



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Condicionamento Acústico Ambiental
de um Sistema Edificado Caracterizado Experimentalmente

Gilson Samir Barbosa Rodrigues Nunes

Condicionamento Acústico Ambiental
de um Sistema Edificado Caracterizado
Experimentalmente



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Gilson Samir Barbosa Rodrigues Nunes

Condicionamento Acústico Ambiental
de um Sistema Edificado Caracterizado
Experimentalmente

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor José Filipe Bizarro Meireles

outubro de 2013

DECLARAÇÃO

Gilson Samir Barbosa Rodrigues Nunes

Endereço eletrónico: a39298@alunos.uminho.pt Telefone:

Número do Bilhete de Identidade:

Título da Tese:

Condicionamento Acústico Ambiental de um Sistema Edificado Caracterizado Experimentalmente

Orientador:

Professor José Filipe Bizarro Meireles

Ano de conclusão: 2013

Dissertação submetida na Universidade do Minho para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, ___/___/_____

Assinatura: _____

Aos meus pais.

Agradecimentos

A concretização deste percurso e a realização deste trabalho não teria sido possível sem o apoio de algumas pessoas, que aqui passo a agradecer:

- À minha família, à minha namorada e à família Carvalho, pelo apoio incondicional em todos os momentos desta etapa.
- Ao meu orientador Professor Meireles, pelo apoio, disponibilidade, interesse e orientação ao longo do trabalho.
- Ao colega Marco Daniel, pelo apoio na realização dos ensaios e pelos seus aconselhamentos
- Ao Sr. Araújo, pelo apoio dado no laboratório de ensaio de materiais.
- Aos meus amigos, colegas e a todos que de uma forma positiva ajudaram-me na conclusão da minha formação.

A todos um sincero muito obrigado.

Resumo

Numa consideração geral, e tomando o contínuo que integre estímulos desde os sons com interesse aos ruídos indesejáveis, pode dizer-se que, à medida que a intensidade sonora aumenta, os efeitos (médios) alastram do campo das atitudes ao dos comportamentos e, por fim, atingem o domínio da fisiologia (trauma). O problema assume tal agudeza para os indivíduos que exercem certos tipos de atividade, que a surdez provocada por exposição a ruído excessivo foi incluída no domínio das doenças profissionais (em Portugal, desde 1973), sendo conferido o direito de compensação às pessoas que, em consequência da exposição ao ruído, sofrerem redução da sua capacidade sensorial. No que respeita a "incomodidade", trata-se de um efeito complexo que integra ações primárias diversas do ruído, não explicitadas, tais como interferência na comunicação oral, perturbação do sono, alteração da capacidade de concentração e de relaxação, bem como outras mais difíceis de caracterizar, como afetação da privacidade e conotações de perigo.

Quando o fundo auditivo atinge intensidades tais que invade todo o domínio sonoro apreensível ao Homem, a seleção, a inteligência do espaço, deixa de ser possível passa a ser poluição sonora e impedimento que se escute. É legítimo falar numa "poluição sonora", problema que a medicina preventiva tem de encarar. Como poluente, o ruído atinge essencialmente o Homem, sem o aviso que constituiria a deterioração permanente do ambiente físico.

Para perceber a influência da propagação sonora (ruído) emitida pelas bombas hidráulicas da máquina de ensaios de tração Instron® e do banco de ensaios de tração e compressão, do Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho, realizaram-se estudos sobre propriedades acústicas. Os estudos das propriedades acústicas permitiram adquirir conhecimentos a nível de técnicas de isolamento, materiais e sistemas absorventes sonoros e também foi possível obter valores do ruído emitido pelas bombas hidráulicas, comparando esses valores com os valores recomendados por normas internacionais.

PALAVRAS-CHAVE: Acústica, Ruído, Exposição, Saúde Auditiva, Risco.

Abstract

In a general consideration, and taking the continuum that integrates stimuli from sounds of interest to unwanted noise, in other words, as the sound intensity increases, the sprawling field effects (medium) of the behaviour and attitudes, and finally, they reach the field of physiology (trauma). The problem is of such sharpness for individuals who practice certain types of activity, the hearing loss caused by exposure to excessive noise was included in the field of occupational diseases (in Portugal, since 1973), which granted the right of compensation to persons who, in result of exposure to noise, suffer a reduction of their sensory capabilities. Regarding the “inconvenience”, it is a complex effect that integrates various noise primary action, not explicit, such as interfering in oral communication, sleep disturbance, change in concentration and relaxation, as well as other more difficult to characterize, as affection of privacy and connotations of danger.

