RUÍDO INDUSTRIAL – MAPEAMENTO ACÚSTICO COMO MEDIDA DE CONTROLE E PREDIÇÃO DE NÍVEIS SONOROS OCUPACIONAIS

Andrei Rei Rodrigues Silveira (1); Paulo Henrique Trombetta Zannin (2) Karina Mary de Paiva (3)
(1) Mestre em Engenharia Ambiental, andrei.rei@hotmail.com, Universidade Federal do Paraná – Centro Politécnico, Setor de Tecnologia, Departamento de Engenharia Ambiental, (53) 9 91302970
(2) Prof. Titular Dr. – Ing. Paulo Henrique Trombetta Zannin (UFPR), paulo.zannin@gmail.com, Centro Politécnico da UFPR – Departamento de Engenharia Mecânica, Bloco IV, Sala PG-05, (41) 9 96310635
(3) Prof. Drª. – Karina Mary de Paiva (UFSC), kmvianna@gmail.com, Centro de Ciências da Saúde - CCS. Campus Trindade – Curso de Graduação em Fonoaudiologia, Brasil, (48) 9 96116762

RESUMO
A Perda Auditiva Ocupacional (PAO) continua afetando negativamente a vida de muitos trabalhadores, já que cerca de 16% da perda auditiva relatada globalmente na vida adulta é circunstância da exposição ocupacional. Diante de tal risco, métodos de avaliação e controle do ruído nos espaços de trabalho necessitam ser considerados. Os mapas de ruído são ferramentas que vêm sendo cada vez mais empregadas em estudos acústicos, pois superam as tradicionais medições estáticas baseadas em valores médios, ao possibilitar um conjunto de dados interligados, de ampla visualização e melhor aplicabilidade para caracterização sonora de espaços maiores. Assim, mapas de ruído sobre tráfego rodoviário, ferroviário e aéreo, e outros ruídos ambientais, são cada vez mais vistos na literatura científica. Contudo, seu potencial se mantém pouco explorado quando o assunto é ruído de espaços internos, especialmente sobre o ruído ocupacional, área na qual o mapeamento de ruído poderia trazer uma série de vantagens. É justamente essa lacuna que a presente pesquisa buscou explorar, ao objetivar a caracterização completa do ruído interno em uma sede industrial. Como método para alcance desse objetivo foi empregada metodologia em três fases: o conhecimento da indústria, suas formas de produção, atividades laborais e ambiente físico construído; a elaboração do seu modelo geométrico e; utilização do software Odeon ® versão 11 Industrial para o cálculo dos mapas de ruído ao longo da fábrica com cenários diagnóstico e preditivo. Os resultados evidenciados pelos mapas possibilitaram a quantificação dos níveis sonoros e tempo de reverberação. Discernimento das áreas de maior risco foi alcançado, abordagem que se mostrou fundamental para o planejamento do cenário de controle visando proporcionar saúde, segurança e melhora da qualidade de vida no trabalho.

Palavras-chave: ruído industrial, mapeamento de ruído, segurança do trabalho.

ABSTRACT
Occupational Hearing Loss (OHL) continues to negatively affect the lives of many workers, as around 16% of the hearing loss reported globally in adulthood is a circumstance of occupational exposure. In eminence of such a risk, methods of assessing and controlling noise in the workplace need to be considered. Noise maps are tools that have been increasingly used in acoustic studies, because they surpass the traditional static measurements based on average values, by allowing a set of interconnected data, with wide visualization and better applicability for the sound characterization of larger spaces. Thus, noise maps about road, rail and air traffic, and other environmental noises, are increasingly seen in the scientific literature. However, its potential remains little explored in terms of noise from indoor spaces, especially regarding occupational noise, a theme to which noise mapping could bring a series of advantages. It is precisely this gap that the present research sought to explore, aiming at the complete characterization of indoor noise in an industrial headquarters. As a method to achieve this objective, a methodology was used in three stages: knowledge of the industry, its forms of production, work activities and the built physical environment; the elaboration of its geometric model and; use of Odeon ® version 11 Industrial software for the calculation of noise maps throughout the factory in diagnostic and predictive scenarios. The results evidenced by noise mapping made it possible to quantify the sound levels and reverberation time. Discernment of the areas of greatest risk was achieved, an approach that proved to be fundamental for planning the control scenario in order to provide health, safety and improve the quality of life at work.

