

**METODOLOGIA PARA DEFINIÇÃO DE ESTRATÉGIA DE
CONTROLE E AVALIAÇÃO DE RUÍDO OCUPACIONAL**

Maíra Neves Rodrigues

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**"METODOLOGIA PARA DEFINIÇÃO DE ESTRATÉGIA DE
CONTROLE E AVALIAÇÃO DE RUÍDO OCUPACIONAL"**

Maíra Neves Rodrigues

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues
DEES - UFMG - (Orientador)

Prof. M.Sc. Marco Antônio de Mendonça Vecci
DEES - UFMG - (Co-orientador)

Prof. Dr. Eduardo Bauzer Medeiros
DEMEC - UFMG

Prof. Dr. Erasmo Felipe Vergara Miranda
PPGEC - UFSM

Belo Horizonte, agosto de 2009

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não seria possível sem o apoio e incentivo de diversas pessoas a quem eu gostaria de agradecer.

Aos meus pais por ser a base segura da minha vida e aos meus irmãos pelo carinho e por sempre torcerem por mim.

Ao professor Francisco C. Rodrigues, pela confiança e por aceitar ser orientador deste trabalho.

Ao meu co-orientador Marco A. M. Vecci, pela paciência, ensinamentos e dedicação à esta pesquisa.

À amiga Rafaela, pela amizade sincera e pelo incentivo e apoio incondicional durante o curso.

Aos colegas do Mestrado, pela companhia nos estudos e por tornar mais agradável a dura rotina das disciplinas.

Aos engenheiros Renato Silva e Rogério Xavier, por informações importantes para a concretização desta dissertação.

Aos colegas do LADAE – Laboratório de Dinâmica e Acústica Estrutural, principalmente Frederico Catone, pela contribuição na execução das simulações acústicas.

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

Muito Obrigada!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivo	2
1.1.1. Objetivo Geral.....	2
1.1.2. Objetivos Específicos	3
1.2. Justificativa	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Sons e Ruído	5
2.2. Ruído e Ambiente de Trabalho	6
2.2.1. Insalubridade.....	6
2.2.2. Avaliação da exposição ocupacional ao ruído utilizando a dose diária.....	9
2.2.3. Ruído e Conforto	10
2.2.4. Programa de Prevenção de Riscos Ambientais - PPRA	12
2.3. Controle de Ruído.....	14
2.3.1. Controle do Ruído na Fonte.....	15
2.3.2. Controle do Ruído na Trajetória de transmissão	15
2.3.3. Controle do Ruído no Receptor	17
3. FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA APLICADA	19
3.1. Conceitos básicos.....	19
3.1.1. Níveis Acústicos	21
3.2. Comportamento do som em ambientes fechados.	22
3.2.1. Propagação do som em campo livre	22

3.2.2. Propagação do som no ambiente fechado.....	23
3.3. Predição dos níveis pressão sonora utilizando a potência sonora.....	27
3.4. Determinação da potência sonora utilizando dados de pressão sonora	30
3.4.1. Determinação da Potencia Sonora segundo a norma ISO 3746	30
3.5. Simulação de campo sonoro	36
3.5.1. Método das Fontes Virtuais	36
3.5.2. Método do Traçado dos Raios	39
3.5.3. Método híbrido	40
4. METODOLOGIA.....	42
4.1. Equipamentos utilizados	43
4.2. Estudo de Caso.....	44
4.3. Caracterização das fontes de ruído no ambiente.....	44
4.3.1. Determinação das potências acústicas dos equipamentos ruidosos.....	44
4.4. Determinação dos níveis sonoros nos postos de trabalho.....	49
4.5. Simulação computacional do campo sonoro do ambiente estudado.....	51
4.5.1. Elaboração de modelo tridimensional do ambiente.....	51
4.5.2. Simulação do Campo sonoro existente.....	52
4.6. Identificação das possíveis atenuações acústicas a serem obtidas em cada equipamento.....	54
4.7. Simulação computacional de diferentes situações de tratamento dos equipamentos e do ambiente estudado.....	55
4.8. Correlação entre custos de tratamento acústico dos equipamentos e as reduções dos níveis de ruído nos locais de trabalho.	56
4.9. Estratégia de tratamento acústico para o estudo de caso, visando a redução de ruído no ambiente.	56
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
5.1. Determinação das potências sonoras dos equipamentos.....	57
5.2. Medição dos níveis sonoros nos postos de trabalho	61
5.3. Simulação computacional do campo sonoro do ambiente estudado.....	62
5.3.1. Simulação com apenas uma fonte sonora operando - Calibração do modelo	62
5.3.2. Simulação acústica do ambiente com valores das potências sonoras corrigidos.	66
5.3.3. Identificação da contribuição de cada fonte nos níveis sonoros do ambiente	67
5.4. Identificação das atenuações acústicas obtidas na máquina Tipo A.....	74

5.5. Simulação computacional de diferentes situações de tratamento dos equipamentos e do ambiente estudado.....	75
5.6. Cenários de tratamento acústico nos equipamentos relacionando redução de ruído e custos de tratamento.....	80
5.7. Estratégia de tratamento acústico com base nos cenários simulados.	94
6. CONCLUSÕES	96
6.1. Considerações Finais	96
6.2. Proposta para futuros trabalhos.....	99
7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	100

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Desenho esquemático das definições do volume dV e da superfície ΔS , utilizados na derivação para a determinação da intensidade sonora do campo difuso. Adaptado de KINSLER et al.(1999).....	24
FIGURA 2: Nível de pressão sonora em função da distância da fonte sonora, com diferentes valores de R e Q. (HASSALL e ZAVERI, K., 1988).....	29
FIGURA 3: Dimensões da superfície de medição. O volume ao centro representa o volume da fonte sonora em estudo.	31
FIGURA 4: Posições do microfone que delimitam as subáreas da superfície de medição. ISO 3746.....	32
FIGURA 5: Posições do microfone para medição de fontes sonoras pequenas. ISO 3746	33
FIGURA 6: Posições do microfone para medição fontes sonoras altas. ISO 3746.....	33
FIGURA 7: Posições do microfone para medição fontes sonoras longas. ISO3726.....	34
FIGURA 8: Posições do microfone para medição fontes sonoras grande. ISO3746	34
FIGURA 9: Esquema das fontes virtuais. PORTELA (2008).....	37
FIGURA 10: Construção das fontes virtuais. Adaptado de VORLÄNDER (2008).	37
FIGURA 11: Teste de visibilidade. F representa as fontes virtuais e R os receptores. Os índices indicam as paredes que refletiram os raios. O número de incidências denota a ordem da fonte virtual. VORLÄNDER (2008).....	38
FIGURA 12: Traçado dos raios sonoros da fonte ao receptor. VORLÄNDER, (2008)	40
FIGURA 13: Histograma: a resposta ao impulso da sala é determinada a partir da contagem de eventos. Cada ponto é a energia detectada pelo receptor em função do tempo. VORLÄNDER, (2008).....	40
FIGURA 14: Reflexão baseada no espalhamento. Neste caso, a superfície tem um coeficiente de espalhamento igual a 0,5. CHRISTENSEN; RINDEL (2005).....	41
FIGURA 15: Pontos de medição dos níveis de emissão sonora das máquinas tipo A, B, C e D.	46
FIGURA 16: Desenho esquemático da delimitação das superfícies de medição.	47
FIGURA 17: Localização dos pontos de medição para determinação dos níveis de pressão sonora nos postos de trabalho	1
FIGURA 18: Maquete elaborada para simulação do campo sonoro do ambiente no software ODEON.....	52
FIGURA 19: Indicação dos pontos medição em laboratório da Máquina A.....	55
FIGURA 20: Níveis acústicos medidos nos possíveis postos de trabalho da indústria..	61
FIGURA 21: Comparação entre os níveis sonoros simulados e medidos.	66

FIGURA 22: Numeração dos equipamentos para simulação acústica.	1
FIGURA 23: Contribuição das fontes sonoras nos níveis acústicos simulados para os pontos P1, P2 e P3.	69
FIGURA 24: Contribuição das fontes sonoras nos níveis acústicos simulados para os pontos P4, P5 e P6.	70
FIGURA 25: Contribuição das fontes sonoras nos níveis acústicos simulados para os pontos P7, P8 e P6.	70
FIGURA 26: Contribuição das fontes sonoras nos níveis acústicos simulados para os pontos P10, P11 e P12.	71
FIGURA 27: Contribuição das fontes sonoras nos níveis acústicos simulados para os pontos P13, P14 e P15.	71
FIGURA 28: Contribuição das fontes sonoras nos níveis acústicos simulados para os pontos P16, P17 e P18.	72
FIGURA 29: Contribuição das fontes sonoras nos níveis acústicos simulados para os pontos P16, P17 e P18.	72
FIGURA 30: Contribuição das fontes sonoras nos níveis acústicos simulados para os pontos P16, P17 e P18.	73
FIGURA 31: Contribuição das fontes sonoras nos níveis acústicos simulados para os pontos P16, P17 e P18.	73
FIGURA 32: Comparação entre os níveis sonoros simulados para a condição sem tratamento e os níveis simulados com tratamento acústico das fontes.	76
FIGURA 33: Comparação entre os níveis sonoros simulados para as condições sem tratamento acústico e para condição de tratamento com adição de absorção sonora no ambiente.	77
FIGURA 34: Comparação entre os níveis sonoros simulados para as condições sem tratamento, com tratamento acústico das fontes – atenuação de 6 dB(A) – e com adição de absorção no ambiente.	77
FIGURA 35: Comparação entre os níveis sonoros simulados para as condições sem tratamento, com tratamento acústico das fontes – atenuação de 9 dB(A) – e com adição de absorção no ambiente.	78
FIGURA 36: Comparação entre os níveis sonoros simulados para a condição sem tratamento acústico e com tratamento dos equipamentos A e B com superfícies absorventes.	79

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Limites de tolerância para Ruído Contínuo ou Intermitente estabelecidos pela NR-15.....	8
TABELA 2: Níveis de ruído para conforto, estabelecidos pela NBR 10152, para diversos ambientes.....	11
TABELA 3: Valores Potência Sonora e Nível de Potência Sonora (<i>NWS</i>) típicos de algumas fontes sonoras	20
TABELA 4: Coeficientes de absorção dos materiais de revestimento utilizados na simulação	53
TABELA 5: Coeficientes de absorção utilizados para simulações de tratamento acústico nas superfícies do ambiente	56
TABELA 6: Níveis sonoros registrados nos pontos próximos às máquinas da indústria. Estes valores foram base para o cálculo da potência sonora dos equipamentos.....	58
TABELA 7: Níveis de potência sonora encontrados para cada superfície da máquina, referente a cada ponto de medição.....	60
TABELA 8: Relação entre os resultados obtidos na simulação e os níveis sonoros medidos. MÁQUINA TIPO A.....	62
TABELA 9: Relação entre os resultados obtidos na simulação e os níveis sonoros medidos. MÁQUINA TIPO B.....	63
TABELA 10: Relação entre os resultados obtidos na simulação e os níveis sonoros medidos. MÁQUINA TIPO C.....	64
TABELA 11: Relação entre os resultados obtidos na simulação e os níveis sonoros medidos. MÁQUINA TIPO C CALIBRADA.....	65
TABELA 12: Relação entre os resultados obtidos na simulação e níveis sonoros medidos. MAQUINA TIPO D.....	65
TABELA 13: Numeração para identificar as fontes sonoras no ambiente.....	67
TABELA 14: Níveis de pressão sonora medidos próximo à máquina Tipo A, na condição sem tratamento acústico e com tratamento acústico.	75
TABELA 15: Planilha de tratamento acústico nas fontes sonoras para os pontos de medição P4, P5 e P6 – Opção 1: tratamento acústico dos equipamentos tipo C.....	82
TABELA 16: Planilha de tratamento acústico nas fontes sonoras para os pontos de medição P4, P5 e P6 – Opção 2: tratamento acústico dos equipamentos tipo A e B.	84
TABELA 17: Planilha de tratamento acústico nas fontes sonoras para os pontos de medição P4, P5 e P6 – Opção 3: tratamento acústico dos equipamentos tipo A, B e D.	86
TABELA 18: Planilha de tratamento acústico nas fontes sonoras para os pontos de medição P16, P17 e P18.	88

TABELA 19: Planilha de tratamento acústico nas fontes sonoras para os pontos de medição P19, P20 e P21 – Opção 1: tratamento acústico das máquinas tipo D.....	90
TABELA 20: Planilha de tratamento acústico nas fontes sonoras para os pontos de medição P19, P20 e P21 – Opção 2: tratamento acústico das máquinas tipo D.....	91
TABELA 21: Planilha de tratamento acústico nas fontes sonoras para os pontos de medição P19, P20 e P21 – Opção 3: tratamento acústico das máquinas tipo A, B e D..	93
TABELA 22: Relação de custos de implantação de tratamento acústico dos equipamentos e do ambiente.....	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACGIH	American Conference Governmental Industrial Hygienists
CLT	Consolidação das Leis Trabalhistas
ISO	International Organization for Standardization
PAIR	Perda Auditiva Induzida pelo Ruído
PPRA	Programa de Prevenção de Riscos Ambientais

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>A</i>	Absorção Sonora Total [Sabine métrico]
<i>α</i>	Coefficiente de Absorção
<i>c</i>	Velocidade do som no ar [m/s]
<i>DI</i>	Índice de diretividade [dB]
<i>E</i>	Densidade de Energia Sonora [Pa]
<i>E</i>	Energia Sonora [J]
<i>I</i>	Intensidade Sonora [W/m ²]
Leq	Nível Sonoro Equivalente [dB]
<i>NI</i>	Nível de Intensidade Sonora [dB Ref. 10 ⁻¹² W/m ²]
<i>NPS</i>	Nível de Pressão Sonora [dB Ref. 2,0 x 10 ⁻⁵ Pa]
<i>NWS</i>	Nível de Potência Sonora [dB Ref. 10 ⁻¹² W]
<i>P</i>	Pressão Sonora [Pa]
<i>P₀</i>	Pressão Sonora de Referência [Pa]
<i>Q</i>	Diretividade
<i>r</i>	distância da fonte sonora [m]
<i>R</i>	Constante de Absorção do ambiente
<i>S</i>	Área de Superfície [m ²]
<i>V</i>	Volume [m ³]
<i>W</i>	Potência Sonora [W]

RESUMO

Os elevados níveis de ruído têm sido um grave problema nos ambientes de trabalho, principalmente nas indústrias, ocasionando danos à saúde de inúmeros funcionários. Em muitos casos, o controle destes níveis de ruído requer medidas de engenharia complexas, com custos elevados e que demandam bom planejamento técnico e financeiro.

Neste contexto, este trabalho teve como objetivo desenvolver uma metodologia para avaliação e controle do ruído nos locais de trabalho, por meio de ferramentas que permitiram prever resultados e custos inerentes à implantação das medidas de atenuação dos níveis sonoros, visando dar diretrizes para uma estratégia de gestão de ruído ocupacional.

Para o desenvolvimento desta pesquisa utilizou-se como estudo de caso um galpão industrial próximo à região metropolitana de Belo Horizonte, onde os níveis sonoros dentro do ambiente eram bastante elevados. A metodologia adotada neste estudo visou caracterizar o ruído no ambiente, relacionando o ruído proveniente dos equipamentos ruidosos com os níveis de pressão sonora nos postos de trabalho. Além disto, foram identificados os potenciais níveis de atenuação sonora nos equipamentos, com o intuito de prever o ruído nas estações de trabalho após o tratamento acústico dos equipamentos.

As análises dos diversos cenários de tratamento acústico nas fontes sonoras, bem como no ambiente, permitiram avaliar as relações de custo-benefício proporcionado por cada cenário e, desta forma, possibilitou estabelecer diretrizes de tratamento acústico visando adequar os níveis de ruído às normas de higiene ocupacional. Verificou-se que a associação do tratamento acústico nas fontes sonoras com o tratamento do ambiente por meio de superfícies absorventes proporcionou resultados bastante satisfatórios, principalmente nos locais onde a influência da reverberação do ambiente é maior. No entanto ao avaliar os custos de implantação do sistema de absorção sonora, concluiu-se que é mais viável o tratamento acústico dos equipamentos da linha de produção da fábrica do que investir no tratamento das superfícies do ambiente.

ABSTRACT

The high levels of noise have been a serious problem in the workplace, especially in industries, causing damage to health of many employees. However, in many cases, control of noise levels requires complex engineering measures, with attendant high costs and thus demands good technical and financial planning.

In this context, this work aimed to develop a methodology for evaluation and control of noise at work, by means of tools that can predict outcomes and costs of implementation of the control noise measures, to give guidelines for a management strategy of occupational noise.

For the development of this research was used as a case study an industrial warehouse near the metropolitan region of Belo Horizonte where the noise levels within the environment were high. The methodology adopted in this study aimed to characterize the noise in this environment, linking the noise from the equipment with noise levels of sound pressure on jobs. Furthermore, in order to predict the noise at the work space after acoustic treatment of equipment the potential for mitigation of noise levels in machinery has been identified.

The analysis of different scenarios of acoustic treatment on sound sources and on the environment allowed to evaluate the cost-benefit corresponding to each scenario and therefore has set guidelines for acoustic treatment to adjust the noise levels to the standards of occupational health. It was found that the association with acoustic treatment of sound sources and treatment of the environment by absorbing surfaces provided very satisfactory results, especially in places where the influence of the reverberation effect is greater. However, from an economical view point the acoustic treatment of all equipment of the production line seems to be a better option than to invest in the treatment of the surfaces of the environment.

1.

INTRODUÇÃO

O ambiente de trabalho é o local onde inúmeras pessoas passam grande parte do seu dia. Para assegurar a qualidade de vida dessas pessoas é necessário que esse ambiente seja salubre e confortável, a fim de garantir o bem estar do indivíduo, sua segurança e produtividade.

Um dos fatores que compromete a qualidade do ambiente de trabalho é o ruído ocupacional excessivo. Em diversos setores, os elevados níveis de ruído são causa de grande insatisfação dos funcionários, além de comprometer a saúde dos mesmos. Em ambientes de indústrias, mineradoras, construção civil e locais onde geralmente são utilizados equipamentos altamente ruidosos, a necessidade de medidas de controle do ruído é constante.

A ocorrência de níveis elevados de ruído nos ambientes de trabalho se deve às fontes geradoras de ruído no ambiente, às características arquitetônicas do local como volumetria, revestimentos das superfícies e sistemas de vedação; ou então, ao ruído externo que interfere no ambiente, como por exemplo, o ruído de tráfego. No caso das indústrias a causa principal dos elevados níveis de ruído são os equipamentos extremamente ruidosos utilizados nos processos de fabricação.

O excesso de ruído pode causar inúmeros danos à saúde humana. A consequência física facilmente detectada é a perda auditiva, denominada PAIR – Perda Auditiva Induzida pelo Ruído. A PAIR é uma lesão irreversível, consequência de exposições contínuas ao ruído, no período de anos, e afeta significativamente a compreensão da fala. (RIOS, 2003)

No entanto, estudos vêm debatendo outros efeitos do ruído nos aspectos psicofisiológicos da saúde e bem estar do homem. A exposição excessiva ao ruído pode comprometer outros órgãos e funções do organismo, além de causar perturbações no sono acarretando em efeitos como irritabilidade, cansaço e dificuldade de concentração. (RIOS, 2003). Segundo MORATA *et al* (1997) o excesso de ruído eleva os níveis de estresse, o que aumenta a pressão arterial e a secreção de hormônios como adrenalina e cortisol.

Além dos aspectos físicos do funcionário, o excesso de ruído compromete o desempenho no trabalho e aumenta o risco de acidentes, uma vez que interfere na concentração e na comunicação verbal entre os funcionários.

Diante destas circunstâncias serão desenvolvidas etapas sistemáticas, para avaliar e propor medidas de controle de ruído ocupacional, que resulte em programas de controle de ruído efetivos, factíveis e principalmente mensuráveis no que diz respeito a custos de implementação e qualidade de resultados. Este trabalho visou dar suporte a um programa de controle de ruído, que atendesse as necessidades dos funcionários, permitindo inserções de fiscalização pelos órgãos responsáveis e, viável do ponto de vista físico e financeiro.

1.1. Objetivo

1.1.1. Objetivo Geral

Desenvolver uma metodologia de avaliação e controle de ruído ocupacional, visando estabelecer relações custo-benefício de possíveis cenários de implementação de medidas mitigatórias para o problema dos elevados níveis sonoros que possam orientar uma estratégia de gestão de ruído nos ambientes de trabalho.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Identificar a contribuição do ruído proveniente dos equipamentos sem o tratamento acústico nos níveis sonoros dos postos de trabalho.
- Identificar e quantificar a atenuação do nível do ruído no ambiente com equipamentos tratados acusticamente.
- Quantificar custos da implantação dos sistemas de atenuação de ruído nos equipamentos.
- Estabelecer diversos cenários que possibilite a avaliação de custos e benefícios de implantação de sistemas para mitigar o ruído no ambiente de trabalho.
- Estabelecer relações entre o tratamento acústicos nas máquinas e no ambiente.
- Propor estratégias de tratamento acústico em função dos cenários previstos, através de avaliações técnicas-financeiras vinculadas aos resultados desejáveis referentes à salubridade do ambiente de trabalho.

1.2. Justificativa

O Ruído Ocupacional e seu controle são temas discutidos e amplamente estudados. Medidas de controle do ruído têm sido propostas nos aspectos legais, por meio de leis e regulamentações, no âmbito médico, através de programas de conservação auditiva e no âmbito técnico-operacional, que tem como objetivo tratar ambientes e fontes sonoras visando à atenuação do ruído.

No entanto, apesar das medidas de controle de ruído serem difundidas, existe a necessidade de uma metodologia de avaliação e controle de ruído que, ao mesmo tempo, seja capaz de prever os resultados a serem obtidos, assim como os custos e investimentos necessários para implementar as medidas de controle de ruído. Como consequência, torna-se possível avaliar, com antecedência, a relação custo-benefício dos resultados obtidos em função dos investimentos a serem realizados. Cabe ressaltar que, garantindo a qualidade do ambiente de trabalho, a empresa obtém retorno com uma

melhor força de trabalho, diminuição dos gastos com assistência médica e indenizações, diminuição do número de acidentes e, portanto, maior produtividade.

Um trabalho desta natureza viria ao encontro dos interesses dos órgãos fiscalizadores do Ministério do Trabalho, uma vez que seriam estabelecidos visa colaborar para o desenvolvimento de programas efetivos com resultados e metas, os quais se tornariam alvos concretos de inspeção por estes órgãos fiscalizadores.

Busca-se, também, ir ao encontro dos interesses do funcionário, tendo como objetivo principal proporcionar condições de trabalho salubres, alocando esforços para tornar possível medidas de controle na fonte e/ou no meio de transmissão, diminuindo, desta forma, a exigência do protetor auricular, uma vez que, o protetor auricular não deve ser a medida principal de controle do ruído. Cabe ressaltar que, além do desconforto, o protetor dificulta a comunicação entre os funcionários.

2.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Sons e Ruído

Os sons desagradáveis, indesejáveis, ou aqueles que causam alguma sensação de desconforto são denominados ruídos. Essa interpretação de som indesejável é uma sensação subjetiva, portanto, um som agradável para um, pode gerar incômodo para outro. Porém, para especialistas da saúde e da segurança do trabalho, o ruído é classificado como um agente físico que causa danos à saúde e à capacidade auditiva dos seres humanos. Neste caso, mesmo sons agradáveis, porém com volume elevado, devem ser considerados ruídos. O incômodo ou o dano causado pelo ruído depende de suas características físicas (amplitude e frequência), do seu tempo de duração, da resposta subjetiva e suscetibilidade de cada pessoa.

A NR-15, a fim de avaliar o tipo de ruído no ambiente de trabalho, estabelece a seguinte classificação do ruído em função da sua variação do tempo:

Ruído Contínuo – cuja variação do Nível de Pressão Sonora (NPS) não ultrapassada 3 dB(A) durante um período relativamente longo(aproximadamente 15 minutos).

Ruído Intermitente – Ruído cujo NPS varia bruscamente mais que 3 dB(A), várias vezes em um período de tempo curto.

Ruído Impulsivo ou de Impacto – Ruído que representam picos de energia acústica com duração inferior a 1s e com intervalos de ocorrência, entre picos, superiores a 1s.

2.2. Ruído e Ambiente de Trabalho

O ser humano, para seu bem estar, precisa estar em equilíbrio, provendo de saúde física, psíquica e emocional. Considerando que o indivíduo passa pelo menos um terço do dia no trabalho, sua qualidade de vida e bem estar está estreitamente vinculado à vida de qualidade no ambiente de trabalho.

Para promover a qualidade de vida, boas condições de trabalho devem ser garantidas. Estas condições envolvem questões relacionadas a jornadas e cargas de trabalho, materiais e equipamentos disponibilizados para a execução de tarefas, bem como controle sobre fatores ambientais indesejados como, iluminação, temperatura, ruído, vibração, poeira e gases (VIEIRA, 2005).

Visando qualificar o ambiente de trabalho, os higienistas do trabalho consideram o ruído como um agente físico indesejável com limites de tolerância determinados pela norma regulamentadora do Ministério do Trabalho, NR-15.

2.2.1. Insalubridade

Segundo ARAÚJO E RAGAZZI (1999), “(...) trabalho insalubre é aquele que pode causar efeitos adversos à saúde devido à exposição habitual e permanente aos agentes de risco considerados insalubres pela legislação.”

O Art. 189 da Consolidação das Leis do Trabalho – CLT define que as atividades insalubres são aquelas que expõem os empregados a agentes nocivos à saúde, acima de limites de tolerância determinados.

Conforme citado anteriormente, a norma regulamentadora que dispõe sobre atividades insalubres no trabalho e estabelece limites de tolerância é a NR-15 – Atividade e

Operações insalubres. Os índices referentes ao ruído estabelecidos nesta norma foram baseados nos índices determinados pela American Conference Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), 1978.

Segundo SALIBA (2008), a ACGIH considera que o limite de tolerância para o ruído não protege todos os trabalhadores dos efeitos da exposição ao mesmo, mas visa proteger a maioria dos funcionários. Por outro lado, a NR-15 define Limite de Tolerância como sendo “(...) a concentração ou intensidade máxima ou mínima, relacionada com a natureza e o tempo de exposição ao agente, que não causará dano à saúde do trabalhador, durante a sua vida laboral.” Ou seja, segundo a NR-15, mantendo-se os níveis sonoros e a exposição ao ruído dentro dos limites estabelecidos, garante-se que qualquer trabalhador não terá dano à saúde. Embora o dano causado ao indivíduo seja também função da suscetibilidade de cada indivíduo, este fato não é considerado na NR-15.

Para avaliar o ruído e os níveis de exposição, a NR-15 estabelece parâmetros diferentes para Ruído Contínuo e Intermitente e para o Ruído de Impacto. Para avaliar o ruído contínuo e intermitente determina-se que a medição dos níveis acústicos deve ser realizada próxima ao ouvido do trabalhador, em decibéis, com instrumento de nível de pressão sonora operando na curva de ponderação "A" e resposta lenta (SLOW). Quanto aos valores de tolerância, a norma estabelece os seguintes limites:

TABELA 1: Limites de tolerância para Ruído Contínuo ou Intermitente estabelecidos pela NR-15

Nível de ruído dB (A)	Máxima Exposição Diária Permissível
85	8 horas
86	7 horas
87	6 horas
88	5 horas
89	4 horas e 30 minutos
90	4 horas
91	3 horas e 30 minutos
92	3 horas
93	2 horas e 40 minutos
94	2 horas e 15 minutos
95	2 horas
96	1 hora e 45 minutos
98	1 hora e 15 minutos
100	1 hora
102	45 minutos
104	35 minutos
105	30 minutos
106	25 minutos
108	20 minutos
110	15 minutos
112	10 minutos
114	8 minutos
115	7 minutos

Fonte: NR-15

Essa norma regulamentadora também estabelece que o limite máximo para exposição à ruído contínuo ou intermitente é de 115 dB(A), para indivíduos que não estejam devidamente protegidos.

Em relação ao Ruído de Impacto, a NR-15 determina que os níveis acústicos devem ser medidos em dB (linear) e com circuito de resposta para impacto. O limite de tolerância estabelecido para o ruído de impacto é 130 dB (linear). Caso não seja possível medir os níveis de ruído no circuito de impacto, as medições deverão ser realizadas no circuito de resposta rápida (FAST). Neste caso, o limite de tolerância passa a ser 120 dB (C).

2.2.2. Avaliação da exposição ocupacional ao ruído utilizando a dose diária

O ministério do trabalho por meio da FUNDACENTRO desenvolveu a norma de avaliação de ruído ocupacional, denominada NHO-01 – Norma de Higiene Ocupacional – que estabelece critérios e procedimentos para avaliação da exposição ao ruído ocupacional.

Um dos parâmetros estabelecidos pela norma para fins de avaliação da exposição ao ruído é a dose diária de exposição¹. Segundo a NHO-01, a dose diária é a exposição ao ruído relativa à jornada de trabalho diária, expresso em porcentagem de energia sonora, que tem como referência os limites de tolerância estabelecidos pela NR-15 (ver TAB. 1). Além destes critérios de referência, a norma NHO-01 considera o incremento de duplicação de dose igual a 3, enquanto a NR-15 considera incremento igual a 5.

