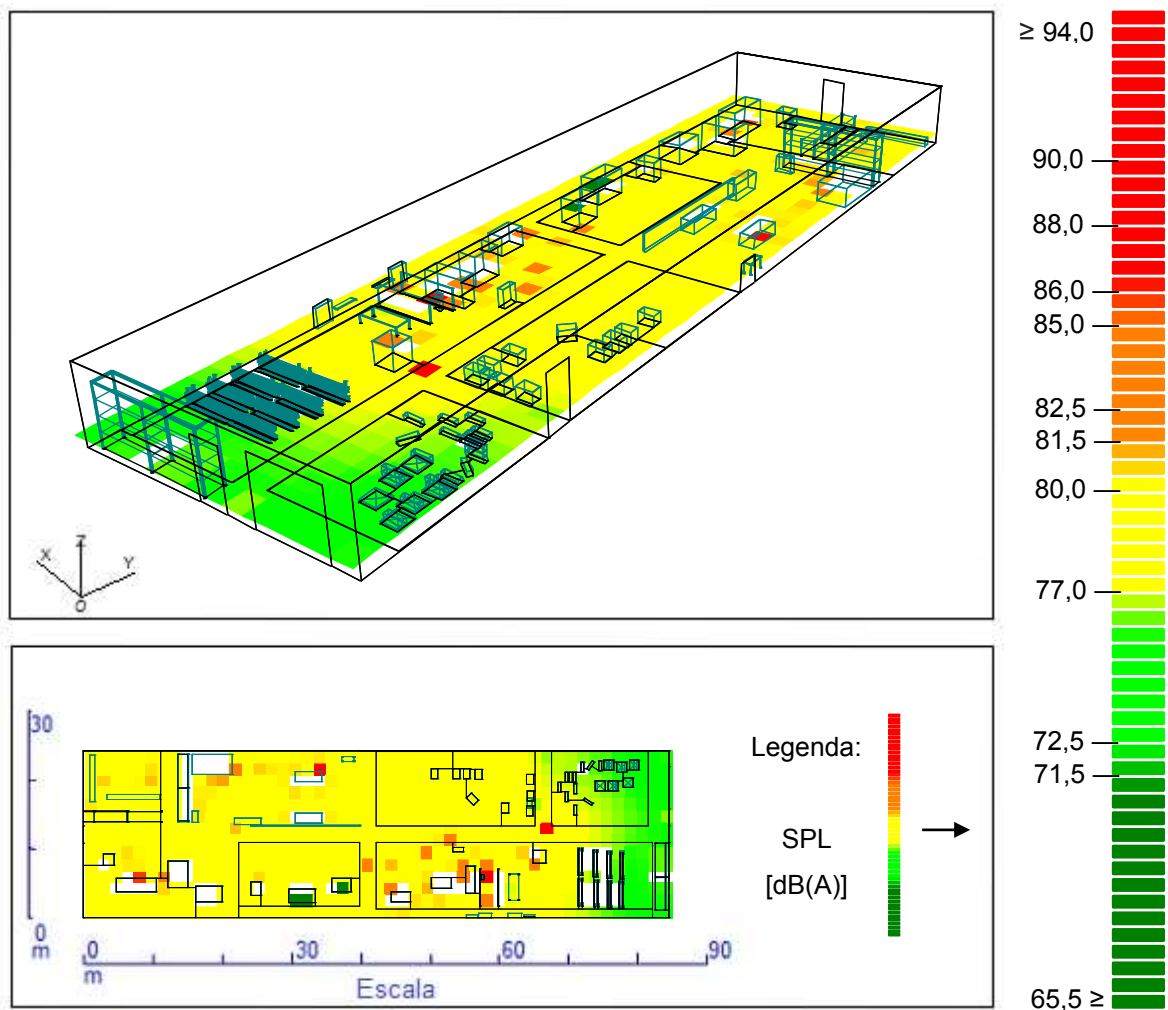
5.2 MAPAS DE RUÍDO DOS AMBIENTES INDUSTRIAIS

Serão apresentados os resultados do mapeamento de ruído em cada fábrica da indústria avaliada. Ainda que o objetivo não seja a comparação de concordância entre os resultados do dosímetro e mapas, as Tabelas 5, 6 e 7 trazem essas informações para uma abordagem complementar agregar à caracterização de ruído industrial, e também, para que não seja necessário retornar a outros capítulos para compreensão do contexto e localização dos GHE nos mapas.

▪ Fábrica 1

Como resultados dos cálculos no modelo geométrico desta fábrica, o mapeamento apresentado pela Fig. 18 mostra a distribuição espacial do nível de pressão sonora mapeado (SPL) ao longo da planta, onde máquinas foram predominantemente responsáveis pelas fontes do ruído industrial

Figura 18 – Mapeamento evidencia a distribuição de ruído ao longo do *layout* da fábrica 1



Pelo tipo de mapa resultante, fica claro que a oscilação de níveis sonoros não é uma característica que define o ruído da fábrica 1, mas o oposto disso, a uniformidade por grande parte de sua extensão é marcante, já que grande parte de sua área se encontra nas transições de amarelo, entre 77,5 e 82,0 dB(A). Nas áreas de armazenamento de produtos, por outro lado, tons de verde claro predominam, sendo os únicos locais que se diferenciam de forma mais expressiva. Tais resultados se devem à concentração homogênea de máquinas operando em diversos locais distintos, que além disso produzem níveis sonoros muito próximos – fundamento de acústica em que fontes sonoras semelhantes possuem baixa capacidade de soma no ruído global, prevalecendo a pressão sonora da fonte de ruído dominante (LONG, 2014a) –, até porque algumas delas são do mesmo modelo e trabalham com o mesmo objetivo.

Em termos de valores exatos segundo o mapeamento, apenas 0,7% da área da fábrica está com 85,0 dB(A) ou mais. Isso ocorre nas pequenas faixas ao redor das máquinas verificadas pelas manchas que transitam do laranja para o vermelho. Ou seja, por mais que sejam altos níveis de ruído, e não produzam impactos em termos de representatividade da fábrica por possuírem pequenas áreas de propagação sonora, muitas vezes são áreas que podem exercer influência nos operadores que desempenham seus trabalhos em proximidade a essas. Ainda assim, 95% da fábrica está com níveis de ruído $\leq 81,1$ dB(A), e 67,2% da fábrica está com níveis abaixo de 80,0 dB(A).

As informações contidas na Tabela 5 demonstram os níveis de ruído diagnosticados pelo mapeamento em comparação àqueles da etapa de dosimetria.

Tabela 5 – Distribuição dos níveis de ruído das avaliações individuais de GHE *versus* mapeamento nesses locais da fábrica 1

GHE	Quadrante para localização no mapa (x,y)	$L_{p,A,eq,T8}^{(1)}$ [dB(A)]	SPL ⁽²⁾ [dB(A)]
1P1	esquerdo (x) e superior (y)	83,55	82,50
1P2	esquerdo (x) e centro-superior (y)	79,55	77,00 – 80,00
1P3	esquerdo (x) e centro (y)	81,78	80,00 – 83,00
1P4	esquerdo (x) e centro-inferior (y)	78,22	77,00 – 80,00
1P5	esquerdo (x) e inferior (y)	81,70	80,00
1P6	direito (x) e centro-superior (y)	81,92	82,00 – 85,00
1P7	direito (x) e superior (y)	83,49	80,00 – 82,50

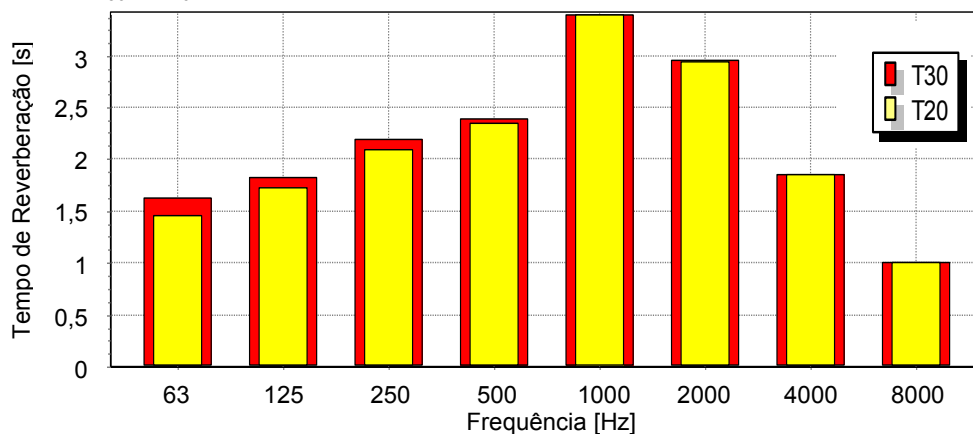
¹ Nível de pressão sonora médio de uma exposição de 8 horas avaliado com o audiodosímetro; ² Nível de pressão sonora equivalente mapeado. Nota: SPL únicos em 1P1 e 1P2 retratam suas áreas.

O mapa de ruído não substitui a dosimetria, mas complementa com uma ideia global de ruído ao tornar possível a identificação de variações espaciais que ocorrem dentro de própria área coberta pelo GHE, apontando conseqüentemente, suas viabilidades quando selecionados. Com os resultados obtidos nota-se uma boa concordância entre as médias de exposição diária com o mapa; poucas diferenças estão presentes e estas fornecem informações adicionais sobre locais que possivelmente apenas os GHE não conseguiriam distinguir. Os desvios encontrados estão inclusive todos dentro do intervalo de confiança de incerteza expandida (U); a região de 1P6 foi a que apresentou a maior divergência: 3,08 dB(A).

É natural que alguns valores no mapa se encontrem acima ou abaixo da média de exposição diária, sendo ideal que a diferença do que foi medido para o que foi mapeado não seja superior a 3,0 dB(A) (MANVELL; VAN BANDA, 2011). Deve-se levar em consideração, no entanto, que a locomoção de um trabalhador possa ser restrita a uma pequena área na fábrica em que há incidência de uma faixa específica de pressão sonora (cria-se particularidade pontual), por outro lado, há situações em que a não permanência do trabalhador nas proximidades da máquina em tempo integral, acaba atenuando a média de exposição. Isso ocorre porque à medida que aumenta a distância da fonte sonora, há diminuição da pressão sonora que chega até o receptor (HUNDY et al, 2016).

Outra variável de interesse é o tempo de reverberação (T_{30}) que avalia diretamente se o ambiente industrial pode ser caracterizado como de alta, média ou baixa absorção sonora, onde neste último caso seria denominado um ambiente com materiais de propriedades reflexivas (DIN-EN -ISO 11654, 2018). A Fig. 19 mostra a estimativa de T_{30} como resultado do cálculo de mais de 301 mil reflexões sonoras.

Figura 19 – T_{30} e T_{20} em bandas de oitavas como resultado dos materiais e suas áreas na fábrica 1



Para o tempo de reverberação não há um valor limite ou recomendável que não deva ser excedido em espaços industriais. Este é um parâmetro que depende do propósito para qual o recinto será utilizado e de seu tamanho em volume, quanto maior é o volume interno do recinto, maior será o tempo de reverberação. Também é uma variável que é normatizada com a ideia de conforto acústico e não para orientar atividades ocupacionais. Em ambientes como salas administrativas e igrejas com o mesmo volume da fábrica 1, por exemplo, o tempo de reverberação não poderia ser maior do que 2,0 s para gerar as condições de conforto (LONG, 2014d; ABNT, 1992).

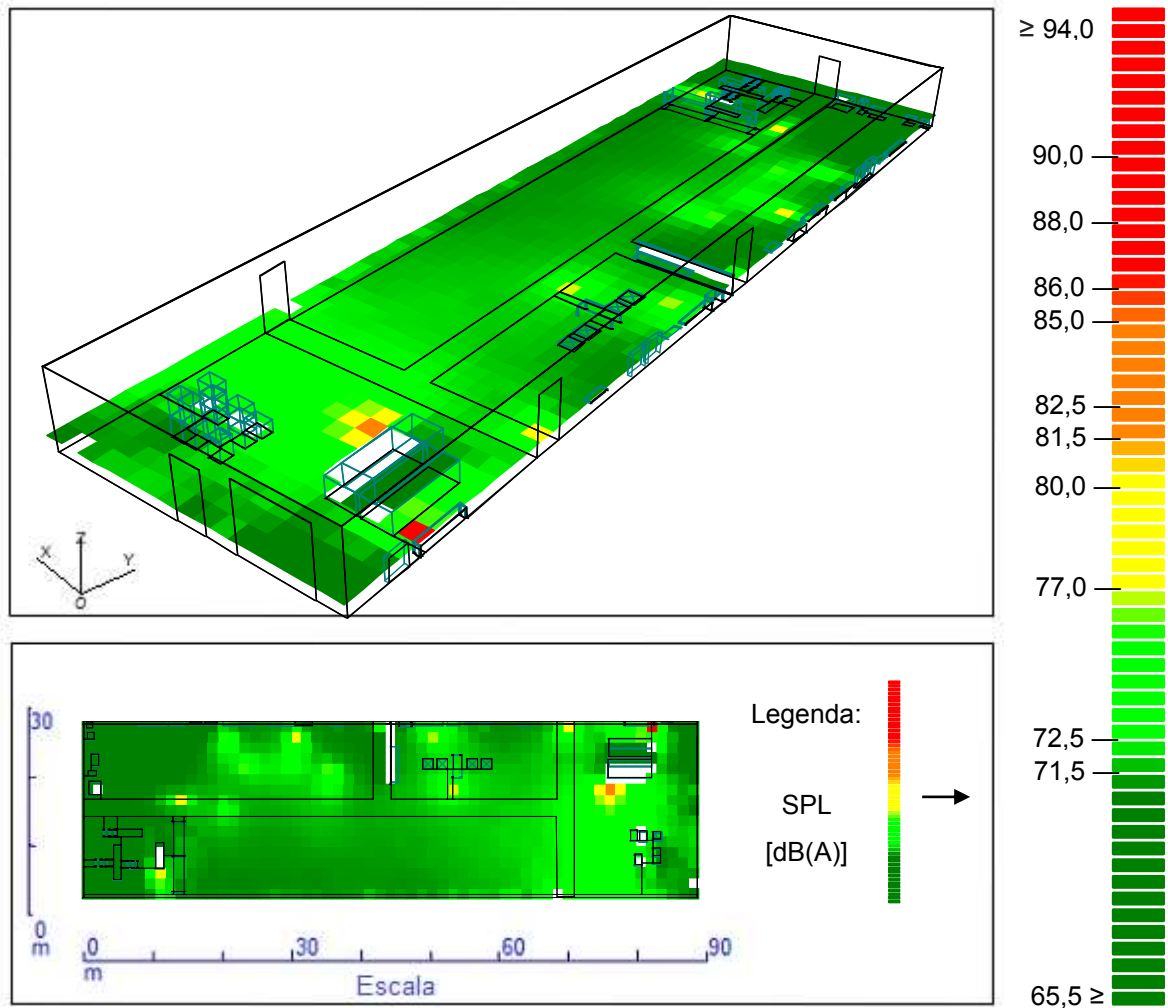
Valores mais baixos de T_{30} estão ligados a melhores sensações acústicas e a outras variáveis do som que interagem para a definição de uma boa qualidade sonora no recinto (KOCINSKI; OZIMEK, 2016; CHRISTENSSON; ECOPHON, 2018; CAMPBELL; SVENSSON; NILSSON, 2014; DÍAZ; PEDRERO, 2005).

Contudo, indiretamente a combinação dos materiais da fábrica (Quadro 9), resultando entre 2,3 a 3,8 s de T_{30} nas faixas centrais de frequência, podem sim influenciar no nível de ruído global. Isso ocorre porque maiores T_{30} estão apontando para presença de materiais de baixa absorção sonora ou ausência de materiais com altos coeficientes de absorção, aumentando o número de reflexões dos raios sonoros em diversas direções. A alteração de materiais poderia diminuir o número de reflexões, levando à diminuição de T_{30} , e paralelamente a uma quantidade menor de raios sonoros que contribuem para o somatório de SPL (ver equação 14), o qual também poderia ser reduzido (ODEON, 2011); dessa forma algumas áreas da fábrica se tornariam mais seguras para trabalhar.

▪ Fábrica 2

Ao contrário das fontes sonoras que originam o ruído na fábrica 1, nessa fábrica não há máquinas de grande porte envolvendo transformação de matéria. Atividades manuais para a produção de equipamentos ou máquinas e montagem final são os trabalhos preponderantes e, assim sendo, ferramentas manuais e pequenos dispositivos constituem as fontes sonoras. Em virtude disso, é verificável pelo mapa de ruído apresentado na Fig. 20 os resultados dos mais baixos níveis de ruído caracterizados na indústria.