Keywords: industrial noise, noise mapping, work safety.

1. INTRODUÇÃO

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, o que pode levar, porém, à redução da saúde dos indivíduos expostos, resultando em adversos efeitos auditivos e não auditivos (SAYLER et al., 2019; THEMANN; MASTERSON, 2019).

Em 2020 estima-se que cerca de 466 milhões de pessoas conviveram com problemas relacionados a perda auditiva, isto é 5,9% da população mundial que requer mais de US$ 750 bilhões anuais de custos endereçados ao tratamento de perda auditiva globalmente nos sistemas de saúde (OMS, 2020). Importante parcela do desenvolver da perda auditiva está atrelado a fatores ligados às condições ambientais e, portanto, evitáveis. A exposição ao ruído ocupacional, que pode gerar a Perda Auditiva Ocupacional (PAO), está entre as causas evitáveis, e mesmo assim ainda é um risco frequente, já que cerca de 16% da perda auditiva na vida adulta está ligada à exposição ocupacional (OMS, 2020). Cenário esse, que pode ser minimizado pelas diferentes formas de controle para reduzir os níveis de ruído no local de trabalho.

Além dos efeitos auditivos da exposição ao ruído ocupacional, efeitos não auditivos também resguardam perigos. Doenças cardíacas isquêmicas e hipertensão, distúrbios do sono, comprometimento cognitivo, esgotamento, risco à saúde mental por estresse, sensação de incômodo, raiva e outros distúrbios emocionais estão entre as doenças crônicas mais relatadas em decorrência da exposição ao ruído (OMS, 2018). A maior propensão de acidentes no trabalho conforme seja maior o nível sonoro em que trabalhadores são sujeitos durantes suas jornadas, também é um risco à integridade física da pessoa exposta (ALI, 2011; YOON et al., 2015).

Em vista dos riscos supramencionados, métodos de avaliação do ruído nos espaços de trabalho necessitam ser considerados. Parâmetros quantitativos como os níveis de pressão sonora, podem ser convenientemente utilizados para o desenvolvimento de medidas de caráter preventivo associados à previsão do ruído, considerando intervenções administrativas e de engenharia para a diminuição e controle desse agente ambiental (GUARNACCIA; QUARTIERI; RUGGIERO, 2014).

Assim, o mapa acústico ou mapa de ruído é uma ferramenta pertinente para caracterizar o ruído, sendo capaz de fornecer informações sobre as áreas mais afetadas pela sua incidência em caráter diagnóstico e preditivo, etapa fundamental para o dimensionamento adequado de postos ocupacionais, de medidas técnicas para modificação da infraestrutura de trabalho e até do ambiente construído (BOZKURT; DEMIRKALE, 2017); potenciais estes que são inerentes do mapeamento de ruído em espaços internos.

Muitos trabalhos científicos, assim como este, dedicaram-se ao estudo do ruído industrial. Porém, alguns preocuparam-se com os efeitos na saúde correlacionados com a exposição ao ruído (CHANG et al., 2013; MOHAMMADI, 2008; HOSSEINABADI et al., 2019; ZAW et al, 2020; RUBI-ROMERO, 2018) ou com a quantificação da exposição humana aos níveis sonoros, considerados também em ambiente industrial e outras formas de trabalho, em que não raro puderam ser vistos altos níveis de ruído (KARANDAGH et al., 2021; AREZES; BERNARDO; MATEUS, 2012; FERNÁNDEZ et al., 2009; PARK et al., 2020; TAO et al., 2016). Poucos estudos utilizaram a predição do ruído através dos mapas sonoros em ambientes fechados, esta escassez de certa forma evidencia a atual fraca integração do assunto ocupacional com a metodologia de mapeamento acústico no meio científico. Ferramenta esta que pode atualmente estar com seu potencial inexplorado ou subestimado quanto à quantificação de níveis sonoros e de cenários de intervenção no recinto industrial (GUARNACCIA et al., 2014; MAJIDI et al., 2019; ANIZAR et al., 2018; HASSANVAND et al, 2018).