When the fund reaches auditory intensities such pervades the entire field sound understandable to man, the selection, the intelligence of space, no longer possible becomes noise and hindrance to be heard. It is legitimate to speak of a “noise” problem that preventive medicine has to face. As pollution, noise affects mainly humans, no warning would provide a permanent deterioration of the physical environment.

To understand the influence of sound propagation (noise) emitted by hydraulic pumps of the Instron ® tensile testing machine and database tensile and compression, from the Laboratory Testing of Materials (LEM) of the Department of Mechanical Engineering from University of Minho , studies were performed on the acoustic properties. These studies of acoustic properties allowed to acquire knowledge at the level of technical insulation, sound absorbing materials and systems, and it was also possible to obtain values of noise emitted by hydraulic pumps, comparing these values with the values recommended by international standards.

KEYWORDS: Acoustics, Noise Exposure, Hearing Health, Risk.

Índice

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xv
Lista de Siglas	xvii
Símbolos	xix
CAPÍTULO 1 Introdução	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Metodologias e Abordagem do Trabalho	3
CAPÍTULO 2 Estado da Arte	5
2.1. Introdução	5
2.2. Ruído	5
2.3. Higiene e Segurança do Trabalho	6
2.4. Técnicas de Medição	6
2.5. Técnicas de Isolamento	9
2.5.1. Medidas construtivas ou de engenharia	9
2.5.1.1. Atuação sobre a fonte produtora de ruído	9
2.5.1.2. Atuação sobre as vias de propagação	9
2.5.2. Medidas organizacionais ou administrativas	12
2.5.3. Medidas de proteção individual	13
2.6. Absorção sonora	13
2.6.1. Coeficiente de absorção sonora	14
2.6.2. Características dos materiais com influência na absorção sonora	14
2.6.3. Espessura	15
2.6.4. Massa volúmica	15
2.6.5. Materiais e sistemas absorventes sonoros	16
2.6.6. Materiais texturados	17
2.6.7. Membranas ressonantes	22
2.6.8. Ressonadores de cavidade	24
2.7. Resumo e implicações no desenvolvimento do trabalho	25
CAPÍTULO 3 Propriedades da Propagação Sonora	27
3.1. Introdução	27
3.2. Grandezas e Propriedades Envolvidas	27
3.2.1. Nível Sonoro	27
3.2.2. Relação entre Níveis de Pressão Sonora, Potência e Intensidade Sonora	29
3.2.3. Adição de Níveis Sonoros	31
3.2.4. Frequência de Espectro	31
3.2.5. Audibilidade	33
3.2.6. Valor eficaz ou <i>Root Mean Square</i>	35
3.3. Efeito do Ruído no Corpo Humano	36
3.3.1. Nível sonoro equivalente	38
3.4. Introdução ao Tratamento de Sinal	41
3.5. Resumo e Implicações no Desenvolvimento do trabalho	42
CAPÍTULO 4 Aplicação num Caso Prático	43
4.1. Introdução	43
4.2. Ensaios	44
4.2.1. Descrição das Bombas Hidráulicas	44
4.2.2. Metodologia de Ensaio	47
4.2.2.1. Primeiro ensaio	47
4.2.2.2. Segundo e terceiro ensaios	47