Figura 20 – Mapeamento evidencia a distribuição de ruído ao longo do *layout* da fábrica 2



É possível perceber que a distribuição espacial do ruído está entre os tons verdes escuros e claros que abrangem níveis de pressão sonora equivalente entre 65,5 e 77,0 dB(A). São os trabalhos manuais que causam especificamente os problemas de maior ruído verificados na fábrica e visíveis pelas pequenas manchas nas cores amarelo, laranja e vermelho, mas que nesse caso demonstram alta particularidade pontual, isto é, torna-se representativo de algumas pequenas áreas da fábrica.

Em um diagnóstico mais representativo o mapeamento de ruído proporciona outra abordagem, pois extraindo informações apenas por meio da dosimetria outra ideia seria concebida a respeito do ruído nesse ambiente de trabalho, enquanto que pelos mapas é possível afirmar que 99,95% da fábrica está com níveis sonoros abaixo de 85,0 dB(A); 95% das áreas também estão com níveis iguais ou menores que 74,3 dB(A), além de metade da fábrica estar com níveis abaixo de 69,0 dB(A).

A Tabela 6 destaca os resultados em função das diferentes etapas de estudo na fábrica 2, comparando os dados das avaliações de exposições individuais ao diagnóstico do mapeamento.

Tabela 6 – Distribuição dos níveis de ruído das avaliações individuais de GHE *versus* mapeamento nesses locais da fábrica 2

GHE	Quadrante para localização no mapa (x,y)	$L_{p,A,eq,T8}^{(1)}$ [dB(A)]	SPL ⁽²⁾ [dB(A)]
2P1	direito (x); toda extensão superior-centro (y)	80,37	70,00 – 80,50
2P2	direito (x) e centro-inferior (y)	82,06	68,00 – 82,00
2P3	esquerdo (x) e superior (y)	81,42	67,00 – 81,50
2P4	toda a largura da fábrica (x) e inferior (y)	87,12	65,50 – 89,00

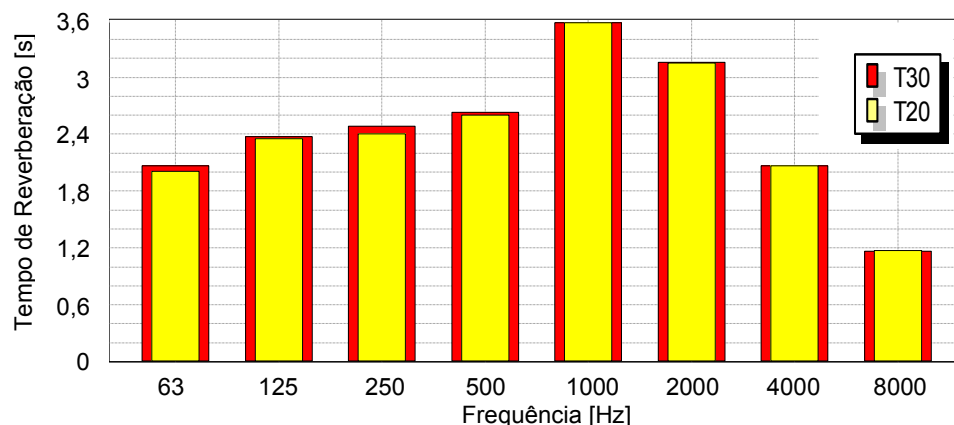
¹ Nível de pressão sonora médio de uma exposição de 8 horas avaliado com o audiodosímetro;

² Nível de pressão sonora equivalente mapeado.

É nessa fábrica onde ocorrem as maiores variações nos níveis de ruído na área de um mesmo GHE, como pode ser visto na quarta coluna da Tabela 6. Ainda assim pode-se dizer que ambos os valores concordaram bem, pois os que foram medidos se encontram inseridos no intervalo de variações que o mapa evidenciou. O fato de haver áreas com menor SPL não significa necessariamente que o GHE representa os mesmos integrantes de formas desiguais, o que demonstraria incoerência, mas demonstra as áreas do grupo que fazem os níveis de ruído aumentarem ou diminuírem. Esse padrão explica como o ponto 2P4 não representa a realidade de toda a sua área em termos de abrangência, uma vez que o trabalho de embalagem com o uso de furadeiras é uma fonte sonora pontual além de ser feita separadamente em cada tarefa e em pequenas áreas.

Em relação ao tempo de reverberação, os resultados que aparecem na Fig.21 mostram tendência que se assemelha aos índices obtidos na fábrica 1.

Figura 21 – T_{30} e T_{20} em bandas de oitavas como resultado dos materiais e suas áreas na fábrica 2

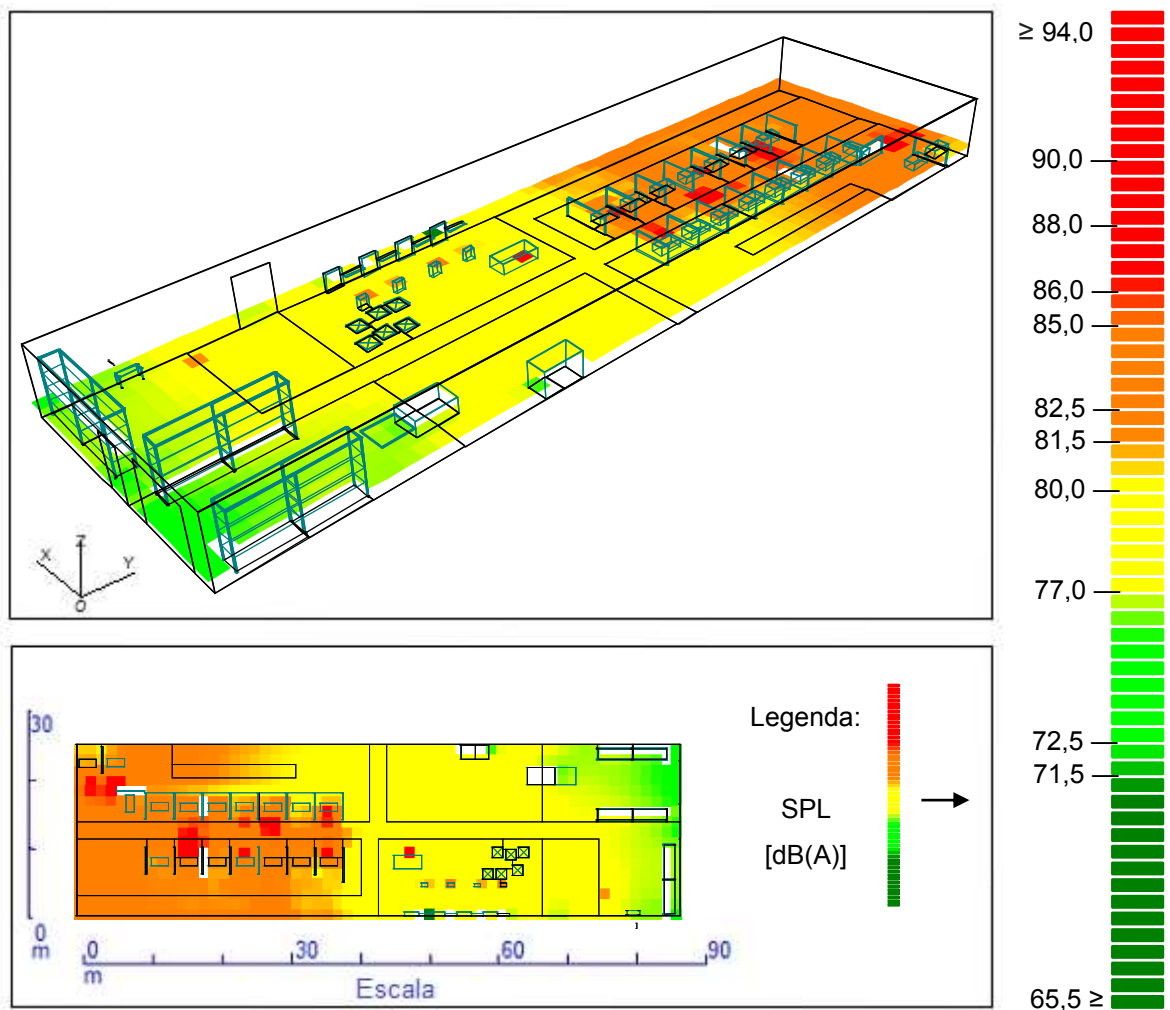


Como as fábricas pertencem a uma mesma planta industrial, são constituídas dos mesmos materiais e possuem as mesmas dimensões, os resultados de T_{30} tem de se aproximarem, enquanto que as oscilações neste parâmetro podem ser explicadas pelo número e porte de máquinas e equipamentos presentes em seus interiores, à medida que isso cria diferentes *layouts* e conseqüentemente diferentes áreas de absorção, podendo proporcionar diferenças no T_{30} ; isto foi especialmente confirmado nas baixas e altas frequências que resultaram em valores maiores em comparação à fábrica 1 em função da redução no número de superfícies metálicas de maquinaria, as quais impactam no T_{30} por possuírem seus coeficientes de absorção justamente nessas faixas de frequência.

- Fábrica 3

A Fig. 22 abaixo traz os resultados do mapeamento de ruído na fábrica 3.

Figura 22 – Mapeamento evidencia a distribuição de ruído ao longo do *layout* da fábrica 3



Fica evidente por meio do contraste de cores em relação às duas fábricas anteriores que na fábrica 3 os maiores níveis de ruído foram registrados, comprovado pelo mapeamento acústico. Quase metade da ilustração do mapa é preenchida com cores que vão do amarelo escuro em 81,0 dB(A) para o laranja intenso em 85,0 dB(A), contanto ainda com áreas em vermelho para além dos 86,5 dB(A). A fábrica também apresenta a maior porcentagem acima dos 85,0 dB(A), com 5% de sua área total incluída, isso ocorre com apenas 0,05% da fábrica 2 e 0,7% da fábrica 1; este índice só não é ainda maior em função do último terço da fábrica ser destinado para armazenamento, onde são verificados baixos níveis de ruído. Além disso, outras grandes áreas se encontram próximas do valor limite de 85 dB(A), na faixa de 83,5 a 84,9 dB(A).

As atividades com os níveis acima de 85,0 dB(A) fazem parte dos trabalhos de caldeiraria e soldagem realizados nos boxes destinados a estes fins; percebe-se ainda que nesse local do mapa, diferentemente de outros com atividades manuais, o ruído se espalha por grandes áreas demonstradas pela maior abrangência das manchas em laranja e vermelho. Ao contrário do exemplo das outras atividades manuais nas fábricas anteriores e na própria fábrica 3 onde se formaram pequenas e restritas manchas laranjas dentro do predomínio amarelo (fábrica 1 e 3) e do verde (fábrica 2). O porquê desse novo padrão ser sustentado se deve à proximidade em que as atividades acontecem, à quantidade desses trabalhos ocorrendo simultaneamente e ao alto nível de pressão sonora gerado por todo o setor.

Dispondo de valores dos níveis de ruído mapeado nas áreas em que houve a etapa de dosimetria, a Tabela 7 a seguir faz a integração dessa correspondência.

Tabela 7 – Distribuição dos níveis de ruído das avaliações individuais de GHE *versus* mapeamento nesses locais da fábrica 3

GHE	Quadrante para localização no mapa (x,y)	$L_{p,A,eq,T8}^{(1)}$ [dB(A)]	SPL ⁽²⁾ [dB(A)]
3P1	máquina à direita (x) e centro-inferior (y)	86,55	80,50
3P2	máquina à direita (x) e centro (y)	83,32	80,50
3P3	esquerdo (x) superior (y)	85,16	84,50 – 86,50
3P4	direito (x) superior (y)	84,58	84,00 – 86,00
3P5	extremo direito (x) extremo superior (y)	91,13	86,00 – 93,50
3P6	esquerdo (x) centro-inferior (y)	85,43	78,50 – 86,50
3P7	esquerdado(x) inferior (y)	85,49	77,00 – 85,50

¹ Nível de pressão sonora médio de uma exposição de 8 horas avaliado com o audiodosímetro;

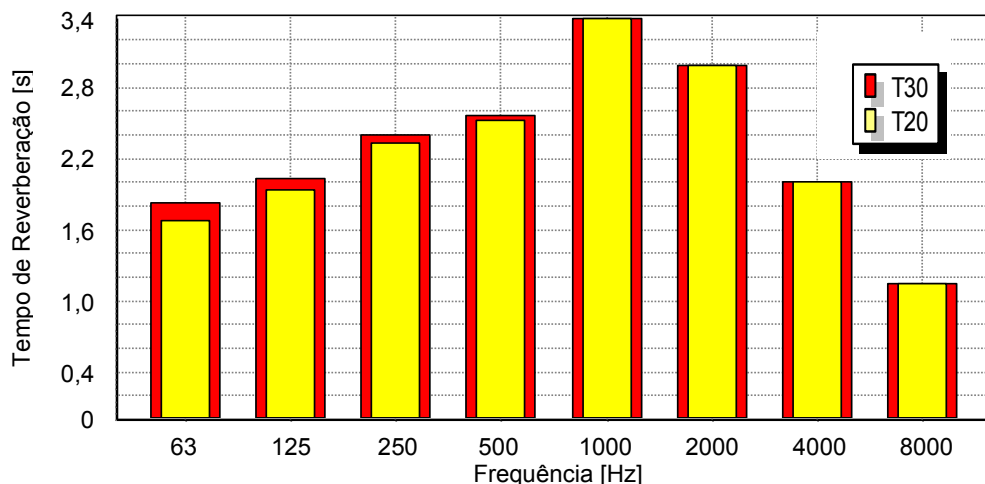
² Nível de pressão sonora equivalente mapeado.

Pode ser visto da comparação mostrada pela Tabela 7 que novamente as áreas mapeadas concordaram bem com aquilo evidenciado na execução com dosimetria; os valores de SPL que se mostraram acima de $L_{p,A,eq,T8}$ estão dentro do intervalo de incerteza expandida. Porém, pela primeira vez divergências maiores apareceram entre os dois métodos, as quais estão localizadas nas áreas de 3P1 e 3P2, únicas máquinas existentes nessa fábrica. Muito do que pode ser explicado decorre da absorção sonora proporcionada aos arredores dessas fontes de ruído no cálculo do modelo, principalmente pela existência de portões que foram considerados abertos de acordo com o Quadro 9.

Outra explicação é que ambos os métodos aplicados por essa pesquisa não foram realizados nos mesmos dias, o que pode ter demonstrado diferenças entre operações de trabalho ou sazonalidade de ruído. Em um cenário ideal, amostragens durante um ano todo nas técnicas de mapeamento de ruído tendem a superar essa questão, mas que na prática tempo e custos se tornam fatores limitantes (MORILLAS; GAJARDO, 2014). Por outro lado, esses aspectos de incertezas no mapeamento podem ser reflexos de algumas simplificações ao aproximar a potência sonora para se tornar aceitável de acordo com a pressão sonora em seu entorno (WITTE, 2013). Contudo, as vantagens oferecidas a essa pesquisa pelo método de mapeamento se sobressaem aos desvios pontuais verificados, além de que se pode encarar os mapas de ruído como enriquecedores dos dados já existentes, aumentando as perspectivas espaciais e temporais dos níveis de ruído nas fábricas.

Por sua vez, a distribuição do tempo de reverberação na fábrica 3 pode ser vista na Fig. 23 abaixo.

Figura 23 – T_{30} e T_{20} em bandas de oitavas como resultado dos materiais e suas áreas na fábrica 3



Nota-se que tal distribuição se deu de forma praticamente idêntica ao evidenciado pelas distribuições obtidas nas outras fábricas. Com a análise desses resultados em conjunto, o T_{30} se mostrou uma variável coerente já que é um parâmetro influenciado pelos materiais de construção e pela forma que o local é utilizado com as angulações formadas pelos objetos e equipamentos dispostos internamente. Sobre a sua magnitude, os altos índices superiores a 2 s nas faixas centrais de 500 a 4000 Hz caracterizam a indústria de uma forma geral como um ambiente de baixo conforto acústico e inteligibilidade de fala, de acordo com o que já foi anteriormente discutido.

Os resultados desse capítulo se tornam pioneiros ao confrontar e complementar dados de dosimetria e mapeamento acústico. Mais de 8 bilhões de cálculos foram feitos para a predição do ruído e construção dos mapas via *software*. O autoajuste e a confiabilidade obtidos por meio de duas metodologias fornecem maior suporte aos dados de exposição ao ruído. O mapeamento surge como uma ferramenta complementar que possibilita imagens mais amplas que as médias pontuais para GHE de exposição não alcançam, dando suporte à gestão para movimentação e adequações de medidas de controle.