Existem medidores integradores denominados dosímetros que registram a dose de ruído diária. Entretanto, este parâmetro pode ser calculado medindo-se os níveis de pressão sonoros e cronometrando o tempo de exposição a cada nível medido (SALIBA, 2008). Desta forma a dose diária pode ser calculada da seguinte maneira:

$$\text{DOSE DIÁRIA} = \left(\frac{C_1}{T_1} + \frac{C_2}{T_2} + \frac{C_3}{T_3} + \dots + \frac{C_n}{T_n} \right) \times 100 \quad [\%] \quad (2.1)$$

Onde:

C_n é o tempo diário que o funcionário fica exposto a um nível de ruído específico.

T_n é o tempo máximo de exposição permitido a este nível específico.

Se os valores dos níveis de ruído medidos forem intermediários aos valores constantes na TAB. 1, deve-se considerar o nível imediatamente superior.

¹ A norma estabelece que este parâmetro deve ser utilizado somente para avaliação de ruído contínuo ou intermitente.

Para avaliação de ruído ocupacional utilizando a Dose diária de ruído, considera-se 100% o valor de dose diária máxima permitida. Uma vez que este valor é excedido, medidas imediatas devem ser iniciadas para atenuar a exposição do trabalhador ao ruído. A norma NHO-01 determina também que a partir do valor de 50% da dose de ruído são necessárias ações preventivas que minimizem os danos à saúde do funcionário causados pela exposição ao ruído, bem como medidas que visem evitar que os níveis sonoros sejam elevados.

2.2.3. Ruído e Conforto

Além de um agente causador de danos à saúde, o ruído é causa de grande desconforto. A avaliação considerando este parâmetro pode ser bastante subjetiva, pois o incômodo causado por um tipo de ruído varia de indivíduo para indivíduo. O conforto de um local está relacionado com as suas condições ambientais, como temperatura, iluminação, umidade e ruído. A norma que regulamenta as condições ambientais do local de trabalho visando o conforto do trabalhador é a NR-17 - Ergonomia. Esta norma estabelece que as condições ambientais do local de trabalho devem estar adequadas às características psicofisiológicas dos trabalhadores e à natureza do trabalho a ser executado.

Para atividades que exijam solicitação intelectual e concentração constantes, como salas de controle, laboratórios, escritórios, são recomendadas as condições de conforto para ruído estabelecidas pela NBR 10152 (1987). Para locais que não apresentam equivalência na NBR 10152, o nível de ruído aceitável para condição de conforto é de 65 dB(A) e curva de avaliação de ruído (NC) 60.

No entanto, para diversas situações este nível de ruído é bastante elevado, como no caso de escritórios ou laboratórios. Acredita-se que este nível de ruído (65 dBA) tenha sido adotado devido à presença de computadores com ventiladores ruidosos na maioria dos escritórios da época da elaboração da NBR 10152 (1987). Considerando que atualmente os computadores pessoais são bem mais silenciosos, não existe motivo aparente para adoção de limite tão elevado, como 65 dB(A). É interessante ressaltar que neste caso o limite não foi estabelecido somente em função das características psicofisiológicas do trabalhador, ou da característica da atividade, mas também, em função da tecnologia disponível na época que as normas foram elaboradas.

TABELA 2: Níveis de ruído para conforto, estabelecidos pela NBR 10152, para diversos ambientes.

Locais	dB(A)	NC
HOSPITAIS		
Apartamentos, Enfermarias, Berçários, Centros cirúrgicos	35 - 45	30 - 40
Laboratórios, Áreas para uso do público	40 - 50	35 - 45
Serviços	45 - 55	40 - 50
ESCOLAS		
Bibliotecas, Salas de música, Salas de desenho	35 - 45	30 - 40
Salas de aula, Laboratórios	40 - 50	35 - 45
Circulação	45 - 55	40 - 50
HOTÉIS		
Apartamentos	35 - 45	30 - 40
Restaurantes, Salas de Estar	40 - 50	35 - 45
Portaria, Recepção, Circulação	45 - 55	40 - 50
RESIDÊNCIAS		
Dormitórios	35 - 45	30 - 40
Salas de estar	40 - 50	35 - 45
AUDITÓRIOS		
Salas de concertos, Teatros	30 - 40	25 - 30
Salas de conferências, Cinemas, Salas de uso múltiplo	35 - 45	30 - 35
RESTAURANTES	40 - 50	35 - 45
ESCRITÓRIOS		
Salas de reunião	30 - 40	25 - 35
Salas de gerência, Salas de projetos e de administração	35 - 45	30 - 40
Salas de computadores	45 - 65	40 - 60
Salas de mecanografia	50 - 60	45 - 55
IGREJAS E TEMPLOS (Cultos meditativos)	40 - 50	35 - 45
LOCAIS PARA ESPORTE		
Pavilhões fechados para espetáculos e atividades esportivas	45 - 60	40 - 55

Nota: O valor inferior da faixa representa, segundo a NBR-10152, o nível sonoro para conforto, enquanto que o valor superior significa o nível sonoro aceitável para a finalidade Fonte: NBR-10152

2.2.4. Programa de Prevenção de Riscos Ambientais - PPRA

Nas últimas décadas, a área da segurança e higiene do trabalho atua também através de medidas preventivas com o objetivo de preservar a saúde do trabalhador. Diante disto, instituiu-se uma norma que regulamentasse essas medidas preventivas quanto aos riscos ambientais, a NR-9 - Programa de Prevenção de Riscos Ambientais. Esta norma estabelece a obrigatoriedade da elaboração e implementação, por parte dos empregadores, do Programa de Prevenção de Riscos Ambientais – PPRA, “...visando à preservação da saúde e da integridade dos trabalhadores, através da antecipação, reconhecimento, avaliação e conseqüente controle da ocorrência de riscos ambientais existentes ou que venham a existir no ambiente de trabalho.(...)”²

SALIBA (2008) salienta que o PPRA é um programa de higiene ocupacional fundamental para a melhoria das condições ambientais e prevenção de doenças. O autor salienta, no entanto, muitos empregadores possuem uma visão equivocada do programa, transformando-o em um documento a ser apresentado ao auditor fiscal.

A elaboração do PPRA deverá envolver a participação do empregador, com o compromisso no cumprimento do programa como atividade permanente da empresa, e a participação dos empregados, colaborando e participando na execução do Programa.

A norma estabelece uma estrutura mínima que o programa deve conter:

- Planejamento anual com estabelecimento de metas, prioridades e cronograma;
- Estratégia e metodologia de ação;
- Forma de registro, manutenção e divulgação dos dados;
- Periodicidade e forma de avaliação do desenvolvimento do PPRA.

A norma determina, ainda, que deverá ser efetuada, pelo menos uma vez ao ano, ou quando necessário, uma análise global do PPRA para avaliação do seu desenvolvimento e realização dos ajustes necessários e estabelecimento de novas metas e prioridades.

Quanto ao desenvolvimento do Programa, a NR-9 estabelece as seguintes etapas:

- Antecipação e reconhecimento dos riscos;

² Trecho do Item 9.1.1 da Norma Regulamentadora NR-9.

- Estabelecimento de prioridades e metas de avaliação e controle;
- Avaliação dos riscos e da exposição dos trabalhadores;
- Implantação de medidas de controle e avaliação de sua eficácia;
- Monitoramento da exposição aos riscos;
- Registro e divulgação dos dados.

A etapa da antecipação atua na identificação dos riscos e adoção de medidas de controle na fase de instalação da fábrica ou estabelecimento. Na fase de reconhecimento, identificam-se quantitativamente os riscos ambientais em cada posto de trabalho, principais fontes geradoras, possíveis trajetórias e meios de propagação dos riscos, medidas de controle existentes, dentre outros.

Sempre que necessárias deverão ser realizadas avaliações quantitativas para comprovar o controle da exposição ou a inexistência de riscos identificados na etapa de reconhecimento, dimensionar a exposição dos trabalhadores, ou, subsidiar o equacionamento das medidas de controle.

A norma NR-9 estabelece que medidas de controle, que visam eliminar ou minimizar os riscos ambientais, devem ser adotadas nas seguintes circunstâncias:

- Identificação, na etapa de antecipação, de risco potencial à saúde;
- Constatação, na fase de reconhecimento, de risco evidente à saúde;
- Quando os resultados das avaliações quantitativas da exposição dos trabalhadores excederem os limites de tolerância previstos na NR-15 ou, na ausência destes os valores limites de exposição ocupacional adotados pela ACGIH, ou aqueles que venham a ser estabelecidos em negociação coletiva de trabalho, desde que mais rigorosos do que os critérios técnico-legais estabelecidos;
- Quando, por meio do controle médico da saúde, ficar caracterizado o vínculo causal entre danos observados na saúde os trabalhadores e a situação de trabalho a que eles ficam expostos.

A implantação das medidas de controle deverá seguir uma hierarquia que priorize as ações coletivas que eliminam ou reduzam a utilização ou a formação de agentes

prejudiciais à saúde. As medidas de caráter individual devem ser utilizadas somente quando for tecnicamente inviável a adoção de medidas coletivas ou quando estas não forem suficientes.

Segundo a norma, o monitoramento da exposição dos trabalhadores e das medidas de controle deverá consistir em avaliações sistemáticas e repetitivas, visando à introdução ou modificação das medidas de controle, sempre que necessário.

Avaliando a NR-9, nota-se que o estímulo à melhora do ambiente de trabalho através do reconhecimento e avaliação dos riscos ambientais, bem como a elaboração de medidas sistemáticas de controle são os principais focos da norma. Dentro deste contexto, o controle do ruído faz parte de um conjunto de medidas de melhoria e adequação às normas de salubridade do ambiente de trabalho.

2.3. Controle de Ruído

O controle do ruído compreende medidas que visam obter níveis de ruído aceitáveis ou confortáveis em determinado ambiente.

A redução do ruído pode ser alcançada através de soluções técnicas para atenuação de ruído no ambiente, ou então, caso a engenharia de controle de ruído não seja suficiente, pela adoção de equipamentos de proteção individual – EPIs – e/ou medidas administrativas, como por exemplo, a diminuição da jornada de trabalho, alternância de posto de trabalho, dentre outros.

As medidas de engenharia de controle de ruído podem reduzir o ruído na fonte, na trajetória ou no receptor. Pode-se optar por modificações nas máquinas, no ambiente de operação das mesmas, ou então, por modificações de layout. A escolha da melhor estratégia de controle de ruído envolve aspectos econômicos e sociais, e deve ser efetuada buscando encontrar a solução que resulte no melhor custo-benefício.

2.3.1. Controle do Ruído na Fonte

O controle de ruído na fonte consiste em diminuir a emissão sonora da mesma, através de modificações mecânicas no funcionamento do equipamento e tratamento acústico nos sistemas da máquina que geram o ruído.

Antes de propor modificações na fonte sonora, é necessário identificar os elementos responsáveis pela geração do ruído. A causa de grande parte dos problemas de ruído nos equipamentos são provenientes de impactos causados por acelerações e deformações bruscas (BISTAFA, 2006). Em geral, o ruído emitido por equipamentos é função de diversos fenômenos físicos que ocorrem durante seu funcionamento.

A partir da identificação dos causadores de ruído no equipamento, o controle do mesmo envolve diversas ações, como manutenção, substituição de materiais do equipamento, substituição de processos mecânicos e de geração de energia, etc. BORTONCELLO *et al* (2005), apresenta estudos de caso de tratamento de ruído em máquinas, identificando os causadores do ruído no equipamento e implementação das soluções mais viáveis. A partir da substituição de bombas de ar-vácuo acionadas por motor elétrico, por bombas acionadas por ar comprimido foram atenuados 3 dB(A) da emissão acústica do equipamento. Entretanto, outras medidas poderia ter sido conjugadas a esta para serem obtidos desempenhos mais efetivos na redução do ruído.

O controle de ruído por meio de medidas de engenharia são, geralmente, viáveis do ponto de vista técnico, apesar de muitas vezes serem complexas. No entanto, em muitos casos, os custos de implantação destas medidas são elevados, se tornando um obstáculo para implementação das mesmas (SUTTER³ apud SILVA 2006). Diante disto, são necessários planejamentos técnicos e financeiros para implantar medidas de engenharia de maneira eficaz.

2.3.2. Controle do Ruído na Trajetória de transmissão

O controle de ruído na trajetória adota medidas de atenuação que atuam no caminho de propagação do som, ou seja, entre a fonte sonora e o receptor. Sendo assim, é necessário

³ SUTER, A. H. The nature and effects of noise. *Encyclopedia of occupational health and safety*. v. VI. Geneva: ILO, 1998.

conhecer as possíveis transmissões do ruído da fonte ao receptor, como por exemplo, se o ruído está sendo transmitido pelo ar ou pelas estruturas de piso ou paredes.

Os métodos freqüentemente utilizados para atenuação do ruído na trajetória são:

- Aumentar a distância entre a fonte sonora e o receptor;
- Enclausuramento do equipamento ruidoso;
- Tratamento acústico das superfícies do ambiente (controle da reverberação);
- Barreiras acústicas;
- Separação de áreas ruidosas por divisórias.

Para escolher a opção mais eficiente no controle do ruído no meio de transmissão é necessário avaliar o campo sonoro onde a redução de ruído é desejável e os possíveis caminhos da propagação do som. Segundo BERANEK e VÉR (1992), para controlar o ruído no campo direto, ou seja, nos locais próximos à fonte sonora, a melhor opção é o uso de clausuras ou barreiras acústicas. No entanto, para reduzir no campo reverberante a medida de controle indicada é a utilização de materiais absorventes nas superfícies do ambiente, visando diminuir os níveis sonoros gerados pelas reflexões.

O enclausuramento de equipamentos, técnica bastante utilizada na prática, consiste em isolar o equipamento por uma clausura constituída por elementos com elevada capacidade de isolamento acústico. Devem-se ter cuidados especiais com os fechamentos de portas, janelas e frestas da clausura, pois estes elementos podem reduzir consideravelmente a eficácia do sistema. Estes elementos devem ser bem vedados para impedir a passagem do ruído do ambiente da clausura para o ambiente do receptor.

Outro aspecto a ser considerado no projeto de enclausuramento de um equipamento são as conexões rígidas, entre a máquina e o sistema. Este tipo de conexão permite a passagem do ruído e vibrações pela estrutura. Desta forma, deve-se procurar utilizar materiais flexíveis nestas ligações para amortecer, principalmente as vibrações da máquina. LAI *et al* (2002), apresentam resultados obtidos de experimentos que comparam diferentes sistemas de enclausuramento e de painéis amortecedores. No estudo de caso apresentado pelos autores, sistema de enclausuramento parcial instalado resultou numa redução de ruído em 5 dB(A) na posição do operador da máquina.

Entretanto, essa atenuação subiu para 12-19 dB(A) quando foi instalado um painel amortecedor para reduzir o ruído de impacto gerado pelo equipamento em estudo.

O enclausuramento em diversos casos resulta em atenuações de ruído satisfatórias, entretanto, em muitas situações, pode tornar-se inviável, pois pode dificultar ou inviabilizar a operação do equipamento. Em alguns casos, o enclausuramento parcial é uma boa opção quando não é possível o fechamento total do equipamento, no entanto, a perda por transmissão e absorção dos elementos de fechamento do sistema precisa ser bem maior para ter a mesma eficiência do enclausuramento total.

2.3.3. Controle do Ruído no Receptor

Quando a atenuação do ruído na fonte sonora ou na trajetória do ruído for tecnicamente inviável, pode-se adotar o controle de ruído no receptor.

O controle de ruído no receptor geralmente se restringe ao uso, pelos trabalhadores, de protetores auriculares. Por ser uma medida de caráter individual, além do desconforto e de dificultar a comunicação entre os usuários, a utilização dos protetores auditivos deve ser a última alternativa para o problema do ruído.

Os protetores auditivos são equipamentos de proteção individual que visam diminuir a dose de exposição ao ruído para o trabalhador. A eficiência do protetor e seu funcionamento dependem de suas características e das características do usuário (GERGES, 2000).

A escolha do tipo de protetor deve levar em consideração o tipo do ambiente ruidoso, o conforto, aceitação dos usuários, bem como custo e durabilidade. Os protetores de inserção podem ser auto-moldáveis, aqueles que são inseridos no ouvido e adquirem a forma do canal auditivo, ou então, ou pré-moldado, com formas que encaixam bem no canal auditivo.

Há também o protetor tipo Concha que, segundo GERGES, 2000, oferece uma atenuação de ruído maior que os protetores de inserção. Esta atenuação obtida está relacionada com a pressão que o protetor exerce sobre os dois lados da cabeça, entretanto seu custo é mais elevado.

Além destes tipos de protetores auriculares, estão disponíveis no mercado os protetores ativos. Estes protetores captam o som e emitem uma onda sonora igual ao som incidente no ouvido, porém com defasagem de 180° , implicando no cancelamento do som incidente. Este sistema é bastante eficiente para sons contínuos com frequências inferiores a 1.500 Hz. Como os demais protetores auriculares são eficientes nas frequências médias e altas, a solução de protetores do tipo concha com cancelamento ativo de ruído oferece excelente desempenho na redução da exposição ao ruído em diversas situações.

Ressalta-se que a eficiência da utilização do protetor auditivo como medida de controle de ruído está diretamente relacionada com a aceitação e conforto do usuário, pois o funcionário deve usar o protetor durante toda a jornada de trabalho para que a redução da dose de exposição ao ruído seja máxima.

3.

FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA APLICADA

3.1. Conceitos básicos.

As ondas sonoras são fenômenos ondulatórios que transportam energia acústica. A taxa de energia, por unidade de tempo, que passa através de uma unidade de área normal à direção de propagação da onda é denominada Intensidade Sonora, cuja unidade é W/m².

Para emissão em campo livre⁴, a intensidade sonora é definida como:

$$I = \frac{P^2}{\rho \cdot c} \quad (3.1)$$

Onde:

P é pressão sonora;

ρ é a densidade do meio

c é velocidade do som no meio. No ar, para condições normais de pressão e temperatura, c é aproximadamente 344 m/s.

⁴ O campo livre é um meio homogêneo, livre de barreiras ou superfícies de reflexão.

A intensidade sonora também está relacionada a uma propriedade da fonte sonora, a potência sonora. Esta característica da fonte independe do ambiente ou da distância do receptor, ou seja, ela é invariável. A potência sonora é a potência total que irradia em todas as direções da fonte, geralmente medidas em 1/1 bandas de oitava, e é o melhor descritor para emissão de energia sonora por uma fonte. Assim como a potência energética, a potência sonora também é medida em Watts, ou seja, energia (acústica) por unidade de área. Apesar de possuir a mesma unidade (Watts), os valores numéricos da potencia acústica tem efeitos bem diferentes da potência elétrica. Uma lâmpada incandescente com potência de 40 W emite uma luz “fraca”, no entanto uma fonte sonora com potência acústica de 40 W emite um som com alta amplitude,

TABELA 3: Valores Potência Sonora e Nível de Potência Sonora (*NWS*) típicos de algumas fontes sonoras

Fonte Sonora	Potência Sonora (Watts)	Nível de Potência Sonora (dB)
Conversaão	10^{-5}	70
Voz Humana, máximo	10^{-2}	100
Piano de Cauda	10^{-1}	110
Orquestra	100	140
Avião em decolagem	10^3-10^4	150-160

Fonte: VORLÄNDER, M. *Auralization*. Berlin: Springer, 2008. p.25.

Considerando uma fonte sonora pontual (esférica), em campo livre, tem-se a intensidade sonora em um ponto a uma distancia r da fonte igual a:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (3.2)$$

Para caracterizar uma fonte sonora é importante, além de determinar a potência sonora, conhecer sua diretividade. A distribuição da emissão sonora de uma fonte em função da direção é denominada diretividade. Geralmente é dada em função da posição angular ao redor do centro acústico da fonte e também em função da frequência.

Uma fonte sonora que irradia o som em todas as direções com mesma amplitude é denominada onmidirecional, por outro lado, fontes sonoras que emitem o som com intensidades diferentes, em função da direção, são chamadas direcionais. Desta forma,

para fonte onmidirecional, o nível de pressão sonora, a uma distancia r da fonte, será a mesma em todas as direções.

A diretividade pode ser limitada pelas superfícies de reflexão onde a fonte está apoiada. Esta grandeza é representada pelo fator de diretividade, Q dado por:

$$Q = \frac{I(\theta)}{I} \quad (3.3)$$

Onde:

$I(\theta)$ é a intensidade sonora na direção θ

I é a intensidade média, $W/4\pi r^2$

Na prática, quando a fonte sonora está instalada sobre uma superfície refletora, sobre o chão, por exemplo, Q é igual a 2. Quando a fonte está apoiada no chão e encostada em uma parede, Q é igual a 4, e se a mesma estiver instalada em um canto do ambiente, Q será igual a 8.

3.1.1. Níveis Acústicos

A faixa de valores de pressão sonora e intensidade sonora audíveis é muito abrangente, portanto utiliza-se uma escala logarítmica para trabalhar com estas grandezas. Desta forma o nível de intensidade acústica (NI) é dado por:

$$NI = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad [\text{dB}] \quad (3.4)$$

Onde:

I_0 é intensidade sonora no limite da audibilidade. Para o ar é igual a 10^{-12} W/m².

Utilizando as equações 3.1 e 3.4, define-se o nível de pressão sonora (NPS) como:

$$NPS = 10 \log \frac{P^2}{P_0^2} = 20 \log \frac{P}{P_0} \quad [\text{dB}] \quad (3.5)$$

Onde:

P_0 corresponde a pressão sonora no limiar da audibilidade, $P_0 = \rho \cdot I_0 \cdot c = 2,0 \times 10^{-5}$ N/m²

Com base no NPS, é possível estabelecer o nível de pressão sonora equivalente contínuo (L_{eq}) que consiste no nível de pressão sonora médio durante um intervalo de tempo T . Desta maneira o nível de pressão sonora equivalente contínuo é determinado segundo a equação 3.6.

$$L_{eq,T} = 10 \log \left\{ \left[\left(\frac{1}{T} \right) \int_{t_2}^{t_1} P^2(t) dt \right] / P_0^2 \right\} \quad [\text{dB}] \quad (3.6)$$

Além dos níveis NI e NPS, define-se também o nível de potência sonora (NWS):

$$NWS = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad [\text{dB}] \quad (3.7)$$

A grandeza em escala logarítmica para avaliar a diretividade da fonte sonora e a influência das superfícies refletoras, onde esta se encontra apoiada, é índice de diretividade dado como:

$$DI = 10 \log Q \quad [\text{dB}] \quad (3.8)$$

3.2. Comportamento do som em ambientes fechados.

Para avaliar o problema do ruído em uma indústria e propor medidas de controle, é necessário entender como o som se comporta em um recinto fechado. Para isso, diversas variáveis, como geometria do ambiente, absorção, reflexão e características das fontes sonoras, devem ser analisadas, assim como as relações estabelecidas entre elas.

3.2.1. Propagação do som em campo livre

Em campo livre, onde predomina o som direto da fonte, livre de reflexões, as relações numéricas entre a intensidade, potência e pressão sonora são dadas pelas equações 3.1 e 3.2.

Definindo a densidade de energia acústica como:

$$E = P^2 / \rho_0 c^2 \quad (3.9)$$

Onde:

P^2 é a pressão sonora efetiva

A densidade de energia produzida por uma fonte sonora omnidirecional em campo livre é dada por:

$$E_d = \frac{W}{4\pi r^2 c} \quad (3.10)$$

Considerando o efeito da diretividade da fonte, a intensidade sonora passa a ser igual a $(W/4\pi r^2) \cdot Q$, portanto a densidade de energia torna-se:

$$E_d = \frac{WQ}{4\pi r^2 c} \quad (3.11)$$

3.2.2. Propagação do som no ambiente fechado

Quando uma fonte sonora, dentro de um recinto, opera continuamente, o que impede que a pressão sonora cresça infinitamente são a absorção das superfícies do ambiente e a absorção do ar. Usualmente, para a avaliação do som em recintos, desconsidera-se a absorção do ar, desta forma, somente a absorção das superfícies influencia no incremento e no valor máximo da pressão sonora. Em um local com alta absorção sonora, o estado estacionário da energia acústica é atingido rapidamente, nestes ambientes predominam o som direto da fonte. Por outro lado, em ambientes com pouca absorção um tempo bem maior é necessário para que a amplitude da pressão sonora atinja o valor máximo. Nestes ambientes os sons produzidos pelas reflexões são predominantes (KINSLER *et al.*, 1999).

O som produzido pela fonte sonora é emitido em várias direções. Ao atingir uma superfície parte do som é absorvida e parte é refletida. Após inúmeras reflexões a sala torna-se difusa. Exceto nos locais próximos à fontes ou às superfícies absorventes, para efeito de análise, pode-se assumir que a densidade de energia \mathcal{E} é a mesma em todo o espaço e todas as direções de propagação são igualmente prováveis. Assumindo esta condição, KINSLER *et al.* (1999) estabelece as seguintes relações para determinar a intensidade sonora no campo difuso.

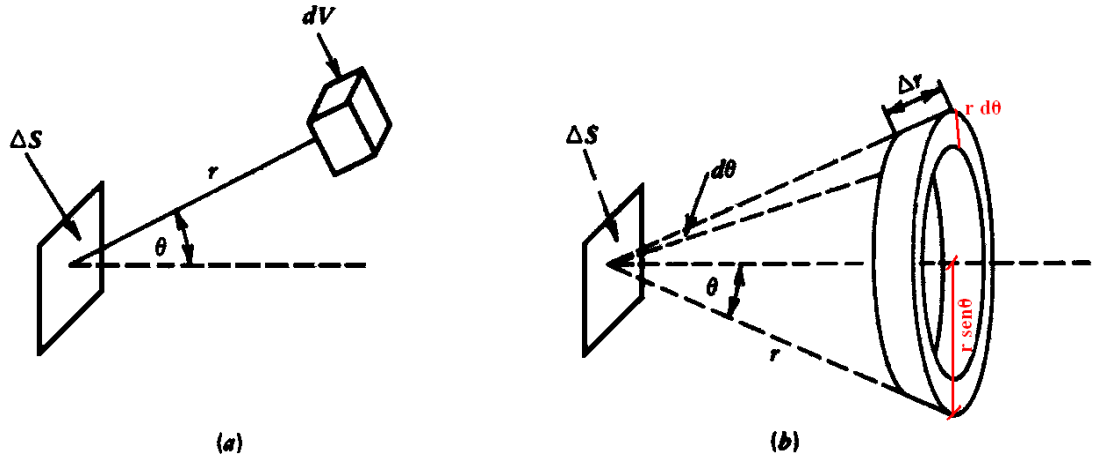


FIGURA 1: Desenho esquemático das definições do volume dV e da superfície ΔS , utilizados na derivação para a determinação da intensidade sonora do campo difuso. Adaptado de KINSLER *et al.*(1999).

Considerando, para este modelo, que a densidade de energia acústica \mathcal{E} é uniforme, a energia acústica presente em dV é $\mathcal{E}dV$. Sendo a projeção do elemento de área na esfera de raio r , é igual a $\Delta S \cos \theta$ e a área da esfera $4\pi r^2$, a razão $\Delta S \cos \theta / 4\pi r^2$ representa a fração de área com incidência direta da energia $\mathcal{E}dV$ incidente em dS por transmissão direta.

Desta forma, parte da energia em dV que incide em ΔS , ΔE , é dada por:

$$\Delta E = (\mathcal{E}dV / 4\pi r^2) \Delta S \cos \theta \quad (3.12)$$

Supondo, agora, que dV é parte de uma esfera de espessura Δr e raio r com centro em ΔS (FIG. 1-b), tem-se $dV = 2\pi r \sin \theta \Delta r r d\theta$, onde $2\pi r \sin \theta$ é o perímetro da circunferência, $r d\theta$ a base do anel e Δr a espessura. Desta forma, a equação 3.12 torna-se:

$$\Delta E = \frac{\mathcal{E} \Delta S \Delta r}{2} \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta = \frac{\mathcal{E} \Delta S \Delta r}{4} \quad (3.13)$$

Considerando que $\Delta t = \Delta r / c$ é o intervalo de tempo necessário para a energia chegar até a superfície, a equação 3.13 pode ser reescrita como:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{E \Delta S c}{4} \quad (3.14)$$

Logo a razão dE/dt por unidade de área é dada por:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{E c}{4} \quad (3.15)$$

Se a absorção total das superfícies da sala é A , a parte da energia absorvida é definida por $A \mathcal{E} c/4$. A energia absorvida pelas superfícies somada à parcela $V d\mathcal{E}/dt$ é igual a potência gerada na sala. A equação diferencial abaixo determina os valores da energia sonora na sala

$$V \frac{dE}{dt} + \frac{Ac}{4} E = W \quad (3.16)$$

Onde:

W é a potência gerada no ambiente

$V dE/dt$ é a parcela que representa a energia refletiva e a energia que continua sendo gerada no ambiente e

$A E c/4$ representa a energia sonora absorvida.