4.2.2.3.	Quarto e quinto ensaios.....	47
4.2.2.4.	Sexto e sétimo ensaios.....	47
4.2.3.	Técnicas de Medição.....	47
4.2.3.1.	Primeiro ensaio.....	47
4.2.3.2.	Segundo e terceiro ensaios.....	48
4.2.3.3.	– Quarto e quinto ensaios.....	48
4.2.3.4.	– Sexto e sétimos ensaios.....	49
4.3.	Equipamentos Experimentais.....	49
4.3.1.	Equipamentos de Medição e Processamento.....	49
CAPÍTULO 5 Apresentação e Discussão de Resultados		51
5.1.	Primeiro ensaio.....	51
5.1.1.	Resultados obtidos.....	51
5.2.	Segundo e terceiro ensaios.....	53
5.2.1.	Resultados obtidos.....	53
5.3.	Quarto e quinto ensaios.....	57
5.3.1.	Resultados obtidos.....	57
5.4.	Sexto e sétimo ensaios.....	61
5.4.1.	Resultados obtidos.....	61
5.5.	Discussão de Resultados.....	65
CAPÍTULO 6 Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros.....		67
6.1.	Conclusões.....	67
6.2.	Propostas para Trabalhos Futuros.....	68
Bibliografia.....		71
ANEXOS		72
	Anexo A Resultado dos níveis de pressão sonora dos ensaios.....	I
	Anexo B Projeto da cabina de isolamento acústico.....	VIII

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Suporte de isolamento anti vibrátil de um processador, separado por espuma [3].	10
Figura 2.2 – Encapsulamento de um gerador de uma fábrica [5].	10
Figura 2.3 - Painel antirruído [6].	11
Figura 2.4 – Espuma de absorção acústica[7].	11
Figura 2.5 – Desenho 3D de uma cabina para o LEM. a) Unidades Hidráulicas do LEM; b) Estrutura metálica para a cabina; c) Cabina de isolamento sonoro.	12
Figura 2.6 - Auricular de proteção auditiva [8].	13
Figura 2.7 – Gráfico da variação da absorção sonora com a espessura [9].	15
Figura 2.8 – Gráfico da variação da absorção sonora com a massa volúmica [9].	16
Figura 2.9 - Lãs minerais. a) Flexíveis; b) Semirrígidos; c) Rígido[9].	18
Figura 2.10 - Absorsores suspensos [11]	18
Figura 2.11 – Gráfico com a diminuição dos tempos de reverberação por aplicação de absorsores suspensos [9].	19
Figura 2.12 – Aglomerado negro e aglomerado composto de cortiça.	19
Figura 2.13 – Gráfico com as diferenças de absorção sonora entre aglomerados negro e aglomerados compostos de cortiça [9].	20
Figura 2.14 - Características de absorção sonora de uma massa porosa com espessuras nominais de 13 mm e 25 mm [9].	21
Figura 2.15 - Coeficiente de absorção sonora de um reposteiro de algodão com diferentes percentagens de franzido [9].	22
Figura 2.16 - Membrana ressonante.	22
Figura 2.17 - Características de absorção sonora de sistemas tipo membrana ressonante, com e sem preenchimento por material absorvente na caixa-de-ar [9].	23
Figura 2.18 - Características de absorção sonora de sistema tipo membrana ressonante, com e sem preenchimento por material absorvente na caixa-de-ar [9].	24
Figura 2.19 - Ressonador de cavidade[9].	25
Figura 3.1 – Termómetro acústico de relação entre pressão sonora e nível de pressão sonora[13].	29
Figura 3.2 - Exemplo de uma análise espectral ou análise por frequência[14].	32
Figura 3.3 – Análise espectral ou análise por frequências na banda de oitavas[13].	33
Figura 3.4 - Representação gráfica das linhas isofónicas[1].	34
Figura 3.5 - Filtro de ponderação [15].	35
Figura 3.6- Anatomia do ouvido [16].	37
Figura 3.7- Desenvolvimento das perdas auditivas induzidas pela exposição ao ruído[2].	38
Figura 3.8 - Sonómetro de precisão com análise espectral em tempo real.	42
Figura 4.1 - Organigrama dos ensaios.	43
Figura 4.2 Máquina de testes Instron® do LEM.	44
Figura 4.3 - Mesa de testes de tração do LEM.	45
Figura 4.4 - Bomba hidráulica da máquina de testes Instron®.	45
Figura 4.5 - Bomba hidráulica do banco de ensaios.	46