5.3 MEDIDAS DE CONTROLE PARA O CENÁRIO ATUAL DE RUÍDO INDUSTRIAL

Esse capítulo desenvolve medidas de controle para o embasamento do que pode ser o início de uma gestão integrada e melhoria contínua dos cenários de ruído diagnosticados. Dentro da hierarquia de controle, parte-se do controle na trajetória, medidas administrativas e também quanto ao uso de EPIs; pois a pretensão do estudo não envolveu alterações na linha de produção ou controles nas fontes de ruído.

Assim, um conjunto de mudanças foi desenvolvido de acordo com a necessidade específica mostrada por cada fábrica para melhoria das condições de exposição ocupacional: i) através do *software* Odeon 11[®] novos cenários preditivos de ruído foram mapeados a partir de mudanças na composição de materiais; ii) mudanças administrativas consideraram o tempo de exposição e local apropriado; e iii) o uso de EPIs que melhor se adequam à frequência e níveis de ruído existentes. Os resultados foram organizados por categorias das medidas de controle.

- Superfícies para absorção sonora

Em um cenário no qual materiais com propriedades de absorção sonora fossem inseridos de acordo com a Tabela 8 nas fábricas 1 e 3, uma vez que seus diagnósticos mapeados justificam tal medida de controle, áreas com alto coeficiente de absorção sonora são incorporadas. Esses materiais de alto desempenho acústico foram escolhidos como o melhor cenário calculado no Odeon em termos de área e coeficiente de absorção, a Fig. 24 ilustra suas aplicações em ambiente industrial.

Tabela 8 – Materiais característicos para absorção sonora e suas áreas totais de absorção preditiva

Materiais absorventes	Coeficientes de absorção sonora de 125 a 4000 Hz (α_i) ¹						Área S_i [m ²]
	125	250	500	1000	2000	4000	
Fábrica 1							
Painéis metálicos	0,35	0,65	1,00	1,00	1,00	0,92	841,0
$A_{T\ TOTAL}$ ²	294,4	546,6	841,0	841,0	841,0	773,7	841,0
Fábrica 3							
Composto absorvedor	0,12	0,47	0,85	0,84	0,64	0,62	340,7
Painéis metálicos	0,35	0,65	1,00	1,00	1,00	0,92	1295,3
$A_{T\ TOTAL}$ ²	494,2	1002,1	1584,9	1581,5	1513,3	1402,9	1636,0

¹ Variável adimensional. ² Absorção sonora, dado por $\sum S_i \cdot \alpha_i$, em que S_i é a área superficial do material absorvente e α_i seu respectivo coeficiente de absorção sonora [m² · Sabine].

Figura 24 – Cenário hipotético que considera novas superfícies de absorção sonora nas fábricas 1 e 3



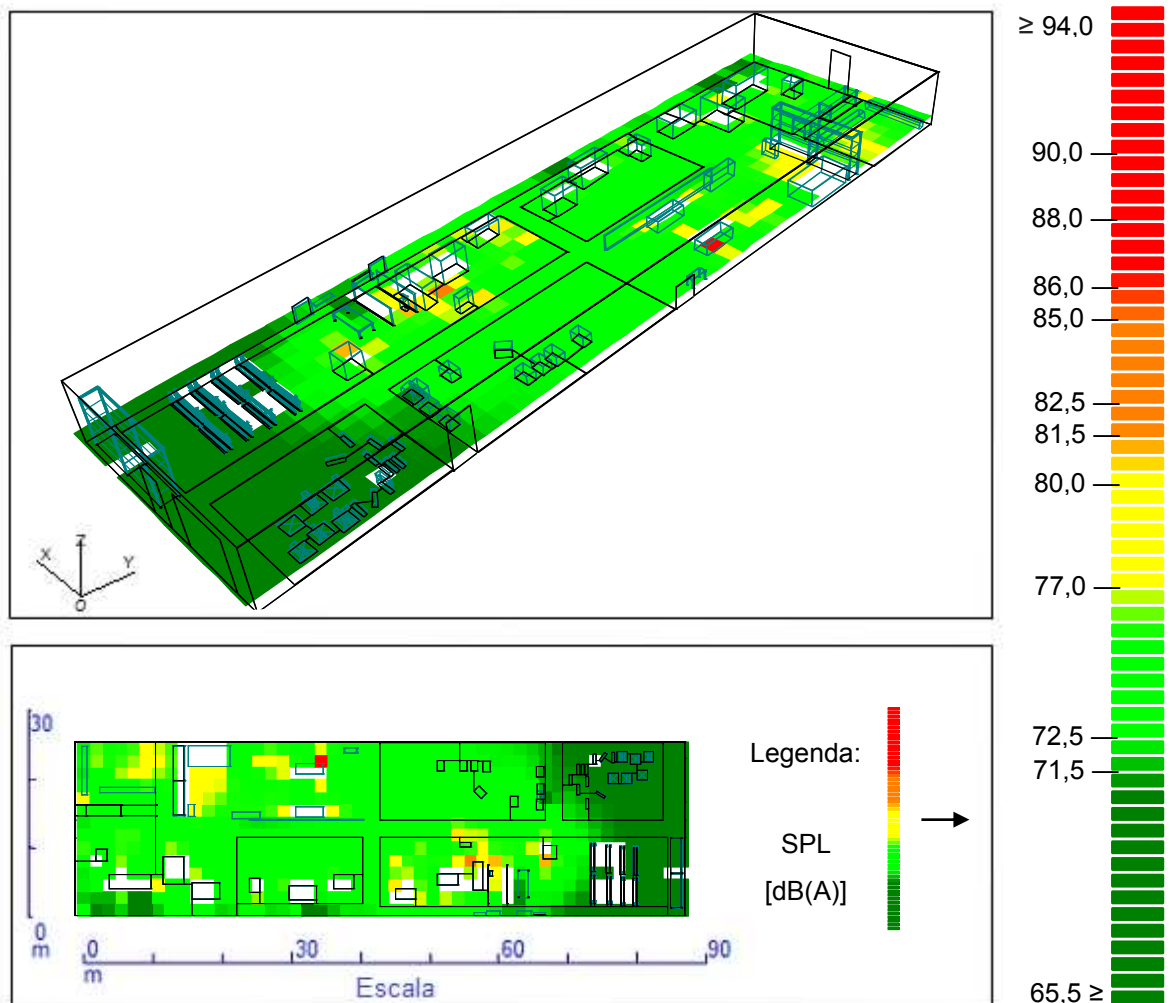
Fonte: IAC AcousticsI® (2021) 23-A; Sound Seal® (2021) 23-B.

A fábrica 2 foi a única em que não foi elaborada essas medidas, dado que seus níveis de ruído não oferecem grau de risco e abrangência que justificaria o investimento da instalação de novos materiais por toda sua extensão.

As frequências centrais demonstradas pelos resultados anteriores as apontaram como as mais influentes, assim, a escolha dos materiais acústicos foi planejada conforme esse critério; os custos de investimento não foram considerados para a escolha. A faixa de 125 a 4000 Hz é na qual mudanças são mais perceptíveis e influenciam a acústica do recinto, por isso se tornam suficientes para descrever os coeficientes de absorção sonora.

O resultado do mapeamento de ruído após os novos materiais serem inseridos na fábrica 1 é visto na Fig. 25. Destaca-se que a aplicação dos painéis metálicos se restringiu a duas grandes áreas: toda a parede à esquerda (x) e parede frontal a (y) na porção superior da imagem.

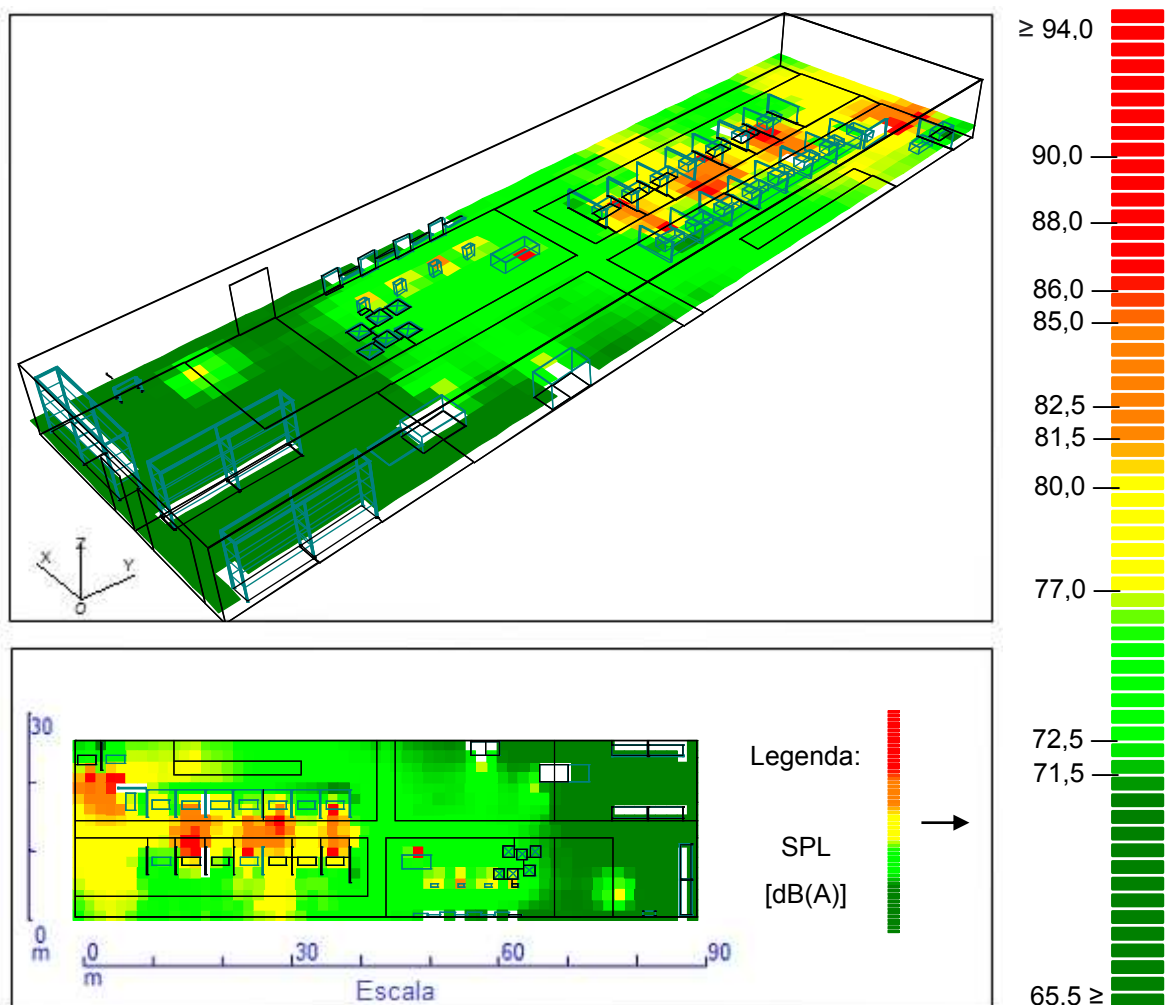
Figura 25 – Mapa preditivo com os níveis de ruído na fábrica 1 após se inserir material absorvente



Pelo mapa obtido, as modificações na fábrica 1 causariam alterações nos resultados de SPL ao longo de toda a sua área, o reduzindo em magnitude e alcance. O que antes era visto no mapa do presente (Fig. 18), com o predomínio de tons amarelos, passaria a ser somente ilhas que contornam as máquinas e a coloração verde claro assumiria a maior proporção de área com níveis sonoros entre 72,5 e 77,0 dB(A). Apenas uma pequena mancha vermelha registrou o nível de 85,0 dB(A) e outras pequenas regiões em laranja com níveis de 83,0 dB(A). Precisamente, áreas da fábrica com SPL abaixo de 85,0 dB(A), de 99,3% aumentariam para 99,87%. Os ruídos menores que 80,0 dB(A) estariam em 99,03% da área total, sendo ainda que metade da fábrica não ultrapassaria os 74,0 dB(A).

Na fábrica 3, a inserção de superfícies para absorção sonora seguiu os seguintes critérios: painéis metálicos nas paredes com exceção de onde há portões (parede abaixo e frontal a y); e composto absorvedor revestindo os compartimentos entre os boxes. A Fig. 26 evidencia o novo resultado do mapeamento na fábrica.

Figura 26 – Mapa preditivo com os níveis de ruído na fábrica 3 após se inserir materiais absorventes

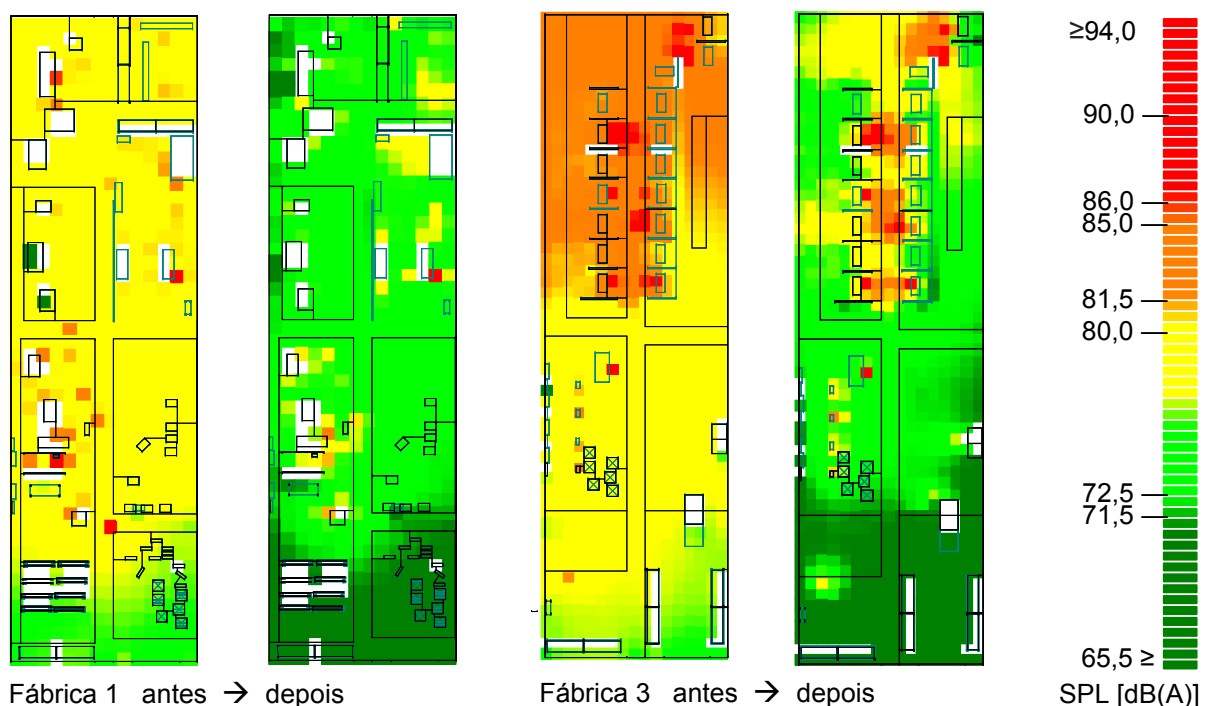


O novo padrão de cores resultante da fábrica 3 está indicando condições de SPL que requerem especial atenção. Tons de verde claro, verde escuro e amarelo se tornaram mais representativos. Em uma análise dos percentuais de área, 97,9% da fábrica passou a estar abaixo dos 85,0 dB(A), quantidade que antes representava 95% da área do recinto. Esse acréscimo de 2,9% equivale a um ganho de 63,8 m² em área segura conforme a legislação nacional (BRASIL, 2011). Além disso, 89,7% da fábrica está com níveis iguais ou menores que 80,0 dB(A), ou seja, grandes áreas na faixa 80,0 – 85,0 dB(A) reduziram suas abrangências. Porém, deve-se notar que pontos acima de 85,0 dB(A) embora tenham diminuído suas áreas, não diminuíram em magnitude, pois as manchas laranjas e vermelhas evidenciam a permanência desses níveis e, assim, alto risco nos locais de caldeiraria e soldagem.