Estabelecendo a condição $t = 0$, a solução da equação 3.16 é:

$$E = (4W/Ac)(1 - e^{-t/\tau_E}) \quad (3.17)$$

$$\tau_E = 4V/Ac \quad (3.18)$$

Onde:

τ_E é a constante do tempo.

Se o ambiente tem um volume grande e uma absorção total pequena, τ_E será maior e um tempo relativamente longo será necessário para que a densidade de energia atinja seu valor limite, portanto a parcela $(1 - e^{-t/\tau_E})$ da equação 3.17 pode ser desconsiderada. Desta forma, a densidade de energia final⁵ estabilizada é dada por:

⁵ Energia do campo difuso (reverberante).

$$E(\infty) = 4W(\infty)/Ac \quad (3.19)$$

A partir da equação 3.19, estabelece-se a relação abaixo entre pressão sonora e potência sonora, no estado estacionário, onde $t > 4V/Ac$:

$$W(\infty) = \frac{\bar{P}^2 A}{4\rho c} \quad (3.20)$$

Onde:

\bar{P}^2 é a pressão acústica média quadrática.

A partir da equação 3.9, a densidade de energia do campo reverberante é igual a

$$E(\infty) = P_r^2(\infty)/\rho_0 c^2 = 4W(\infty)/Ac \quad (3.21)$$

Onde:

P_r é a pressão sonora no campo reverberante.

A é a absorção total do ambiente, definida como $S\bar{\alpha}$, sendo $\bar{\alpha}$ o coeficiente de absorção médio das superfícies do ambiente.

A potência sonora definida em 3.20 é a potencia sonora remanescente após as primeiras reflexões (REYNOLDS, 1981). Portanto:

$$W(\infty) = W(1 - \bar{\alpha}) \quad (3.22)$$

Onde:

O fator $(1 - \bar{\alpha})$ representa a influência da absorção na potência do campo reverberante

Desta forma, a densidade sonora no campo reverberante torna-se

$$E(\infty) = \frac{4W}{Rc} \quad (3.23)$$

Onde

R é a constante de absorção da sala igual a $\frac{S\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}$.

KINSLER *et al.* (1999) ressaltam que este modelo se aplica somente para o caso de campo sonoro difuso e, portanto, existem algumas limitações. A equação diferencial

3.16, só poderá ser utilizada quando houver decorrido tempo suficiente para acumular reflexões que caracterizem o campo reverberante. O modelo descrito acima não pode ser aplicado, por exemplo, em ambientes com geometria esférica, uma vez que nestes ambientes as ondas sonoras são refletidas para o centro do ambiente, não mantendo a condição de campo sonoro difuso.

3.3. Predição dos níveis pressão sonora utilizando a potência sonora

Conhecendo as características da fonte sonora e do ambiente em que a mesma se encontra, é possível prever o nível de pressão sonora em determinado ponto do ambiente. Isto pode ser de grande utilidade para o controle de ruído, permite, por exemplo, determinar o nível de ruído no ambiente com a instalação de novas máquinas, antes mesmo que estas sejam instaladas.

O nível de pressão sonora em um determinado local no ambiente depende da distância da fonte e das características acústicas do local, bem como do índice de diretividade.

Sendo a densidade de energia total em um ambiente definida pela soma da densidade de energia no campo livre e a densidade de energia no campo reverberante (REYNOLDS, 1981). Tem-se:

$$E_{\text{total}} = \frac{WQ}{4\pi \cdot r^2 c} + \frac{4W}{R \cdot c} \quad (3.24)$$

Onde:

A primeira parcela representa a densidade de energia acústica no campo livre, definida pela equação 3.11;

E a segunda parcela, representa a densidade de energia do campo reverberante, definida pela equação 3.23.

Substituindo a densidade sonora pela pressão sonora definida na equação 3.9, tem-se

$$\frac{P^2}{\rho \cdot c^2} = \frac{WQ}{4\pi r^2 c} + \frac{4W}{R \cdot c} \quad (3.25)$$

A partir da equação $I = P^2/\rho.c = W/S$, onde S é a área da fonte, obtêm-se $P^2 = \rho.cW/S$. Logo:

$$P_0^2 = \frac{\rho.cW_0}{S_0} \quad (3.26)$$

Onde:

S_0 , para medidas métricas, é igual a 1 m^2 .

Desta forma, a equação 3.25 dividida por P_0 é igual a:

$$\frac{P^2}{P_0^2} = \frac{W}{W_0} \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (3.27)$$

Utilizando as definições das equações 3.5 e 3.7, tem-se:

$$NPS = NWS + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (3.28)$$

Para compreender o melhor significado físico da equação 3.28, a FIG. 2 apresenta o gráfico que analisa a equação escrita como $NPS - NWS = 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$, em função da distância r , com diferentes valores de Q e R .

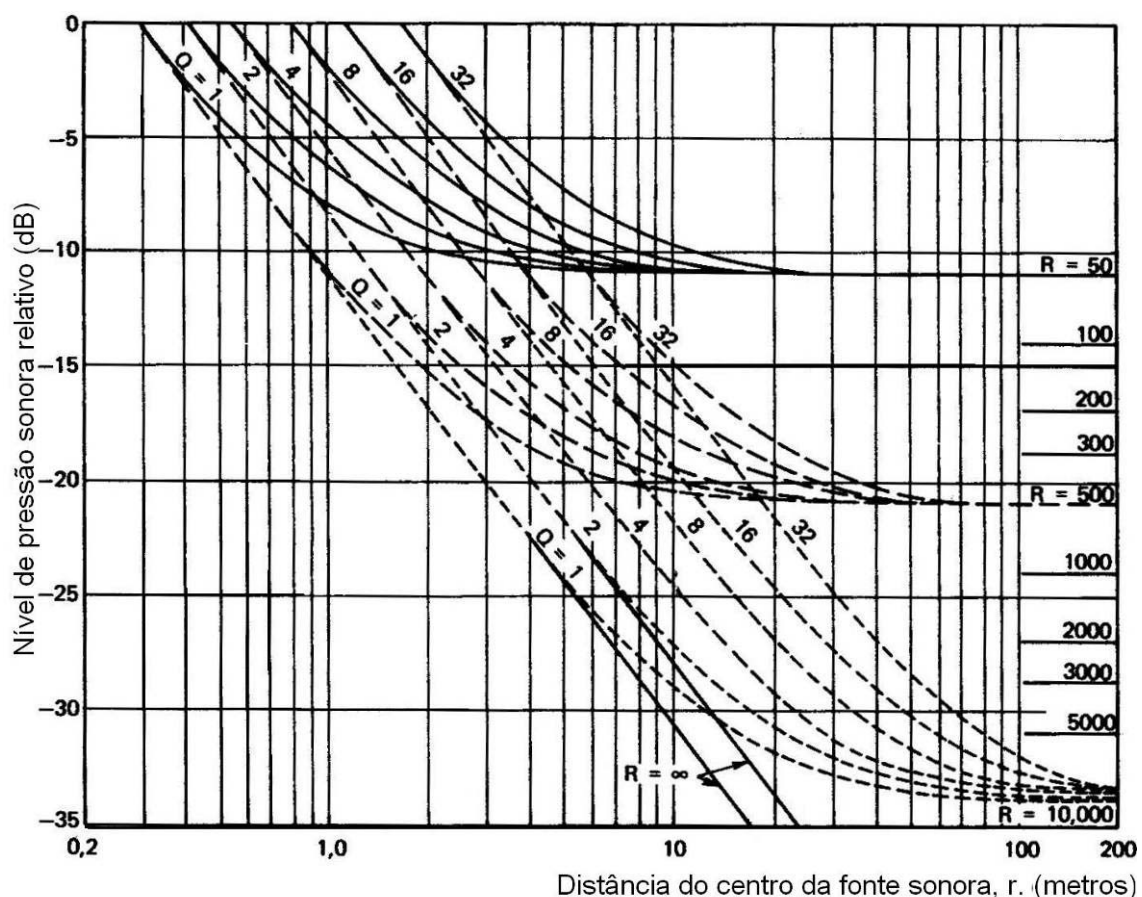


FIGURA 2: Nível de pressão sonora em função da distância da fonte sonora, com diferentes valores de R e Q . (HASSALL e ZAVERI, K., 1988).

Analisando o gráfico e a equação 3.28, observa-se que quando $R = \infty$ (absorção total) e $Q = 1$ (fonte sonora suspensa e não direcional) tem-se a situação de campo livre, portanto a variação NPS é linear.

Através do gráfico é possível avaliar, também, outras situações. Considerando o caso onde $R = 500$ e $Q = 2$, observa-se que até a distância $r = 1$, o NPS tem os mesmos valores para $R = \infty$, ou seja, a propagação do som está em campo livre e as características da sala não têm influência nos valores de NPS. Já a partir de 10 m, os valores de NPS se tornam praticamente constantes. Portanto, para alterar os valores de NPS é necessário variar a quantidade de absorção no ambiente. Conclui-se, portanto que quando um operador de uma máquina trabalha muito próximo a ela, não é beneficiado pela absorção do ambiente. Entretanto, ao se distanciar do equipamento, o NPS tem uma redução de 3 dB ao dobrar a constante de absorção da sala, R . (HASSALL e ZAVERI, 1988)

Em relação ao fator de diretividade da fonte sonora, em campo livre, tem-se ao dobrar o valor de Q , o NPS aumenta em aproximadamente 3 dB, para uma mesma distância e absorção. No entanto, ao atingir o campo reverberante, os valores de NPS não se alteram com a variação de Q .

Desta forma, a absorção do ambiente influencia os valores dos níveis sonoros para os pontos localizados no campo reverberante, enquanto a diretividade da fonte sonora atua nas situações de campo livre.

3.4. Determinação da potência sonora utilizando dados de pressão sonora

A potência sonora de máquinas e equipamentos pode ser determinada de acordo com as normas ISO 3740-3747, a partir de dados de níveis de pressão sonora. Segundo HASSALL e ZAVERI (1988), somente os dados dos níveis de pressão sonora não são suficientes para determinar a potência sonora de um equipamento, que depende também da distância entre o receptor e fonte sonora, bem como, das características do ambiente.

3.4.1. Determinação da Potencia Sonora segundo a norma ISO 3746

A norma ISO 3746 descreve o método para determinar a potência sonora em ambientes externos ou em caso de máquinas com dimensões maiores que 15 m, portanto, onde a contribuição do campo reverberante nas medições da pressão sonora é pequena comparada com a influência do campo direto. Utilizando este método, é possível obter bons resultados também para ambientes volumosos ou em ambientes pequenos com superfícies absorventes nos tetos e paredes. (HASSALL e ZAVERI, 1988)

As normas que descrevem os métodos para determinar a potência sonora de um equipamento parte da premissa de que a potência emitida por uma dada fonte é diretamente proporcional ao quadrado da pressão sonora sobre uma superfície hipotética que delimita a fonte. Desta forma, três dados são necessários para determinar a potência sonora: o volume que delimita a fonte sonora sob teste, o qual a norma chama de “caixa de referência”; os dados de medição de nível de pressão sonora em pontos determinados

pela norma; e a superfície de medição, relacionada com as dimensões da fonte e com a distância entre o microfone e a mesma.

Caixa de Referência

A caixa de referência é a delimitação do volume da fonte sonora em estudo. Ressalta-se que na delimitação deste volume, devem-se considerar somente os elementos da fonte que emitem energia sonora, aqueles que não são significantes na radiação do som, são desconsiderados.

Superfície de medição

As superfícies de medição são delimitadas pelas posições do microfone de medição dos níveis de pressão sonora. Em geral, a superfície de medição pode ser delimitada em forma hemisférica, semi-hemisférica ou um quarto de hemisfério de raio r ; bem como em forma de paralelepípedo retangular, com lados paralelos aos lados do volume da fonte sonora.

Delimitando a superfície de medição como um paralelepípedo, suas dimensões são determinadas conforme a FIG. 3 abaixo.

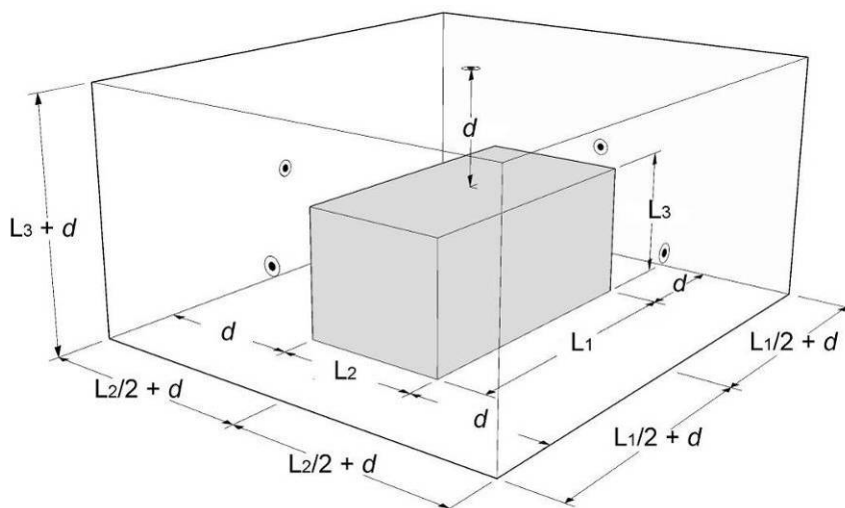


FIGURA 3: Dimensões da superfície de medição. O volume ao centro representa o volume da fonte sonora em estudo.

Onde L_1 , L_2 e L_3 são, respectivamente, comprimento, largura e altura da fonte sonora, e d a distância entre o microfone de medição e a superfície da fonte.

Sendo assim, a área da superfície de medição total para uma fonte sonora sob uma superfície de reflexão, segundo a norma ISO 3746, é dada por:

$$S = 4(ab + bc + ac) \quad (3.29)$$

Onde

$$a = L_1/2 + d$$

$$b = L_2/2 + d$$

$$c = L_3 + d$$

Determinação dos pontos de medição

Cada plano da superfície de medição deve ser subdividida obtendo o menor número possível de subáreas com dimensões menores que $3d$, ver FIG. 4. Na figura abaixo, os pontos de medição são representados pelos pontos no centro das subáreas e pelos cantos que delimitam estas áreas, exceto os pontos que encontram a superfície refletora.

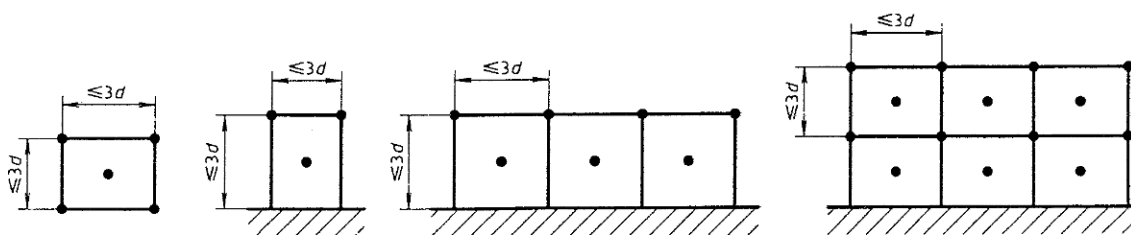


FIGURA 4: Posições do microfone que delimitam as subáreas da superfície de medição. ISO 3746

A distância entre a superfície da fonte e o microfone, d , deve ser maior que 0,15 m, no entanto a norma sugere a distância de 1m.

Desta maneira, os pontos de medição são definidos em função das dimensões da fonte e da distância do microfone, conforme FIG. 5 a FIG. 8 .

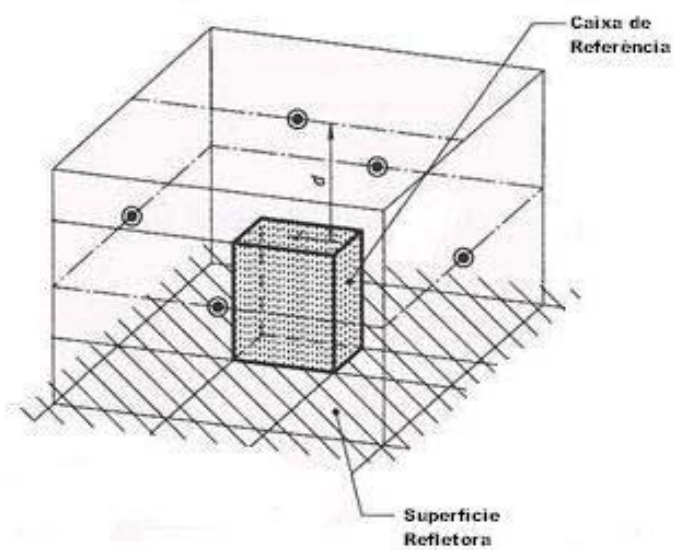


FIGURA 5: Posições do microfone para medição de fontes sonoras pequenas. ISO 3746

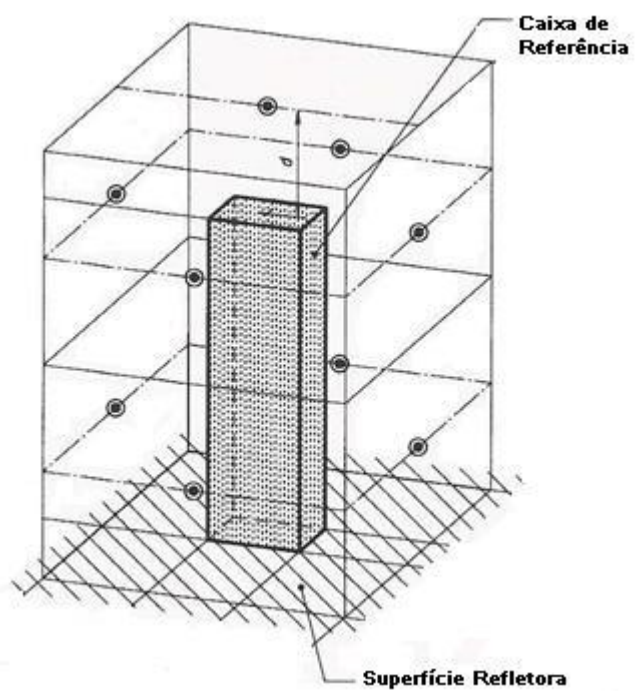


FIGURA 6: Posições do microfone para medição fontes sonoras altas. ISO 3746

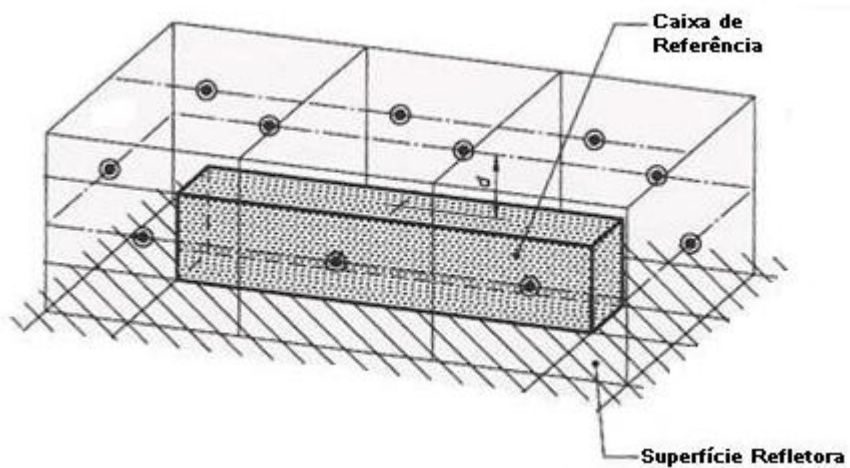


FIGURA 7: Posições do microfone para medição fontes sonoras longas.
ISO3726

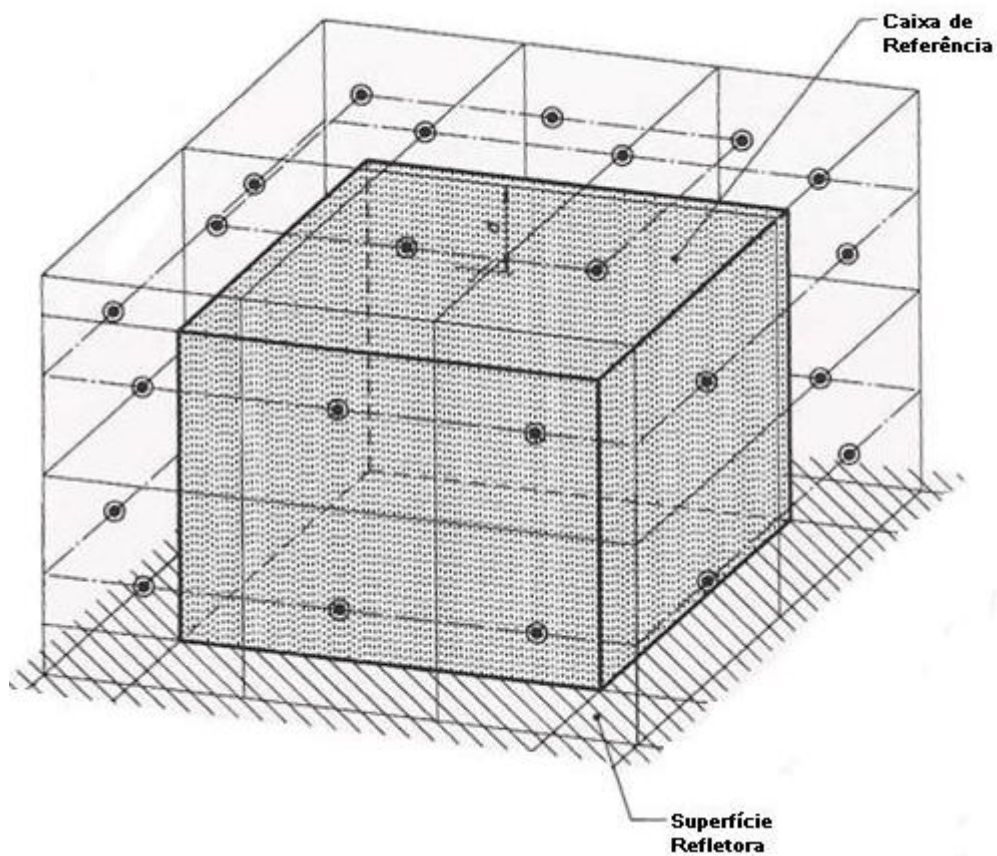


FIGURA 8: Posições do microfone para medição fontes sonoras grande. ISO3746

Medição dos níveis de pressão sonora.

Em cada posição de microfone, deve-se medir o nível de pressão sonora, na curva de ponderação A, por um período que depende do tipo de ruído gerado pela fonte. Para fontes emissoras de ruído contínuo, a norma ISO 3746 determina um período mínimo de 30s.

Obtidos os níveis de pressão sonora em cada ponto, um NPS médio da fonte sonora é determinado da seguinte maneira:

$$\overline{NPS}_A = 10 \log \left[\frac{1}{S} \sum_{i=1}^n S_i 10^{0,1NPS_{Ai}} \right] \quad (3.30)$$

Onde:

\overline{NPS}_A é a média dos níveis de pressão sonora obtidos nas medições

NPS_{Ai} é o nível de pressão sonora global, ponderado na curva A, na *i*ésima posição do microfone

S_i é a área da superfície referente à *i*ésima posição do microfone

S é a área total da superfície de medição

n é o número de pontos de medição.

Se o nível obtido não for maior que o Ruído de Fundo em 10 dB(A), um fator de correção deverá ser utilizado para ajustar o resultado. Caso o \overline{NPS}_A não seja maior que o Ruído de Fundo em 3 dB(A), a qualidade do resultado ficará comprometida.

Determinação da Potencia Sonora da Fonte

Após obter os níveis de pressão sonora dos pontos de medição e a média logaritma destes valores, o nível de potência sonora é determinado conforme a equação 3.31.

$$NWS_A = \overline{NPS}_A + 10 \log \left(\frac{S}{S_0} \right) \quad (3.31)$$

Onde:

NWS_A é o nível de potência sonora da fonte

S_0 é igual a 1 m²

3.5. Simulação de campo sonoro

A utilização de softwares de simulação acústica são ferramentas importantes no estudo e avaliação de ambientes. A simulação permite predizer o campo sonoro de uma sala antes mesmo dela ser construída, ou, predizer níveis acústicos ao instalar equipamentos ruidosos no ambiente.

Os programas de simulação mais utilizados atualmente se fundamentam na acústica geométrica, que pode ser associada à óptica geométrica. A acústica geométrica se baseia no conceito de raios sonoros. Estes raios representam a onda esférica com um ângulo infinitamente pequeno, e assim como a onda sonora, carregam a energia acústica e podem ser refletidos, refratados e difratados. A modelagem baseada na acústica geométrica é uma simplificação dos métodos analíticos e fornece uma descrição do campo sonoro que se reduz a energia acústica, tempo de transição e direção dos raios. No entanto, os métodos geométricos fornecem aproximações bastante aceitáveis e viabilizam o processamento em computadores, uma vez que os métodos numéricos geram tempos consideravelmente longos para processar as soluções procuradas.

Os métodos geométricos mais utilizados em softwares comercializados atualmente são o Método das Fontes Virtuais, Método do Traçado dos Raios ou a combinação de ambos, denominado Método Híbrido. (JUNIOR, 2005; PORTELA, 2008; VORLÄNDER, 2008)

3.5.1. Método das Fontes Virtuais

A característica importante do método das fontes virtuais é a maneira utilizada para modelar as reflexões do som proveniente de uma fonte sonora. Este método considera as superfícies refletoras do ambiente como espelhos. As fontes sonoras inseridas no ambiente são espelhadas em relação a todas as superfícies, criando as imagens das fontes, sendo estas, fontes virtuais de primeira ordem. As fontes virtuais de primeira ordem são espelhadas novamente e assim sucessivamente, criando fontes virtuais de ordens maiores. A característica especular do ambiente permite rastrear o caminho dos raios sonoros da fonte ao receptor, ou o caminho inverso, do receptor para a fonte. (VORLÄNDER, 2008)

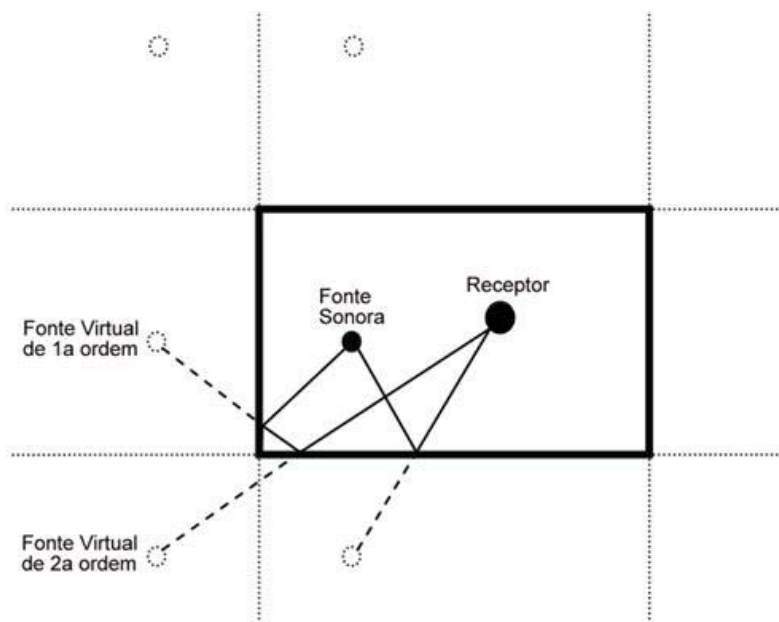


FIGURA 9: Esquema das fontes virtuais. PORTELA (2008).

Sendo \vec{F} a posição da fonte sonora, \vec{F}_n a posição da fonte virtual, \vec{n} o vetor unitário normal ao plano da parede e \vec{r} o vetor entre o ponto no plano, \vec{A} , e a fonte sonora, o produto escalar de \vec{n} e \vec{r} resulta na distância entre a parede e a fonte sonora, \bar{d} (Ver FIG. 10)

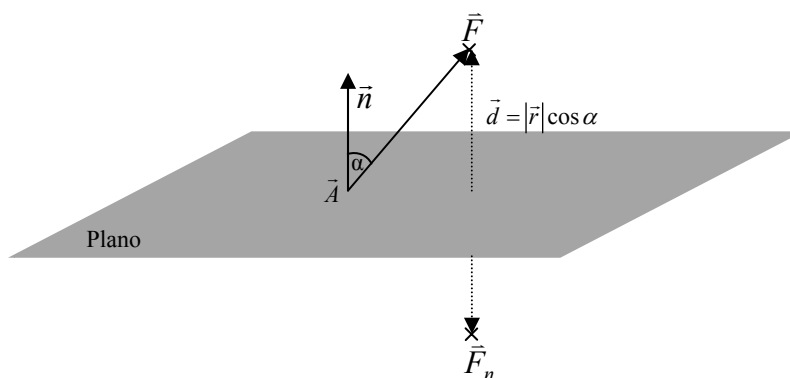


FIGURA 10: Construção das fontes virtuais. Adaptado de VORLÄNDER (2008).