Figura 4.6 - Desenho 3D da localização das unidades hidráulicas. 1 – Bomba hidráulica da máquina de tração Instron®; 2 – Bomba hidráulica do banco de ensaios.	46
Figura 4.7 - Desenho 3D dos locais do segundo e terceiro ensaios na bomba hidráulica da mesa de testes de tração. 2 – Parte superior; 3 Parte frontal.	48
Figura 4.8 – Esquema do quarto ensaio (vista da frente) e quinto ensaio (vista de cima), na bomba hidráulica da máquina de testes Instron®. 4Parte superior; 5 – Parte frontal.	48
Figura 4.9 – Esquema do ensaio sonoro nas duas bombas a funcionar em simultâneo (vista de cima). 6 – Parte interior; 7 – Parte exterior.	49
Figura 4.10 – Cadeia procedimentos de medição utilizado nos equipamentos do LEM.	49
Figura 4.11 - Microfone do grupo ICP®, modelo número 130D20 [20].	50
Figura 4.12 - a) Unidade de processamento “LMS SCADAS Mobile SCM01”, b) Unidade de análise e leitura de sinal “LMS Test.Xpress” [21]	50
Figura 5.1 – Variação da pressão sonora no laboratório, com as bombas desligadas.	51
Figura 5.2 – Gráfico com os níveis de pressão sonora do primeiro ensaio, com filtro de ponderação A (dB(A)).	52
Figura 5.3 - Variação da pressão sonora no laboratório na parte superior da bomba hidráulica do banco de ensaios de tração e compressão.	53
Figura 5.4 - Gráfico com os níveis de pressão sonora do segundo ensaio na bomba hidráulica do banco de ensaios de tração e compressão.	54
Figura 5.5 - - Variação da pressão sonora no laboratório na parte frontal da bomba hidráulica do banco de ensaios de tração e compressão.	55
Figura 5.6 - Gráfico com os níveis de pressão sonora do terceiro ensaio na bomba hidráulica do banco de ensaios de tração e compressão.	55
Figura 5.7 - Gráfico com a média dos níveis de pressão sonora na bomba hidráulica do banco de ensaios de tração e compressão.	56
Figura 5.8 – Gráfico com os níveis de pressão sonora do quarto ensaio (parte superior) na bomba hidráulica da máquina de tração Instron®.	57
Figura 5.9 - Gráfico com os níveis de pressão sonora do quarto ensaio na bomba hidráulica da máquina de tração Instron®.	58
Figura 5.10 - Gráfico com os níveis de pressão sonora do quinto ensaio (parte frontal) na bomba hidráulica da máquina de tração Instron®.	59
Figura 5.11 - Gráfico com os níveis de pressão sonora do quinto ensaio na bomba hidráulica da máquina de tração Instron®.	59
Figura 5.12 - Gráfico com a média dos níveis de pressão sonora na bomba hidráulica da máquina de tração Instron®.	60
Figura 5.13 - Gráfico com os níveis de pressão sonora do sexto ensaio (parte interior) das bombas hidráulicas.	61
Figura 5.14 - Gráfico com os níveis de pressão sonora do sexto ensaio nas bombas hidráulicas.	62
Figura 5.15 - Gráfico com os níveis de pressão sonora do sétimo ensaio (parte exterior) das bombas hidráulicas.	63
Figura 5.16 - Gráfico com os níveis de pressão sonora do sétimo ensaio nas bombas hidráulicas.	64

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Comparação do nível de pressão sonora do critério OSHA e do critério ISO[2].	39
Tabela 5.1 - Variação da pressão sonora do primeiro ensaio.	51
Tabela 5.2 - Valores dos níveis pressão sonora do primeiro ensaio.	52
Tabela 5.3 - Comparação entre os níveis de pressão sonora admissíveis e o RMS do nível sonoro do primeiro ensaio.	53
Tabela 5.4 - Variação da pressão sonora do segundo ensaio.	54
Tabela 5.5 - Valores dos níveis de pressão sonora do segundo ensaio.	54
Tabela 5.6 - Variação da pressão sonora do terceiro ensaio.	55
Tabela 5.7 - Valores dos níveis pressão sonora do terceiro ensaio.	56
Tabela 5.8 – Média dos valores dos níveis de pressão sonora na bomba hidráulica do banco de ensaios de tração e compressão.	56
Tabela 5.9 - Comparação entre os níveis de pressão sonora admissíveis e o RMS médio do níveis de pressão sonora do segundo e terceiro ensaios.	57
Tabela 5.10 - Variação da pressão sonora do quarto ensaio.	58
Tabela 5.11 - Valores dos níveis pressão sonora do quarto ensaio.	58
Tabela 5.12 - Variação da pressão sonora do quinto ensaio.	59
Tabela 5.13 - Valores dos níveis pressão sonora do quinto ensaio.	60
Tabela 5.14 – Média dos valores dos níveis de pressão sonora na bomba hidráulica da máquina de tração Instron®.	60
Tabela 5.15 - Comparação entre os níveis de pressão sonora admissíveis e o RMS médio dos níveis de pressão sonora do quarto e quinto ensaios.	61
Tabela 5.16 - Variação da pressão sonora do sexto ensaio.	62
Tabela 5.17 - Valores dos níveis pressão sonora do sexto ensaio.	62
Tabela 5.18 - Comparação entre os níveis de pressão sonora admissíveis e o RMS do sexto ensaio.	63
Tabela 5.19 - Variação da pressão sonora do sétimo ensaio.	63
Tabela 5.20 - Valores dos níveis pressão sonora do sétimo ensaio.	64
Tabela 5.21 - Comparação entre os níveis de pressão sonora admissíveis e o RMS do sétimo ensaio.	64