Em ambas as fábricas o tempo de reverberação também sofreu alterações, na verdade pode-se dizer que foi a variável mais afetada pelas modificações. Os maiores valores de T_{30} na fábrica 1 passaram a ser de 1,76 s em 63 Hz e 1,7 s em 1 kHz; na frequência de 500 Hz foi obtido 1,15 s, enquanto que na fábrica 3 nessas respectivas frequências, valores de 2,45; 1,3 e 0,8 s foram registrados. Na prática esses resultados poderiam sensivelmente melhorar o conforto acústico percebido.

Com os mapas das fábricas, ilustradas abaixo na Fig. 27, uma comparação pode ser feita de antes e depois sobre o efeito da absorção sonora nos resultados.

Figura 27 – Comparação entre antes e depois da medida de controle nos mapas de ruído das fábricas



Os novos mapas calculados se mostraram com diferentes níveis de ruído e acústica industrial, sendo possível devido à alta absorção sonora dos materiais empregados, que na prática poderia atingir bons resultados sobre as variáveis analisadas, como destacado na Fig. 27.

No entanto, ressalta-se que a absorção sonora de qualquer material será diferente quando suas propriedades físicas mudarem, isto é, sua espessura, densidade, resistência ao fluxo de ar, método de montagem e instalação real. Os coeficientes fornecidos pelos fabricantes também podem variar, pois são dependentes do método de teste que os atribuem ao material, e sobre cada teste há um nível de incerteza (SEDDEQ, 2009; DUNNE; DESAI; SADIKU, 2017; MCGRORY et al., 2012).

Por mais que a medida de controle proposta não tenha solucionado todas as áreas de risco, é também verdade que os valores de SPL se tornariam mais pontuais e muitas áreas reduziriam sua magnitude, isso mostra que essa solução apresentou bons resultados. Para auxiliar os critérios de viabilidade, uma análise de custo benefício seria uma alternativa. Contudo, o mapeamento preditivo já se mostra uma ferramenta justificável para segurança ocupacional e fundamental antes de se realizar qualquer investimento.

- Medidas administrativas

Essa categoria de controle engloba o planejamento de ações que visam diminuir o tempo de exposição dos indivíduos ao ruído. Também, paralela ou simultaneamente, modificar a forma de trabalhar para que a dose de exposição não exceda os 100%, isto é, níveis acima de 85,0 dB(A) durante 8 horas de trabalho. Para esse fim, podem ser incluídas mudanças de setor que implicariam mudanças na posição de trabalho dentro da(s) fábrica(s).

Os pontos de exposição incluídos nessa medida de controle são todos aqueles que tiveram suas médias de exposição diária maiores que 85,0 dB(A), como verificados na fábrica 2 e 3. Assim, não mais 8 horas de exposição são permitidas a esses pontos, pois conforme a média de ruído exceda o limite de exposição, o tempo de exposição máxima permitido ($T_{MÁX}$) diminui progressivamente. Então, não mais seria permitido continuar o trabalho sujeito ao mesmo nível diário de exposição ($L_{p,A,eq,T8}$), a menos que um novo tempo de exposição seja planejado (T_{PLAN}) aliado

ao redimensionamento de um novo nível de ruído ($L_{p,A,eq,TF}$), que é alcançado justamente por medidas administrativas de controle para que o tempo que falta da jornada de trabalho (T_F) possa ser concluído com segurança.

Da Tabela 9, toma-se o ponto 2P4 para explicar a ideia anterior. Os 87,12 dB(A) não permitem que 8 h de trabalho sejam cursadas, comprimindo o tempo máximo para 5,96 h. Com a medida administrativa, impõe-se que apenas 5,5 h sejam trabalhadas e as 2,5 h restantes, sob o novo nível máximo de 73,63 dB(A).

Tabela 9 – Controle a partir de tempo de exposição planejando ligado a novo nível sonoro máximo

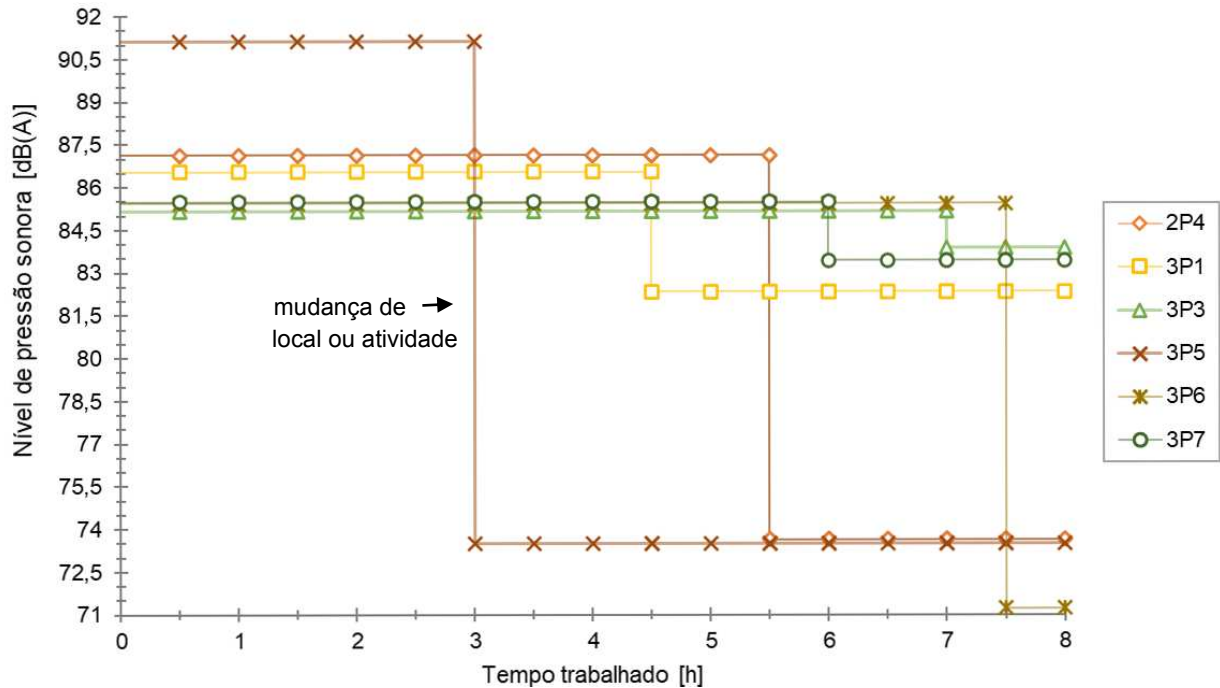
GHE	$L_{p,A,eq,T8}$ [dB(A)]	T_{MAX} [h]	T_{PLAN} [h]	T_F [h]	$L_{p,A,eq,TF}$ [dB(A)]
2P4	87,12	5,96	5,5	2,5	73,63
3P1	86,55	6,45	4,5	3,5	82,33
3P3	85,16	7,82	7,0	1,0	83,88
3P5	91,13	3,42	3,0	5,0	73,48
3P6	85,43	7,54	7,5	0,5	71,21
3P7	85,49	7,47	6,0	2,0	83,42

Nota: os significados das variáveis da Tabela 9 podem ser checados no texto da página anterior.

Os novos níveis máximos são a condição para que a jornada de trabalho continue sem ultrapassar 100% da dose de exposição. Porém, como pode ser visto na Tabela 9, esse nível de ruído redimensionado irá depender do tempo planejado. Isso pode ser verificado ao comparar os grupos 3P6 e 3P7, que possuem médias diárias de exposição muito próximas, e assim, semelhantes tempos máximos permitidos. No entanto, com escolhas de tempos planejados diferentes, $L_{p,A,eq,TF}$ determinará níveis distintos para prosseguir a jornada de trabalho. Em 3P6, já que 7,5 h do trabalho se deram nos 85,43 dB(A), conseqüentemente, a meia hora final de expediente precisará ocorrer em um nível de ruído com magnitude muito menor. O oposto ocorre em 3P7, onde se optou por restringir a exposição a 85,49 dB(A) faltando 2 horas para o fim do trabalho, isso permite que o mesmo continue em um nível menor, mas próximo do original. Dessa forma, fica claro que diferentes escolhas administrativas podem ser feitas para o tempo planejado, de acordo com a necessidade da atividade realizada ou de haver possibilidade ou não de troca de setor.

Refletindo os dados da Tabela 9, a Fig. 28 ilustra a dinâmica do que ocorreria em cada posto de trabalho do mesmo grupo ao longo da jornada de trabalho, se as medidas administrativas fossem implementadas

Figura 28 – Dinâmica de trabalho administrada quanto ao nível de ruído



Nota: os decaimentos em cada grupo representam as mudanças de local ou atividade que propiciam a redução no nível de ruído de exposição.

As referidas mudanças de atividade ou localização podem ser, por exemplo, a saída da operação de profissionais do grupo 3P5 para outros setores da fábrica 3 em que os níveis de ruído não sejam superiores a 73,48 dB(A), ou até mesmo a mudança de função no trabalho, como o remanejamento para a fábrica 2, onde existem grandes áreas para que o trabalho restante possa ocorrer em níveis abaixo de $L_{p,A,eq,TF}$. Essa mesma lógica pode ser replicada para todos os outros pontos respeitando suas particularidades ao idealizar novas atividades ou horários intermitentes de exposição, desde que o novo limite máximo de exposição não seja ultrapassado. Assim, um arranjo planejado para a rotação de locais ou tarefas pode ser vinculado ao nível de ruído ideal para cada caso.

É fundamental destacar que os resultados apresentados não consideraram a atenuação sonora advinda do uso de EPIs, sendo que acima de 80,0 dB(A) o fornecimento dos mesmos já é iniciado. Isso porque medir a atenuação efetiva intra-auricular pode ser muitas vezes difícil para esse fim, assim como, a falta de controle

quanto ao não uso e/ou mal uso de EPIs prejudica a atenuação efetiva (HUGUES et al., 2018; OIT 2011b; UNE-EN: 458, 2016). Com isso, uma abordagem preventiva é necessária, já que não se pode contar com a efetividade dos protetores auditivos para o planejamento dos controles.

Empresas bem sucedidas em saúde auditiva entendem que os EPIs devem ser usados como medidas de curto prazo enquanto outros métodos para controlar o ruído são desenvolvidos, tais como a rotação de trabalho, limitar a exposição, e outras medidas administrativas como estudos para aquisição de ferramentas e máquinas mais “silenciosas” (BELL; LUNT; WEBSTER, 2014; ANIZAR et al., 2018). A gestão administrativa pode ainda abrir possibilidades para gerar satisfação nos colaboradores, ao atribuir tarefas e novas condições de trabalho baseadas no desenvolvimento de habilidades que ocasionem aprendizado profissional (RERKJIRATTIKAL; OLAPIRIYAKUL, 2019; ARYANEZHAD et al., 2009).

Sugere-se que para um bom desempenho das medidas de controle administrativas, a gestão de riscos deve incorporar um olhar ao cumprimento regulamentar, à integridade física do trabalhador e, à limitação de riscos que otimizem a qualidade de vida no trabalho. E como foi visto, isso pode ser feito com medidas simples sem gastos ou mudanças na linha de produção, evidenciando o potencial algumas vezes subestimado de medidas administrativas (BELL; LUNT; WEBSTER, 2014; KEEFE et al., 2020).

- **Uso do Equipamento de Proteção Individual (EPI)**

Última na hierarquia de controle, essa medida é para qual a maior parte das ações são direcionadas, pois normalmente acredita-se que as formas de controle de ruído propostas anteriormente sejam complexas e demandem altos investimentos, inviabilizando o custo-benefício (MORATA; MEINKE, 2016); paradigma esse que a atual pesquisa lança novas perspectivas, justamente ao considerar o uso de EPIs como a última solução, ideal quando em conjunto com as demais.

Dois principais tipos de protetores auditivos são os mais difundidos, o tipo plug ou inserção é usado diretamente no canal auditivo, e o tipo concha possui revestimento acolchoado e alça que o prende à cabeça. Na Tabela 10 a seguir é mostrada a comparação desses dois EPIs a partir da capacidade de atenuar os níveis de ruído em frequências específicas. Essa análise permite uma escolha

adequada para a redução da exposição desejada de acordo com os níveis de ruído existentes nas fábricas.

Tabela 10 – Comparação da capacidade de atenuação de ruído entre EPIs

Tipo de EPI	Nível de atenuação de ruído em bandas de oitava [dB]						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Plug	20,8	23,2	25,4	22,5	27,1	27,8	38,1
DP ¹	5,0	4,8	5,0	4,0	4,9	7,2	6,7
Concha	11,0	15,4	25,1	30,0	35,9	34,4	35,5
DP ¹	2,1	3,9	3,8	4,4	2,0	3,1	3,1

¹ Desvio padrão da atenuação [dB]. Fonte: 3M[®](2021).

O desvio padrão atrelado a cada atenuação explica que a atenuação real será diferente da teórica medida em laboratório, assim, recomenda-se utilizar 2 desvios padrão para subtrair a atenuação em cada frequência e obter um nível de confiança de 98% na prática (GUIDA et al., 2014; 2017; ZANNIN; GERGES, 2006).

A análise então envolveu os pontos 2P4 e 3P5 para aplicação dessa medida de controle, conforme mostra a Tabela 11. Tal decisão utilizou como critério o fato de que são esses pontos que estão expostos aos maiores níveis sonoros registrados pela pesquisa, apesar de todos os outros trabalhadores precisarem usar EPI, por trabalhar ou transitar em áreas acima de 80,0 dB(A). Dessa forma, como os outros grupos possuem exposições a magnitudes inferiores, baixas atenuações poderiam ser suficientes para reduzir os níveis de exposição a níveis mais seguros.

Tabela 11 – Exposição ao ruído atenuada pelo uso de EPI, tipo inserção e concha

Condição	Nível Total [dB(A)]
2P4 sem EPI	87,12
3P5 sem EPI	91,13
2P4 com protetor plug	71,69
2P4 com protetor concha	67,01
3P5 com protetor plug	76,31
3P5 com protetor concha	69,15

Nota: para melhor organização na visualização dos resultados, os dados de frequência em bandas de oitava estão ausentes. Essas informações podem ser encontradas no Apêndice E, no qual há a atenuação detalhada nas frequências de 125 a 8000 Hz.

As atenuações resultantes do uso de EPIs se mostram eficazes na diminuição da exposição, porém requerem o uso correto durante todo o tempo de exposição. Uma atenuação maior é feita pelo tipo concha, mas não necessariamente “melhor”, tendo em vista que superatenuações também podem trazer riscos aos expostos, e além disso, a opinião do trabalhador deve ser primordial nessa escolha, visando maior conforto e, uso por um tempo eficaz na diminuição dos níveis sonoros (SAYLER et al., 2019; SVIECH et al., 2013).

O funcionamento correto do protetor auditivo também depende de características fisiológicas e anatômicas inerentes ao usuário que interferem na atenuação. Aspectos dos materiais utilizados como as espumas, forros e revestimentos do mesmo modo causam interferências, podendo ter perdas de atenuação nas baixas frequências por se tratar de materiais leves, e assim suscetíveis ao vazamento de energia sonora. Outras incertezas poder estar ligadas ainda a divergência das atenuações informadas pelo fabricante, com valores superiores quando confrontadas às verificadas em medições de atenuação (ZANNIN; GERGES, 2006; ROCHA et al., 2016).

Dessa maneira, tendo em vista as questões citadas para definição do EPI é recomendável o uso do tipo concha nos grupos de exposição avaliados, pois o mesmo proporciona mais vantagens ao unir maior atenuação, menos variabilidade de atenuação entre os usuários e facilmente visto à distância para auxiliar no monitoramento de seu uso (CCOHS, 2021), ainda que esteja longe de ser um equívoco a recomendação do protetor tipo plug. Utilizar os dois simultaneamente, porém ofereceria uma proteção extra chamada de atenuação dupla, ainda que essa abordagem preventiva seja indicada para exposições diárias a partir de 100 dB(A).

Nesse capítulo foi demonstrado pelos resultados dos diferentes controles que eficácia não necessariamente é significado de exigência de altos investimentos, ainda que esses possam ser necessários para modificações de materiais internos. Mas que é reflexo de um completo e profundo entendimento do cenário atual de ruído e de onde se quer chegar quando se planeja uma ou mais medida de controle antes de a(s) implementar, possibilitando riqueza de informações, o processo de tomada de decisão acaba se tornando mais claro e seguro. E mais, foi evidenciado que promover mais de uma ideia é possível, pois assim movimentos em conjunto para maior saúde e segurança podem trazer resultados sinérgicos não obtidos quando adotadas medidas isoladamente.