É justamente nesse último ponto que o trabalho busca oferecer a maior inovação, pois situa-se ao potencialmente suprir a lacuna científica do estudo do ruído industrial a partir do método de mapeamento de ruído, podendo potencialmente ampliar as perspectivas da forma de caracterização do ruído no ambiente de trabalho industrial, seu envolvimento com o contexto ocupacional e também com o planejamento de soluções que podem passar por alterações do ambiente construído.

2. OBJETIVO

Levando em consideração as questões anteriormente levantadas, o objetivo do estudo foi realizar a caracterização do ruído interno de uma indústria do ramo metalomecânico por meio do mapeamento acústico dos diferentes setores da fábrica.

Especificamente: (i) fornecer a predição do ruído em toda a extensão das áreas de trabalho, indicando os setores de maior risco; e (ii) apresentar cenários preditivos para gestão dos possíveis riscos provenientes do ruído industrial.

3. MÉTODO

Três etapas metodológicas foram responsáveis pelos resultados do mapeamento acústico e assim serão detalhadas nos subtópicos a seguir.

O *software* de modelagem de salas Odeon® Versão 11 Industrial, foi usado para projetar a variável principal de estudo, o nível de pressão sonora mapeado (SPL), descritor da magnitude de ruído industrial. O tempo de reverberação (T_{30}) foi utilizado de forma complementar como descritor da qualidade acústica do ambiente construído. O equipamento de medição sonora no ambiente interno da fábrica foi o modelo 2250 Brüel & Kjær®, o qual forneceu os dados de entrada para o *software*.

3.1. Conhecimento do ambiente de fabricação

A atuação da empresa em estudo é voltada à fabricação de máquinas e equipamentos que são destinados em grande parte para a indústria alimentícia. Trata-se da manipulação de peças e acessórios metálicos usuais da incorporação metalomecânica à cadeia de suprimentos na qual o contexto desta organização está inserido. Os principais processos consistem na metalurgia essencial de transformação para a construção de máquinas a partir de peças e chapas metálicas. Dessa forma, envolve um conjunto de serviços de caldeiraria e soldagem de componentes metálicos, montagem elétrica e estrutural a partir de ferramentas manuais, máquinas de dobra e corte a laser de metais e, montagem final de máquinas como requisito pré-expedição.

Conhecer o ambiente de fabricação é crucial em estudos acústicos, somente assim é possível entender a dinâmica de produção, maquinário presente e métodos de trabalho, aspectos que se relacionam diretamente com as potenciais fontes sonoras existentes. Portanto, essa etapa é voltada para a identificação e localização das fontes sonoras e dos aspectos construtivos do ambiente de fabricação. A Fig. 1 a seguir exibe a planta baixa elaborada a partir dessa etapa, evidenciando o arranjo físico e funcional da fábrica e as máquinas em operação. O Quadro 1 e a Fig. 2, complementam as informações já trazidas no croqui da Fig. 1, descrevendo correspondentemente as áreas de trabalho e os códigos de representação das máquinas.

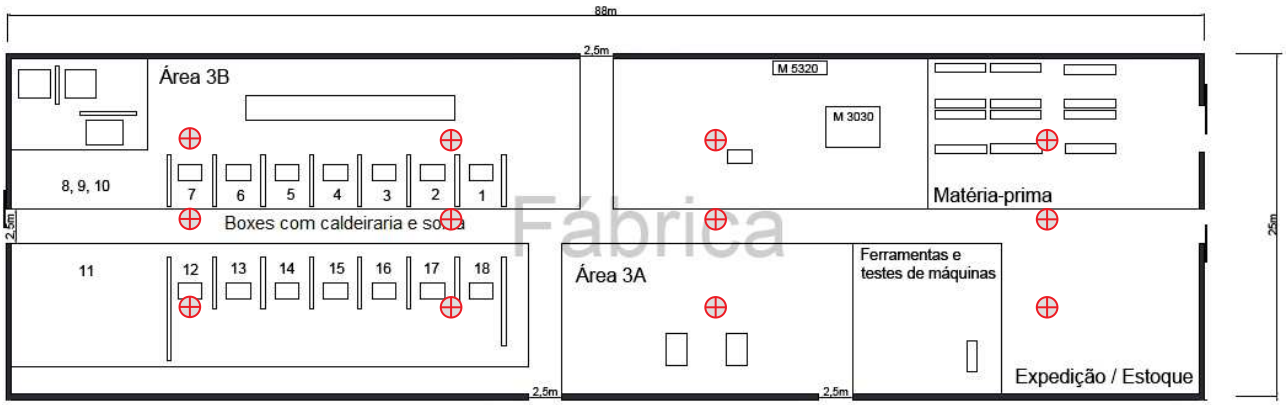

Figura 1 - Planta baixa do recinto industrial e identificação das atividades de fabricação. Nota: miras vermelhas são pontos de medição na fábrica que contém dados reais de pressão sonora para autoajuste da modelagem, explicado no item 3.3.