Lista de Siglas

ACT	Autoridade para as Condições de Trabalho
CEE	Comunidade Económica Europeia
EPI's	Equipamentos de Proteção Individual
ISO	<i>International Standard Organization</i>
NP	Norma Portuguesa
NE	Norma Europeia
OIT	Organização Internacional do Trabalho
OSHA	<i>Occupational Safety and Health Administration</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SHST	Segurança, Higiene e Saúde no Trabalho
SPL	<i>Sound Pressure Level</i>
UE	União Europeia

Símbolos

Símbolo	Significado
dB	Decibel
dB(A)	Decibel A (com filtro de ponderação A)
Hz	Hertz
L_{Aeq}	Nível sonoro equivalente ponderado A
$L_{EP,d}$	Nível de exposição diária
Pa	Pascal
s	Segundos

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1. Motivação

O ruído é considerado um incómodo para o trabalho e para as comunicações verbais, podendo provocar fadiga auditiva e, em casos extremos, surdez entre outras alterações fisiológicas.

Tal como foi referido no resumo, houve uma necessidade de avaliar a exposição ao ruído que os trabalhadores do LEM¹ estão sujeitos, procurando assim uma solução que minimize esse efeito nessas pessoas.

A nível académico a motivação é o término do curso de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, com a especialidade na área de Estruturas.

A nível pessoal, a motivação passa por dar um contributo útil na melhoria do bem-estar de quem trabalha no Departamento de Engenharia Mecânica, sendo eles funcionários, investigadores ou os próprios alunos, adquirindo ao mesmo tempo conhecimento numa área tão importante no nosso quotidiano.

Este trabalho é de um modo geral um grande desafio pessoal, com significado especial, pois representa o complementar de uma etapa e o início de outra.

1.2. Objetivos

O principal objetivo deste trabalho foi obter, analisar e desenvolver a aplicação do conhecimento dos fenómenos acústicos e das representações modelares disponíveis para o seu tratamento, com o objetivo de melhorar as condições acústicas do Laboratório de Ensaio de Materiais.

Dentro do objetivo principal, acima referido, enumera-se uma série de outros objetivos do presente trabalho:

¹ Laboratório de Ensaio de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica

- Obter formação complementar nas áreas de dinâmica de estruturas e de acústica ambiental de forma a possibilitar o desenvolvimento de modelos geométricos descritivos do comportamento acústico de uma estrutura edificada existente;
- Caracterizar as metodologias que, utilizando as técnicas de modelação, permitam traduzir diferentes aproximações à realidade em perspetiva, tanto na caracterização dos campos sonoros na envolvente do sistema como na estimação das características de isolamento;
- Preparação e encaminhamento de inspeções e caracterização do estado acústico de forma a poderem ser obtidos dados suficientes para a realização de um projeto de remodelação do sistema existente;
- Obter formação e recolha de elementos diversos que constam da bibliografia disponível sobre propagação de estímulos sonoros entre espaços, dos processos de estabelecimento, manutenção e atenuação de campos sonoros em espaços fechados e propagação em espaços não fechados, estando estes afetados pela presença de obstáculos que podem dar lugar a fenómenos diversos de reflexão e difração;
- Obtenção de conhecimentos específicos dos fenómenos acústicos em causa e das representações modulares disponíveis para o seu tratamento, dos materiais e soluções a utilizar, nas suas propriedades acústicas, da metodologia dos campos sonoros e do equipamento na perspetiva do utilizador, que permita apreciar dados que venham a ser disponibilizados com interesse para o estudo e das referências regulamentares aplicáveis às diversas situações;
- Desenvolvimentos de um projeto que traduza um processo de modelação global, apresentando do modo mais adequado a informação necessária integrando elementos que a vinculem sob a forma desenhada e escrita de modo a que preencham os requisitos necessários à satisfação das normas e regulamentos em vigor;
- Elaborar um mapa de ruído diurno onde sejam representadas graficamente as características de ruído existentes. Estas representações devem ser preparadas de acordo com as instruções da Direção Geral do Ambiente e da Direção Geral do