5.4 LIMITAÇÕES E PONTOS FORTES DA PESQUISA

As limitações do estudo compreendem os dados de potência sonora e o lapso temporal de construção do mapeamento. O primeiro porque em um cenário ideal, a potência sonora deve ser obtida por cada fonte para alimentar o *software* de cálculo do mapa. Porém na prática se torna quase impossível interromper a produção de grandes fábricas para que se ligue cada fonte alternadamente uma a uma para cálculo de suas potências sonoras. Além disso, a proximidade locacional entre as fontes sonoras impediria uma caracterização precisa pela presença de ruídos de fundo competidores. Sobre a segunda limitação, em um cenário ideal, amostragens durante meses ou anos de níveis sonoros fariam o mapeamento tender a uma representação mais precisa da realidade, contudo, seria algo que apenas um mapeamento em um lapso temporal maior poderia apontar.

É nesse último ponto que se interliga o primeiro ponto forte da pesquisa. Unir duas metodologias, uma dosimetria estatística ao mapeamento de ruído promove maior confiança aos resultados gerados. Um diagnóstico profundo de ruído foi realizado, sua interpretação, previsão e controle, promovendo formas inovadoras de pesquisa, além de fornecer suporte científico para replicação desse conteúdo em outros ambientes de ruído ocupacional. Uma visão inovadora foi obtida a respeito da maior ênfase nas outras técnicas de controle em detrimento da frequente priorização do uso de EPIs, sendo mostradas opções efetivas e aplicáveis para gestão do risco. Difundir essa abordagem também promove inovação à indústria e potencial impacto na melhoria da qualidade de vida dos colaboradores.

6 CONCLUSÃO

A partir da proposta de pesquisa trazida pelo presente trabalho, foi obtida a caracterização total do ruído industrial. O que consistiu na compreensão de sua dinâmica de funcionamento, organização de pontos amostrais, mensuração das exposições ocupacional, mapeamento de ruído diagnóstico e preditivo, até a elaboração de medidas para controle do cenário atual de ruído. Com o desenvolvimento desses resultados, destacam-se as seguintes conclusões:

- Os níveis de ruído industrial aos quais os trabalhadores estão expostos puderam ser quantificados. As médias diárias de exposição de acordo com suas jornadas de trabalho também foram delineadas, entendidas sob perspectiva metodológica que envolveu intervalos de confiança estatísticos. Resultados esses que apontaram maior risco como 91,13 dB(A) para o grupo 3P5 e menor risco com 78,22 dB(A) para 1P4, permitindo ainda o entendimento do comportamento do ruído nos diferentes pontos analisados. Comportamento que se refere à variabilidade entre os dias avaliados e a demonstração da localidade nos recintos industriais em que as diferentes magnitudes de ruído acontecem. Essa etapa de caracterização se mostrou fundamental para a gestão da exposição e medidas de controle visando a saúde e segurança ocupacional.
- Os resultados através da quantificação feita pelos mapas acústicos foram capazes de fornecer uma ampla visualização de ruído por toda extensão das fábricas. Isso possibilitou exclusivo caráter discriminatório de quais setores e atividades possuem maior risco. Além disso, essa completa caracterização dos níveis sonoros forneceu perspectivas que sozinha a dosimetria de ruído dificilmente alcançaria em semelhante tempo hábil. Foi provado que ambas metodologias se complementaram e enriqueceram uma a outra por proporcionar autoanálise na pesquisa e maior suporte aos dados de exposição ao ruído, abordagem essa inovadora. A metodologia de mapeamento deixou de forma mais clara os baixos níveis de ruído que predominaram na fábrica 2 em contraste àqueles moderados e altos, respectivamente, na fábrica 1 e 3. Com esses diagnósticos, embasamento para o que seria coerente nas medidas de controle foi fornecido.

- De posse das prévias informações, cenários preditivos para controle da exposição ao ruído ocupacional foram então apresentados. A modificação das superfícies de absorção sonora não foi capaz de eliminar todas as áreas dos consequentes riscos de exposições maiores que 85 dB(A), como demonstraram os mapas preditivos. Contudo, essa medida impactou positivamente as fábricas em que foram aplicadas, com 12,54 m² de área segura ganha na fábrica 1 e 63,8 m² na fábrica 3, as quais contaram ainda com amplas reduções de áreas com ruído abaixo dos 80 dB(A), e nos tempos de reverberação, que potencialmente trariam maior conforto aos ambientes de trabalho. Medidas administrativas surgiram como alternativas suficientemente eficazes para redução das exposições, com a grande vantagem de não envolver custos ou alterações de fabricação. E ainda, o uso de EPIs foi dimensionado para atenuações específicas em dois grupos de exposição, mas que poderia ter sua ideia replicada a todo público alvo da pesquisa.
- Para trabalhos futuros recomenda-se: i) a repetição de toda a etapa de audiodosímetro em outra época afim de verificar estatisticamente, possível variações das médias de exposição diárias; ii) mapeamento sonoro realizado em um intervalo de tempo maior e simultaneamente à metodologia de dosimetria visando demonstrar concordância estatística entre os métodos; iii) o estudo da viabilidade financeira da implementação de materiais de alta absorção sonora; e iv) pesquisa que considere também o implemento real das medidas de controle aqui promovidas.

REFERÊNCIAS

3M®. **A proteção auditiva que está muito além da atenuação**, 2021. Disponível em: < https://www.3m.com.br/3M/pt_BR/3m-do-brasil/>. Acesso em: 7/03/2021

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12179: Tratamento acústico em recintos fechados - Procedimento**. Rio de Janeiro, p. 9, 1992.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NBR 16077:2021 – Equipamento de proteção individual – Protetores auditivos – Método de cálculo do nível de pressão sonora na orelha protegida**. Rio de Janeiro, 2021.

ACGIH - American Conference of Governmental Industrial Hygienists. **Threshold limit values for chemical substances and physical agents - biological exposure indices**. Ohio, Cincinnati, 2020.

AHMAD, M. A.; RAZALI, A. Can FMA (Noise) 1989 prevent occupational noise induced hearing loss? An evaluation using fault tree analysis. **IJUM Medical Journal Malaysia**, v. 18, n. 3, 2019.

ALEMANHA, Ministério Federal da Defesa. **Verordnung zum schutz der beschäftigten vor gefährdungen durch lärm und vibrationen (lärm- und vibrations- arbeitsschutzverordnung - lärmVibrationsArbSchV)**. 2017.

ALI, S. A. Industrial noise levels and annoyance in Egypt. **Applied Acoustics**, v. 72, n. 4, p. 221–225, 2011.

ALLAHVERDY, A.; JAFARI, A. H. Non-auditory effect of noise pollution and its risk on human brain activity in different audio frequency using electroencephalogram complexity. **Iranian Journal of Public Health**, v. 45, n. 10, p. 1332–1339, 2016.

ANIZAR; ERWIN; SARI, R. M.; SYAHPUTRI, K.; RIZKYA, I. Work rotation to reduce the effect of noise exposure for operators in sugar factory. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 288, p. 012029, 2018. IOP Publishing.

ANSI - American National Standards Institute. **ANSI S1.4: Specification for sound level meters**. Washington, 1983.

ANSI - American National Standards Institute. **ANSI S1.25: Specification for personal noise dosimeters**. Washington, 1991.

ANSI - American National Standards Institute. **ANSI S12.19:1996 (R 2016) Measurement of occupational noise exposure**. Washington, 2016.

ARENAS, J.; SUTER, A. Comparison of occupational noise legislation in the Americas: an overview and analysis. **Noise and Health**, v. 16, n. 72, p. 306, 2014.

AREZES, P. M.; BERNARDO, C. A.; MATEUS, O. A. Measurement strategies for occupational noise exposure assessment: a comparison study in different industrial environments. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 42, n. 1, p. 172–177, 2012.

AREZES, P. M.; MIGUEL, A. S. Assessing the use of hearing protection in industrial settings: a comparison between methods. **International Journal of Industrial Ergonomics**, Noise: Assessment & Control., v. 43, n. 6, p. 518–525, 2013.

ARYANEZHAD, M. B.; KHEIRKHAH, A. S.; DELJOO, V.; MIRZAPOUR AL-E-HASHEM, S. M. J. Designing safe job rotation schedules based upon workers' skills. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 41, n. 1–2, p. 193–199, 2009.

AUSTRÁLIA, Safe Work Australia. **Model Work Health and Safety Act - Noise**. 2011. Disponível em: <
<https://www.legislation.nsw.gov.au/view/whole/html/inforce/current/sl-2011-0674>>. Acesso em: 08/6/2020

AUSTRÁLIA, Safe Work Australia. **Noise**. 2020. Disponível em: <
<https://www.safeworkaustralia.gov.au/noise>>. Acesso em: 08/6/2020

BAKHSH, A. A. S. Investigation and reduction of noise level in a process industry. **Journal of Scientific & Industrial Research**, v. 78, n. 11, p. 799–801, 2019.

BASNER, M.; BABISCH, W.; DAVIS, A.; et al. Auditory and non-auditory effects of noise on health. **The Lancet**, v. 383, n. 9925, p. 1325–1332, 2014.
BENOCCI, R.; BISCEGLIE, A.; ANGELINI, F.; ZAMBON, G. Influence of traffic noise from local and surrounding areas on high-rise buildings. **Applied Acoustics**, v. 166, p. 107362, 2020.

BELL, N.; LUNT, J.; WEBSTER, J.; WARD, T. Comparing high and low performers for noise control. **International Journal of Workplace Health Management**, v. 8, n. 1, p. 46–60, 2015.

BILLON, A.; PICAUT, J.; VALEAU, V.; SAKOUT, A. Acoustic predictions in industrial spaces using a diffusion model. **Advances in Acoustics and Vibration**, v. 6, p. 10, 2012.

BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. 3ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 2018.

BOCKSTAEL, A.; DE BRUYNE, L.; VINCK, B.; BOTTELDOOREN, D. Hearing protection in industry: companies' policy and workers' perception. **International Journal of Industrial Ergonomics**, Noise: Assessment & Control., v. 43, n. 6, p. 512–517, 2013.

BONNET, F.; NÉLISSE, H.; NOGAROLLI, M. A. C.; VOIX, J. In-ear noise dosimetry under earplug: method to exclude wearer-induced disturbances. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 74, p. 102862, 2019.

BONNET, F.; NÉLISSE, H.; NOGAROLLI, M. A. C.; VOIX, J. Individual in situ calibration of in-ear noise dosimeters. **Applied Acoustics**, v. 157, p. 107015, 2020.

BOROIU, A.-A.; TABACU, I.; NEAGU, E.; PÂRLAC, S. Research on the correlation between the characteristics of traffic at intersections and the road noise level. **Automotive series**, year XXII, n. 26, p. 10, 2016.

BOZKURT, T. S.; DEMIRKALE, S. Y. The field study and numerical simulation of industrial noise mapping. **Journal of Building Engineering**, v. 9, p. 60–75, 2017.

BRASIL – Ministério da Economia. **NR 15 – Atividades e Operações Insalubres**. Brasília: Escola Nacional da Inspeção do Trabalho – ENIT, Subsecretaria de Inspeção do Trabalho – SIT, 2011. Disponível em: <
https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos_SST/SST_NR/NR-15-atualizada-2019.pdf>. Acesso em :14/4/2020

BRASIL– Ministério da Saúde. **Sistema de Informação de Agravos de Notificação - DRT PAIR**. 2016. Disponível em: <<http://portalsinan.saude.gov.br/drt-pair>>. Acesso em: 25/5/2020.

BRÜEL & KJÆR®. **Basic Frequency Analysis of Sound**. Disponível em:<
<http://img.sae-china.org/web/2019/11/Basic%20Frequency%20Analysis%20of%20Sound.pdf>>. Acesso em: 18/4/2020

BUJOREANU, C.; NEDEFF, F.; BENCHEA, M.; AGOP, M. Experimental and theoretical considerations on sound absorption performance of waste materials including the effect of backing plates. **Applied Acoustics**, v. 119, p. 88–93, 2017.

BUTORINA, M.; DROZDOVA, L.; KUKLIN, D.; et al. Implementation of noise data into building information model (BIM) to reduce noise in the environment and at workplace. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 337, p. 012083, 2019.

CAMPBELL, C., SVENSSON, C., NILSSON, E. **The same reverberation time in two identical rooms does not necessarily mean the same levels of speech clarity and sound levels when we look at impact of different ceiling and wall absorbers**. Inter.noise, Melbourne, Australia, 2014.

CANFENG, Z.; SHUJIE, Y.; DONG, L. Comprehensive control of the noise occupational hazard in cement plant. **Procedia Engineering**, International Symposium on Safety Science and Engineering in China, 2012., v. 43, p. 186–190, 2012.

CASAS, W. J. P.; CORDEIRO, E. P.; MELLO, T. C.; ZANNIN, P. H. T. Noise mapping as a Tool for controlling industrial noise pollution. **Journal of Scientific & Industrial Research**, v. 73, p. 262–266, 2014.

CHANG, T.-Y.; HWANG, B.-F.; LIU, C.-S.; et al. Occupational noise exposure and incident hypertension in men: a prospective cohort study. **American Journal of Epidemiology**, v. 177, n. 8, p. 818–825, 2013.

CHATILLON, J. Influence of source directivity on noise levels in industrial halls: Simulation and experiments. **Applied Acoustics**, v. 68, n. 6, p. 682–698, 2007.

CCOHS – Canadian Centre for Occupational Health and Safety. **Hearing protector**, 2021. Disponível em: <<https://www.ccohs.ca/>>. Acesso em: 13/3/2020.

CCOHS – Canadian Centre for Occupational Health and Safety. **Noise – basic information**, 2019. Disponível em: <<https://www.ccohs.ca/>>. Acesso em: 07/5/2020.

CCOHS – Canadian Centre for Occupational Health and Safety. **Noise – occupational exposure limits in Canada: OSH answers**, 2020. Disponível em: <<https://www.ccohs.ca/>>. Acesso em: 10/10/2020.

CREMONESI, J. F. **Método de análise do ruído em áreas industriais e controle por enclausuramento acústico das fontes**. 2013. Doutorado em Tecnologia da Arquitetura, São Paulo: Universidade de São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-07062013-135401/>>. Acesso em: 26/3/2020.

CHRISTENSSON, J., ECOPHON, S. G. **Good acoustics for teaching and learning**. Euronoise 2018 - Conference Proceedings. Chersonissos, Grécia, 2018.

DAVIES, R. A. Audiometry and other hearing tests. In: J. M. Furman; T. Lempert (Orgs.); **Handbook of Clinical Neurology**, Neuro-Otology. v. 137, p.157–176, 2016. Elsevier. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978044463437500011X>>. Acesso em: 1/5/2020.

DI, G.; LI, Z.; ZHANG, B.; SHI, Y. Adjustment on subjective annoyance of low frequency noise by adding additional sound. **Journal of Sound and Vibration**, v. 330, n. 23, p. 5707–5715, 2011.

DÍAZ, C.; LI, Z.; PEDRERO, A. The reverberation time of furnished rooms in dwellings. **Applied Acoustics**, v. 66, p. 945–956, 2005.

DIEGGLE, P.; CHETWYND, A. G. **Statistics and scientific method: an introduction for students and researchers**. New York: Oxford University Press, 2011.

DIN-EN-ISO 11654:2018-5. **Acoustics - Sound absorbers - Rating of sound absorption coefficients**. Berlin, 2018.

DUCOURNEAU, J.; PLANEAU, V. The average absorption coefficient for enclosed spaces with non uniformly distributed absorption. **Applied Acoustics**, v. 64, n. 9, p. 845–862, 2003.

DUNNE, R.; DESAI, D.; SADIKU, R. A review of the factors that influence sound absorption and the available empirical models for fibrous materials. **Acoustics Australia**, v. 45, p. 453–469, 2017.

DUPONT, J.-B.; GALLAND, M.-A. Active absorption to reduce the noise transmitted out of an enclosure. **Applied Acoustics**, v. 70, n. 1, p. 142–152, 2009.

EGGERMONT, J. J. Chapter 10 – Nonauditory effects of noise. **Noise and the brain**. p.266–300, San Diego: Academic Press, 2014.

EGGERMONT, J. J. Chapter 6 – Genetic and environmental factors in age-related hearing impairment. **The auditory brain and age-related hearing impairment**. p.125–147, 2019. San Diego: Academic Press, 2019

EGITO – Egyptian Ministry of Environment. **Egyptian environmental law n.º 4 of year 1994**. 1994. Disponível em: <<http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/egy4984E.pdf>>. Acesso em: 18/5/2020

ESPAÑA – Ministerio de la Presidencia. **Real Decreto 286/2006, de 10 de Marzo, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido**. 2006. Disponível em: <<https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2006-4414>>. Acesso em: 21/5/2020

FAROOQ, U. From sound to noise insulation: a journey. **International Journal of Engineering Research and General Science**, v. 3, n. 1, p. 408–413, 2015.