Quadro 1 - Informações da fábrica levantadas em fase exploratória

Identificação	Descrição	Atividade (h)	Número de operadores
M5320	máquina dobradeira	8	1
M3030	máquina corte e dobra a laser	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 manual	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.

Nota-se que um total de vinte trabalhadores estão expostos às condições de ruído em suas atividades laborais. As duas únicas máquinas presentes na fábrica funcionam durante 8 horas, assim como todos os demais postos de trabalho exercendo suas jornadas 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 toda a fábrica 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 do diagnóstico sonoro.



Figura 2 – Distribuição dos boxes de trabalho com atividades de soldagem e caldeiraria na fábrica.

Essa parte da metodologia consistiu no meio pelo qual houve a identificação e detalhamento das atividades, matérias-primas, procedência, meios de trabalho, assim como o conhecimento do recinto industrial e suas dimensões físicas, algo que viria a embasar o método abordado pelo próximo subcapítulo.

3.2. 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. 1, em um modelo 3D, 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, tais como as máquinas, painéis integrantes do layout, barreiras, etc. (ODEON, 2011); assim, atenção especial foi dada a este ponto.

Optando-se por superfícies planas evitando as curvas no modelo, as áreas da fábrica então puderam ser bastante simplificadas sem comprometer a qualidade dos resultados. Chegando-se ao modelo que pode ser visto na Fig. 3. As máquinas foram aproximadas à blocos retangulares com dimensões fidedignas às dimensões reais. Observa-se que o modelo está representado sem seu teto apenas para permitir visualização do *layout* interno.

Os materiais construtivos do local são os elencados no Quadro 2 a seguir, que também evidencia as dimensões reais de área das superfícies físicas 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 do software 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 calculados.

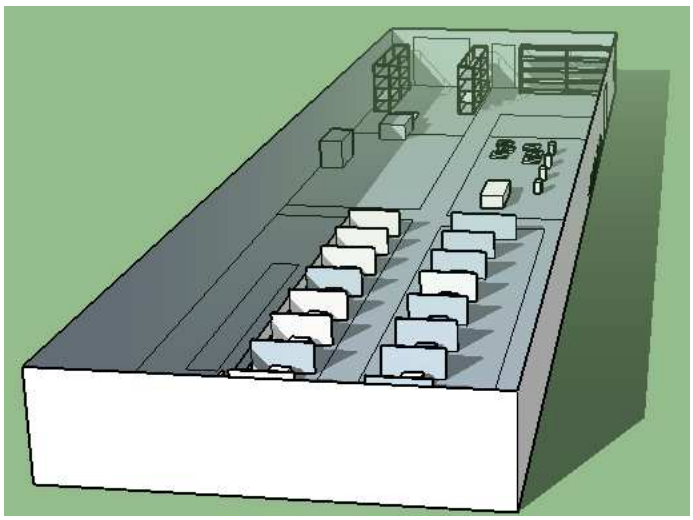

Figura 3 - Modelo geométrico da fábrica representando sua planta em 3D.

Quadro 2 - Materiais com respectivas absorções sonoras e área de absorção total na fábrica

Materiais Fábrica	Coeficientes de absorção sonora em bandas de oitava (α_i) [2]								Área (S_i) [m^2]
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Componentes metálicos [1]	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 25ºC [m^2] [3]	1,5	5,7	18,4	43,8	77,7	143,5	372,1	1254,6	-
$A_{T\ TOTAL}$ [4]	1445,6	1144,0	935,1	812,6	579,8	683,0	1107,3	2199,3	6774,6

[1] Material utilizado para representar teto metálico e outras superfícies metálicas. [2] Variável adimensional. [3] Absorção sonora do ar ambiente nas bandas de frequência à temperatura de 25ºC . [4] Absorção sonora de um espaço interno, dado por $\sum Si \cdot \alpha i$, em que Si é a área superficial do material absorvente e αi seu respectivo coeficiente de absorção sonora [$m^2 \cdot$ Sabine].