Conhecendo a distância d , obtêm a posição da fonte virtual, conforme equação 3.32:

$$\vec{F}_n = \vec{F} - 2dn \quad (3.32)$$

Após um conjunto de fontes virtuais serem criadas, um teste chamado de “teste de audibilidade” (VORLÄNDER, 2008), ou “de visibilidade”, deve ser realizado. Este teste consiste em checar a relevância de cada fonte virtual um ponto receptor específico. Para verificar se o receptor é “visível” para uma fonte virtual, traça-se o caminho contrário a propagação do som, ou seja, do receptor para a fonte sonora, passando por toda a cadeia de fontes virtuais criadas.

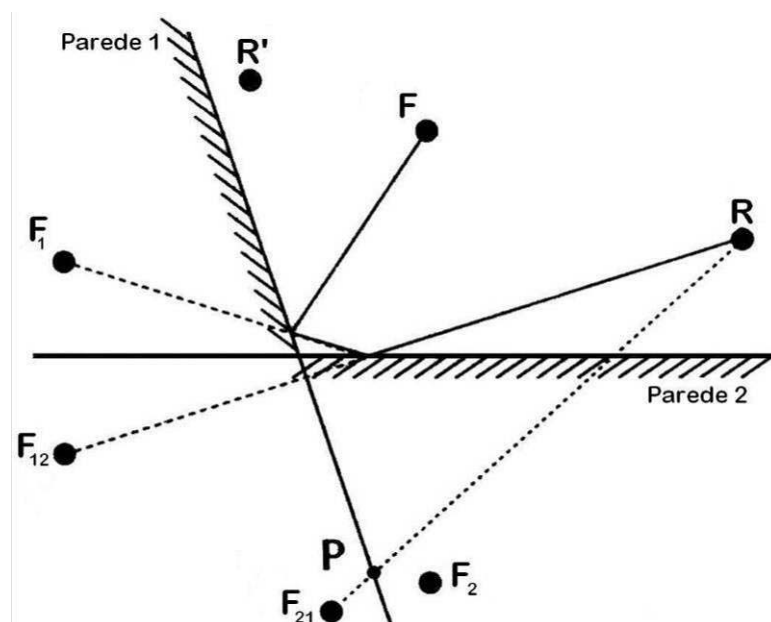


FIGURA 11: Teste de visibilidade. F representa as fontes virtuais e R os receptores. Os índices indicam as paredes que refletiram os raios. O número de incidências denota a ordem da fonte virtual. VORLÄNDER (2008).

Para a programação destas ferramentas foi necessário desenvolver procedimentos para criar algoritmos para o teste de visibilidade. Este procedimento é realizado da seguinte maneira: um segmento de reta é traçado entre a fonte virtual e o receptor. Se o ponto de encontro entre este segmento de reta e a linha da última parede a espelhar a fonte estiver dentro dos limites do contorno do ambiente, esta fonte é visível para o receptor.

7Conforme demonstrado na FIG. 11, o caminho do receptor R está conectado à fonte virtual, F_{12} , onde o último índice indica que a última parede a ser tocada foi a parede 2. Portanto, se a interseção entre a linha do caminho do receptor, $\overline{RF_{12}}$, e a linha da parede 2 estiver localizada dentro dos limites do polígono de contorno do ambiente, a fonte virtual F_{12} é audível para R. Por outro lado, analisando a fonte F_{21} , para a qual a parede 1 foi a última a ser tocada, observa-se que esta não é audível para R, pois a linha $\overline{RF_{21}}$ intercepta o segmento da parede 1 fora do polígono que delimita o ambiente (Ponto P). (VORLÄNDER, 2008).

O teste de audibilidade prolonga consideravelmente o tempo de processamento computacional do modelo, principalmente quando o ambiente em estudo possui muitas superfícies e geometria irregular, ou então, quando o coeficiente médio de absorção é muito baixo (VORLÄNDER, 2008).

3.5.2. Método do Traçado dos Raios

O Método do Traçado dos Raios associa a onda sonora a raios luminosos e a fonte sonora a uma fonte luminosa. Este modelo parte do princípio que uma fonte sonora irradia o som através de raios com a velocidade do som em diversas direções. A energia sonora de cada raio é a energia sonora da fonte dividida pelo número de raios. Ao tocar uma superfície, o raio é refletido, e devido a absorção da superfície, ele perde parte da sua energia. O raio é refletido diversas vezes até atingir uma energia mínima pré-determinada, quando ele é eliminado. (VORLÄNDER, 2008).

Ao passar por um receptor, a energia do raio e o tempo decorrido desde a sua radiação são registrados. Desta forma, o campo sonoro naquele ponto é a soma das intensidades dos raios que “passam” por ele (Ver FIG. 12 e FIG 13).

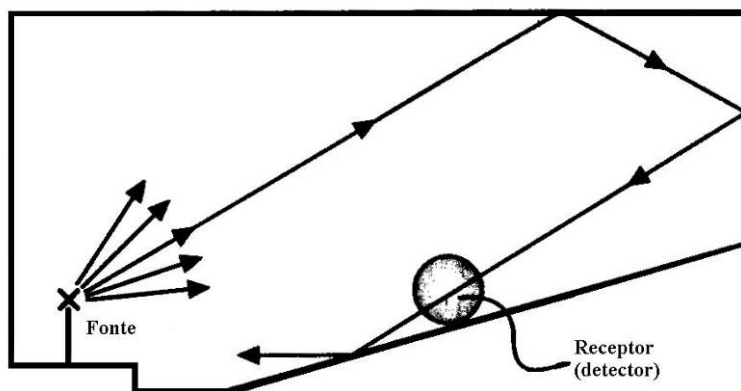


FIGURA 12: Traçado dos raios sonoros da fonte ao receptor. VORLÄNDER, (2008)

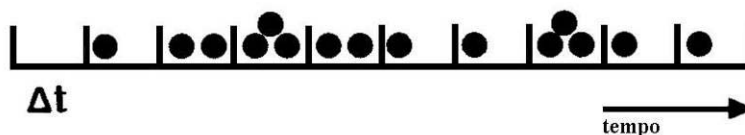


FIGURA 13: Histograma: a resposta ao impulso da sala é determinada a partir da contagem de eventos. Cada ponto é a energia detectada pelo receptor em função do tempo. VORLÄNDER, (2008)

As fontes sonoras são caracterizadas por sua potência sonora e diretividade, entretanto no modelo do traçado dos raios utiliza-se apenas a posição da fonte e a direção de referência (no eixo). Para modelar a diretividade podem ser escolhidas direções específicas para partículas com densidades de energia diferentes (VORLÄNDER, 2008).

3.5.3. Método híbrido

Alguns softwares combinam os métodos das Fontes Virtuais e do Traçado dos Raios buscando obter bons resultados e processamento mais rápido. A chave na combinação destes dois métodos é o modelo escolhido para realizar o teste de audibilidade. Sendo que, se um raio passa pelo receptor, a fonte virtual correspondente do mesmo deve ser audível. (VORLÄNDER, 2008).

O programa ODEON, que será utilizado para simulações no presente trabalho, utiliza o método híbrido, sendo o método das fontes virtuais utilizado até a segunda ordem e

partir de então, o traçado dos raios. No traçado dos raios, é acrescentado o efeito de espalhamento. A direção do raio é determinada pela soma do vetor especular, com tamanho $(1-s)$, e o vetor de espalhamento, de tamanho s . Se o coeficiente é igual 0, o raio será refletido na direção especular. Se o coeficiente de espalhamento for igual a 1, o raio é refletido em uma direção aleatória (CHRISTENSEN; RINDEL, 2005).

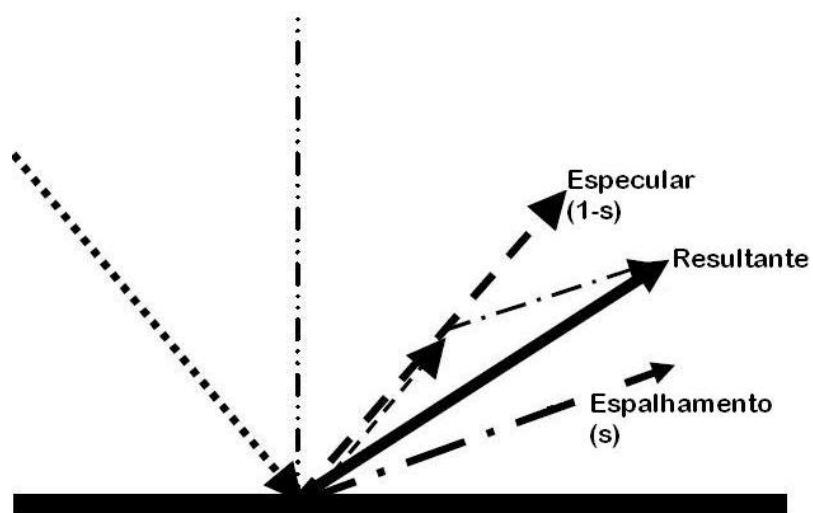


FIGURA 14: Reflexão baseada no espalhamento. Neste caso, a superfície tem um coeficiente de espalhamento igual a 0,5. CHRISTENSEN; RINDEL (2005)

4.

METODOLOGIA

A metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho de pesquisa visou fornecer subsídios para caracterizar o ruído no ambiente, relacionando o ruído proveniente dos equipamentos ruidosos com os níveis de pressão sonora nas estações de trabalho. Paralelamente, foram determinados os potenciais níveis de atenuação de ruído nos equipamentos, com o intuito de predizer o ruído nas estações de trabalho com os equipamentos tratados acusticamente, bem como quantificar os custos dos tratamentos acústicos e avaliar os benefícios alcançados com o controle do ruído.

Desta forma, os procedimentos adotados no trabalho estão discriminados a seguir:

- Identificação das Fontes de Ruído.
- Determinação da potência sonora dos equipamentos ruidosos.
- Medição dos níveis sonoros nos postos de trabalho.

- Simulação computacional utilizando as potências acústicas encontradas no item anterior, ajustando resultados virtuais com os valores medidos nos postos de trabalho.
- Estudo da contribuição de cada fonte de ruído no nível sonoro dos postos de trabalho.
- Identificação das possíveis atenuações acústicas a serem obtidas em cada equipamento.
- Simulação computacional com as potências sonoras dos equipamentos com níveis de ruído reduzidos através de tratamento acústico.
- Estabelecer correlação entre custos de tratamento acústico dos equipamentos e as reduções dos níveis de ruído nos postos de trabalho.
- Estabelecer estratégias para um programa de tratamento acústico de ruído no ambiente estudado.

4.1. Equipamentos utilizados

Para a realização deste trabalho foram realizadas medições acústicas das emissões sonoras dos equipamentos e dos níveis acústicos nos postos de trabalho do estudo de caso em questão. Os equipamentos utilizados para a realização destas medições foram:

- Analisador de Freqüências e Integrador Sonoro em Tempo Real, marca 01dB-Stell, modelo SOLO MVI;
- Microfone marca GRAS, modelo MCE 212;
- Pré-amplificador marca 01dB-Stell, modelo PRE21S;
- Calibrador de nível de pressão sonora marca 01dB, modelo CAL21, número de série 51231378, classificado como do tipo 1, conforme padrões estabelecidos pela norma IEC-60942, com precisão de $\pm 0,3\text{dB}$ e com variação de $\pm 2\%$ na freqüência de emissão de 1.000Hz.

Esses equipamentos são classificados como do tipo 1 (um), conforme padrões estabelecidos pelas normas IEC 651, IEC 804, IEC 61672-1, IEC 1260, ANSI S1.11.

Na época da realização das medições, os equipamentos possuíam certificados de calibração com prazos de validade em vigor, emitidos pela empresa CHROMPACK, a qual está integrada à Rede Brasileira de Calibração e devidamente credenciada pelo INMETRO.

4.2. Estudo de Caso

O desenvolvimento do trabalho foi realizado com base em um estudo de caso onde existe o problema de elevados níveis de ruído. O local escolhido foi galpão industrial de uma empresa localizada próxima a região metropolitana de Belo Horizonte - MG. O galpão possui aproximadamente 7800 m² de área de piso e linha de produção com aproximadamente 240 máquinas, de quatro tipos diferentes.

Conforme medições realizadas, os níveis acústicos dentro do ambiente variam entre 90 e 100 dB(A), o que pode gerar danos à saúde dos funcionários e acréscimos nos encargos trabalhistas, além de pagamentos de indenizações pela empresa.

4.3. Caracterização das fontes de ruído no ambiente

No local de estudo foram identificadas as fontes emissoras de ruído através de levantamento dos equipamentos utilizados no processo produtivo da indústria. No estudo de caso, foram levantadas quatro tipos de máquinas que, neste trabalho, serão denominadas como máquinas tipo A, B, C e D. Cabe ressaltar que neste levantamento verificou-se que as máquinas do tipo A e B possuem funcionamento e estrutura similares, embora apresentem dimensões diferentes.

4.3.1. Determinação das potências acústicas dos equipamentos ruidosos.

As potências acústicas dos equipamentos ruidosos foram determinadas utilizando diretrizes da norma ISO 3746 – *Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure – Survey method using an enveloping measurement surface over a reflecting plane*, ver item 3.4, onde são descritos os procedimentos da norma. No entanto, para viabilizar a execução do trabalho em função do tempo, algumas adaptações da norma foram necessárias.

Primeiramente foram medidos os níveis sonoros emitidos por cada máquina identificada no estudo de caso. Os níveis sonoros foram medidos em 4 (quatro) posições próximas a cada lado do equipamento, a uma altura de 1,5 m do piso. Observou-se que em um dos equipamentos da linha de produção da fábrica não seria possível realizar a medição nas laterais do equipamento, portanto as medições das emissões sonoras desse equipamento foram efetuadas em apenas dois pontos de seu entorno. Visando eliminar a influência das superfícies refletoras das máquinas nos níveis medidos, os pontos de medição se localizaram a uma distância mínima de 1 (um) metro. Entretanto, em algumas situações, a distância foi menor, devido a limitações de espaço, ver FIG. 15.

Os critérios adotados na medição visaram garantir que o nível sonoro proveniente do equipamento fosse maior que o Ruído de Fundo em 10 dB(A). Caso não fosse possível garantir este critério, para diferenças de até 3 dB(A) seria utilizado um fator de correção, conforme determina a norma ISO 3746. Em todos os pontos de medição foram verificadas diferenças da emissão sonora dos equipamentos e do Ruído de Fundo maiores que 10 dB(A). A fim de garantir esta diferença de nível, as medições foram realizadas em um dia em que não havia produção na fábrica, desta maneira, cada máquina foi ligada separadamente para a medição de seus níveis de emissão sonora. Os níveis sonoros medidos foram registrados em bandas de oitava no intervalo de 63 Hz a 8 kHz e valores globais expressos na curva de ponderação A - dB(A).

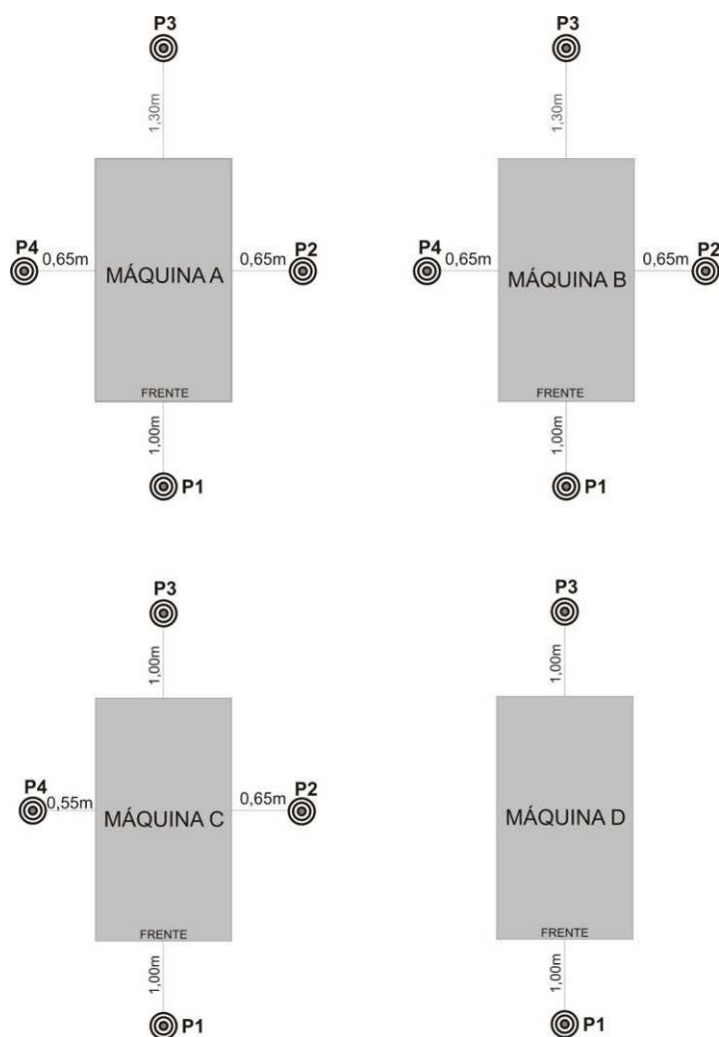


FIGURA 15: Pontos de medição dos níveis de emissão sonora das máquinas tipo A, B, C e D.

Uma vez que, o ruído proveniente dos equipamentos é contínuo, as medições sonoras tiveram a duração de 1 (um) minuto por ponto de medição, com registros de 1 (um) e 1 (um) segundo.

Estabeleceu-se uma caixa de volume que delimitasse a fonte sonora, considerando os elementos que emitiam ruído na fonte. Nos locais onde foi posicionado o microfone de medição, estabeleceu-se planos imaginários denominados superfície de medição, ver FIG. 16. As dimensões da superfície de medição foram determinadas de acordo com a norma ISO 3746.

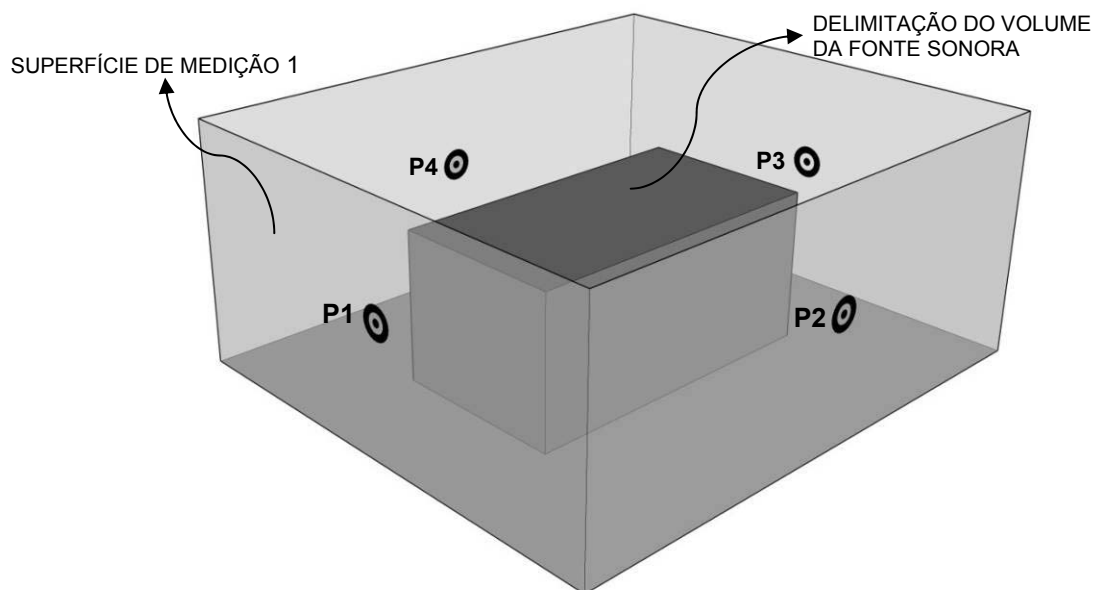


FIGURA 16: Desenho esquemático da delimitação das superfícies de medição.

Considerou-se que o nível acústico medido em um ponto da superfície de medição fosse constante em toda a superfície. Desta forma, considerando que a incidência normal à superfície é igual o nível de pressão sonora e que a potência sonora é uma grandeza invariável para a mesma fonte, o nível sonoro da superfície de medição foi “transposto” para a superfície da fonte.

$$NPS = 10 \log \left(\frac{W}{A} \right) \quad (4.1)$$

Onde:

W é a potência sonora;

A é a área de incidência e;

NPS é o nível de pressão sonora

Portanto,

$$NPS_{Fi} = 10 \log \left(\frac{W}{A_{Fi}} \right) = 10 \log W - 10 \log A_{Fi} \quad (4.2)$$

$$NPS_{M_i} = 10 \log \left(\frac{W}{A_{M_i}} \right) = 10 \log W - 10 \log A_{M_i} \quad (4.3)$$

Onde:

NPS_F é o nível de pressão sonora na superfície da fonte ;

A_F é a área da superfície da fonte;

NPS_M é o nível de pressão sonora na superfície de medição;

A_M é a área da superfície de medição;

i , índice referente a cada ponto de medição

Considerando que a potência sonora é constante, a seguinte relação pode ser estabelecida:

$$NPS_{F_i} + 10 \log A_{F_i} = NPS_{M_i} + 10 \log A_{M_i} \quad (4.4)$$

$$NPS_{F_i} = NPS_{M_i} + 10 \log A_{M_i} - 10 \log A_{F_i} \quad (4.5)$$

$$NPS_{F_i} = NPS_{M_i} + 10 \log \left(\frac{A_{M_i}}{A_{F_i}} \right) \quad (4.6)$$

Desta forma, o NPS_F será o nível de emissão sonora da superfície do equipamento, por unidade de área, utilizado para a caracterização da fonte sonora na simulação computacional. Utilizando esta metodologia, cada superfície da fonte terá um valor de emissão sonora referente a cada ponto de medição.

Para cada tipo de máquina foram coletadas duas amostras de emissão acústica, sendo uma máquina mais ruidosa e outra menos ruidosa. Foram selecionados diversos equipamentos dentro da produção e realizadas medições de pressão sonora próximos aos mesmos. Com base nessas, identificou-se os equipamentos que emitiam ruído mais elevado e os equipamentos que emitiam ruído menos elevado. Desta forma, foram determinadas duas potências sonoras para cada tipo de equipamento.

4.4. Determinação dos níveis sonoros nos postos de trabalho

Os pontos de medição para determinar os níveis sonoros nos postos de trabalho foram definidos em função dos possíveis locais onde os funcionários se posicionam próximo aos equipamentos durante a jornada de trabalho, uma vez que não existe, neste estudo de caso, uma área bem delimitada que pudesse ser caracterizada como um posto de trabalho. Estas posições estão indicadas esquematicamente na FIG. 17 a seguir. Em todos os locais de medição o microfone esteve posicionado a 1,5 metros de altura do piso.

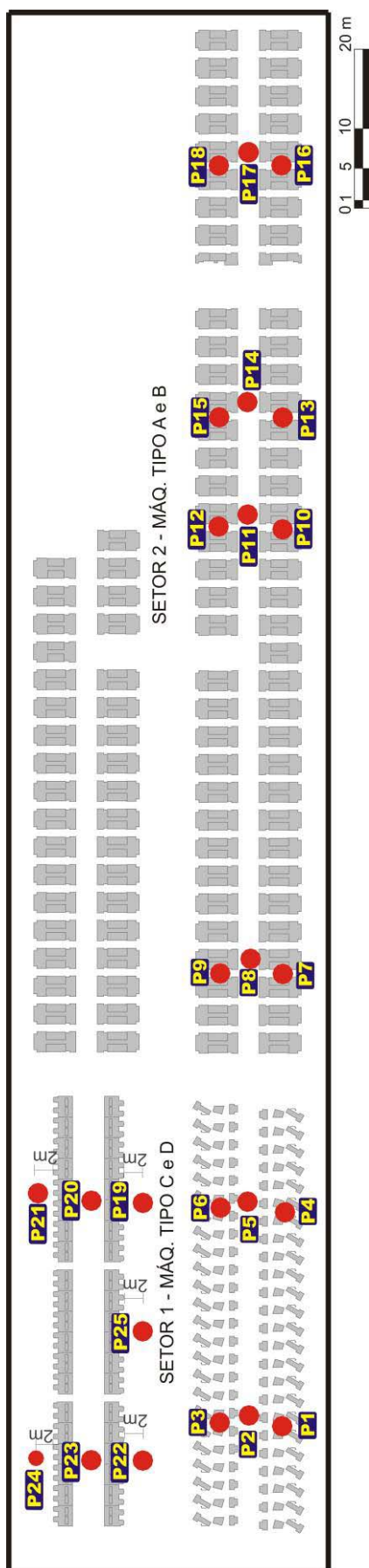


FIGURA 17: Localização dos pontos de medição para determinação dos níveis de pressão sonora nos postos de trabalho

Cabe ressaltar que os pontos são representativos, uma vez que o operador pode se posicionar que qualquer ponto em frente ou entre as máquinas.

Durante as medições acústicas foram adotados intervalos de medição com duração de 2 (dois) minutos uma vez que o ruído das fontes geradoras – as máquinas da indústria – é contínuo. Os níveis sonoros foram registrados em bandas de oitava de 63 Hz a 8 kHz e os valores globais expressos na curva de ponderação A - dB(A).

As medições foram realizadas em dias de funcionamento normal, desta forma, os níveis sonoros originados de eventos não característicos dos equipamentos foram desconsiderados da medição.

4.5. Simulação computacional do campo sonoro do ambiente estudado

A simulação computacional foi uma ferramenta utilizada para identificar a contribuição acústica de cada equipamento no campo sonoro do ambiente. Uma vez identificada a contribuição de cada fonte sonora no ambiente foi possível determinar o campo acústico no ambiente para a situação de equipamentos tratados acusticamente.

4.5.1. Elaboração de modelo tridimensional do ambiente

Para a simulação do campo sonoro do ambiente foi elaborada uma maquete eletrônica a fim de caracterizar a volumetria e as superfícies do local, bem como localizar as fontes sonoras espacialmente. Esta maquete foi elaborada com base nas plantas baixas e cortes do galpão industrial fornecidos pela empresa, bem como em levantamentos *in loco* para atualizar alguns dados fornecidos.

Este modelo elaborado visou à simulação acústica do ambiente, portanto a volumetria da maquete foi simplificada e as superfícies com dimensões pequenas (menores que 0,50m), como por exemplo, vigas e pilares, foram desconsideradas. A bibliografia consultada, bem como o manual do software, afirma que as pequenas superfícies na maquete tridimensional podem causar conflitos no processamento do traçado dos raios, e desta forma, erros nos resultados.

As máquinas da linha de produção do galpão foram caracterizadas no modelo de acordo com suas dimensões e localização no layout da fábrica. Existe um número razoável de equipamentos na fábrica, portanto foi relevante modelar a volumetria dos mesmos, pois terão influência no volume total do ambiente para o cálculo do tempo de reverberação.

A fim de caracterizar as superfícies do ambiente do modelo foram levantados *in loco* os revestimentos das superfícies do local. Abaixo estão listados os materiais utilizados nos pisos, vedações, portas e telhado.

- Vedação de parede: Alvenaria pintada e Telha de aço galvanizado pré-pintado
- Pisos: Concreto e aço
- Portas: Chapa de aço pintado
- Telhado: Telha sanduíche de aço galvanizado.
- Forro: Pequena área de forro revestido com espuma tipo Sonex
- Superfícies dos equipamentos: Chapa de aço pintado

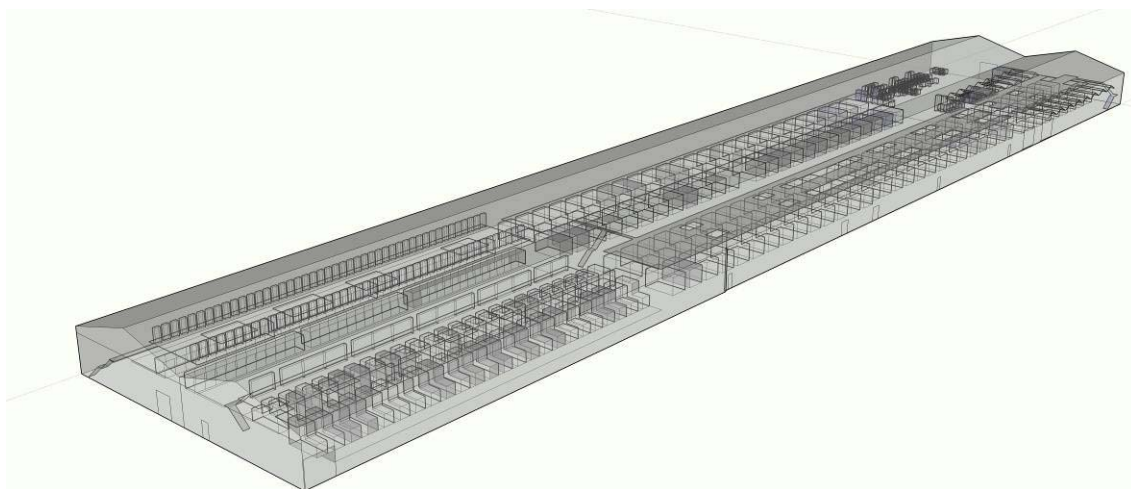


FIGURA 18: Maquete elaborada para simulação do campo sonoro do ambiente no software ODEON.