FERNÁNDEZ, M. D.; QUINTANA, S.; CHAVARRÍA, N.; BALLESTEROS, J. A. Noise exposure of workers of the construction sector. **Applied Acoustics**, v. 70, n. 5, p. 753–760, 2009.

FLETCHER, H. New methods and apparatus for testing hearing. **Ann Otol Rhinol Laryngol**, v. 35, p. 165–180, 1926.

FRANÇA – Ministère du travail. **Décret n.º 2008-244 du 7 ars 2008 relatif au code du travail (partie réglementaire)**. 2008. Disponível em: <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=CF1B22DBC476B71979304004FF9AD28A.tplgfr24s_2?cidTexte=JORFTEXT000018442415&dateTexte=20200521>. Acesso em: 21/5/2020.

FUCHS, J. C.; TUCKER, A. S. Chapter nine – Development and integration of the ear. **Current Topics in Developmental Biology**, Craniofacial Development. v. 115, p.213–232, Academic Press, 2015.

FUNDACENTRO. **Norma de higiene ocupacional nº 01 – Avaliação da exposição ocupacional ao ruído**. São Paulo, 2001.

GALLAGHER, H. L.; MCKINLEY, R. L.; THEIS, M. A.; SWAYNE, B. J.; THOMPSON, E. R. **Performance assessment of passive hearing protection devices**. Air force research lab wright-patterson afb oh human performance wing (711th) warfighter interface division/battlespace acoustics branch, 2014. Disponível em: <<https://apps.dtic.mil/docs/citations/ADA615393>>. Acesso em: 21/02/2020.

GOZALO, G. R.; GÓMEZ, V. E.; BARRIGÓN, J. M. M.; MONTES, D. G.; ATANASIO, P. M. Statistical attribution of errors in urban noise modeling. **Applied Acoustics**, v. 153, p. 20–29, 2019.

GRUBEŠA, S.; SUHANEK, M.; PETOŠIĆ, A.; DJUREK, I. Chapter 15 – Monitoring urban noise. In: F. Pacheco-Torgal; E. Rasmussen; C.-G. Granqvist; et al. (Orgs.); **Start-Up Creation (Second Edition)**, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. p.391–417, 2020. Woodhead Publishing. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128199466000151>>. Acesso em: 3/7/2020.

GUARNACCIA, C.; QUARTIERI, J.; RUGGIERO, A. Acoustical noise study of a factory: indoor and outdoor simulations integration procedure. **International Journal of Mechanics**, v. 8, p. 298–306, 2014.

GUEST, H.; MUNRO, K.; PRENDERGAST, G.; HOWE, S.; PLACK, C. Tinnitus with a normal audiogram: Relation to noise exposure but no evidence for cochlear synaptopathy. **Hearing Research**, v. 344, 2016.

GUIDA, H. L.; TAXINI, C. L.; GONÇALVES, C. G. DE O.; et al. Avaliação da proteção auditiva utilizada por policiais em estande de tiros. **Brazilian Journal of Otorhinolaryngology**, v. 80, n. 6, p. 515–521, 2014.

HASSANVAND, D.; ZARE, S.; GHOTBI-RAVANDI, M. R. **Assessment of personal and environmental sound pressure level and sound map projection using Surfer and Noise at work: The case of a tire manufacturing complex in Iran (2017)**. p.12, 2018. Theran: Iranian Society of Acoustics and Vibration.

HANSEN, H.; VERHEY, J. L.; WEBER, R. The Magnitude of Tonal Content. A Review. **Acta Acustica united with Acustica**, v. 97, n. 3, p. 355–363, 2011.

HODGSON, M. Ray-tracing evaluation of empirical models for predicting noise in industrial workshops. **Applied Acoustics**, v. 64, n. 11, p. 1033–1048, 2003.

HOSSEINABADI, M. B.; KHANJANI, N.; MÜNZEL, T.; DAIBER, A.; YAGHMORLOO, M. Chronic occupational noise exposure: effects on DNA damage, blood pressure, and serum biochemistry. **Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis**, v. 841, p. 17–22, 2019.

HUGUES, N.; BONNET, F.; VOIX, J. In-ear noise dosimetry: challenges and benefits. **Euronoise Papers – Euronoise 2018 Conference**, p.579–584, Creta, Grécia, 2018. Disponível em: <http://www.euronoise2018.eu/docs/papers/101_Euronoise2018.pdf>. Acesso em: 28/5/2020

HUNASHAL, R. B. Assessment of noise pollution indices in the city of Kolhapur, India. **International Conference on Emerging Economies – Prospects and Challenges (ICEE-2012)**, p. 448–457, 2012.

IAC ACOUSTIC. **Noise-Foil® Acoustic Metal Panels**, 2021. Disponível em: <<https://www.iacacoustics.com/noise-foil-absorption-panels.html>>. Acesso em: 2/03/2021.

IANNACE, G.; BERARDI, U.; ROSSI, F. D.; et al. Acoustic enhancement of a modern church. **Buildings**, v. 9, n. 4, p. 83, 2019.

IEC – International Electrotechnical Commission. **IEC 60942: Electroacoustics - Sound calibrators**. Genebra, 2003.

IEC – International Electrotechnical Commission. **IEC 61252: Electroacoustics - Specifications for personal sound exposure meters**. Genebra, 2002.

IEC – International Electrotechnical Commission. **IEC 61672-1: Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications**. Genebra, 2013.

ÍNDIA – Government of India – Ministry of Environmental, Forest and Climate Change. **The Noise Pollution (Regulation and Control) Rules, 2000 - Factories Act. 1948**. 2000. Disponível em: <<http://moef.gov.in/noise-pollution-norms/>>. Acesso em: 20/5/2020.

ISMAILA, S. O.; ODUSOTE, A. Noise exposure as a factor in the increase of blood pressure of workers in a sack manufacturing industry. **Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 3, n. 2, p. 116–121, 2014.

ISO – International Organization for Standardization. **ISO 9612: Acoustics – Determination of occupational noise exposure – Engineering method**. Genebra, 2009.

ISO – International organization for standardization. **ISO 1999: Acoustics -- Estimation of noise-induced hearing loss**. Genebra, 2013.

ISO – international organization for standardization. **ISO 1996-1: Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 1: Basic quantities and assessment procedures**. Genebra, 2016.

ISO – International Organization for Standardization. **ISO 532-1:2017 Acoustics – Methods for calculating loudness – Part 1: Zwicker method**. Genebra, 2017.

ITÁLIA – Presidenza della Repubblica. **Decreto Legislativo 10 aprile 2006, n.º 195**. 2006. Disponível em: <<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2006/05/30/006G0214/sg>>. Acesso em: 21/5/2020.

JAPÃO – Japan Industrial Safety & Health Association (JISHA). **Guidelines for the Prevention of Noise-Induced Impairments**. 1992. Disponível em: <<https://www.jniosh.johas.go.jp/icpro/jicosh-old/english/guideline/Guide-1.html>>. Acesso em: 21/5/2020

JEON, J. Y.; YOU, J.; JEONG, C. I.; KIM, S. Y.; JHO, M. J. Varying the spectral envelope of air-conditioning sounds to enhance indoor acoustic comfort. **Building and Environment**, v. 46, n. 3, p. 739–746, 2011.

JOHN, G. W.; GRYNEVYCH, A.; WELCH, D.; MCBRIDE, D.; THORNE, P. R. Noise exposure of workers and the use of hearing protection equipment in New Zealand. **Archives of Environmental & Occupational Health**, v. 69, n. 2, p. 69–80, 2014.

KANG, T.-S.; LEE, L.-K.; KANG, S.-C.; et al. Assessment of noise measurements made with a continuous monitoring in time. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 134, n. 1, p. 822–831, 2013.

KARANDAGH, S. T.; ALIMOHAMMADI, I.; MOATAR, F.; KANRASH, F. A. Association between noise annoyance and socioeconomic status of the employees in an electrical panel manufacturer. **Applied Acoustics**, v. 176, p. 107889, 2021.

KEEFE, A. R.; DEMERS, P. A.; NEIS, B.; et al. A scoping review to identify strategies that work to prevent four important occupational diseases. **American Journal of Industrial Medicine**, v. 63, n. 6, p. 490–516, 2020.

KERÄNEN, J.; HONGISTO, V. Comparison of simple room acoustic models used for industrial spaces. **Acta Acustica united with Acustica**, v. 96, n. 1, p. 179–194, 2010.

KOCINSKI, J., OZIMEK, E. Speech Recognition in an Enclosure with a Long Reverberation Time. **Archives of Acoustics**, v. 41, n. 2, p. 255–264, 2016.

STIL ACOUSTICS LIMITED©. Knowledge - sound absorption in rooms, reverberation time RT60. **Stil Acoustics**, 2020. Disponível em: < <http://stil-acoustics.co.uk/Acoustics.html>>. Acesso em: 12/4/2020

KUEHN, J. Chapter 32 - Noise Measurement. In: W. Boyes (Org.); **Instrumentation Reference Book (Fourth Edition)**. p.593–614, 2010. Boston: Butterworth-Heinemann. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750683081000322>>. Acesso em: 3/7/2020.

LAI, A.-J.; HUANG, C.-Y. Effect of occupational exposure to noise on the health of factory workers. **Procedia Manufacturing**, 25th International Conference on Production Research Manufacturing Innovation: Cyber Physical Manufacturing August. Chicago, Illinois., v. 39, p. 942–946, 2019.

LAMANCUSA, J. S. **Noise metrics and regulations – noise control course – lecture notes**. The Pennsylvania State University, 2000.

LAUER, A. M.; DENT, M. L.; SUN, W.; XU-FRIEDMAN, M. A. Effects of non-traumatic noise and conductive hearing loss on auditory system function. **Neuroscience, Hearing Loss, Tinnitus, Hyperacusis, Central Gain.**, v. 407, p. 182–191, 2019.

LI, F.; LIAO, S. S.; CAI, M. A new probability statistical model for traffic noise prediction on free flow roads and control flow roads. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 49, p. 313–322, 2016.

LONG, M. Chapter 2 – Fundamentals of Acoustics. **Architectural Acoustics (Second Edition)**. p.39–79, Boston: Academic Press, 2014a.

LONG, M. Chapter 3 – Human perception and reaction to sound. **Architectural Acoustics (Second Edition)**. p.81–127, Boston: Academic Press, 2014b.

LONG, M. Chapter 8 – Sound in Enclosed Spaces. **Architectural Acoustics (Second Edition)**. p.313–344, Boston: Academic Press. 2014c.

LONG, M. Chapter 21 – Design of Studios and Listening Rooms. **Architectural Acoustics (Second Edition)**. p.313–344, Boston: Academic Press. 2014d.

MAJIDI, F.; KHOSRAVI, Y.; ABEDI, KAMALAD-D. Determination of the equivalent continuous sound level (Leq) in industrial indoor space using GIS-based noise

mapping. **Journal of Human Environment and Health Promotion**, v. 5, n. 2, p. 50–55, 2019.

MANVELL, D.; VAN BANDA, E. H. Good practice in the use of noise mapping software. **Applied Acoustics**, Noise Mapping., v. 72, n. 8, p. 527–533, 2011.

MARTYR, A. J.; PLINT, M. A. Chapter 9 – Vibration and noise. **Engine Testing (Fourth Edition)**. p.203–225, 2012. Oxford: Butterworth-Heinemann. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080969497000091>>. Acesso em: 22/4/2020.

MCGRORY, M.; CIRAC, D. C.; GAUSSEN, O.; CABRERA, D. Sound absorption coefficient measurement: re-examining the relationship between impedance tube and reverberant room methods. **Australian Acoustical Society Conference 2012, Acoustics, Development, and the Environment**, p. 135–142, 2012.

MEIRA, T. C.; SANTANA, V. S.; FERRITE, S. Gender and other factors associated with the use of hearing protection devices at work. **Revista de Saúde Pública**, v. 49, n. 0, 2015.

MORATA, T. C.; MEINKE, D. Uncovering effective strategies for hearing loss prevention. **Acoustics Australia**, v. 44, n. 1, p. 67–75, 2016.

MORATA, T. C.; THEMANN, C. L.; BYRNE, D. C.; et al. Letter to the editor: scientific rigor required for a re-examination of exchange rate for occupational noise measurements. Re: Exchange rates for intermittent and fluctuating occupational noise: a systematic review of studies of human permanent threshold shift, *Ear Hear* 35, 86–96. **Ear and hearing**, v. 36, n. 4, p. 488–491, 2015.

MOHAMMADI, G. Hearing conservation programs in selected metal fabrication industries. **Applied Acoustics**, v. 69, n. 4, p. 287–292, 2008.

MORILLAS, J. M. B.; GAJARDO, C. P. Uncertainty evaluation of continuous noise sampling. **Applied Acoustics**, v. 75, p. 27–36, 2014.

MOROE, N. F.; KHOZA-SHANGASE, K. Recent advances in hearing conservation programmes: a systematic review. **South African Journal of Communication Disorders**, v. 67, n. 2, 2020.

MORZYŃSKI, L.; SZCZEPAŃSKI, G. Double panel structure for active control of noise transmission. **Archives of Acoustics**, v. 43, n. 4, p. 689–696, 2018.

MUSIEK, F. E.; BARAN, J. A. **The auditory system: anatomy, physiology, and clinical correlates; Second Edition**. Plural Publishing, 2018.

NEITZEL, R. L.; ANDERSSON, M.; ANDERSSON, E. Comparison of multiple measures of noise exposure in paper mills. **Annals of Occupational Hygiene**, v. 60, n. 5, p. 581–596, 2016.

NEUBAUER, R.; KOSTEK, B. Prediction of the reverberation time in rectangular rooms with non-uniformly distributed sound absorption. **Archives of Acoustics**, v.

26, n. 3, 2001. Disponível em:

<<https://acoustics.ippt.pan.pl/index.php/aa/article/view/398>>. Acesso em: 14/9/2020.

NIGÉRIA – Federal Environmental Protection Agency (FEPA). **National guidelines and standard for industrial effluents, gaseous emission and hazardous waste in Nigeria**. 1991.

NOVA ZELÂNDIA – New Zealand Government – New Zealand Parliamentary Council Office. **Health and Safety in Employment Regulations 1995 (SR 1995/167)**. 2016.

ODEON®. Odeon Romm Acoustics Software – Version 11. 2011 Disponível em: <<https://odeon.dk/>>.

OIT – Organização Internacional do Trabalho. **Encyclopaedia of occupational health & safety - part VI. General hazards (noise)**. 4º ed. 2011a.

OIT – Organização Internacional do Trabalho. **Encyclopaedia of occupational health & safety - part IV. Tools and approaches**. 4º ed. 2011b.

OMS - ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Hearing loss**. Disponível em: <https://www.who.int/health-topics/hearing-loss#tab=tab_3>. Acesso em: 29/06/2020.

OSHA – Occupational Safety and Health Administration. **OSHA 29 Code of Federal Regulations (CRF) nº 1910.95: occupational safety and health standards – occupational health and environmental control**. 2008. Disponível em: <<https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.95>>. Acesso em: 16/4/2020

OSHA – Occupational Safety and Health Administration. **OSHA kicks off “hear and now – noise safety challenge”**. 2016. Disponível em: <<https://www.osha.gov/news/newsreleases/trade/08022016>>. Acesso em: 25/5/2020.

OTERO, L. A.; SEOANE, M.; CESPÓN, J. L.; VILAN, J. Prediction of noise levels in closed industrial plants. In: International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Internoise), 42., **Conference Proceedings...**, 2013. Innsbruck, Austria. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/257207338_Prediction_of_noise_levels_in_closed_industrial_plants>. Acesso em: 18/6/2020.

OVSIIANNIKOV, M.; OVSIIANNIKOV, S. Combined visualization for noise mapping of industrial facilities based on ray-tracing and thin plate splines. In: The 6th International Conference on Theoretical and Applied Physics, 6., 2017, **AIP Conference Proceedings...**, 2017. Makassar, Indonesia. Disponível em: <<http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4973067>>. Acesso em: 13/6/2020.

PAPAZOGLU, I. A.; ANEZIRIS, O. N.; BELLAMY, L. J.; ALE, B. J. M.; OH, J. Quantitative occupational risk model: Single hazard. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 160, p. 162–173, 2017.