Esses dados são aqueles originais, ou seja, refletem sobre como estão no presente momento os aspectos construtivos do recinto, sendo que os resultados do subcapítulo 4.1 os levam em consideração. Já em 4.2 ao realizar predições futuras, altera-se 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.

3.3. Mapeamento de ruído 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 a seguir (Equação 1).

$$L_p = L_W + 10 \log\left(\frac{Q_\theta}{\Omega r^2} + \frac{4}{A_T}\right) \qquad \text{Equação 1}$$

Onde:
LA_p é o nível de pressão sonora [dB];
LA_W é o nível de potência sonora [dB];
Q_θ é o fator de diretividade da fonte;
Ω é o ângulo sólido para livre propagação do som dependente da localização da fonte sonora [π a 4π];
r é a distância fonte-medidor [m];
A_T é a absorção sonora de um espaço interno, dado por $\sum Si \cdot \alpha i$, em que Si é a área superficial do material absorvente e αi seu respectivo coeficiente de absorção sonora [$m^2 \cdot$ Sabine].
Adaptado de: Long (2014); Bistafa (2018).

Utilizando somente o descrito na Equação 1 com suas generalizações e as intrínsecas incertezas da equação para propagação do som em recintos, os dados de entrada que são valores de LA_W, poderiam conter erros em algumas unidades de dB(A).

Conveniente solução, consiste na simulação com pontos fixos resumidos por medições de pressão sonora confiáveis, os quais podem servir para ajustes do modelo (ver pontos de medição na Fig 1.). 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.* Alternativamente, 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 que se chegue à potência sonora da mesma.

Então, para superar essa questão, com as medições de LA_p reais, estimativas melhoradas e autoajustáveis de LA_W podem ser produzidas, de forma que o mapa acústico venha a reproduzir melhor aquilo que é realmente verificável na prática. Esse processo consistiu na etapa de ajuste dos dados de entrada

no programa Odeon® conforme é ilustrado pela Fig.4, na qual consta todos os pontos em que o medidor sonoro 2250 Brüel & Kjær® foi posicionado em campo, distanciados 22 m na longitudinal e 8,33 m de extensão latitudinal, as medições de LA_p foram realizadas por todos os pontos indicados na fábrica.

Para cada ponto foi conduzida uma medição de 5 minutos, totalizando uma hora de varredura, em ponderação temporal "*slow*" e filtro de 1/3 de oitava, com faixa dinâmica de 40 a 120 dB(A), com o medidor posicionado a 1,2 m do solo e calibrado antes do início das medições com calibrador Brüel & Kjær®, modelo 4231, em conformidade com a norma IEC 60942/2003 que estabelece padrões de desempenho para calibradores de nível sonoro.

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.

O primeiro método é encarregado das últimas reflexões sonoras, a previsão envolve traçar raios sonoros advindos da fonte conforme eles refletem no recinto. Esse processo é baseado na energia emitida, a posição do receptor, as características de absorção sonora e os obstáculos do meio, e a forma como refletem nas superfícies de forma especular pela Lei de Snell e difusa seguindo a Lei de Lambert. No segundo método, 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 sonora (ODEON, 2011).

Então especificamente para se chegar ao SPL, seus resultados aparecem seguindo a relação abaixo (Equação 2).

$$SPL = 10 \log \left(E_{0\text{-}\infty} \right) \qquad \text{Equação 2}$$

Onde:
SPL_A é o nível de pressão sonora mapeado [dB];
$E_{0-\infty}$ é a soma das contribuições de energia em um intervalo de tempo após o som original da fonte [dB].

O termo $E_{0-\infty}$ assume que a fonte de som com sua potência sonora arbitrará um SPL_A nas diferentes posições do mapa, investigando o quanto a acústica e reflexos contribuem para sua magnitude. Ambientes 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.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Serão apresentados os resultados do mapeamento de ruído da indústria avaliada em termos de seu diagnóstico do cenário de ruído no presente, como também, após o desenvolvimento de novo cenário preditivo.