4.5.2. Simulação do Campo sonoro existente

Utilizando o modelo tridimensional elaborado e os dados das potências sonoras encontradas, foram realizadas simulações acústicas através do software ODEON 7.0 (ver item 3.5) que se baseia em modelo híbrido de simulação, ou seja, nas duas

primeiras reflexões o software utiliza o método das fontes virtuais, a partir da terceira reflexão é utilizado o método dos raios para simulação do campo sonoro do ambiente.

As posições das fontes sonoras foram determinadas conforme modelo tridimensional elaborado, onde se encontram as superfícies de cada máquina. As potências sonoras determinadas no item 4.3.1 foram utilizadas para caracterizar a emissão sonora de cada superfície das fontes.

A fim de caracterizar as superfícies da volumetria, foram atribuídos coeficientes de absorção às mesmas, discriminados na TAB. 4.

TABELA 4: Coeficientes de absorção dos materiais de revestimento utilizados na simulação

Revestimento	Coeficiente de absorção por banda de frequência						
	63	125	250	500	1K	2K	4K
Alvenaria pintada	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Telha de aço galvanizado	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
Concreto	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Aço	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
Telha sanduíche	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
Sonex	0,23	0,23	0,67	0,50	0,54	0,47	0,73

Fonte: Odeon 7.0 e Physikalish-Technischen Bundesanstalt - PTB

Calibração do modelo.

Com o objetivo de testar o modelo virtual, primeiramente foram realizadas simulações acústicas com apenas uma máquina ligada. Neste modelo foram inseridos receptores nos locais próximos a máquina, conforme distâncias estabelecidas nas medições da emissão sonora de cada equipamento.

Este procedimento foi realizado para os quatro tipos de equipamento. Os valores dos níveis de pressão sonora registrados pelos receptores foram comparados com os valores medidos e, desta forma, identificou-se necessidade de ajustes nos valores dos dados inseridos no modelo.

Simulação do campo sonoro com dados calibrados

Após a identificação dos ajustes necessários nos dados de potência das fontes sonoras do modelo, foram realizadas as simulações com todas as fontes sonoras (máquinas) ligadas, a fim de avaliar o campo sonoro gerado pelos equipamentos sem tratamento

acústico. Dentro do modelo foram inseridos receptores para registro de NPS da simulação nos locais correspondentes aos pontos escolhidos para a medição dos níveis acústicos nos postos de trabalho.

A partir dos dados das potências sonoras determinadas realizaram-se simulação com as potências sonoras das amostras das máquinas com menor valor, e outra simulação utilizando as potências sonoras mais elevadas.

Após a simulação, os dados de NPS obtidos pelas simulações realizadas foram comparados com os níveis registrados pela medição a fim de obter relações entre a condição de manutenção das máquinas e os níveis sonoros dentro do ambiente.

Os dados fornecidos pela simulação também permitiram identificar a contribuição de cada fonte sonora nos níveis acústicos registrados pelos receptores, o que possibilitou identificar a atenuação no ambiente com o tratamento de fontes sonoras específicas e, assim, estabelecer estratégias de tratamento.

4.6. Identificação das possíveis atenuações acústicas a serem obtidas em cada equipamento

A identificação das possíveis atenuações acústicas dos equipamentos foi realizada em um tipo de máquinas da linha de produção do estudo de caso em questão, a máquina tipo A. Primeiramente foi realizada inspeção no equipamento, acompanhada por um Engenheiro Mecânico, visando identificar os componentes que geram ruído no equipamento, e desta forma, propor sistemas de atenuação.

Os estudos dos possíveis sistemas de atenuação da máquina tipo A foram realizados em laboratório, distante da área de produção. Neste mesmo laboratório foram medidos os níveis de emissão sonora da máquina em 3 (três) pontos próximos a 3 (três) lados da mesma, ver FIG.19. Para avaliar o desempenho dos sistemas de atenuação propostos, após a instalação dos mesmos, foi realizada medição da emissão sonora do equipamento na condição de equipamento tratado acusticamente. Os resultados das medições na condição sem tratamento e com tratamento foram comparados e, portanto, foram identificadas as reduções de ruído emitido pela máquina.

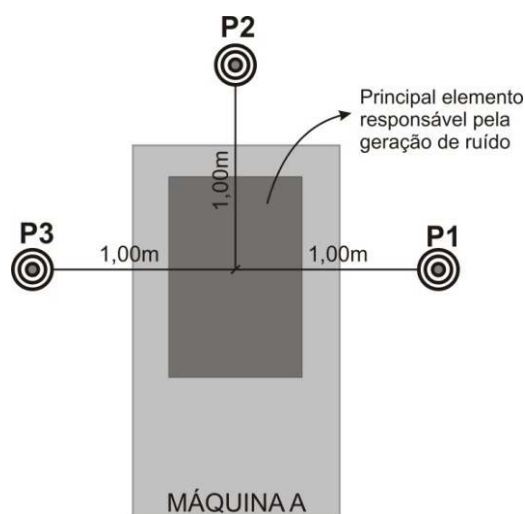


FIGURA 19: Indicação dos pontos de medição em laboratório da Máquina A

4.7. Simulação computacional de diferentes situações de tratamento dos equipamentos e do ambiente estudado.

Após a identificação da atenuação da emissão sonora de um dos equipamentos, foram realizadas simulações no ODEON (2003) com diferentes valores de potências sonoras das máquinas. Além disto, realizaram-se simulações de tratamento acústico nas superfícies do telhado e mezaninos que se localizam acima dos equipamentos geradores de ruído.

Primeiramente, foram simuladas três condições de tratamento dos equipamentos com atenuação nas potências acústicas iguais a 3 dB(A), 6 dB(A) e 9 dB(A). Para cada uma destas condições, bem como para a condição sem tratamento acústico dos equipamentos, foi realizada simulação com coeficientes de absorção indicados na TAB. 5 para as superfícies do telhado e mezaninos acima dos equipamentos. Buscou-se, através destas simulações, estabelecer uma relação entre o tratamento de ruído na fonte e tratamento acústico das superfícies do galpão.

TABELA 5: Coeficientes de absorção utilizados para simulações de tratamento acústico nas superfícies do ambiente

Frequência [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k
Coefficiente de absorção	0,22	0,47	0,77	0,66	0,56	0,47

4.8. Correlação entre custos de tratamento acústico dos equipamentos e as reduções dos níveis de ruído nos locais de trabalho.

Com base nos dados obtidos nas simulações acústicas, obteve-se a contribuição de cada fonte sonora nos níveis de ruído dos postos de trabalho. A partir destes dados e dos custos dos tratamentos acústicos na fonte, foi possível estabelecer diferentes cenários de campo sonoros para o ambiente de trabalho, considerando diversas possibilidades de tratamento acústico.

Visando a adequação do ambiente de trabalho às normas de higiene ocupacional, foram calculadas as doses de ruído para os cenários de tratamento avaliados, comparando com as doses de ruído na situação sem tratamento acústico dos equipamentos. Desta forma, foi possível identificar o quanto os tratamentos acústicos considerados podem reduzir a exposição sonora do funcionário.

4.9. Estratégia de tratamento acústico para o estudo de caso, visando a redução de ruído no ambiente.

Após avaliação dos resultados obtidos nos itens anteriores, estabeleceu-se uma estratégia para tratamento das fontes ruidosas da fábrica. A partir dos cenários simulados e da análise das relações tratamento acústico /redução de ruído/ custos, foi estabelecida uma estratégia para tratamento acústico das fontes de ruído do local. Os critérios para escolha da melhor estratégia a ser adotada foi fundamentada na identificação dos equipamentos mais ruidosos, locais com níveis mais elevados, tratamento de fontes sonoras que proporcionem maior redução do ruído no ambiente, bem como custos inerentes aos sistemas acústicos a serem implantados.

5.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme exposto anteriormente, para desenvolvimento do trabalho foram realizadas medições acústicas dos níveis sonoros no ambiente, bem como das emissões sonoras dos equipamentos geradores de ruído.

A partir dos dados das emissões sonoras das máquinas foram determinadas as potências acústicas dos equipamentos. Utilizando as potências sonoras das máquinas encontradas foi elaborado um modelo para simulações acústicas. Estas simulações permitiram diversos estudos acerca do campo sonoro do ambiente e das relações entre campo livre e reverberante com as atenuações de tratamento acústico.

Com base nos resultados obtidos nas simulações foi possível estabelecer estratégias de tratamento acústico com previsão de atenuações do ruído no ambiente.

5.1. Determinação das potências sonoras dos equipamentos

Para determinar as potências sonoras dos equipamentos foram realizadas medições próximas a duas amostras de cada tipo de máquina. Na TAB. 6, abaixo, estão indicados os valores obtidos nas medições.

TABELA 6: Níveis sonoros registrados nos pontos próximos às máquinas da indústria. Estes valores foram base para o cálculo da potência sonora dos equipamentos.

Equipamento	Ponto Medição	Descrição	NPS [dBA]	Níveis registrados por banda de frequência [dB]							
				63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Tipo A, MAIS ruidoso	P1	À Frente	87	74	77	80	80	84	80	75	69
	P2	À Direita	91	79	79	79	87	87	84	78	74
	P3	Atrás	90	76	76	82	82	87	82	77	70
	P4	À Esquerda	100	78	78	89	92	99	88	84	79
Tipo A, MENOS ruidoso	P1	À Frente	87	76	81	79	82	81	82	77	71
	P2	À Direita	92	80	89	88	87	86	87	82	75
	P3	Atrás	89	77	88	79	82	83	85	78	71
	P4	À Esquerda	91	77	83	82	89	85	85	82	74
Tipo B MAIS ruidoso	P1	À Frente	92	81	90	85	87	86	86	83	75
	P2	À Direita	94	86	95	92	89	87	88	85	88
	P3	Atrás	92	84	93	85	87	85	86	84	75
	P4	À Esquerda	95	88	87	90	88	89	88	87	79
Tipo B MENOS ruidoso	P1	À Frente	82	76	81	80	78	77	75	72	69
	P2	À Direita	85	75	81	78	81	80	80	74	71
	P3	Atrás	86	74	79	76	84	81	78	76	74
	P4	À Esquerda	90	82	82	80	86	87	82	76	74
Tipo C MAIS ruidoso	P1	À Frente	77	66	68	71	70	71	71	71	68
	P2	À Direita	81	71	72	73	74	74	76	73	71
	P3	Atrás	81	64	65	71	71	73	77	73	68
	P4	À Esquerda	86	69	73	73	75	79	82	79	75
Tipo C, MENOS ruidoso	P1	À Frente	78	66	68	71	70	71	71	71	68
	P2	À Direita	80	69	73	74	74	74	75	72	69
	P3	Atrás	77	64	66	70	71	70	71	70	66
	P4	À Esquerda	81	69	74	73	73	75	75	74	70
Tipo D, MAIS ruidoso	P1	À Frente	99	78	81	88	91	93	93	91	90
	P2	Atrás	94	72	80	85	87	89	88	85	85
Tipo D, MENOS ruidoso	P1	À Frente	87	66	74	78	86	81	80	77	75
	P2	Atrás	84	64	76	77	82	79	76	73	70

Como é possível observar nas amostras escolhidas, um mesmo tipo de máquina apresentou níveis de ruído bem diferentes. O exemplo mais evidente é a máquina tipo D, para a qual a medição da primeira amostra no ponto P1, resultou em um nível de 99dB(A), enquanto para a outra amostra na posição P1, foi registrado nível sonoro de 87 dB(A). Não foi realizado estudo específico para determinar as causas destas diferenças de emissão de ruído dos equipamentos do mesmo modelo. Possivelmente, isto está relacionado às condições de uso e manutenção dos mesmos.

Os resultados obtidos nestas medições permitiram aferir que o nível de emissão sonora de um equipamento está diretamente ligado ao seu estado de conservação. Portanto, pode-se supor que uma manutenção apropriada poderá reduzir razoavelmente o ruído emitido pela máquina, no caso da máquina tipo D, em até 12 dB(A), conforme as diferenças nos níveis medidos nas amostras deste equipamento.

Constatou-se que a manutenção realizada nos equipamentos da indústria visa garantir a produção da máquina, ou seja, a manutenção mecânica e elétrica são realizadas para evitar a queda da produtividade do equipamento. No entanto, a manutenção visando os sistemas de atenuação de ruído não é considerada, como por exemplo, a boa vedação da máquina.

Com base nos valores do NPS acima e nas dimensões dos equipamentos levantados no local, foram obtidos os valores das potências sonoras para cada superfície dos equipamentos, conforme a equação 4.6. Nas medições realizadas próximas aos equipamentos, não houve registro do nível sonoro em ponto paralelo à superfície superior de cada máquina. Buscando caracterizar de maneira mais eficaz a emissão sonora dos equipamentos, foi atribuído um valor de potência sonora para a superfície superior de cada equipamento equivalente a média dos valores das potências das demais superfícies.

Desta maneira, a TAB. 7 abaixo apresenta os valores de potência sonora dos equipamentos estudados.

TABELA 7: Níveis de potência sonora encontrados para cada superfície da máquina, referente a cada ponto de medição.

Equipamento	Superfície	NWS [dBA]	Níveis de potência sonora por banda de oitava [dB]						
			63	125	250	500	1k	2k	4k
Tipo A MAIS ruidoso L ₁ = 3,90m L ₂ = 2,40m L ₃ = 2,50	Frente – P1	98	72	80	85	90	92	95	87
	Direita – P2	100	79	84	87	95	95	95	91
	Atrás – P3	98	76	81	84	91	93	94	88
	Esquerda – P4	101	78	87	92	95	95	97	89
	Acima – P5	100	76	83	87	93	94	95	89
Tipo A MENOS ruidoso L ₁ = 3,90m L ₂ = 2,40m L ₃ = 2,50m	Frente – P1	91	72	78	83	84	86	86	81
	Direita – P2	94	82	83	83	88	89	89	85
	Atrás – P3	91	78	80	81	84	86	86	81
	Esquerda – P4	93	82	80	84	86	88	88	84
	Acima – P5	92	78	81	83	85	87	87	83
Tipo B MAIS ruidoso L ₁ = 4,60m L ₂ = 2,60m L ₃ = 2,50m	Frente – P1	95	84	93	88	90	89	89	86
	Direita – P2	97	89	98	95	92	90	91	88
	Atrás – P3	95	87	96	88	90	88	89	86
	Esquerda – P4	97	90	90	93	91	92	91	90
	Acima – P5	96	88	94	91	91	90	90	88
Tipo B MENOS ruidoso L ₁ = 4,60m L ₂ = 2,60m L ₃ = 2,50m	Frente – P1	90	77	80	83	83	87	83	78
	Direita – P2	94	82	82	82	90	90	88	82
	Atrás – P3	93	79	79	85	85	90	85	80
	Esquerda – P4	94	80	86	85	92	88	88	85
	Acima – P5	93	80	82	84	88	89	86	81
Tipo C MAIS ruidoso L ₁ = 2,70m L ₂ = 1,40m L ₃ = 3m	Frente – P1	81	69	72	75	74	75	75	75
	Direita – P2	85	75	76	77	78	78	80	77
	Atrás – P3	84	68	69	74	75	77	80	77
	Esquerda – P4	90	73	77	77	79	83	85	82
	Acima – P5	85	71	73	76	76	78	80	78
Tipo C MENOS ruidoso L ₁ = 2,70m L ₂ = 1,40m L ₃ = 3m	Frente – P1	81	69	71	74	73	74	74	74
	Direita – P2	83	72	76	77	77	77	78	75
	Atrás – P3	80	67	69	73	74	73	74	73
	Esquerda – P4	84	72	77	76	76	78	78	77
	Acima – P5	82	70	73	75	75	75	76	75
Tipo D MAIS ruidoso L ₁ = 1,80m L ₂ = 1,25m L ₃ = 2m	Frente – P1	105	84	87	93	96	99	99	97
	Atrás – P2	100	78	86	91	93	94	94	91
	Acima – P3	102	81	86	92	95	97	97	94
Tipo D MENOS ruidoso L ₁ = 1,80m L ₂ = 1,25m L ₃ = 2m	Frente – P1	93	72	80	83	92	87	86	83
	Atrás – P2	90	70	82	83	87	85	81	79
	Acima – P3	91	71	81	83	89	86	83	81

Obs.: Os valores de L₁, L₂ e L₃ representam, respectivamente, comprimento, largura, e altura das máquinas

5.2. Medição dos níveis sonoros nos postos de trabalho

Os valores de NPS medidos, nos prováveis locais onde os funcionários se posicionam próximo aos equipamentos durante a jornada de trabalho, estão apresentados na FIG. 20 a seguir.

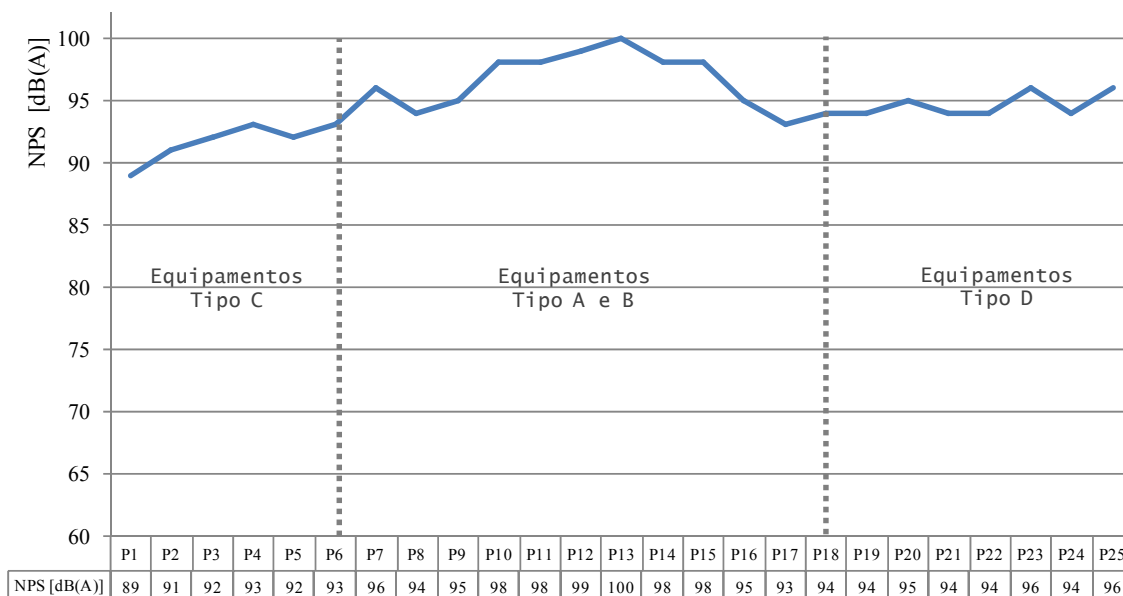


FIGURA 20: Níveis acústicos medidos nos possíveis postos de trabalho da indústria.

Os pontos próximos aos equipamentos do tipo A, P10 - P15, apresentaram níveis mais elevados. Especificamente no ponto P13, local onde foi registrado o maior nível de pressão sonora, observou-se que um dos equipamentos próximo ao local de medição emitia ruído mais elevado que os demais, possivelmente devido ao mal estado de funcionamento.

Os locais de medição P16, P17 e P18, apesar de estarem próximos aos equipamentos do tipo A, apresentaram níveis acústicos menores. Isto se deve, em parte, à existência neste trecho de revestimento absorvente na superfície acima dos equipamentos.

É possível observar, também, que os pontos próximos às máquinas do tipo C apresentaram os menores níveis de pressão sonora menos elevados, o que é justificado pelo fato destes equipamentos emitirem os ruídos abaixo dos demais.

5.3. Simulação computacional do campo sonoro do ambiente estudado

Para simulação do campo sonoro do galpão industrial foi elaborado um modelo tridimensional do ambiente, incluindo os volumes dos equipamentos. Para modelar as fontes sonoras foram utilizadas fontes de superfícies, uma vez que as superfícies dos equipamentos foram incluídas no modelo tridimensional. Os valores das potências sonoras atribuídas às superfícies estão discriminados na TAB. 7 no item 5.1.

5.3.1. Simulação com apenas uma fonte sonora operando - Calibração do modelo

Antes de realizar as simulações com todas as fontes sonoras em operação, foram efetuadas simulações com uma máquina de cada tipo em funcionamento, com o objetivo de testar o modelo e verificar a necessidade de ajustes nos dados inseridos no mesmo. Os dados utilizados para realizar estas simulações, foram os valores de potências sonoras encontrados na TAB. 7 Abaixo são apresentados os resultados obtidos nessas simulações, bem como os níveis acústicos medidos no local para a mesma condição operacional.

TABELA 8: Relação entre os resultados obtidos na simulação e os níveis sonoros medidos. MÁQUINA TIPO A

Ponto de medição/Receptor	Dist. da fonte	Condição	NPS [dBA]
P1	1,0 m	Simulado	94
P1	1,0 m	Medido	95
Diferença de níveis acústicos no ponto P1 simulado e medido			-1
P2	0,55 m	Simulado	98
P2	0,55 m	Medido	97
Diferença de níveis acústicos no ponto P2 simulado e medido			1
P3	1,0 m	Simulado	94
P3	1,0 m	Medido	95
Diferença de níveis acústicos no ponto P3 simulado e medido			-1
P4	0,55 m	Simulado	98
P4	0,55 m	Medido	98
Diferença de níveis acústicos no ponto P4 simulado e medido			1 0

Os valores simulados para os níveis da máquina tipo A estão muito próximos aos valores medidos, a diferença entre ele não ultrapassa 1 dB(A). Uma vez que o erro estimado do equipamento utilizado para as medições acústicas é de ± 1 dB, não foram necessários ajustes nos valores das potências sonoras desta máquina.

Os resultados obtidos pelo teste realizado com a máquina tipo B estão na TAB. 9, abaixo.

TABELA 9: Relação entre os resultados obtidos na simulação e os níveis sonoros medidos. MÁQUINA TIPO B

Ponto de medição/Receptor	Dist. da fonte	Condição	NPS [dBA]
P1	1,0 m	Simulado	91
P1	1,0 m	Medido	92
Diferença de níveis acústicos no ponto P1 simulado e medido			-1
P2	0,55 m	Simulado	95
P2	0,55 m	Medido	94
Diferença de níveis acústicos no ponto P2 simulado e medido			1
P3	1,0 m	Simulado	91
P3	1,0 m	Medido	92
Diferença de níveis acústicos no ponto P3 simulado e medido			-1
P4	0,55 m	Simulado	96
P4	0,55 m	Medido	95
Diferença de níveis acústicos no ponto P4 simulado e medido			-1

Na simulação teste da máquina tipo B a diferença dos níveis sonoros medidos e simulados não ultrapassam 1 dB(A), portanto, também não houve necessidade de ajustes nas potências sonoras desses equipamentos.

TABELA 10: Relação entre os resultados obtidos na simulação e os níveis sonoros medidos. MÁQUINA TIPO C

Ponto de medição/Receptor	Dist. da fonte	Condição	NPS [dBA]
P1	1,0 m	Simulado	80
P1	1,0 m	Medido	77
Diferença de níveis acústicos no ponto P1 simulado e medido			3
P2	0,55 m	Simulado	84
P2	0,55 m	Medido	81
Diferença de níveis acústicos no ponto P2 simulado e medido			3
P3	1,0 m	Simulado	80
P3	1,0 m	Medido	81
Diferença de níveis acústicos no ponto P3 simulado e medido			-1
P4	0,55 m	Simulado	88
P4	0,55 m	Medido	86
Diferença de níveis acústicos no ponto P4 simulado e medido			2

Para o teste com a máquina tipo C ocorre uma situação diferente. Os níveis simulados nos pontos P1, P2 e P4 apresentam discrepâncias acima de 1 dB(A) em relação aos níveis medidos. Uma provável justificativa é possível erro na medição pois, devido às proximidades dos equipamentos, não foi possível posicionar o microfone adequadamente nesses locais. E como consequência, não foi excluído o som refletido nas superfícies adjacentes o que provavelmente ocasionou uma majoração nos níveis de emissão acústica medidos, e consequentemente, nos níveis de potência sonora calculados para este equipamento.

Para tentar contornar este efeito, foram efetuados ajuste nos dados de pressão sonora das superfícies da fonte. Subtraiu-se dos níveis de potências sonoras das superfícies da fonte tipo C os mesmos valores das diferenças encontradas na simulação anterior. Após estes ajustes, a simulação foi realizada novamente e os dados obtidos são apresentados na TAB. 11.

TABELA 11: Relação entre os resultados obtidos na simulação e os níveis sonoros medidos. MÁQUINA TIPO C CALIBRADA.

Ponto de medição/Receptor	Dist. da fonte	Condição	NPS [dBA]
P1	1,0 m	Simulado	78
P1	1,0 m	Medido	77
Diferença de níveis acústicos no ponto P1 simulado no Odeon e medido			1
P2	0,55 m	Simulado	82
P2	0,55 m	Medido	81
Diferença de níveis acústicos no ponto P2 simulado no Odeon e medido			1
P3	1,0 m	Simulado	80
P3	1,0 m	Medido	81
Diferença de níveis acústicos no ponto P3 simulado no Odeon e medido			-1
P4	0,55 m	Simulado	85
P4	0,55 m	Medido	86
Diferença de níveis acústicos no ponto P4 simulado no Odeon e medido			-1

Conforme pode ser observado, na TAB. 11, com os ajustes adotados, a simulação dos sons com a máquina tipo C em operação também apresentaram resultados com erro de ± 1 dB.

A TAB. 12 a seguir apresenta os resultados da simulação de teste da máquina tipo D.

TABELA 12: Relação entre os resultados obtidos na simulação e níveis sonoros medidos. MÁQUINA TIPO D

Ponto de medição/Receptor	Dist. da fonte	Condição	NPS [dBA]
P1	1,0 m	Simulado	99
P1	1,0 m	Medido	99
Diferença de níveis acústicos no ponto P1 simulado no Odeon e medido			0
P2	1,0 m	Simulado	94
P2	1,0 m	Medido	94
Diferença de níveis acústicos no ponto P2 simulado no Odeon e medido			0

O teste da simulação realizado para a máquina tipo D foi satisfatório, pois os resultados da simulação foram os mesmos obtidos pela medição, não necessitando, portanto, de ajuste no modelo de simulação.

5.3.2. Simulação acústica do ambiente com valores das potências sonoras corrigidos

Após os ajustes nas emissões acústicas do modelo de simulação, foram realizadas duas simulações com potências sonoras distintas. A primeira simulação foi efetuada utilizando os valores mais elevados das potências sonoras e a segunda, por sua vez, foi elaborada considerando os menores valores das potências acústicas coletadas dos equipamentos.

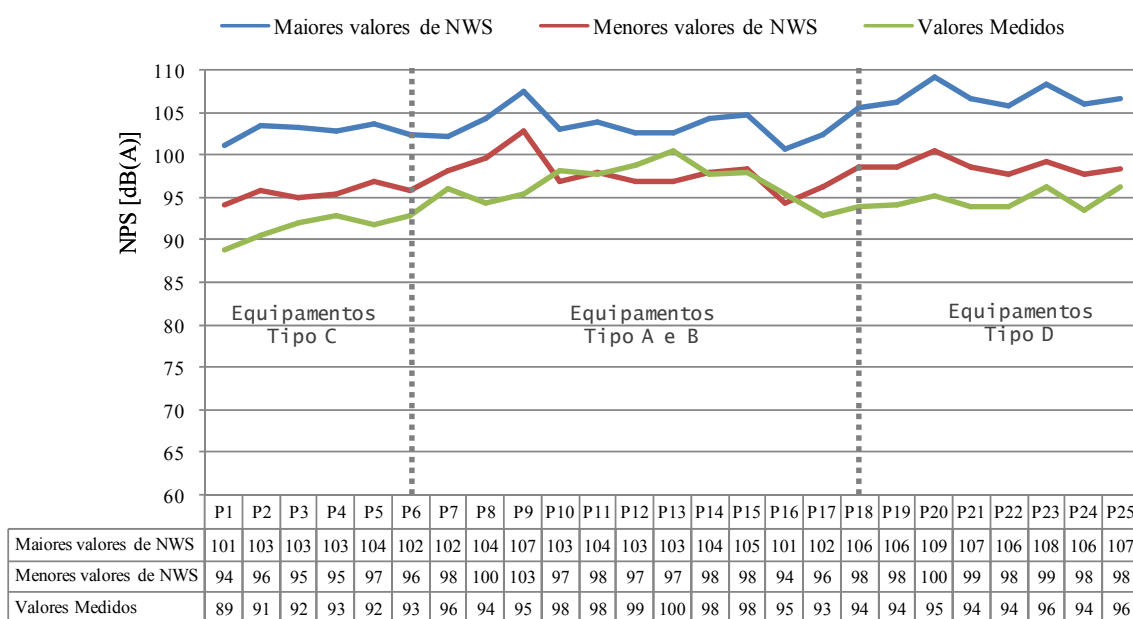


FIGURA 21: Comparação entre os níveis sonoros simulados e medidos.