- PAPINI, G. S.; PINTO, R. L. U. F.; MEDEIROS, E. B.; COELHO, F. B. G. Hybrid approach to noise control of industrial exhaust systems. **Applied Acoustics**, v. 125, p. 102–112, 2017.
- PARK, S.; JOHNSON, M. D.; HONG, O. Analysis of Occupational Safety and Health Administration (OSHA) noise standard violations over 50 years: 1972 to 2019. **American Journal of Industrial Medicine**, v.63, p. 616–623, 2020.
- PASSERO, C. R. M.; ZANNIN, P. H. T. Acoustic evaluation and adjustment of an open-plan office through architectural design and noise control. **Applied Ergonomics**, v. 43, n. 6, p. 1066–1071, 2012.
- PETERSON, A. P. G. **Handbook of Noise Measurement**. GenRad, Massachusetts, 9 ed, 1980. Disponível em: <https://www.ietlabs.com/pdf/Manuals/Handbook_Noise_Measurement.pdf>. Acesso em: 13/4/2020.
- POPESCU, D. L. Managing the risks of noise exposure at work. Proceedings of the 22nd International Congress on Sound and Vibration: Major Challenges in Acoustics, Noise and Vibration Research. **Anais...**, 2015. Florence, Italy. Disponível em: <http://apps-webofknowledge.ez22.periodicos.capes.gov.br/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=50&SID=8CO7Aq1idBLkHCl1mul&page=1&doc=36>. Acesso em: 26/5/2020.
- PORTUGAL – Ministério do Trabalho e da Solidariedade Social. **Decreto-Lei n.º 182/2006**. 2006. Disponível em: <<https://dre.pt/pesquisa/-/search/539986/details/maximized>>. Acesso em: 21/5/2020.
- RABBANI, E. R. K.; BARKOKEBAS, B. J.; LAGO, E. M. G.; et al. Occupational noise evaluation and proposal for the determination of auditory protection: study of pumping stations in Brazil. 7th International Symposium on Occupational Safety and Hygiene (SHO). **Anais...**, p.535–539, 2011. Guimarães, Portugal.
- RAJAGOPALAN, P.; LEUNG, T. C. Y. On the acoustic performance of a precast panel system made from environmentally sustainable concrete: application in sports hall buildings. **Architectural Science Review**, v. 56, n. 2, p. 118–130, 2013.
- RAJALA, V.; HONGISTO, V. Annoyance penalty of impulsive noise – the effect of impulse onset. **Building and Environment**, v. 168, p. 106539, 2020.
- RAMUTSINDELA, M.; MICKLER, D. **Africa and the Sustainable Development Goals**. Springer, 2019.
- RAO, T. R.; KIRTHANA, S. Developing a GUI for optimization of acoustic enclosure of a compressor chamber. In: D. K. Mandal; C. S. Syan (Orgs.); **CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future**, Lecture Notes in Mechanical Engineering. p.367–377, 2016. Springer, New Delhi: India. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-81-322-2740-3_35>. Acesso em: 9/6/2020.

REINO UNIDO – Statutory Instruments. **Health and safety - the control of noise at work regulation n.º 1643**. 2005. Disponível em: <<http://www.legislation.gov.uk/ukxi/2005/1643/2006-04-06>>. Acesso em: 22/5/2020.

REPÚBLICA DA ÁFRICA DO SUL. **Nº. 85 of 1993: Occupational health and safety act – occupational health and safety amendment act, n.º. 181 of 1993**. Disponível em: <<https://vula.uct.ac.za/access/content/group/9c29ba04-b1ee-49b9-8c85-9a468b556ce2/DOH/Variety/Legislation/OHSA-GRD/Noise.htm>>. Acesso em: 19/5/2020.

RERKJIRATTIKAL, P.; OLAPIRIYAKUL, S. Overtime assignment and job satisfaction in noise-safe job rotation scheduling. In: H. Seki; C. H. Nguyen; V.-N. Huynh; M. Inuiguchi (Orgs.); *Integrated Uncertainty in Knowledge Modelling and Decision Making. Anais...*, Lecture Notes in Computer Science. p.26–37, 2019. Cham: Springer International Publishing.

ROCHA, C. H.; LONGO, I. A.; MOREIRA, R. R.; SAMELLI, A. G. Avaliação do protetor auditivo em situação real de trabalho pelo método field microphone-in-real-ear. **CoDAS**, v. 28, n. 2, p. 99–105, 2016.

RUBIO-ROMERO, J. C.; CARRILLO-CASTRILLO, J. A.; SORIANO-SERRANO, M.; GALINDO-REYES, F.; DE LA VARGA-SALTO, J. A longitudinal study of noise exposure and its effects on the hearing of olive oil mill workers. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 67, p. 60–66, 2018.

RYU, J.; SONG, H.; KIM, Y. Effect of the suspended ceiling with low-frequency resonant panel absorber on heavyweight floor impact sound in the building. **Building and Environment**, v. 139, p. 1–7, 2018.

SABINE, W. C. *Collected papers on acoustics*, Cambridge (MA), **Harvard University Press**, 1922.

SAYAPATHI, B. S.; SU, A. T.; KOH, D. The effectiveness of applying different permissible exposure limits in preserving the hearing threshold level: a systematic review. **Journal of Occupational Health**, v. 56, n. 1, p. 1–11, 2014.

SAYLER, S. K.; ROBERTS, B. J.; MANNING, M. A.; SUN, K.; NEITZEL, R. L. Patterns and trends in OSHA occupational noise exposure measurements from 1979 to 2013. **Occupational and Environmental Medicine**, v. 76, n. 2, p. 118–124, 2019.

SEDDEQ, H. S. Factors influencing acoustic performance of sound absorptive materials. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 3, p. 4610–4617, 2009.

SHA, S.-H.; GROSH, K.; ALTSCHULER, R. A. Protection and repair of hearing. In: R. Lanza; R. Langer; J. P. Vacanti; A. Atala (Orgs.); **Principles of Tissue Engineering (Fifth Edition)**. p.1093–1112, 2020. Academic Press. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128184226000617>>. Acesso em: 1/5/2020.

SHARMA, G. S.; SARKAR, A. Directivity based control of acoustic radiation. **Applied Acoustics**, v. 154, p. 226–235, 2019.

SHORE, S. E.; WU, C. Mechanisms of noise-induced tinnitus: insights from cellular studies. **Neuron**, v. 103, n. 1, p. 8–20, 2019.

SLIWINSKA-KOWALSKA, M.; PAWELCZYK, M. Contribution of genetic factors to noise-induced hearing loss: a human studies review. **Mutation Research/Reviews in Mutation Research**, v. 752, n. 1, p. 61–65, 2013.

SOUNDPLAN®. **SoundPLAN industry noise**. 2015. Disponível em: <http://www.soundplan.com/industry_noise.htm>. Acesso em: 22/6/2020.

SOUND SEAL. **Barrier Backed Composite BBC-13®**, 2021. Disponível em: <<https://www.soundseal.com/noise-barrier-composites.html>>. Acesso em: 2/03/2021.

STUMPF, A. M.; ERLANDSON, G.; RUTHS, J.; et al. Noise exposures of sugar cane mill workers in Guatemala. **International Journal of Audiology**, v. 59, n. sup1, p. S48–S53, 2020.

SUÉCIA – Agência do Ambiente de Trabalho. **Arbetsmiljöverkets Författningssamling - Buller (AFS 2005: 16)**. 2005. Disponível em: <<https://www.av.se/globalassets/filer/publikationer/foreskrifter/buller-foreskrifter-afs2005-16.pdf>>. Acesso em: 21/5/2020.

SVIECH, P. S.; GONÇALVES, C. G. DE O.; MORATA, T. C.; MARQUES, J. M. Avaliação do conforto do protetor auditivo individual numa intervenção para prevenção de perdas auditivas. **Revista CEFAC**, v. 15, n. 5, p. 1325–1337, 2013.

TAO, L.; ZENG, L.; WU, K.; et al. Comparison of four task-based measurement indices with full-shift dosimetry in a complicated noise environment. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 53, p. 149–156, 2016.

TAPPURA, S.; SIEVÄNEN, M.; HEIKKILÄ, J.; JUSSILA, A.; NENONEN, N. A management accounting perspective on safety. **Safety Science**, v. 71, p. 151–159, 2015.

TUFTS, J. B.; HAMILTON, M. A.; UCCI, A. J.; RUBAS, J. Evaluation by industrial workers of passive and level-dependent hearing protection devices. **Noise and Health**, v. 13, n. 50, p. 26, 2011.

UNE-EN – Una Norma Española - European Norm. **UNE EN 458:2016 Hearing protectors – recommendations for selection, use, care and maintenance – guidance document**. 2016.

UNIÃO EUROPEIA – Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia. **Diretiva 2003/10/CE do Parlamento e Conselho Europeu**. 2003. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:042:0038:0044:PT:PDF>>. Acesso em: 21/5/2020.

VOHR, B. Ear and Hearing Disorders. In: C. A. Gleason; S. E. Juul (Orgs.); **Avery's diseases of the newborn (Tenth Edition)**. p.1558-1566, 2018. Philadelphia. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323401395001091>>. Acesso em: 1/5/2020.

WANG, D.; ZHOU, M.; LI, W.; et al. Occupational noise exposure and hypertension: the dongfeng-tongji cohort study. **Journal of the American Society of Hypertension**, v. 12, n. 2, p. 71–79.e5, 2018.

WITTE, J., R. Chapter 6 - Industrial and harbour noise. In: Licitra, G. (Org.); **Noise mapping in the EU**. p.109–128, 2013. CRC Press.

WHO – World Health Organization. **Environmental noise guidelines for the European region**. Public Health Panorama, 2018. Disponível em:<<http://www.euro.who.int/en/publications/abstracts/environmental-noise-guidelines-for-the-european-region-2018>>. Acesso em: 07/5/2020.

XIONG, B.; LIU, Z.; LIU, Q.; et al. Missed hearing loss in tinnitus patients with normal audiograms. **Hearing Research**, v. 384, p. 107826, 2019.

YAGHOUBI, K.; ALIMOHAMMADI, I.; ABOLGHASEMI, J.; et al. The relationship between noise annoyance and salivary cortisol. **Applied Acoustics**, v. 160, p. 107131, 2020.

YOON, J.-H.; HONG, J.-S.; ROH, J.; KIM, C.-N.; WON, J.-U. Dose - response relationship between noise exposure and the risk of occupational injury. **Noise & Health**, v. 17, n. 74, p. 43–47, 2015.

ZANNIN, P. H.; GERGES, S. N. Y. Effects of cup, cushion, headband force, and foam lining on the attenuation of an earmuff. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 36, n. 2, p. 165–170, 2006.

ZANNIN, P. H. T. Occupational noise in urban buses. **International Journal of Industrial Ergonomics**, Spanning the Gap from Traditional Ergonomics to Health and Safety Issues., v. 38, n. 2, p. 232–237, 2008.

ZARE, S.; BANESHI, M. R.; HEMMATJO, R.; et al. The effect of occupational noise exposure on serum cortisol concentration of night-shift industrial workers: a field study. **Safety and Health at Work**, v. 10, n. 1, p. 109–113, 2019.

ZHANG, X.; QU, Z.; WANG, H. Engineering acoustic metamaterials for sound absorption: from uniform to gradient structures. **iScience**, v. 23, n. 5, p. 101110, 2020.

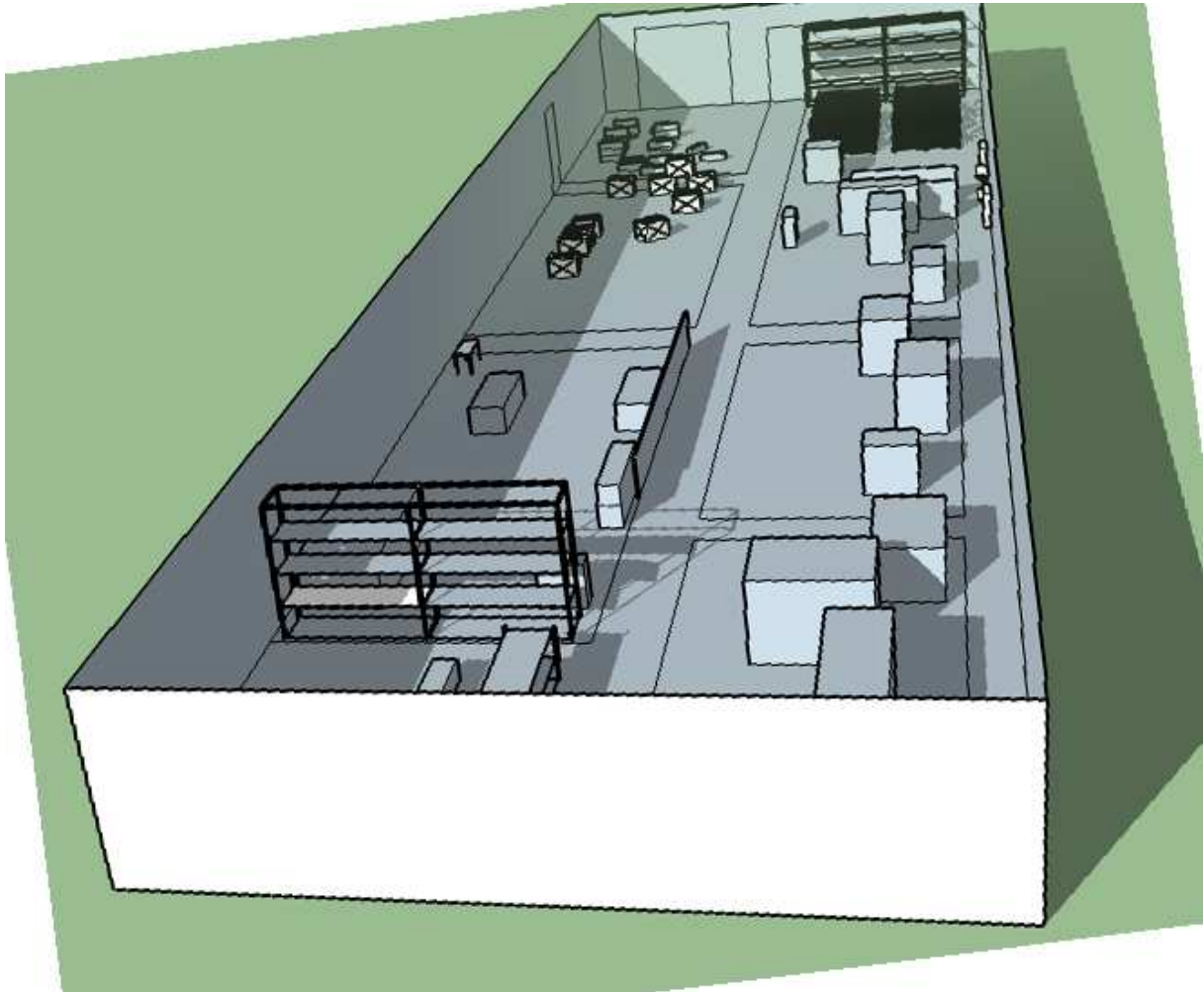
ZAW, A. K.; MYAT, A. M.; THANDAR, M.; et al. Assessment of noise exposure and hearing loss among workers in textile mill (Thamine), Myanmar: A Cross-sectional Study. **Safety and Health at Work**, 2020.

APÊNDICE A

Estão dispostos nesse Apêndice os modelos geométricos da indústria. Essa etapa é realizada por meio do *software Google SketchUp Make versão 2017*[®]. Uma vez os modelos geométricos construídos, estes constituem a geometria necessária para que com o *software Odeon*[®], possa ser atribuída as características intrínsecas dos materiais construtivos, para então, possibilitar o cálculo do mapeamento acústico propagado em seu interior.