Este possível novo cenário é estabelecido a partir de medidas de controle que consideram mudanças na composição de materiais internos, propiciando superfícies para maior absorção sonora.

4.1. Mapa de ruído do ambiente industrial interno

Como resultados dos cálculos no modelo geométrico desta fábrica, o mapeamento apresentado pela Fig. 5 mostra a distribuição espacial do nível de pressão sonora mapeado (SPL_A) ao longo da planta.

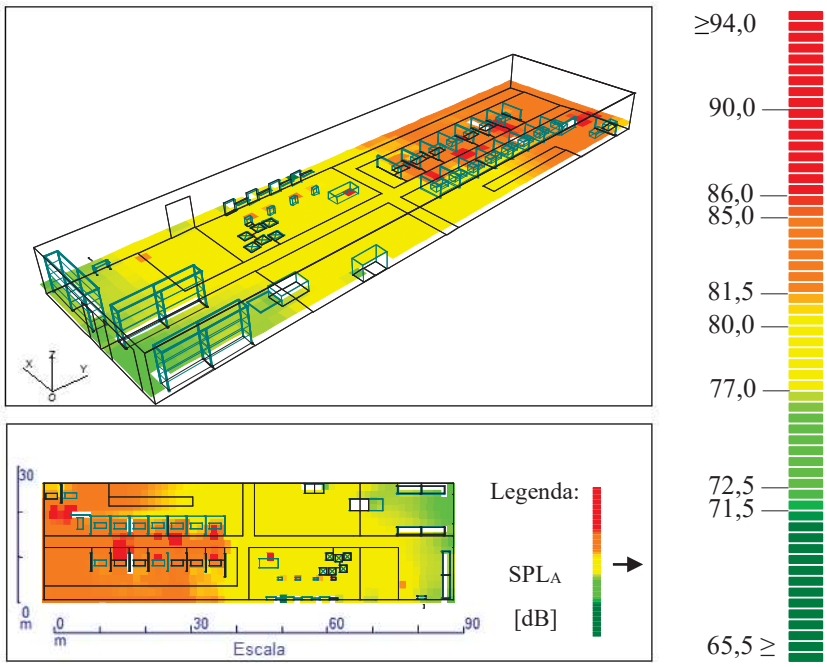

Figura 5 – Mapeamento evidencia a distribuição de ruído ao longo do *layout* da fábrica.

Pelo tipo de mapa resultante, fica claro que a oscilação de níveis sonoros é uma característica que define o ruído da fábrica.

Tais resultados se devem à concentração heterogênea de métodos de trabalho ao longo de sua extensão, como os tons de verde, que aparecem em locais destinados exclusivamente à pré-expedição e armazenamento de matéria-prima (Fig. 1), com níveis de ruído na faixa de 72,5 – 76,5 dB(A). 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). 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.

Diferentemente de outros locais com atividades manuais, como a área 3A, onde se formou pequenas e restritas manchas de maior magnitude dentro do predomínio amarelo, o ruído nos boxes de caldeiraria e soldagem se espalha por grandes áreas demonstradas pela maior abrangência das manchas em laranja e vermelho. O porquê desse 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 esse método de trabalho, sendo registrados até 92 dB(A) em alguns pontos imediatamente próximos às fontes.

Em termos de valor exato segundo o mapeamento, 5% da área total da fábrica apresenta níveis iguais ou superiores que 85,0 dB(A). Este índice só não é ainda maior em função do último terço da fábrica ser destinado ao armazenamento, onde são verificados baixos níveis de ruído. Além disso, outras grandes áreas se encontram na faixa de 83,5 a 84,9 dB(A), próximas do valor limite de 85 dB(A), segundo a legislação nacional, que considerada esse limite para uma exposição durante 8 horas de jornada de tabalho (BRASIL, 2011).

Por sua vez, a distribuição do tempo de reverberação da fábrica pode ser vista na Fig. 6 ao lado.

Sobre a sua magnitude, os altos índices superiores a 2 s nas faixas centrais de 500 a 2000 Hz caracterizam a indústria de uma forma geral, como um ambiente de baixo conforto acústico e compreensão de fala.