Comparando os NPS simulados com os maiores valores de potências sonora e menores valores das emissões sonoras dos equipamentos, é possível concluir que a manutenção dos equipamentos influencia diretamente nos níveis de ruído do ambiente. Pode-se inferir que garantindo um bom programa de manutenção dos equipamentos, principalmente em relação ao isolamento acústico do equipamento, é possível atenuar o

ruído em diversos postos de trabalho em até 9 dB(A), conforme diferenças dos níveis sonoros nos pontos P20, P23 e P25.

A FIG. 21 indica que os níveis sonoros medidos estão mais próximos dos valores simulados com os menores níveis de potência sonora, demonstrando que as máquinas em funcionamento durante a realização das medições acústicas operavam, em sua maioria, na condição de menor emissão acústica.

Nos locais próximos aos equipamentos tipo C e D, os níveis simulados com os menores valores de potência sonora estão acima dos valores medidos no local. Possivelmente isto ocorre, pois as potências sonoras utilizadas não são exatamente as mesmas das potências sonoras dos equipamentos do local no dia da medição. Próximo às máquinas tipo D, outro fator que pode ter contribuído para diferença foi o fato de que no momento da medição, diversos equipamentos estavam fora de operação.

Os níveis simulados para o ponto P9 apresentaram divergência mais significativa (9 dBA) em relação ao valor medido no local. Algum erro ainda não identificado pode ter ocorrido no modelo computacional, pois o valor registrado pelo receptor não é coerente, uma vez que o ponto P9 deveria apresentar valores de NPS próximo aos valores de P7, P10 ou P11, uma vez que se encontra em condição similar no ambiente simulado.

5.3.3. Identificação da contribuição de cada fonte nos níveis sonoros do ambiente

Para identificar a contribuição de cada fonte sonora nos níveis sonoros dos locais de trabalho utilizou-se também a simulação realizada no ODEON (2003), o qual possui ferramenta que permite esta identificação. Para tanto, no modelo tridimensional, utilizado na simulação, cada máquina foi identificada com um número, conforme TAB. 13 e FIG. 22.

TABELA 13: Numeração para identificar as fontes sonoras no ambiente.

Tipo da Máquina	Nº da fonte
C	F1 a F48
D	F49 a F128
A e B	F129 a F237

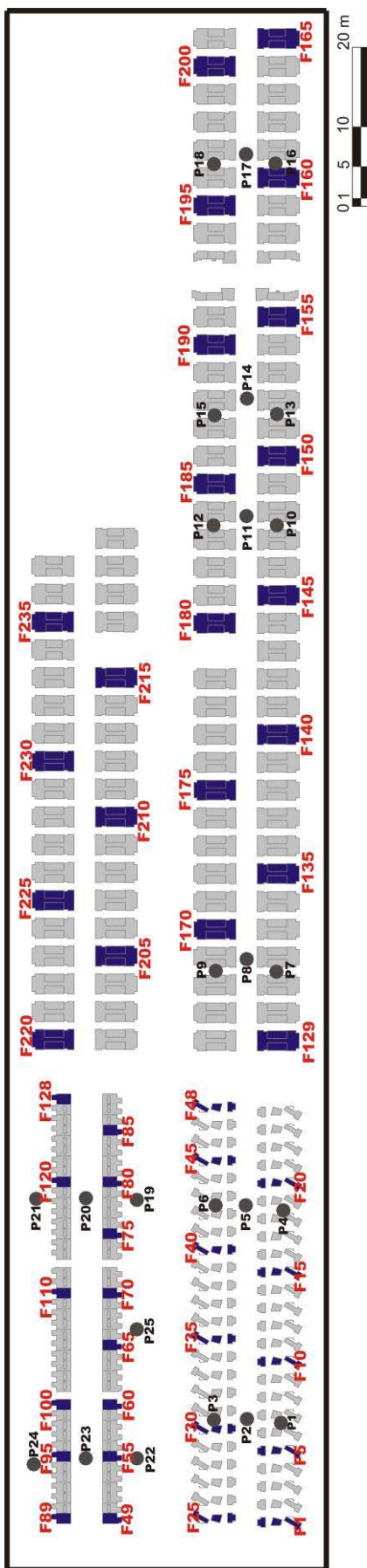


FIGURA 22: Numeração dos equipamentos para simulação acústica.

Desta forma, após a simulação com as potências sonoras considerando os menores valores das potências sonoras, foram identificadas as contribuições de cada fonte sonora nos pontos receptores, as quais estão apresentadas nas figuras a seguir.

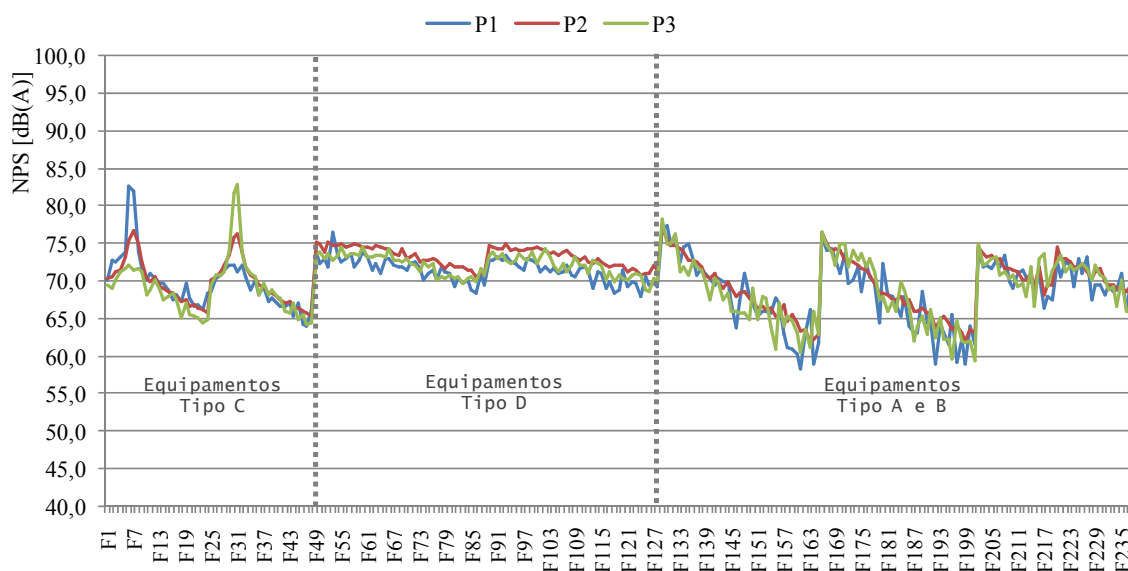


FIGURA 23: Contribuição das fontes sonoras nos níveis acústicos simulados para os pontos P1, P2 e P3.

Na FIG. 23 pode-se verificar que os níveis sonoros nos pontos P1, P2 e P3, próximos aos equipamentos tipo C, têm grande contribuição dos níveis sonoros emitidos pelos equipamentos tipo A, B e D. Os picos do gráfico representam as contribuições das máquinas que estão mais próximas aos pontos, como por exemplo, o ponto P1 que está entre as máquinas F6 e F7, local onde foi identificado o maior nível sonoro (aproximadamente 82 dB(A)).

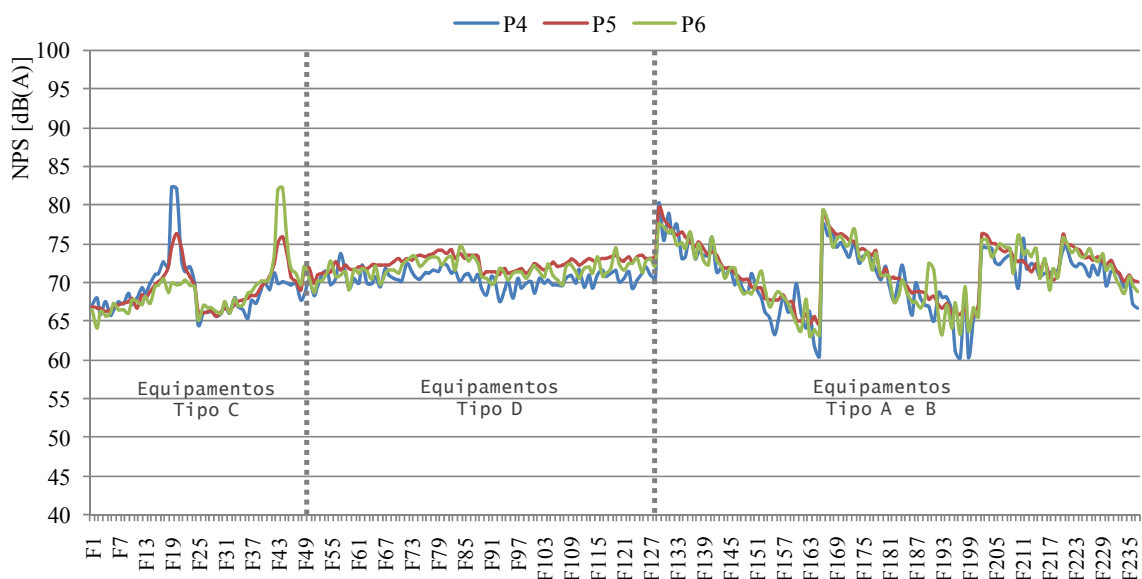


FIGURA 24: Contribuição das fontes sonoras nos níveis acústicos simulados para os pontos P4, P5 e P6.

Assim como nos pontos anteriores, os pontos P4, P5 e P6 também se localizam próximo aos equipamentos tipo C e, portanto, assim como nos pontos P1, P2 e P3 têm grande influência das máquinas tipo A, B e D. No entanto, a contribuição das máquinas tipo A e B é maior nos níveis sonoros dos pontos P4, P5 e P6, uma vez que estes equipamentos estão mais próximos aos pontos em questão.

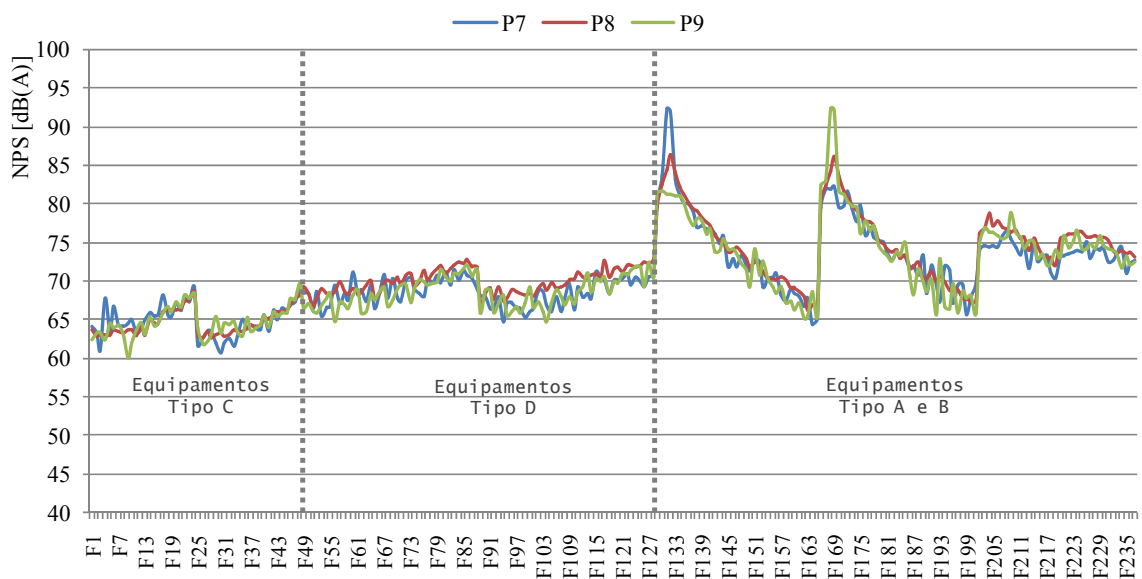


FIGURA 25: Contribuição das fontes sonoras nos níveis acústicos simulados para os pontos P7, P8 e P9.

Analisando o gráfico acima, é possível observar que os picos dos valores dos NPS procedentes de cada máquina são mais acentuados para os pontos P7, P8 e P9. Desta forma, conclui-se que, para estes pontos, os níveis sonoros registrados têm influência de um número menor de equipamentos, comparados com os níveis dos pontos próximos às máquinas tipo C.

A influência dos equipamentos tipo C e D nos pontos P7, P8 e P9 pode ser desconsiderada, pois os níveis provenientes destas máquinas são inferiores em 10 dB(A) aos níveis procedentes dos equipamentos mais próximos aos pontos.

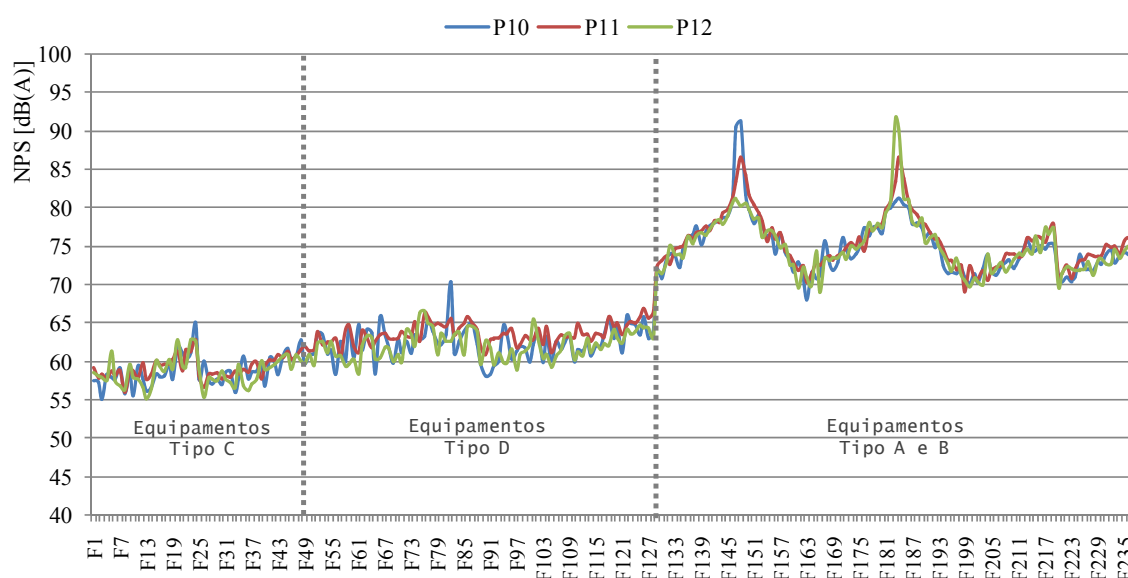


FIGURA 26: Contribuição das fontes sonoras nos níveis acústicos simulados para os pontos P10, P11 e P12.

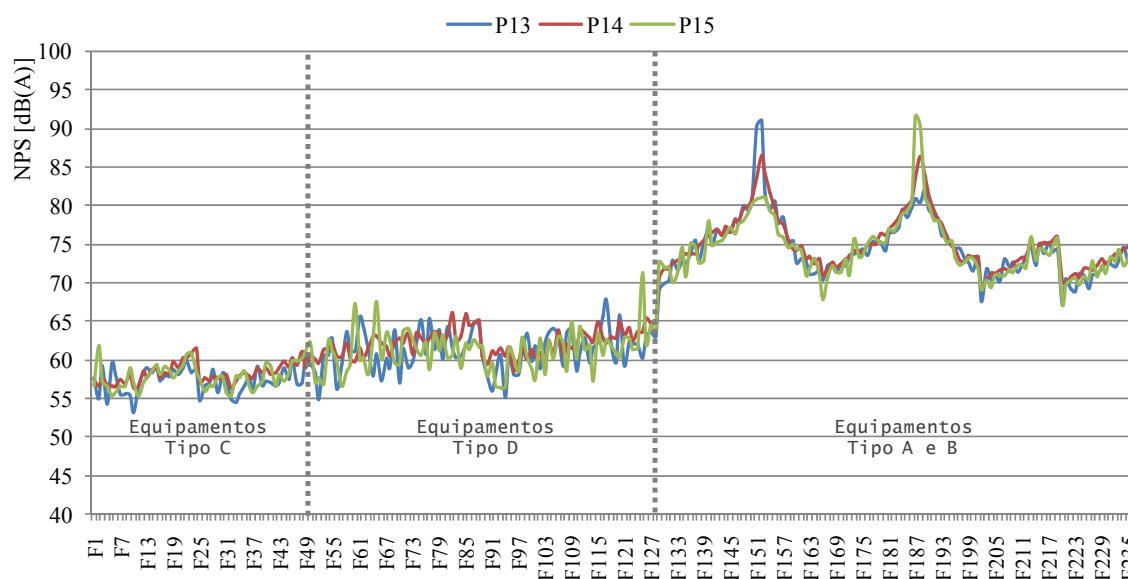


FIGURA 27: Contribuição das fontes sonoras nos níveis acústicos simulados para os pontos P13, P14 e P15.

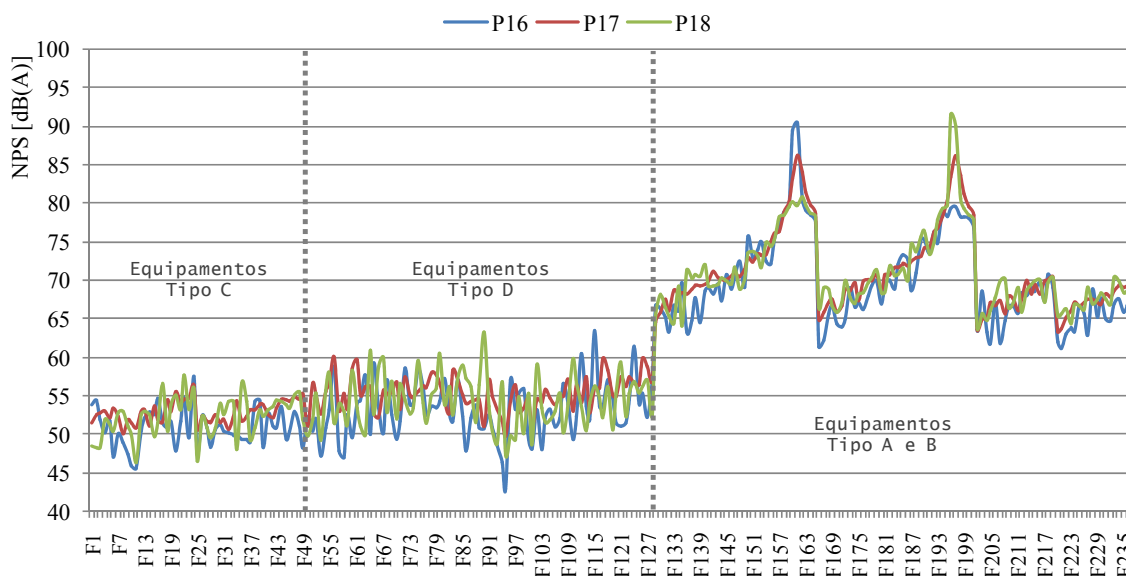


FIGURA 28: Contribuição das fontes sonoras nos níveis acústicos simulados para os pontos P16, P17 e P18.

Conforme se pode observar nas FIGs. 26, 27 e 28, nos pontos P10 a P18 somente as máquinas mais próximas a estes locais contribuem para os níveis de pressão sonora registrados nos mesmos. Cabe ressaltar que os pontos, P7 a P18, estão em locais onde as máquinas tipo A e B operam, diante disto, pode-se concluir que nos locais onde o funcionário se posiciona neste setor da produção, a influência do campo reverberante gerado pelos equipamentos C e D pode ser desconsiderado.

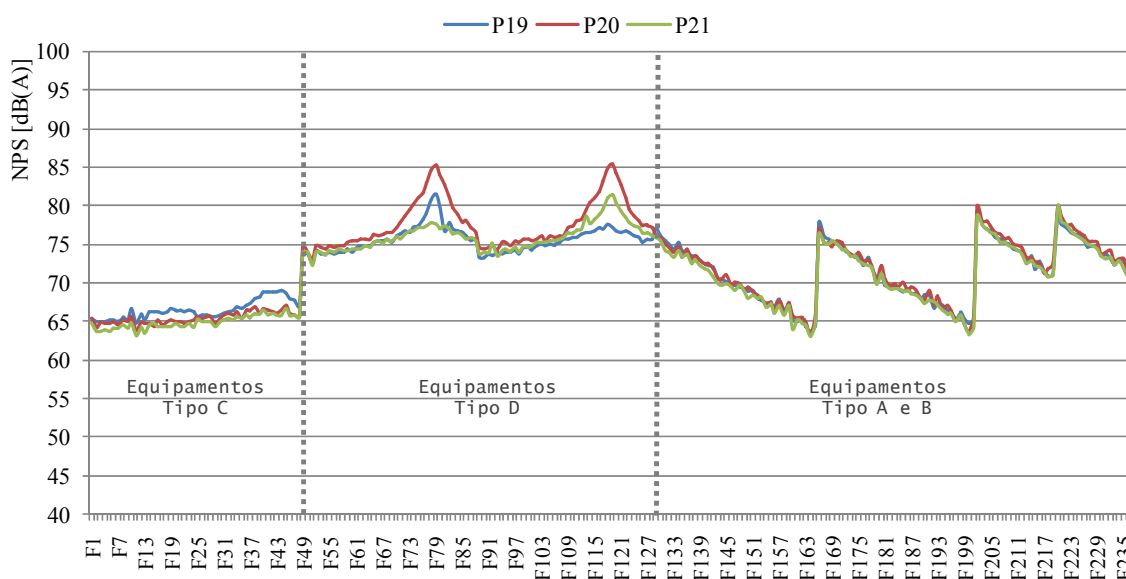


FIGURA 29: Contribuição das fontes sonoras nos níveis acústicos simulados para os pontos P16, P17 e P18.

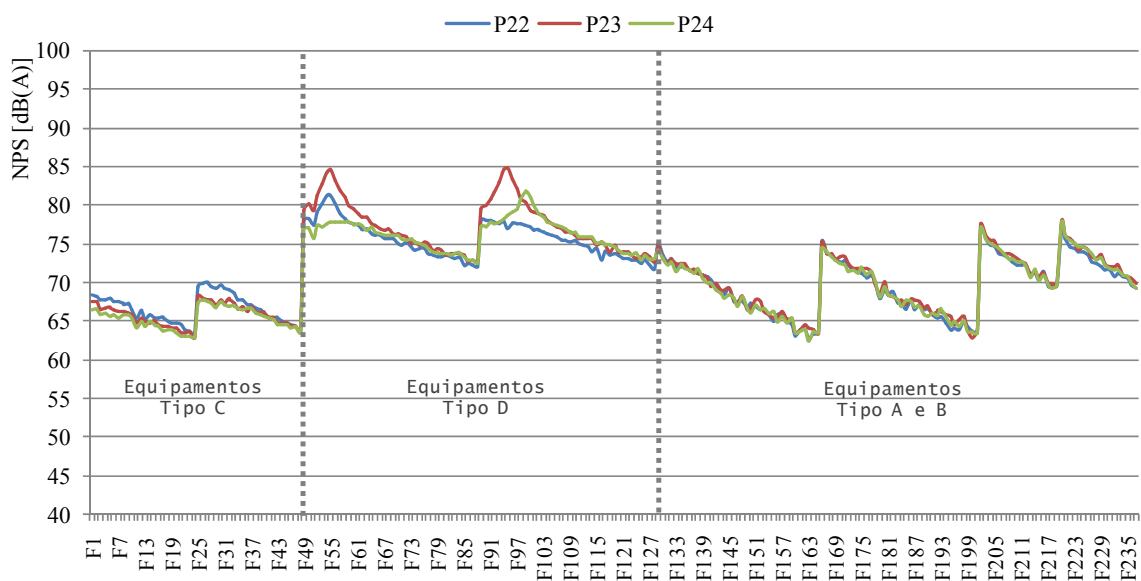


FIGURA 30: Contribuição das fontes sonoras nos níveis acústicos simulados para os pontos P16, P17 e P18.

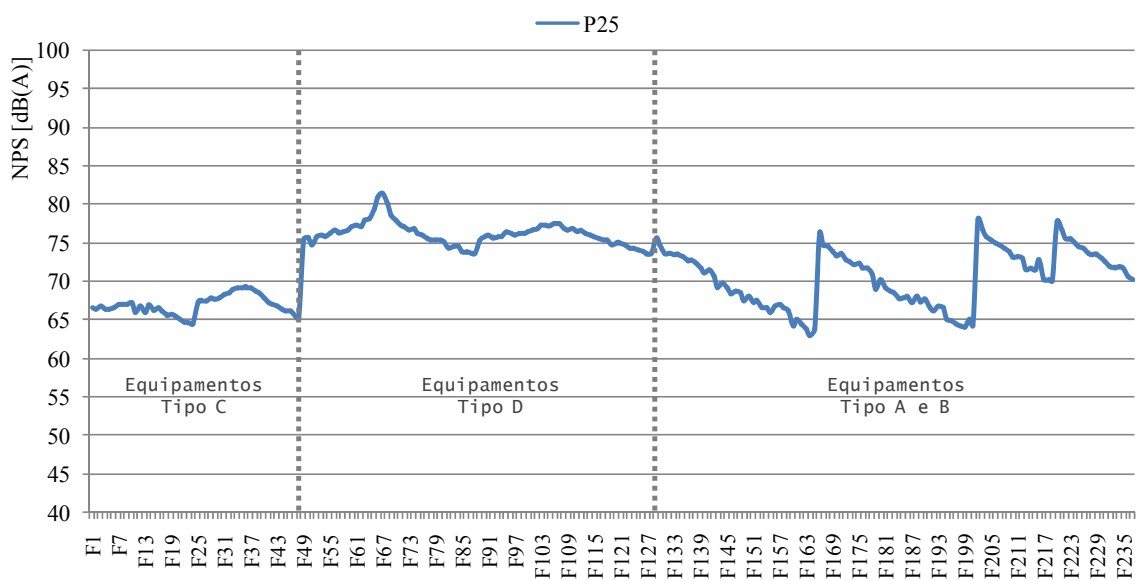


FIGURA 31: Contribuição das fontes sonoras nos níveis acústicos simulados para os pontos P16, P17 e P18.

Nas FIGs. 29, 30 e 31 estão apresentadas as relações de contribuição das emissões sonoras dos equipamentos nos níveis de pressão sonora nos pontos próximos às máquinas tipo D. Assim como acontece nos locais próximos aos equipamentos do tipo C, os níveis sonoros nos pontos P19 a P25 sofrem grande influência da emissão sonora

dos equipamentos A e B. Por outro lado, a contribuição dos equipamentos tipo C pode ser desconsiderada na avaliação destes locais, pois os níveis sonoros procedentes dessas máquinas estão 10 dB(A) ou mais abaixo dos níveis de ruído provenientes dos demais equipamentos.

Conclui-se a partir destes gráficos, que para atenuar o ruído nos pontos P1 a P6 e P19 a P25 não é suficiente reduzir a emissão sonora dos equipamentos C e D próximo a estes locais, uma vez que nestes pontos os níveis sonoros resultantes do campo reverberante gerados pelos equipamentos A e B são bastante significativos.

5.4. Identificação das atenuações acústicas obtidas na máquina Tipo A

Para identificar as possíveis atenuações na máquina tipo A, primeiramente foram medidos os níveis sonoros emitidos por um protótipo da máquina em 3 pontos, durante 1(um) minuto, registrados na curva de ponderação A.

Neste mesmo protótipo foram realizados estudos visando reconhecer as possíveis atenuações de ruído no equipamento. Com base nestes estudos, o departamento de Eng. de Manutenção da empresa adotou diversas alterações, buscando diminuir a emissão sonora da máquina. Cabe ressaltar os que sistemas acústicos mitigadores de ruído dos equipamentos implantados não alteraram as dimensões dos mesmos, uma vez que são constituídos de sistemas de absorção internos e fechos de isolamento de borda para vedação da máquina.

Após a instalação dos sistemas de atenuação e manutenção, os níveis sonoros emitidos pela máquina foram medidos novamente. A TAB. 14 apresenta os níveis sonoros emitidos pelo equipamento na condição sem e com tratamento acústico.