- Fábrica 1:

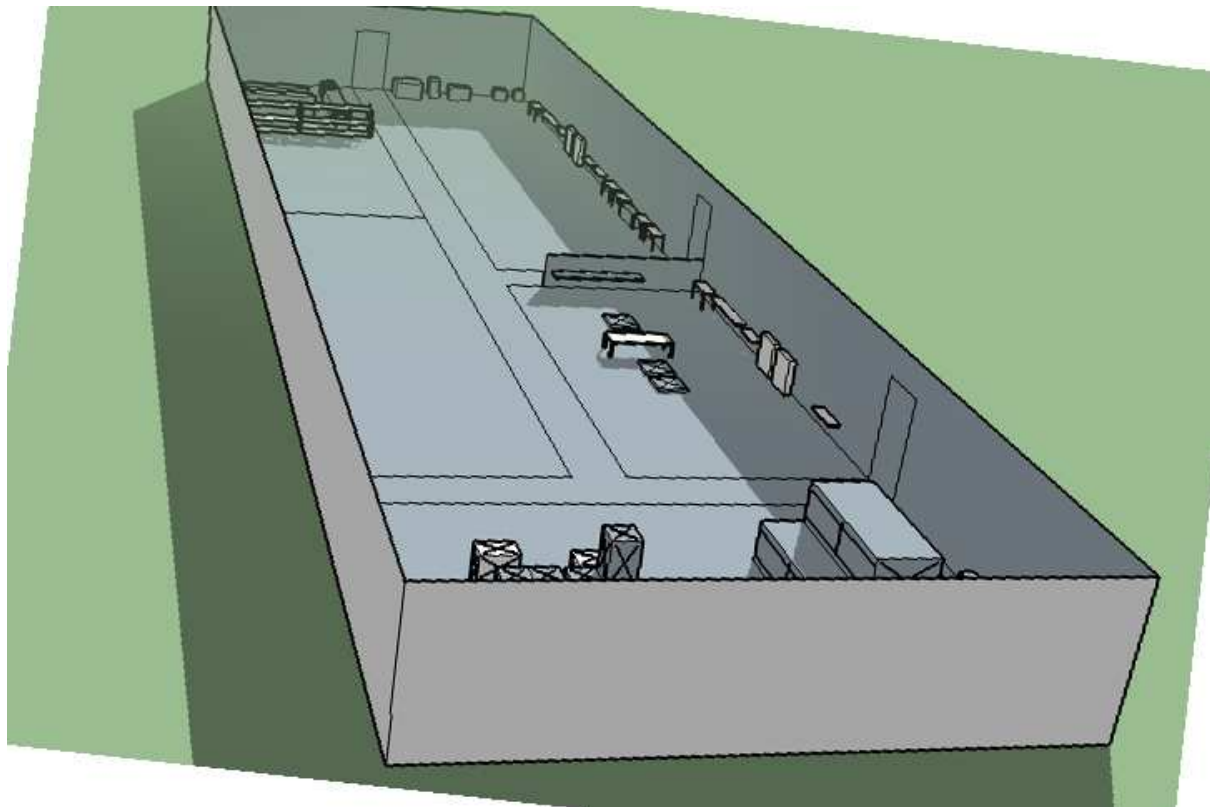
Figura A-1 – Modelo geométrico da fábrica 1 representando sua planta em 3D.



Nota: a) pode ser melhor interpretada ao visualizar a planta da Figura 10 (página 49) da esquerda para a direita. b) o modelo está representado sem seu teto afim de permitir visualização do *layout* interno.

- Fábrica 2:

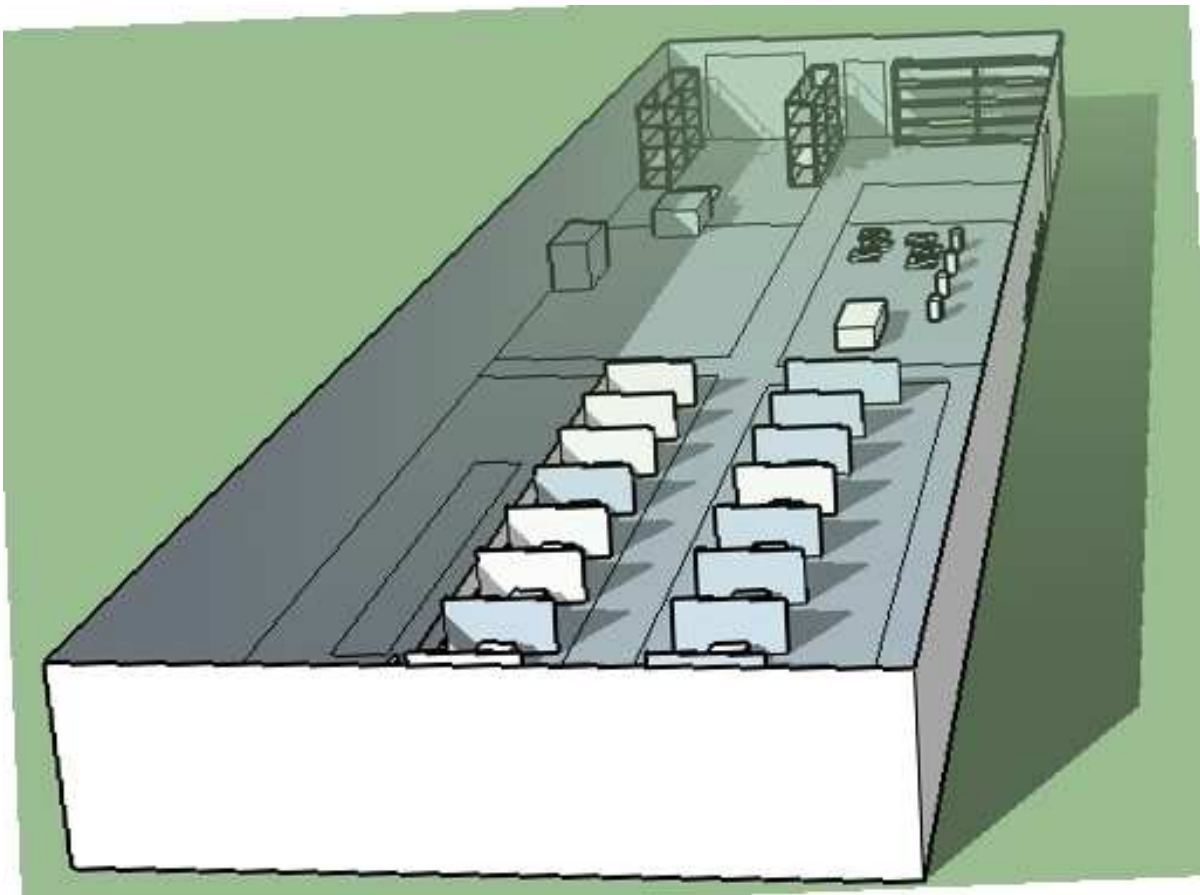
Figura A-2 – Modelo geométrico da fábrica 2 representando sua planta em 3D.



Nota: a) pode ser melhor interpretada ao visualizar a planta da Figura 10 (página 49) da direita para a esquerda. b) o modelo está representado sem seu teto afim de permitir visualização do *layout* interno.

- Fábrica 3:

Figura A-3 – Modelo geométrico da fábrica 3 representando sua planta em 3D.



Nota: a) pode ser melhor interpretada ao visualizar a planta da Figura 10 (página 49) da esquerda para a direita. b) o modelo está representado sem seu teto afim de permitir visualização do *layout* interno.

APÊNDICE B

Informações complementares para a Tabela 1, com dados das demais variáveis como: D% – dose medida de exposição individual ao ruído; L₁₀ – nível sonoro excedido em 10% do tempo de medição; L₅₀ – nível sonoro excedido em 50% do tempo de medição L₉₀ – nível sonoro excedido em 90% do tempo de medição.

Tabela B-1 – Resultados da exposição de trabalhadores ao ruído industrial da fábrica 1

Amostra	L _{p,A,eq,T,n} [dB(A)]	D% [%]	D ₈ [%]	L _{p,Cpico} [dB(C)]	Nº Picos	L ₁₀ [dB(A)]	L ₅₀ [dB(A)]	L ₉₀ [dB(A)]	L _{p,A,eq,T8} [dB(A)]	
1	84,1	22,1	88,3	122,8	2	87,9	78,2	71,9		
1P1	2	82,2	17,0	67,8	122,8	1	84,2	74,9	72,0	83,55
	3	84,1	22,1	88,3	122,6	4	84,5	76,1	72,9	
1P2	1	80,4	13,2	53,0	117,8	0	83,7	73,9	70,7	
	2	79,1	11,0	43,9	122,9	3	81,1	74,3	69,1	79,55
	3	79,0	10,9	43,8	118,2	0	80,6	75,1	73,3	
1P3	1	76,5	5,6	30,8	122,0	1	79,3	69,4	63,8	
	2	80,0	12,5	50,0	118,1	0	81,8	76,7	73,5	
	3	86,3	13,7	119,7	123,0	7	89,6	80,4	75,0	81,78
	4	78,1	6,0	38,4	112,8	0	80,5	75,1	72,7	
	5	80,7	14,2	55,1	121,8	1	82,9	78,0	74,0	
1P4	1	78,7	5,2	41,7	122,6	1	81,3	74,5	68,7	
	2	77,8	9,2	36,9	121,4	3	81,3	74,4	66,6	78,22
	3	78,1	9,6	38,4	122,5	1	79,8	74,8	71,8	
1P5	1	78,1	4,3	38,4	127,8	2	80,9	73,4	68,3	
	2	78,9	5,6	42,9	123,1	4	81,0	74,7	71,4	
	3	83	18,9	75,8	123,1	11	85,4	79,0	71,7	81,70
	4	81,1	14,6	58,2	122,9	5	82,6	73,5	69,6	
	5	84,3	22,7	90,7	122,9	15	83,6	77,6	72,8	
1P6	1	81,8	16,0	64,2	124,1	12	84,3	77,9	75	
	2	81,5	15,4	61,6	123,3	1	84,2	76,8	72,4	81,92
	3	82,4	17,4	69,7	123,3	2	82,5	76,5	73,3	
1P7	1	83,6	10,3	82,4	123,1	12	85,6	77,8	72,6	
	2	82,0	16,5	66,0	122,6	16	83,6	76,1	72,7	83,49
	3	84,5	23,3	93,3	122,4	14	86,3	76,9	73,2	

APÊNDICE C

Informações complementares para a Tabela 2, com dados das demais variáveis como: D% – dose de exposição individual ao ruído; L₁₀ – nível sonoro excedido em 10% do tempo de medição; L₅₀ – nível sonoro excedido em 50% do tempo de medição L₉₀ – nível sonoro excedido em 90% do tempo de medição.

Tabela C-1 – Resultados da exposição de trabalhadores ao ruído industrial da fábrica 2

Amostra	L _{p,A,eq,T,n} [dB(A)]	D% [%]	D ₈ [%]	L _{p,Cpico} [dB(C)]	Nº Picos	L ₁₀ [dB(A)]	L ₅₀ [dB(A)]	L ₉₀ [dB(A)]	L _{p,A,eq,T8} [dB(A)]	
2P1	1	80,1	12,7	50,70	122,9	2	83	73,5	64,8	
	2	81,6	15,6	62,42	122,7	5	84,7	74,9	68,1	80,37
	3	79,0	10,9	43,69	123,2	1	82,0	73,0	67,1	
2P2	1	83,5	20,3	81,2	122,5	2	82,6	71,9	67,1	
	2	81,3	15,0	59,9	122,5	5	81,4	70,5	65,8	82,06
	3	80,9	14,2	56,6	111,1	0	78,2	71,8	67,0	
2P3	1	80,5	13,4	53,7	122,6	1	83,9	74,6	67,2	
	2	81,8	16,0	64,2	122,8	3	81,7	71,7	67,9	81,42
	3	81,8	16,1	64,4	124,8	2	86,0	75,8	68,5	
2P4	1	84,4	23,0	92,0	123,1	33	85,1	73,2	65,8	
	2	82,9	18,7	74,7	123,1	10	83,9	73,1	65,5	
	3	89,0	43,5	174,1	125,2	36	91,2	77,4	68,8	87,12
	4	86,0	28,7	114,9	123,2	44	87,5	75,7	69,1	
	5	89,6	47,3	189,2	123,3	52	93,3	77,8	67,7	

APÊNDICE D

Informações complementares para a Tabela 3, com dados das demais variáveis como: D% – dose de exposição individual ao ruído; L₁₀ – nível sonoro excedido em 10% do tempo de medição; L₅₀ – nível sonoro excedido em 50% do tempo de medição L₉₀ – nível sonoro excedido em 90% do tempo de medição.

Tabela D-1 – Resultados da exposição de trabalhadores ao ruído industrial da fábrica 3

Amostra	L _{p,A,eq,T,n} [dB(A)]	D% [%]	D ₈ [%]	L _{p,Cpico} [dB(C)]	Nº Picos	L ₁₀ [dB(A)]	L ₅₀ [dB(A)]	L ₉₀ [dB(A)]	L _{p,A,eq,T8} [dB(A)]	
3P1	1	87,4	34,9	139,5	122,8	31	86,5	77,3	73	
	2	85,9	28,3	113,3	122,6	33	86,8	76,7	72,6	86,55
	3	86,2	29,5	118,1	122,8	30	87,5	77,7	72,9	
3P2	1	83,7	20,8	83,1	122,6	23	87,2	78,0	73,2	
	2	83,8	21,1	84,5	122,7	12	83,4	75,4	69,9	83,32
	3	82,4	17,4	69,6	122,9	8	81,9	75,1	71,2	
3P3	1	85,7	27,4	110,0	123,0	35	89,7	80,0	73,6	
	2	86,0	28,7	114,7	123,1	31	88,3	83,3	73,4	85,16
	3	83,4	20,0	80,0	123,0	27	86,4	75,3	69,0	
3P4	1	84,3	22,7	90,7	122,9	7	88,0	77,9	71,5	
	2	84,4	23,0	92,0	123,2	13	89,6	75,1	69,1	84,58
	3	85,0	25,0	100,0	123,5	5	89,6	77,7	70,3	
3P5	1	94,5	93,3	373,2	123,0	42	93,2	75,2	68,3	
	2	93,9	85,9	343,4	122,9	39	96,5	76,4	71,4	
	3	82,9	18,7	74,7	123,0	9	84,5	73,9	68,7	91,13
	4	88,0	37,9	151,6	123,3	28	91,9	77,3	69,3	
	5	85,9	28,3	113,3	123,2	4	87,8	76,5	66,9	
3P6	1	81,2	14,8	59,0	122,7	6	82,8	75,3	71,6	
	2	86,0	28,7	114,9	123,1	12	86	77,0	72,6	
	3	82,3	17,2	68,8	122,9	3	85,5	77,4	71,9	85,43
	4	88,5	40,6	162,4	123,1	16	86,8	77,9	72,0	
	5	85,3	26,0	104,2	123,2	12	87,8	76,8	71,7	
3P7	1	86,4	30,3	121,4	122,6	21	88,7	76,2	71,2	
	2	84,8	24,3	97,3	122,5	7	88,5	76,5	60,2	85,49
	3	85,1	25,3	101,4	122,6	12	86,2	75,4	69,9	

APÊNDICE E

Os dados presentes nesse apêndice são os usados para obtenção no nível total de atenuação de cada EPI marcados em cinza na Tabela E-1, o procedimento utilizado é descrito pela norma ABNT NBR 16077:2021 – Equipamento de proteção individual – Protetores auditivos – Método de cálculo do nível de pressão sonora na orelha protegida. Trata-se da consideração da atenuação em cada frequência de 125 a 8000 Hz fornecida pelo fabricante, para resultar no valor final de “nível total”.

Tabela E-1 – Dados que explicam os resultados presentes na Tabela 11

Nível de pressão sonora [dB(A)]	Frequências em bandas de oitava [dB]							Nível Total
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
2P4 sem EPI	63,1	71	75,8	82,8	80,8	79,1	78,5	87,12
3P5 sem EPI	60,5	70,6	78,4	87,2	84,4	85,5	77,8	91,13
Atenuação pelo EPI plug	20,8	23,2	25,4	22,5	27,1	27,8	38,1	-
DP plug ¹	5,0	4,8	5,0	4,0	4,9	7,2	6,7	-
Atenuação pelo EPI concha	11,0	15,4	25,1	30,0	35,9	34,4	35,5	-
DP concha ²	2,1	3,9	3,8	4,4	2,0	3,1	3,1	-
2P4 com protetor plug	52,3	57,4	60,4	68,3	63,5	65,7	53,8	71,69
2P4 com protetor concha	56,3	83,4	58,3	61,6	48,9	50,9	49,2	67,01
3P5 com protetor plug	49,7	57	63	72,7	67,1	72,1	53,1	76,31
3P5 com protetor concha ²	53,7	63	60,9	66	52,5	57,3	48,5	69,15

¹ Desvio padrão na atenuação do protetor tipo plug [dB]; ² Desvio padrão na atenuação do protetor tipo concha [dB].

Exemplificando o procedimento de cálculo, o nível de pressão sonora ao qual o grupo 2P4 está exposto com o protetor plug é obtido da seguinte maneira: Linha 1 – [Linha 3 – (2·Linha 4) = Linha 7. Esse procedimento se repetiu para as outras linhas. O nível total com o uso dos protetores auditivos, como o valor de 71,69 dB(A) com o tipo plug, é obtido pela soma logarítmica nas frequências de 125 a 8000 Hz, devendo-se usar a seguinte expressão:

$$\text{Nível total} = 10 \log \sum_{i=1}^N 10^{n_i \cdot 0,1}$$

Onde:

n – nível de pressão sonora equivalente com os protetores auditivos em cada frequência [dB(A)].