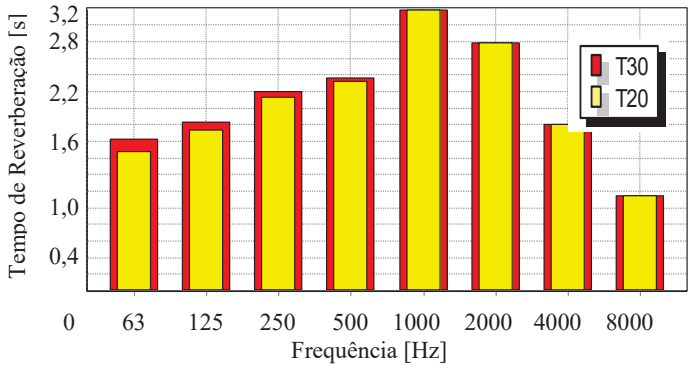

Figura 6 - T_{30} e T_{20} em bandas de oitavas como resultado dos materiais existes e áreas de superfícies na fábrica.

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). Além disso, indiretamente, os resultados de T_{30} nas faixas centrais de frequência, podem sim influenciar no nível de ruído global. Isso ocorre porque maiores T_{30} apontam 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_A conforme foi visto na Equação 2, o qual também poderia ser reduzido (ODEON, 2011); dessa forma algumas áreas da fábrica poderiam se tornar mais seguras para trabalhar.

Os resultados desse trabalho são pioneiros ao relacionar mapeamento acústico interno com viés ocupacional. Mais de 8 bilhões de cálculos foram feitos para a predição do ruído e obtenção dos mapas via *software*. O mapeamento surge como uma ferramenta que possibilita imagens mais amplas que as médias pontuais de avaliações de exposições ocupacional tradicionalmente feitas, dando suporte à gestão para movimentação e possíveis adequações no projeto de medidas de controle.

4.1. Medida de controle do diagnóstico de ruído industrial – superfícies de absorção sonora

Em um cenário no qual materiais com propriedades de absorção sonora fossem inseridos na fábrica de acordo com a Tabela 1, uma vez que seu diagnóstico mapeado justifica 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 sonora.

Tabela 1 - Materiais característicos para absorção sonora e suas áreas totais de absorção preditiva

Materiais absorventes [1]	Coeficientes de absorção sonora de 125 a 4000 Hz (α_i) [2]						Área S_i
	125	250	500	1000	2000	4000	[m²]
Composto absorvedor [3]	0,12	0,47	0,85	0,84	0,64	0,62	340,7
Painéis metálicos [4]	0,35	0,65	1,00	1,00	1,00	0,92	1295,3
$A_{T\ TOTAL}$ [5]	494,2	1002,1	1584,9	1581,5	1513,3	1402,9	1636,0

[1] Ilustrações dos materiais absorventes podem ser encontradas seguindo o disposto nas referências bibliográficas; [2] Variável adimensional; valores são fornecidos pelos fabricantes; [3] Composto absorvedor de som com 2,54 cm de acolchoado de fibra de vidro revestido em vinil (Sound Seal®, 2021); [4] IAC Acousticsl® (2021) [5]Absorção sonora total proporcionada pelos novos materiais.

O resultado do mapeamento de ruído após os novos materiais serem inseridos é visto na Fig. 7. Destaca-se que a aplicação dos painéis metálicos se restringiu às paredes, com exceção daquela onde há portões (parede abaixo e frontal a y); o composto absorvedor revestiu os compartimentos entre os boxes.