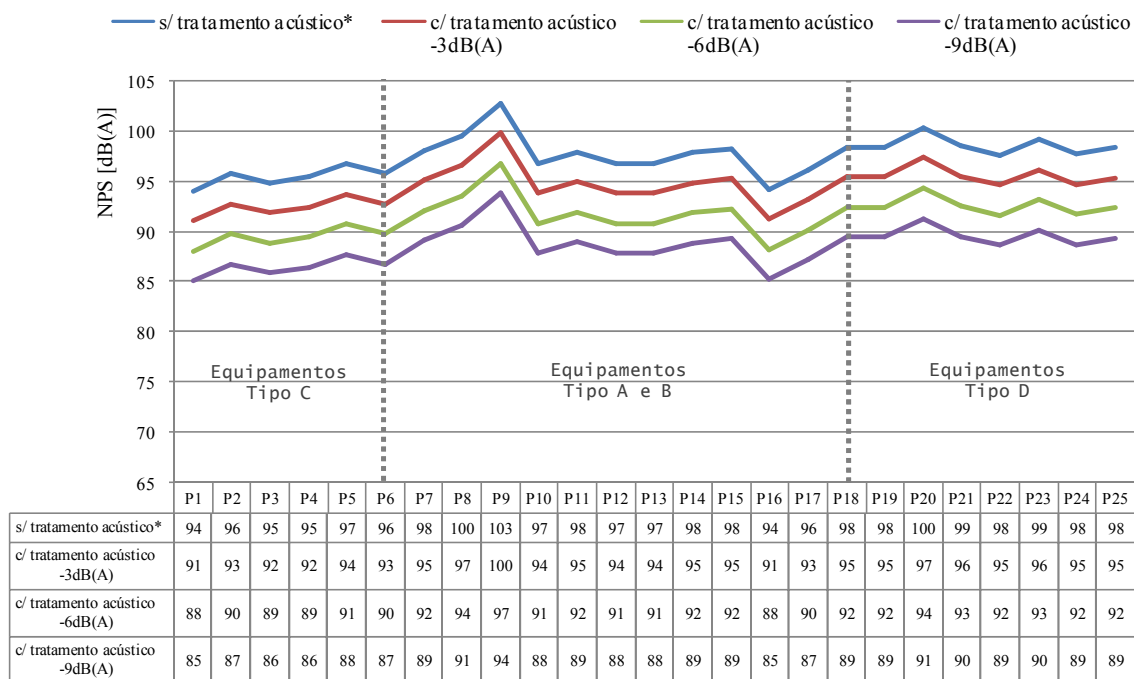
TABELA 14: Níveis de pressão sonora medidos próximo à máquina Tipo A, na condição sem tratamento acústico e com tratamento acústico.

Ponto de medição	Condição	L_{Aeq} [dBA]	Níveis registrados por banda de frequência [dB]							
			63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
P1	S/ tratamento	95	77	82	82	92	91	89	86	79
P1	C/ tratamento	86	88	84	85	87	83	79	77	76
Diferença de níveis acústicos no ponto P1 antes e após tratamento acústico		9	-11	-2	-3	5	8	10	9	3
P2	S/ tratamento	89	81	82	82	84	85	81	80	75
P2	C/ tratamento	86	90	85	82	86	80	78	75	72
Diferença de níveis acústicos no ponto P2 antes e após tratamento acústico		3	-9	-3	0	-2	5	3	5	3
P3	S/ tratamento	88	71	79	86	81	85	81	76	70
P3	C/ tratamento	86	88	86	84	83	84	77	76	73
Diferença de níveis acústicos no ponto P3 antes e após tratamento acústico		2	-17	-7	2	-2	1	4	0	-3

Conforme pode ser observado, no ponto P1 houve uma redução efetiva no L_{Aeq} global de 9 dB(A) na emissão acústica da máquina tipo A. Nos demais pontos de medição houve uma redução dos níveis sonoros equivalentes de 3 dB(A) e 2 dB(A), respectivamente, de forma que a emissão acústica do equipamento se tornou uniforme em todas as posições próximas ao equipamento.

5.5. Simulação computacional de diferentes situações de tratamento dos equipamentos e do ambiente estudado.

A partir da avaliação do potencial de atenuação de ruído identificado na máquina tipo A, foram realizadas simulações acústicas com valores de redução no nível de potência sonora dos equipamentos em 3 dB(A), 6 dB(A) e 9 dB(A). Os resultados obtidos nas simulações são apresentados na FIG. 32, considerando o ambiente sem o uso de material absorvente nas superfícies dos entorno.



*Condição sem tratamento acústico correspondente às potências acústicas com os menores valores medidos.

FIGURA 32: Comparação entre os níveis sonoros simulados para a condição sem tratamento e os níveis simulados com tratamento acústico das fontes.

Os valores dos NPS simulados após a redução das potências sonoras, reduziram linearmente, conforme é observado na FIG. 32. Ou seja, os níveis sonoros registrados nos receptores para os três cenários apresentados nesta figura tiveram reduções equivalentes à atenuação da emissão sonora das fontes. Desta forma, as curvas do gráfico seguem a mesma tendência, uma vez que não houve modificações nas condições do ambiente.

A fim de avaliar as possibilidades de utilização de absorção sonora nas superfícies do ambiente como alternativa de redução de ruído, foram simulados outros três diferentes cenários. O primeiro cenário simulou a condição sem tratamento acústico das fontes sonoras utilizando material absorvente⁶ nas superfícies do telhado e superfícies inferiores dos mezaninos localizados acima dos equipamentos. No segundo cenário simulado, foi considerada a condição de tratamento das fontes com redução da emissão sonora em 6 dB(A) e utilização de absorção sonora nas mesmas condições descritas anteriormente. Por último, no terceiro cenário adotou-se redução sonora nos

⁶ Os coeficientes do material absorvente utilizado na simulação estão listados na TABELA 5.

equipamentos de 9 dB(A) e adição de absorção sonora nas superfícies do telhado e mezaninos sobre os equipamentos. Os resultados obtidos pelas simulações destes cenários estão apresentados nas figuras a seguir.

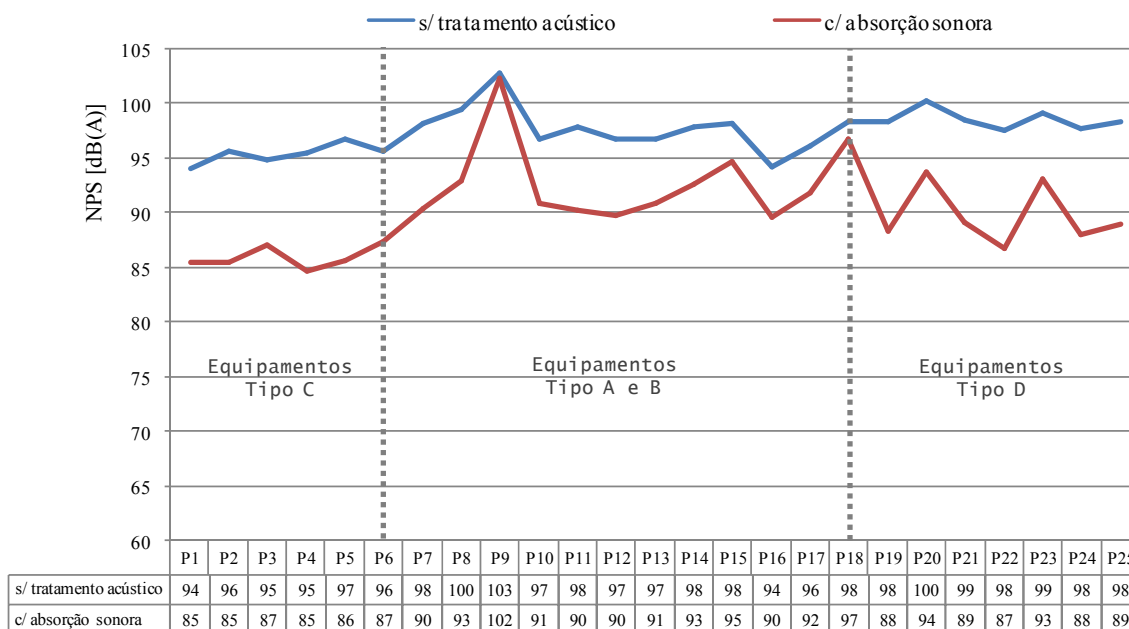


FIGURA 33: Comparação entre os níveis sonoros simulados para as condições sem tratamento acústico e para condição de tratamento com adição de absorção sonora no ambiente.

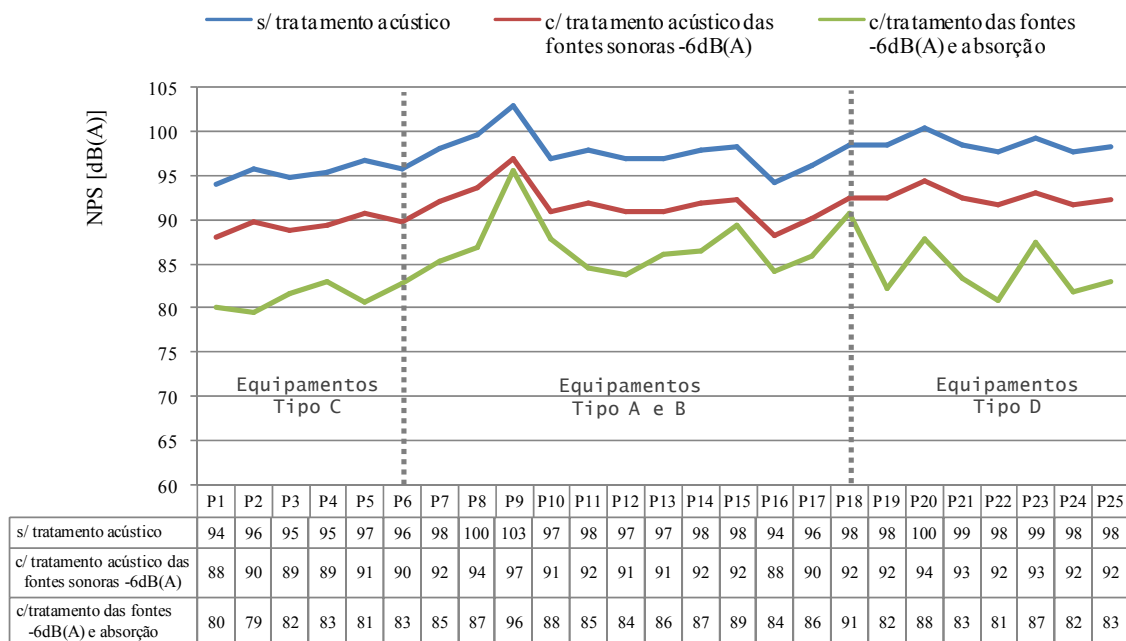


FIGURA 34: Comparação entre os níveis sonoros simulados para as condições sem tratamento, com tratamento acústico das fontes – atenuação de 6 dB(A) – e com adição de absorção no ambiente.

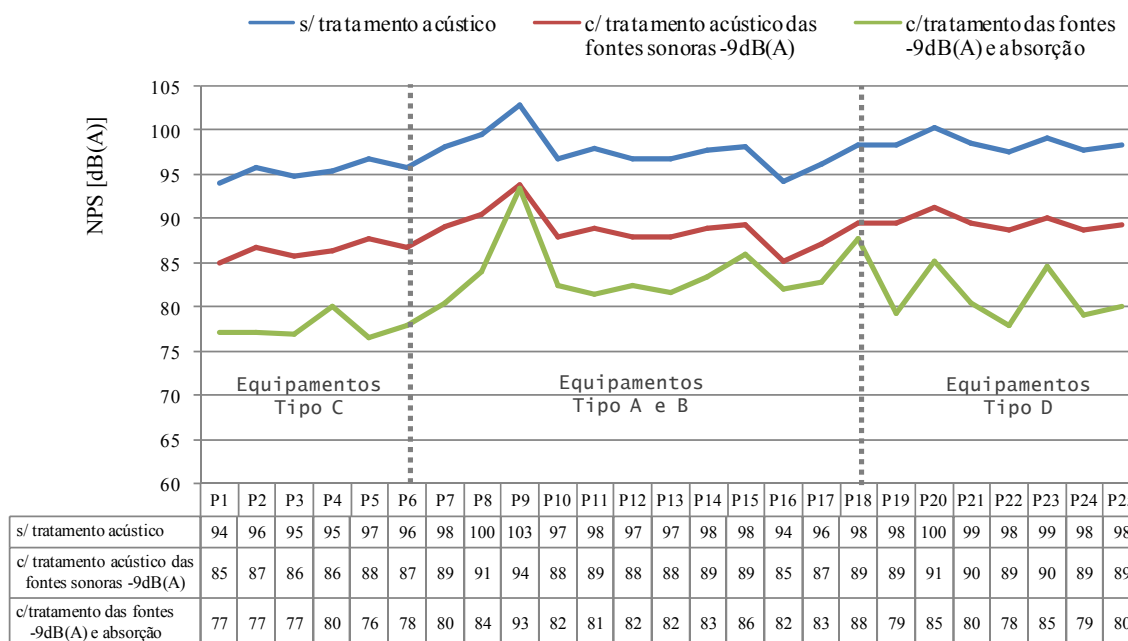


FIGURA 35: Comparação entre os níveis sonoros simulados para as condições sem tratamento, com tratamento acústico das fontes – atenuação de 9 dB(A) – e com adição de absorção no ambiente.

Os gráficos acima apresentam a comparação entre os resultados das simulações com tratamentos acústicos das fontes e com tratamento do ambiente, utilizando material absorvente nas superfícies do telhado e mezaninos sobre as máquinas.

As simulações com utilização de material de absorção no telhado e mezaninos geraram resultados satisfatórios para a atenuação de ruído no ambiente. Obteve-se redução nos níveis sonoros entre 6 dB(A) e 10 dB(A) na maioria dos locais considerados. Entretanto, diferente da simulação com atenuação da potência sonora, a redução do ruído no ambiente com a alteração da absorção não foi linear para todos os locais. Nos gráficos é possível observar a presença de picos, os quais representam os pontos localizados entre as máquinas, ou seja, muito próximos aos equipamentos. A partir destes dados, conclui-se que nos locais entre os equipamentos, os níveis sonoros sofrem maior influência do campo próximo (ou seja, da emissão sonora dos equipamentos) e das reflexões provenientes das superfícies das máquinas adjacentes.

Pode ser observado, também, que os níveis sonoros registrados nos pontos próximos aos equipamentos tipo C e D tiveram uma redução mais efetiva com a utilização de material absorvente, comparada com a atenuação sonora nos pontos próximos às máquinas tipo A e B. Diante disto, pode-se inferir que os níveis acústicos dos locais adjacentes aos

equipamentos C e D a influência da reverberação é maior que nos pontos próximos às máquinas A e B. Os níveis registrados nos pontos P16, P17 e P18 apresentam as menores reduções, possivelmente, devido ao fato destes pontos se localizarem próximos a superfícies com revestimento de espuma absorvente.

Analisando os cenários simulados, é possível concluir que o tratamento de ruído na fonte é mais eficaz que o tratamento do ambiente por meio de utilização de absorção nas superfícies, uma vez que proporciona redução de ruído de maneira uniforme em todo o ambiente, principalmente nos pontos próximos aos equipamentos, locais de maior interesse de atenuação de ruído. Por outro lado, a absorção pode ser uma boa alternativa para os locais onde os níveis sonoros sofrem maior influência da reverberação proveniente de equipamentos mais distantes, como é o caso dos locais adjacentes aos equipamentos tipo C.

Diante destas análises, foram simulados cenários de tratamento acústico atenuando a emissão sonora das máquinas tipo A e B, além de superfícies absorventes no telhado e mezaninos sobre os equipamentos. Os resultados obtidos por estas simulações são apresentados na FIG. 36 a seguir.

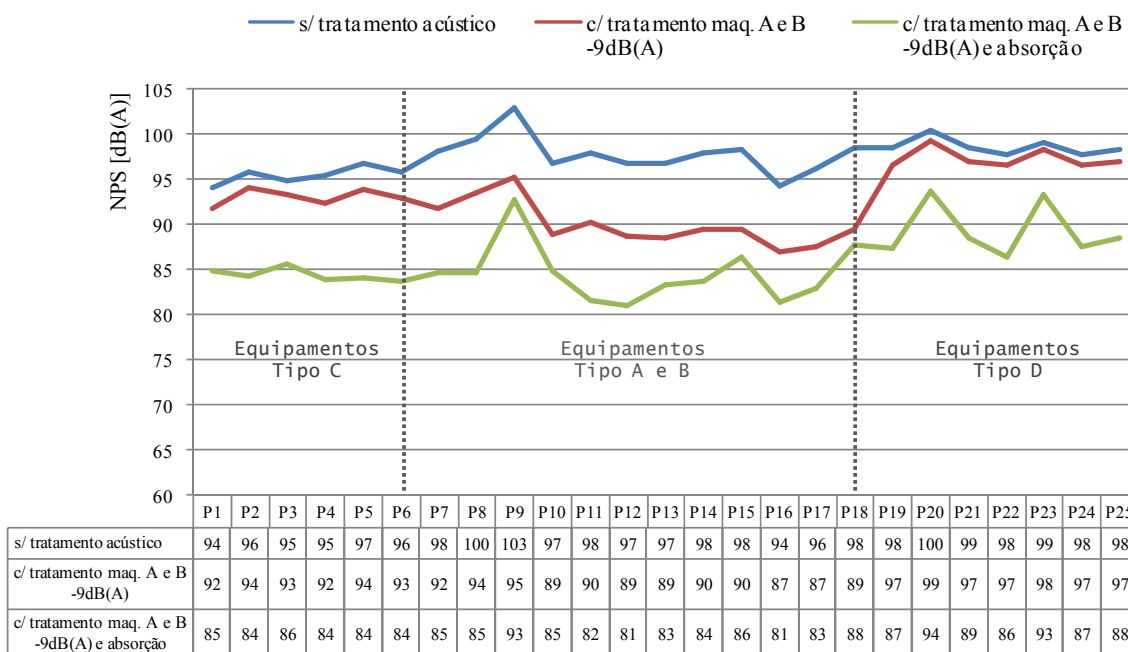


FIGURA 36: Comparação entre os níveis sonoros simulados para a condição sem tratamento acústico e com tratamento dos equipamentos A e B com superfícies absorventes.

Analisando a FIG. 36 é possível perceber que a atenuação do ruído após o tratamento dos equipamentos A e B é mais efetiva para os locais próximos a estas máquinas. Nos demais locais próximos aos equipamentos tipo C e D, a atenuação obtida é menos efetiva, variando entre 1 dB(A) e 3 dB(A). No entanto, ao adicionar o efeito das superfícies absorventes, os níveis sonoros nestes locais reduzem consideravelmente. Provavelmente isto ocorre, pois os níveis acústicos nos locais adjacentes às máquinas tipo C e D têm grande influência do efeito da reverberação do ambiente. Cabe ressaltar, que neste cenário proposto, também ocorrem os picos nos valores de NPS nos pontos entre as máquinas. Este efeito poderia ser atenuado aumentando a distância entre os equipamentos e/ou através de inserção de material fono-absorvente nas superfícies laterais das máquinas.

Todos os cenários analisados neste item serviram de referência para estabelecer estratégias de tratamento a fim de reduzir os níveis sonoros no ambiente, considerando as melhores relações de custo-benefício proporcionado por cada alternativa avaliada.

5.6. Cenários de tratamento acústico nos equipamentos relacionando redução de ruído e custos de tratamento.

Considerando a contribuição da emissão sonora de cada máquina nos níveis sonoros do ambiente, foram elaboradas planilhas que relacionam os níveis sonoros dos locais de medição, possibilidades de atenuação de ruído através de tratamento das fontes e os custos inerentes a estes. As planilhas de tratamento acústico funcionam da seguinte maneira: ao selecionar a opção de tratamento, o equipamento selecionado é tratado virtualmente e o valor de NPS após o tratamento, bem como o custo inerente ao mesmo, é adicionado aos dados da planilha. Ao final desta, são apresentados também os resultados nos níveis globais dos pontos obtidos pelo tratamento, ou seja, a atenuação obtida pela redução da emissão sonora das máquinas selecionadas, bem como o custo total de implantação das medidas de atenuação propostas. Apresenta-se ainda a dose diária de ruído para condição sem o tratamento dos equipamentos comparando com a dose que funcionário estará exposto caso seja realizado o tratamento gerado pela planilha.

Para demonstrar este procedimento de simulação de cenários de tratamento, foram selecionados três exemplos que representam cada região do ambiente: Grupo 1: representado pelos pontos P4, P5 e P6, locais próximos aos equipamentos tipo C, Grupo 2: P16, P17, P18, que representam os locais próximos às máquinas tipo A e B; e Grupo 3: P19, P20, P21, sendo estes, pontos próximos aos equipamentos tipo D.

Uma vez que são muitos os equipamentos no ambiente em questão, procurou-se eliminar das planilhas as máquinas que não emitiam ruído que contribuísse de fato para o nível sonoro do local avaliado. Desta forma, os equipamentos que emitiam ruído menor que 10 dB(A) do maior nível de contribuição dos equipamentos foram desconsiderados nos casos apresentados. Por exemplo, para o ponto P4 a maior contribuição é de 83 dB(A) emitido pela fonte sonora F19, portanto serão consideradas no tratamento acústico deste ponto, somente os equipamentos que emitem ruído maior que 73 dB(A).

Como para cada grupo avaliado, as planilhas oferecem uma variação muito grande de opções de tratamento acústico dos equipamentos, selecionaram-se alguns cenários de cada grupo para serem avaliados. Desta forma, as tabelas seguintes apresentam algumas possibilidades de tratamento acústico nas fontes, com previsão de resultados e investimentos necessários para implantação do mesmo.

Primeiramente, são apresentados, nas TAB. 15 e TAB. 16, as opções de tratamento propostas para o Grupo 1, representados pelos pontos P4, P5 e P6 – próximos aos equipamentos tipo C. A opção 1 propõe o tratamento nos equipamentos tipo C, enquanto a opção 2 apresenta uma alternativa de tratamento atenuando o ruído nos equipamentos tipo A e B. Em seguida, a opção 3 propõe a combinação de tratamento das máquinas tipo A, B e C.

TABELA 15: Planilha de tratamento acústico nas fontes sonoras para os pontos de medição P4, P5 e P6 – Opção 1: tratamento acústico dos equipamentos tipo C.

TRATAMENTO	FONTES SONORAS	Leq [dB(A)]			CUSTOS
		P4	P5	P6	
Máquinas Tipo C					
<input checked="" type="checkbox"/>	F15	62	61	60	R\$ 5.000,00
...
<input checked="" type="checkbox"/>	F19	73	66	61	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F20	73	67	61	R\$ 5.000,00
...
<input checked="" type="checkbox"/>	F23	63	62	61	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F40	61	61	61	R\$ 5.000,00
...
<input checked="" type="checkbox"/>	F43	61	66	73	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F44	61	67	73	R\$ 5.000,00
...
<input checked="" type="checkbox"/>	F47	61	61	62	R\$ 5.000,00
Máquinas Tipo D					
<input type="checkbox"/>	F49	68	72	72	R\$ 0,00
...
<input type="checkbox"/>	F128	71	73	72	R\$ 0,00
Máquinas Tipo A e B					
<input type="checkbox"/>	F129	80	80	78	R\$ 0,00
...
<input type="checkbox"/>	F149	69	70	69	R\$ 0,00
...
<input type="checkbox"/>	F167	76	78	78	R\$ 0,00
<input type="checkbox"/>	F185	69	70	69	R\$ 0,00
<input type="checkbox"/>	F202	74	76	75	R\$ 0,00
...
<input type="checkbox"/>	F237	67	70	69	R\$ 0,00
NPS na Condição sem tratamento acústico		94	95	95	R\$ 0,00
NPS na Condição com tratamento acústico		94	95	95	R\$ 85.000,00
Tempo de exposição (h:min)		0:40	3:45	0:40	
Dose ruído na condição s/ tratamento		250%			
Dose ruído na condição c/ tratamento		250%			

Com base na avaliação da proposta de tratamento para os pontos P4, P5 e P6, apresentados na TAB. 15, constata-se que esta alternativa não gerou nenhuma atenuação de ruído efetiva nos locais avaliados. Na opção apresentada nesta tabela, como descrito anteriormente, foram considerados o tratamento acústico dos equipamentos tipo C. Desta forma, conclui-se que, para atenuar o ruído nestes pontos, não é suficiente o tratamento destes equipamentos, seria necessário atenuar também os diversos equipamentos mais distantes aos locais avaliados.

A partir dos resultados da contribuição da emissão sonora dos equipamentos nos pontos próximos às máquinas tipo C, conclui-se que esses locais sofrem grande influência da emissão sonora dos equipamentos tipo A e B (ver FIG 23 e FIG. 24). Desta forma, foi proposto uma alternativa de tratamento para o Grupo 1, apresentada na TAB. 16 atenuando a emissão sonora das máquinas A e B, a fim de avaliar a real contribuição das emissões acústicas destes equipamentos nos pontos em questão.

TABELA 16: Planilha de tratamento acústico nas fontes sonoras para os pontos de medição P4, P5 e P6 – Opção 2: tratamento acústico dos equipamentos tipo A e B.

TRATAMENTO	FONTES SONORAS	Leq [dB(A)]			CUSTOS
		P4	P5	P6	
Máquinas Tipo C					
<input type="checkbox"/>	F15	71	70	69	R\$ 0,00
...
<input type="checkbox"/>	F19	82	75	70	R\$ 0,00
<input type="checkbox"/>	F20	82	76	70	R\$ 0,00
...
<input type="checkbox"/>	F23	72	71	70	R\$ 0,00
<input type="checkbox"/>	F40	70	70	70	R\$ 0,00
<input type="checkbox"/>	F43	70	75	82	R\$ 0,00
<input type="checkbox"/>	F44	70	76	82	R\$ 0,00
...
...
<input type="checkbox"/>	F47	70	70	71	R\$ 0,00
Máquinas Tipo D					
<input type="checkbox"/>	F49	68	72	72	R\$ 0,00
...
<input type="checkbox"/>	F128	71	73	72	R\$ 0,00
Máquinas Tipo A e B					
<input checked="" type="checkbox"/>	F129	71	71	69	R\$ 5.000,00
...
<input checked="" type="checkbox"/>	F166	69	70	70	R\$ 5.000,00
...
<input checked="" type="checkbox"/>	F185	60	61	60	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F202	65	67	66	R\$ 5.000,00
...
<input checked="" type="checkbox"/>	F217	62	62	60	R\$ 5.000,00
...
<input checked="" type="checkbox"/>	F237	58	61	60	R\$ 5.000,00
NPS na Condição sem tratamento acústico		94	95	95	R\$ 0,00
NPS na Condição com tratamento acústico		92	93	93	R\$ 385.000,00
Tempo de exposição (h:min)		0:40	3:45	0:40	
Dose diária de ruído na condição s/ tratamento		250%			
Dose diária de ruído na condição c/ tratamento		190%			

A segunda proposta de tratamento para o Grupo 1 mostrou ser mais eficaz que a opção 1, pois diminuiu a dose diária de exposição ao ruído de 250% para 190%. No entanto, este resultado não é suficiente para alcançar uma condição de exposição ao ruído permitida, segundo a norma NR-15.

Avaliou-se que este cenário de tratamento não oferece uma boa relação de custo-benefício, caso houvesse a necessidade de atenuar o ruído somente estes pontos dentro do galpão industrial, outras medidas de atenuação deveriam ser estudadas, pois o custo de investimento no tratamento dos equipamentos A e B é elevado para obter como resultado uma atenuação de somente 2 dB(A) em cada ponto, e assim, permanecer em condições ambientais insalubres, pois a exposição excede o valor máximo permitido.

Diante disto, para alcançar níveis de ruído aceitáveis seria necessário adotar alguma medida complementar a esta proposta, como por exemplo, adição de materiais absorventes nas superfícies do ambiente. Ou então, o tratamento de um número maior de equipamentos que contribuem para os níveis sonoros nestes locais avaliados.

Cabe ressaltar, que os pontos em questão também sofrem influência dos equipamentos tipo D, desta forma, para atenuação efetivas nos níveis sonoros nestes locais seria necessário também diminuir a emissão sonora dessas máquinas. Diante disto, a TAB. 17 apresenta um cenário de tratamento para o Grupo 1, atenuando a emissão sonora das máquinas tipo A, B e D para o Grupo 1.

TABELA 17: Planilha de tratamento acústico nas fontes sonoras para os pontos de medição P4, P5 e P6 – Opção 3: tratamento acústico dos equipamentos tipo A, B e D.

TRATAMENTO	FONTES SONORAS	Leq [dB(A)]			CUSTOS
		P4	P5	P6	
Máquinas Tipo C					
<input type="checkbox"/>	F15	71	70	69	R\$ 0,00
...
<input type="checkbox"/>	F19	82	75	70	R\$ 0,00
<input type="checkbox"/>	F20	82	76	70	R\$ 0,00
...
<input type="checkbox"/>	F23	72	71	70	R\$ 0,00
<input type="checkbox"/>	F40	70	70	70	R\$ 0,00
<input type="checkbox"/>	F43	70	75	82	R\$ 0,00
<input type="checkbox"/>	F44	70	76	82	R\$ 0,00
...
...
<input type="checkbox"/>	F47	70	70	71	R\$ 0,00
Máquinas Tipo D					
<input checked="" type="checkbox"/>	F49	59	63	63	R\$ 5.000,00
...
<input checked="" type="checkbox"/>	F128	62	64	63	R\$ 5.000,00
Máquinas Tipo A e B					
<input checked="" type="checkbox"/>	F129	71	71	69	R\$ 5.000,00
...
<input checked="" type="checkbox"/>	F166	69	70	70	R\$ 5.000,00
...
<input checked="" type="checkbox"/>	F185	60	61	60	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F202	65	67	66	R\$ 5.000,00
...
<input checked="" type="checkbox"/>	F217	62	62	60	R\$ 5.000,00
...
<input checked="" type="checkbox"/>	F237	58	61	60	R\$ 5.000,00
NPS na Condição sem tratamento acústico		94	95	95	R\$ 0,00
NPS na Condição com tratamento acústico		89	89	90	R\$ 780.000,00
Tempo de exposição (h:min)		0:40	3:45	0:40	
Dose diária de ruído na condição s/ tratamento		250%			
Dose diária de ruído na condição c/ tratamento		100%			

O cenário de tratamento discriminado na TAB. 17 apresentou o resultado desejado para os níveis de ruído dos pontos do Grupo 1. A dose diária de exposição passou de 250% para 100%, valor máximo permitido pelas normas de higiene ocupacional. Os investimentos necessários para implantação deste cenário são elevados, entretanto o tratamento proposto poderá beneficiar, tanto os postos de trabalho próximos às máquinas tipo C, quanto os locais próximos aos equipamentos tipo A, B e D. Esta alternativa também poderá ser avaliada a partir dos cenários propostos para o Grupo 2 e 3, apresentados a seguir.