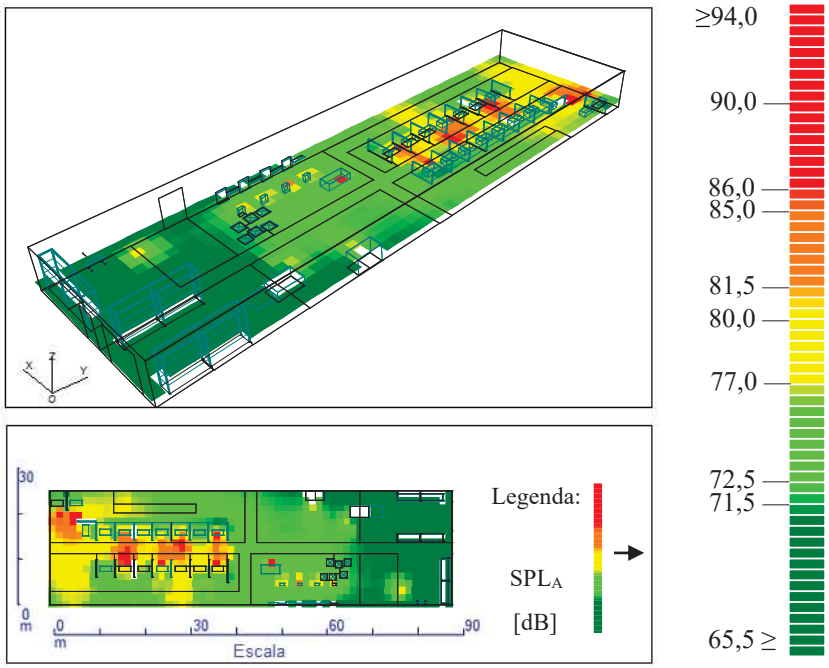

Figura 7 – Mapa preditivo com os níveis de ruído na fábrica após a inserção de materiais absorventes.

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 seriam mais perceptíveis e influenciariam a acústica do recinto, por isso se tornam suficientes para descrever os coeficientes de absorção sonora.

O novo padrão de cores resultante da fábrica está indicando condições particulares na distribuição de SPL_A e por isso 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 m^2 em área segura. 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 nesses locais.

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} registrados anteriormente passaram a ser de 2,45 s em 63 Hz e 1,3 s em 1 kHz; e na frequência de 500 Hz foi obtido 0,8 s. Na prática esses resultados poderiam sensivelmente melhorar o conforto acústico percebido.

Os novos mapas calculados se mostraram com diferentes níveis de ruído e acústica industrial, sendo possível devido à alta absorção sonora dos materiais empregados, podendo atingir bons resultados sobre as variáveis analisadas.

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 eliminado todas as áreas de risco, é também verdade que os valores de SPL_A se tornariam mais pontuais e muitas áreas reduziriam sua magnitude, isso mostra que essa solução apresentou bons resultados. Para auxiliar os critérios de viabilidade de projeto, uma análise de custo benefício seria uma alternativa. Contudo, o mapeamento preditivo demonstrou ser uma ferramenta justificável para segurança ocupacional e fundamental antes de se realizar qualquer investimento.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados da pesquisa foi obtida a caracterização total do ruído industrial. O que consistiu na compreensão da dinâmica de funcionamento da indústria, organização de pontos amostrais, mapeamento de ruído diagnóstico e preditivo.

- Os mapas acústicos foram capazes de fornecer uma ampla visualização do ruído por toda extensão da fábrica. Isso possibilitou exclusivo caráter discriminatório de quais setores e atividades possuem maior risco.
- Com esses diagnósticos, embasamento para o que seria coerente nas medidas de controle foi fornecido.
- Cenário preditivo para controle do ruído ocupacional foi então apresentado. A modificação das superfícies de absorção sonora não foi capaz de eliminar todas as áreas com exposições maiores que 85 dB(A). Contudo, essa medida impactou positivamente ao propiciar ganho de 63,8 m^2 de área segura, contando ainda com amplas reduções de áreas com ruído abaixo dos 80 dB(A), e nos tempos de reverberação, que potencialmente trariam maior conforto e menores riscos associados ao ruído nos ambientes de trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI, S. A. Industrial Noise Levels and Annoyance in Egypt. **Applied Acoustics**, v. 72, n. 4, p. 221–225, 2011.

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.

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.

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

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 :14/3/2021.

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.

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.

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

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

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

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.

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

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.

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.

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

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

ISO – International organization for standardization. ISO 3740: **Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources – Guidelines for the use of basic standards**. Genebra, 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.

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.

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

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.

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.

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

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

OMS - ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Environmental Noise Guidelines for the European Region**. Public Health Panorama, 2018.

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

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.

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.

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

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.

SOUND SEAL. **Barrier Backed Composite BBC-13®**, 2021. Disponível em:< https://www.soundseal.com/files/content/industrial/noise-barrier-composites/documents/bbc13-datasheet.pdf>.

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.

THEMANN, C. L.; MASTERSON, E. A. Occupational noise exposure: A review of its effects, epidemiology, and impact with recommendations for reducing its burden. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 146, n. 5, p. 3879–3905, 2019. Acoustical Society of America.

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.

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.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.