A TAB. 18 seguinte apresenta a proposta de tratamento para o Grupo 2 representado pelos pontos P16, P17 e P18, próximos aos equipamentos tipo A. Conforme foi observado no gráfico da contribuição das fontes sonoras nestes pontos (ver FIG. 28), somente os equipamentos mais próximos influenciam os valores dos níveis acústicos destes locais. Desta forma, a planilha de tratamento da TAB. 18 apresenta uma proposta de tratamento de todas as fontes sonoras que contribuem para os níveis acústicos nos locais avaliados nesta tabela.

TABELA 18: Planilha de tratamento acústico nas fontes sonoras para os pontos de medição P16, P17 e P18.

TRATAMENTO	FONTES SONORAS	Leq [dB(A)]			CUSTOS
		P16	P17	P18	
Máquinas Tipo A					
<input checked="" type="checkbox"/>	F156	68	70	69	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F157	70	70	72	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F158	72	73	72	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F159	73	74	74	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F160	84	77	74	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F161	85	80	74	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F162	74	78	75	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F163	72	75	74	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F164	71	74	73	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F165	70	73	72	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F192	69	70	69	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F193	68	71	72	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F194	72	72	73	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F195	71	74	74	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F196	72	77	85	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F197	73	80	84	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F198	71	77	74	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F199	71	75	73	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F200	71	74	72	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F201	70	73	72	R\$ 5.000,00
NPS na Condição sem tratamento acústico		95	95	96	R\$ 0,00
NPS na Condição com tratamento acústico		89	89	90	R\$ 100.000,00
Tempo de exposição (h:min)		0:32	3:56	0:32	
Dose diária de ruído na condição s/ tratamento		300%			
Dose diária de ruído na condição c/ tratamento		100%			

O tratamento acústico apresentado na TAB. 18 resultou em níveis satisfatórios de exposição ao ruído. Conforme pode ser verificado, a dose diária de ruído diminuiu para um terço do valor da condição sem tratamento acústico dos equipamentos. O investimento necessário para obter estes resultados é relativamente pequeno, uma vez que o valor de R\$ 100.000,00 equivale ao preço de um equipamento tipo A ou B. A relação entre custos e benefícios apresentada nesta tabela é bastante razoável, uma vez que foi alcançado o nível de exposição diária permitida pelas normas de higiene ocupacional. No entanto, cabe ressaltar, que ainda serão necessárias medidas preventivas para evitar possíveis danos à saúde do trabalhador.

O resultado deste tratamento foi possível, pois, conforme FIG. 28, a influência dos equipamentos mais distantes nos níveis sonoros nos pontos P16, P17 e P18 pode ser desconsiderada. Portanto, os níveis de ruído nestes locais é função do campo próximo gerado pelos equipamentos adjacentes a eles.

Em seguida, a fim de avaliar as alternativas de atenuação acústica dos pontos próximos aos equipamentos tipo D, apresentam-se nas tabelas TAB. 19, TAB. 20 e TAB. 21, três propostas de tratamento acústico dos equipamentos para o Grupo 3, representados pelos pontos P19, P20 e P21.

A primeira opção de tratamento propõe atenuar o ruído emitido pelos equipamentos tipo D, enquanto a segunda proposta indica o tratamento acústico dos equipamentos tipo A e B. Por fim, a terceira proposta sugere a atenuação do ruído tanto dos equipamentos tipo D quanto das máquinas tipo A e B.

TABELA 19: Planilha de tratamento acústico nas fontes sonoras para os pontos de medição P19, P20 e P21 – Opção 1: tratamento acústico das máquinas tipo D.

TRATAMENTO	FONTES SONORAS	NPS [dB(A)]			CUSTOS
		P19	P20	P21	
Máquinas Tipo D					
<input checked="" type="checkbox"/>	F49	65	66	65	R\$ 5.000,00
...
<input checked="" type="checkbox"/>	F78	72	76	69	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F79	72	76	69	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F80	71	75	68	R\$ 5.000,00
...
<input checked="" type="checkbox"/>	F89	64	66	65	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F96	65	66	65	R\$ 5.000,00
...
<input checked="" type="checkbox"/>	F118	68	76	72	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F119	68	76	72	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F120	68	75	71	R\$ 5.000,00
...
<input checked="" type="checkbox"/>	F128	67	68	67	R\$ 5.000,00
Máquinas Tipo A e B					
<input type="checkbox"/>	F129	77	76	76	R\$ 0,00
...
<input type="checkbox"/>	F144	71	70	70	R\$ 0,00
<input type="checkbox"/>	F166	78	77	76	R\$ 0,00
...
<input type="checkbox"/>	F180	71	72	71	R\$ 0,00
<input type="checkbox"/>	F202	79	80	79	R\$ 0,00
...
<input type="checkbox"/>	F237	71	72	71	R\$ 0,00
NPS na Condição sem tratamento acústico		97	99	97	R\$ 0,00
NPS na Condição com tratamento acústico		94	95	94	R\$ 345.000,00
Tempo aprox. de exposição (h:min)		0:20	4:25	0:20	
Dose diária de ruído na condição s/ tratamento		400%			
Dose diária de ruído na condição c/ tratamento		220%			

TABELA 20: Planilha de tratamento acústico nas fontes sonoras para os pontos de medição P19, P20 e P21 – Opção 2: tratamento acústico das máquinas tipo D.

TRATAMENTO	FONTES SONORAS	NPS [dB(A)]			CUSTOS
		P19	P20	P21	
Máquinas Tipo D					
<input type="checkbox"/>	F49	74	75	74	R\$ 0,00
...
<input type="checkbox"/>	F78	81	85	78	R\$ 0,00
<input type="checkbox"/>	F79	81	85	78	R\$ 0,00
<input type="checkbox"/>	F80	80	84	77	R\$ 0,00
...
<input type="checkbox"/>	F89	73	75	74	R\$ 0,00
<input type="checkbox"/>	F96	74	75	74	R\$ 0,00
...
<input type="checkbox"/>	F118	77	85	81	R\$ 0,00
<input type="checkbox"/>	F119	77	85	81	R\$ 0,00
<input type="checkbox"/>	F120	77	84	80	R\$ 0,00
...
<input type="checkbox"/>	F128	76	77	76	R\$ 0,00
Máquinas Tipo A e B					
<input checked="" type="checkbox"/>	F129	68	67	67	R\$ 5.000,00
...
<input checked="" type="checkbox"/>	F144	62	61	61	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F166	69	68	67	R\$ 5.000,00
...
<input checked="" type="checkbox"/>	F180	62	63	62	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F202	70	71	70	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F203	68	69	69	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F236	63	63	62	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F237	62	63	62	R\$ 5.000,00
NPS na Condição sem tratamento acústico		94	99	97	R\$ 0,00
NPS na Condição com tratamento acústico		95	98	95	R\$ 335.000,00
Tempo aprox. de exposição (h:min)		0:20	4:25	0:20	
Dose diária de ruído na condição s/ tratamento		400%			
Dose diária de ruído na condição c/ tratamento		330%			

Com base na avaliação da TAB. 19, observa-se que o tratamento dos equipamentos tipo D não é suficiente para diminuir satisfatoriamente os níveis sonoros nos locais próximos a essas máquinas. Neste caso, a influência do campo reverberante é maior e, portanto para atenuar o ruído nestes locais os equipamentos tipo A e B também deverão ser tratados acusticamente. O tratamento acima proposto nesta tabela não oferece uma boa relação de custo-benefício, uma vez que o tratamento proposto requer uma investimento elevado para atenuação de ruído de 3 dB(A). Possivelmente seria necessário um investimento maior, agregando outras medidas mitigatórias para alcançar os resultados desejados.

Diante disto, foi proposto, na TAB. 20 o tratamento dos equipamentos tipo A e B a fim de verificar a atenuação que estes equipamentos proporcionam nos pontos do Grupo 3. No entanto, ao analisar a TAB. 20 observa-se que os resultados obtidos pela proposta de tratamento são inferiores aos previstos no primeiro cenário sugerido para o Grupo 3. Diante disto, conclui-se que para atenuação dos níveis de ruído nos pontos P19, P20 e P21, a prioridade de tratamento seria a redução da emissão sonora dos equipamentos tipo D. No entanto, esta medida não seria suficiente para adequar os níveis de ruído nesses locais às normas de salubridade, conforme pode ser verificado na TAB. 19. Neste contexto, o cenário seguinte apresenta uma proposta de tratamento dos equipamentos tipo D juntamente com atenuação da emissão sonora das máquinas A e B.

TABELA 21: Planilha de tratamento acústico nas fontes sonoras para os pontos de medição P19, P20 e P21 – Opção 3: tratamento acústico das máquinas tipo A, B e D.

TRATAMENTO	FONTES SONORAS	NPS [dB(A)]			CUSTOS
		P19	P20	P21	
Máquinas Tipo D					
<input checked="" type="checkbox"/>	F49	65	66	65	R\$ 5.000,00
...
<input checked="" type="checkbox"/>	F78	72	76	69	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F79	72	76	69	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F80	71	75	68	R\$ 5.000,00
...
<input checked="" type="checkbox"/>	F89	64	66	65	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F96	65	66	65	R\$ 5.000,00
...
<input checked="" type="checkbox"/>	F118	68	76	72	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F119	68	76	72	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F120	68	75	71	R\$ 5.000,00
...
<input checked="" type="checkbox"/>	F128	67	68	67	R\$ 5.000,00
Máquinas Tipo A e B					
<input checked="" type="checkbox"/>	F129	68	67	67	R\$ 5.000,00
...
<input checked="" type="checkbox"/>	F144	62	61	61	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F166	69	68	67	R\$ 5.000,00
...
<input checked="" type="checkbox"/>	F180	62	63	62	R\$ 5.000,00
<input checked="" type="checkbox"/>	F202	70	71	70	R\$ 5.000,00
...
<input checked="" type="checkbox"/>	F237	62	63	62	R\$ 5.000,00
NPS na Condição sem tratamento acústico		97	99	97	R\$ 0,00
NPS na Condição com tratamento acústico		88	90	88	R\$ 680.000,00
Tempo aprox. de exposição (h:min)		0:20	4:25	0:20	
Dose diária de ruído na condição s/ tratamento		400%			
Dose diária de ruído na condição c/ tratamento		120%			

A proposta de atenuação do ruído dos equipamentos A, B e D resultou em razoáveis níveis sonoros nos pontos do Grupo 3. Conclui-se, portanto, que este cenário é a melhor alternativa para atenuação efetiva do ruído nestes locais. Apesar do investimento para este cenário ser maior, deve-se ressaltar que o tratamento dos equipamentos A e B também irão atenuar os níveis sonoros nos outros locais avaliados, desta forma o benefício será maior.

A utilização destas planilhas para simular situações de tratamento acústico das fontes sonoras permite avaliar diversos possíveis cenários de tratamento antes de executar qualquer medida de atenuação de ruído. A previsão de resultados e custos dos tratamentos acústicos a serem implantados possibilita uma avaliação de custo-benefício a fim de estabelecer estratégias para atenuação dos níveis sonoros no ambiente. Acredita-se que estas planilhas sejam uma boa ferramenta para gestão de ruído ocupacional em locais onde investimentos são consideravelmente elevados.

5.7. Estratégia de tratamento acústico com base nos cenários simulados.

Com base nos cenários avaliados e nas simulações de tratamento propostos nos itens anteriores, foi possível estabelecer algumas estratégias de tratamento acústico visando a atenuação de ruído no ambiente, considerando as melhores relações de custo-benefício estabelecidos pelas propostas.

Conforme foi apresentado nas planilhas de simulação de tratamento acústico, a atenuação sonora dos equipamentos A e B resultou em atenuação de ruído efetiva em todos os pontos avaliados no ambiente. Desta forma, pode-se estabelecer como prioridade o tratamento destes equipamentos, por beneficiar todos os locais em questão. Além disto, essas máquinas emitem os maiores níveis de ruído e representam a maior quantidade de equipamentos dentro do galpão industrial.

Como pôde ser observado nas análises deste trabalho, conclui-se que não seria interessante o tratamento dos equipamentos tipo C, visto que isto proporcionaria pouco benefício comparado ao investimento necessário para tal medida. Além disto, o tratamento destes equipamentos traria benefícios somente para os locais adjacentes a eles.

Como segunda prioridade, estabelece-se o tratamento acústico dos equipamentos tipo D, uma vez que resultaria em redução dos níveis sonoros nos locais próximos aos equipamentos tipo C e D. De acordo com avaliação dos locais adjacentes a estes equipamentos, esta medida seria importante para diminuir efetivamente a exposição dos funcionários ao ruído.

Nos locais onde a reverberação é mais acentuada, os benefícios alcançados pela utilização de material fono-absorvente também são efetivos, como por exemplo nos pontos P1 a P6 e P19 a P25 (ver FIG 36), e poderia ser uma alternativa ao tratamento acústico do ambiente. Entretanto, o investimento para implantação desta medida é elevado, uma vez que os custos de sistemas de absorção são altos e o galpão industrial em estudo possui uma área de superfície extensa.

A TAB. 22 apresenta os custos de investimento acústico dos equipamentos A, B e D, bem como os custo de implantação de sistemas acústico fono-absorvente nas superfícies do ambiente.

TABELA 22: Relação de custos de implantação de tratamento acústico dos equipamentos e do ambiente.

TRATAMENTO	Custo unitário [R\$]	Quantidade	Investimento Total [R\$]
Atenuação Máquinas A e B	5.000,00	110 un.	550.000,00
Atenuação Máquinas D	5.000,00	78 un.	390.000,00
Sistema de absorção nas superfícies do telhado e mezanino	200,00*	11.000 m ²	2.200.000,00

*Custo aproximado a partir de pesquisa de mercado.

Avaliando a TAB. 22, verifica-se que o investimento no tratamento acústico do ambiente é duas vezes o valor do investimento na atenuação da emissão sonora dos equipamentos A, B e D. Desta forma, conclui-se que seria mais viável atenuar o ruído dessas máquina a adicionar os sistemas de absorção sonora propostos.

Diante das análises realizadas, conclui-se que para problemas de elevados níveis de ruído em ambientes de galpão industrial similares ao estudo de caso deste trabalho, a melhor alternativa a ser adotada é a atenuação de ruído nas fontes sonoras, ou seja, nos equipamentos.

6.

CONCLUSÕES

6.1. Considerações Finais

Para solucionar o problema dos elevados níveis de ruído nos ambientes de trabalho medidas de controle devem ser adotadas tendo em vista garantir boas condições ambientais nos locais de trabalhos. A redução do ruído pode ser alcançada através de soluções técnicas para atenuação de ruído no ambiente, na fonte sonora, ou então, pela adoção de equipamentos de proteção individual.

O controle de ruído na fonte ou no meio de transmissão são os mais indicados para o problema, uma vez que compreendem em medidas com ganhos coletivos que melhoram efetivamente a qualidade do ambiente, enquanto o controle de ruído no receptor são ações paliativas que devem ser tomadas como última opção. No entanto, as medidas de engenharia que visem o controle de ruído nas fontes sonoras ou no ambiente podem ser complexas e onerosas, necessitando de planejamento técnico e financeiro para viabilizar o projeto.

Dentro deste contexto, este trabalho teve como objetivo propor uma metodologia de controle e avaliação de ruído em locais de trabalho, utilizando ferramentas que permitem prever resultados e custos de investimentos de atenuação de ruído das fontes sonoras e tratamento do ambiente. A fim de exemplificar a metodologia proposta, adotou-se estudo de caso de um galpão industrial na região metropolitana de Belo Horizonte.

Os níveis de ruído em ambientes industriais se devem, principalmente, à emissão sonora de equipamentos muito ruidosos. A escolha por máquinas que geram menos ruído é importante para controle do ruído no ambiente, bem como a manutenção dos equipamentos quanto aos sistemas acústicos das mesmas. Acredita-se que a inexistência de um plano de manutenção de máquinas e equipamentos seja essencial para o controle de ruído a níveis mais toleráveis. Portanto, sugere-se incluir dentro do plano de gestão do ambiente da indústria ações que visem à manutenção rotineira dos sistemas acústicos das máquinas utilizadas nos processos de produção.

Diante disto, dentro da metodologia proposta neste trabalho recomenda-se estudos específicos de fontes sonoras e as relações destas com os níveis sonoros dos locais de trabalho, os quais podem lançar mão de diversas ferramentas de identificação, como por exemplo simulações acústicas associadas a medições sonoras no ambiente.

No estudo de caso adotado na pesquisa, foi possível identificar a atenuação de ruído no ambiente de trabalho de forma a subsidiar a adoção de um plano de manutenção dos equipamentos quanto aos sistemas de isolamento acústico das máquinas. Como estratégia, foram consideradas simulações com diferentes valores de potência sonora, sendo uma simulação com os menores valores de potência sonora dos equipamentos e outra com os maiores níveis de potência sonora. Comparando os resultados destas simulações para as duas condições consideradas, constatou-se que a diferença nos NPS nos postos de trabalho pode chegar a 9 dB(A), conforme FIG. 21.

Além disto, foram realizadas simulações acústicas para estabelecer as relações entre as emissões sonoras dos equipamentos e os níveis de pressão sonora nos postos de trabalho avaliados, bem como simular cenários de tratamento acústico das fontes sonoras e do ambiente por meio de superfícies fono-absorventes.

Após estabelecer as relações da emissão sonora das máquinas com os níveis acústicos nas estações de trabalho, foi possível prever resultados após atenuação da emissão

sonora das máquinas, bem como identificar os equipamentos que mais contribuem para os níveis sonoros nos locais estudados. A partir destes dados, foram elaboradas planilhas para estabelecer relações entre o tratamento acústico dos equipamentos, níveis sonoros atenuados, bem como os custos inerentes ao cenário de tratamento proposto. Com base nestas planilhas foram analisados diversos cenários de tratamento acústico dos equipamentos, identificando as relações de custo-benefício de cada um.

Diante disto, concluiu-se que, para o estudo de caso considerado, o tratamento das máquinas tipo A e B contribuem efetivamente para a atenuação de todos os locais avaliados e, portanto, a atenuação da emissão sonora destes equipamentos deveria ser prioridade para um programa de gestão de ruído ocupacional. Além disto, constatou-se que o tratamento acústico das máquinas tipo C oferece o menor custo-benefício para o ambiente, uma vez que a contribuição desse tratamento se limita aos locais adjacentes aos equipamentos referidos.

Constatou-se, também, que nos locais onde a influência do campo próximo é maior, os custos de tratamento acústico é menor, pois para alcançar resultados satisfatórios seria necessário o tratamento de poucos equipamentos. Por outro lado, nos locais onde a influência do campo reverberante é significativa, um número maior de equipamentos deve ser tratado para obter níveis de ruído permissíveis, segundo as normas de higiene do trabalho.

Conforme citado anteriormente, foram efetuadas simulações acústicas como ferramenta de predição de cenários de tratamento acústico. Nestas simulações foram propostos cenários de tratamento com redução das emissões sonoras dos equipamentos, bem como tratamento acústico das superfícies do ambiente. A partir das análises destes cenários, concluiu-se que o tratamento acústico dos equipamentos resulta em uma atenuação de ruído linear dentro do galpão, enquanto o sistema de absorção proposto não gera bons resultados para os locais muito próximos às máquinas. Por outro lado, estes sistemas resultaram em bons níveis de atenuação do ruído nos demais pontos avaliados, principalmente naqueles em que a reverberação é maior.

A metodologia apresentada no trabalho e exemplificada através de estudo de caso, permite compreender o problema de ruído a ser tratado, identificando os principais fatores que contribuem para os elevados níveis de ruído no ambiente. A utilização de

ferramentas de predição de resultados possibilita também estabelecer diversas opções de controle de ruído, bem como seus custos inerentes, permitindo avaliações de custo-benefício de cada cenário estabelecido. A possibilidade de previsão de resultados e custos do projeto permite a empresa desenvolver um planejamento técnico-financeiro, estabelecendo metas, ações prioritárias e cronograma de execução e desembolso financeiro.

6.2. Proposta para futuros trabalhos

Visando dar continuidade às pesquisas apresentadas nesta Dissertação de Mestrado, são propostos os seguintes trabalhos:

- Medições acústicas após a implantação dos sistemas de controle de ruído a fim de comparar com os resultados obtidos pelas ferramentas de predição de atenuação sonora utilizadas no presente trabalho
- Proposição de controle audiométrico nos funcionários, antes e após de implantação de medidas de controle de ruído, com a finalidade de avaliar os ganhos do tratamento acústico quanto à exposição do trabalhador.

Além disto, outros estudos de caso podem ser realizados com base na metodologia proposta neste trabalho, buscando avaliar outras situações de elevados níveis ruído em locais de trabalho e as medidas cabíveis para solução do problema.

7.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ARAÚJO, G.; REGAZZI, R. *Perícia e Avaliação de Ruído e Calor*. Rio de Janeiro: (s.n), 1999.

[ABNT] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10152: Níveis de ruído para conforto acústico*. Rio de Janeiro, 1987.

BORTONCELLO, E.; LIBERMAN, B.; OCÁCIA, G. Avaliação e Controle de Ruído Ocupacional em Indústria Gráfica. *Revista Tecnologia*:. Vol. 6, No. 1, Jan./Jun. 2005. p 15-25.

BISTAFA, S. R. . *Acústica Aplicada ao Controle de Ruído*. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

CAMILO, T.S. ; TENENBAUM, R.A.Método Híbrido para Simulação Numérica de Acústica de Salas: Teoria, Implantação Computacional e Validação Experimental. *Revista SOBRAC*. Florianópolis. No. 37. Junho 2006. p. 3-14.

CHRISTENSEN, C. L.; RINDEL, J. H. *A new scattering method that combines roughness and diffraction effects*. In: Forum Acusticum. Budapest, 2005.

DIEHL, G. M. Sound-power measurements on large machinery installed. [JASA] *Journal of the Acoustical Society of América*. Vol 61. No. 2. Fev, 1977.

FERNANDES, M.; MORATA, T.C. *Estudo dos efeitos auditivos e extra-auditivos da exposição ocupacional a ruído e vibração*. Rev. Bras. de Otorinolaringol. Vol. 68. No. 5. Set/Out 2002. p. 705-13.

FUNDACENTRO. *Avaliação da exposição ocupacional ao ruído*. Norma de Higiene Ocupacional NHO-01, São Paulo, 1999.

GERGES, S. Ruído e suas Conseqüências. In: VIEIRA, S. *Manual de Saúde e Segurança do Trabalho: Segurança, higiene e medicina do trabalho, volume 3*. São Paulo: LTr, 2005.

GOMES, M.H.A.; BERTOLI, S.R., DEDECCA, J.G. Implementação de Métodos para a Simulação Acústica e Auralização de Salas. *Revista SOBRAC*. Florianópolis. No.38. Março 2007. p 12-24.

HASSALL, J. R.; ZAVERI, K. *Acoustic Noise Measurements*. 5ed. Hardcover: Bruel & Kjaer, 1988.

[ISO] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 3746: Acoustics - Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure – Survey method using an enveloping measurement surface over a reflecting plane*. Genève, Switzerland, 1995.

JUNIOR, A. C. L. F. *Auralização: técnicas de modelagem e simulação binaural de ambientes acústicos virtuais*. Campinas, 2005. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da UNICAMP.

KINSLER, L.; FREY, A.; COPPENS, A.; SANDERS, J. *Fundamentals of Acoustics*. 4ed. New York: John Wiley & Sons, 1999.

LAI, J.C.S.; SPEAKMAN, C.; WILLIAMSON, H.M. Control of shear cutting noise: Effectiveness of passive control measures. *Noise & Vibration Worldwide*, Vol. 33, No. 7, Julho 2002, p 6-12.

MEHTA, M.; JOHNSON, J.; ROCAFORT, J. *Architectural Acoustics: principles and design*. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 445p.

MORATA, T.C.; DUNN, D.E.; SIEBER, W.K. - Perda Auditiva e a Exposição Ocupacional a Agentes Ototóxicos. In: NUDELMANN, A.A.; COSTA, E.A.;

SELIGMAN, J.; IBÁÑEZ, R.N. - *PAIR Perda Auditiva Induzida pelo Ruído*. Porto Alegre, Bagagem Comunicação, 1997.

[NIOSH] NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH. *Industrial Noise Control Manual*. December, 1978. Disponível em <<http://www.cdc.gov/niosh/79-117pd.html>> Acesso: 14/07/2008.

ODEON S/A. *User manual version 7.0*. Dinamarca, 2003.

[OSHA] OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION. *Noise Control: A guide for workers and employers*, 1981. Disponível em: <<http://www.nonoise.org/hearing/noisecon/noisecon.htm> >. Acesso: 22/04/2008.

PIERCE, A. *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Application*. 2. Ed. New York: Acoustical Society of America, 1991.

PIMENTEL-SOUZA, F. Efeito do ruído no homem dormindo e acordado. In: XX Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica, Belo Horizonte, 2000.

- PORTELA, M. S. *Caracterização de Fontes Sonoras e Aplicação na Auralização de Ambientes*. 121 fl. 2008. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina.
- REYNOLDS, D. *Engineering Principles of Acoustics: Noise and Vibration Control*. Boston: Allyn and Bacon, 1981.
- RIOS, A. N. *Efeito do Ruído Tardio na Audição e na Qualidade do Sono em Indivíduos Expostos a Níveis Elevados*. Ribeirão Preto, 2003. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Medicina da USP/Ribeirão Preto.
- SALIBA, T. *Curso Básico de Segurança e Higiene Ocupacional*. 2 ed. São Paulo, LTr, 2008.
- SALIBA, T.; SALIBA, S. *Legislação de Segurança, Acidente do Trabalho e Segurança do Trabalhador*. 3 ed. São Paulo: LTr, 2005.
- SELL, I. Ergonomia e Qualidade de Vida no Trabalho. . In: VIEIRA, S. *Manual de Saúde e Segurança do Trabalho: qualidade de vida no trabalho, volume 2*. São Paulo: LTr, 2005.
- SHAIKH, G. H. Occupational noise exposure limits for developing countries. *Applied Acoustics*. Vol 57, 1999, p 89-92.
- SHARMA 0.; .MOHANAN, V.; SINGH, M.. Noise Emission Levels in Coal Industry. *Applied Acoustics*. Vol 54, 1998, p 1-7.
- SILVA, M. C. E. da, *Sistema de gestão de segurança e saúde no trabalho em usinas de reciclagem de entulho: um estudo da exposição ocupacional ao ruído*. 179 fl. 2006. Dissertação de Mestrado. Centro Universitário Senac, São Paulo.
- VASCONCELOS, A. F. Qualidade de Vida no Trabalho: Origem, Evolução e Perspectivas. *Caderno de Pesquisas em Administração*, Vol. 8, No. 1, janeiro/março 2001. Disponível em: <<http://www.ead.fea.usp.br/cad-pesq/arquivos/v08-1art03.pdf>> Acesso: 23/06/2008.
- VÉR, I.; BERANEK, L. *Noise and Vibration Control Engineering Principles and Applications*. New York: John Wiley & Sons, 1992
- VIEIRA, S. *Manual de Saúde e Segurança do Trabalho: qualidade de vida no trabalho, volume 2*. São Paulo: LTr, 2005.
- _____. *Manual de Saúde e Segurança do Trabalho: Segurança, higiene e medicina do trabalho, volume 3*. São Paulo: LTr, 2005.
- _____. *Riscos Ambientais à Saúde do Trabalhador*. In: VIEIRA, S. *Manual de Saúde e Segurança do Trabalho: qualidade de vida no trabalho, volume 2*. São Paulo: LTr, 2005.
- VECCI, M.A.M. *Ruído ambiental*. Notas de Aula. Belo Horizonte, 2006.
- VÖRLANDER, M. *Auralization*. Berlin: Springer, 2008.
- WEBSTER, M. Programa de Prevenção de Riscos Ambientais – PPRA: Proposta para elaboração e execução. In: VIEIRA, S. *Manual de Saúde e Segurança do Trabalho: qualidade de vida no trabalho, volume 2*. São Paulo: LTr, 2005.

_____. *Segurança e Higiene do Trabalho: Conceitos e Objetivos*. In: VIEIRA, S. *Manual de Saúde e Segurança do Trabalho: Segurança, higiene e medicina do trabalho, volume 3*. São Paulo: LTr, 2005.

[WHO] WORLD HEALTH ORGANIZATION. Occupational Exposure to Noise: Evaluation, Prevention and Control, 2001. Disponível em: <http://www.who.int/occupational_health/publications/occupnoise/en/> Acesso: 14/07/2008.