Ordenamento do Território e Desenvolvimento Urbano. Estes elementos são a base para o desenvolvimento das fases ulteriores e devem proporcionar a compreensão clara das soluções de projeto a implementar;

- Elaborar um projeto de condicionamento acústico do sistema, exigindo-se portanto uma formação específica que permita a caracterização deste fim. Este projeto deve conter a organização geral das medidas a realizar, uma prospetiva de desempenhos no que respeita aos processos de propagação sonora envolvendo a envolvente exterior e os elementos horizontais e verticais, de separação dos espaços, evidenciando a satisfação dos requisitos da legislação em vigor. Deve ainda traduzir a adequação em termos de salvaguarda da inteligibilidade da voz. Deve conter um conjunto ordenado das informações escritas e desenhadas que possibilitem a interpretação inequívoca por parte dos utilizadores na execução das tarefas consequentes.

1.3. Metodologias e Abordagem da Dissertação

Esta dissertação de mestrado foi dividida em seis capítulos, dos quais o primeiro capítulo é introdutório correspondendo ao presente capítulo. Neste capítulo é feita uma apresentação dos motivos que conduziram ao desenvolvimento do estudo da acústica, mais precisamente o ruído e são descritos os objetivos a cumprir durante todo o projeto.

O **Capítulo 2** aborda o estado da arte, onde são referenciados os temas que levam á compreensão das características e propriedades do ruído, á higiene e segurança no trabalho, às técnicas de medição e às técnicas de isolamento, enquadrando esses temas no desenvolvimento do trabalho.

No **Capítulo 3** apresenta-se as grandezas e propriedades da propagação sonora, abordando as propriedades do ruído, o efeito do ruído no corpo humano, a introdução ao tratamento do sinal, os requisitos normativos e o enquadramento desses temas no desenvolvimento do trabalho.

Uma vez validados os conceitos teóricos da acústica no capítulo 3, no **Capítulo 4** foram abordados os ensaios laboratoriais, são referidos os meios laboratoriais, equipamentos de medição, a descrição das bombas hidráulicas, a metodologia de ensaio e as técnicas de medição.

Com a realização dos ensaios utilizando as técnicas adequadas, o **Capítulo 5** apresenta os resultados experimentais da propagação da pressão sonora emitida pelas bombas hidráulicas, tanto no funcionamento a *so/o* como em conjunto.

Finalmente no **Capítulo 6** foram apresentadas as conclusões relevantes retiradas ao longo deste trabalho e também apresentadas sugestões de trabalho futuro.

CAPÍTULO 2

Estado da Arte

2.1. Introdução

Uma onda sonora é definida como um distúrbio padrão causado pelo movimento de uma energia que se desloca através de um meio (ar, água, ou qualquer matéria líquida ou sólida) e que se propaga conforme vai se afastando da fonte sonora. A fonte é um objeto que causa uma vibração, como o som de um telefone, ou a corda vocal de uma pessoa. A vibração provoca distúrbios nas partículas que estão no meio circundante; essas partículas provocam distúrbios nas partículas a seguir a elas, e por aí em diante. O distúrbio padrão cria um movimento exterior no padrão da onda, como as ondas do mar no oceano. A onda carrega a energia do som através de um meio, normalmente em todas as direções e conforme vai se afastando da fonte, vai perdendo a intensidade[1].

As características físicas da fala, música, e ruído podem ser medidos com precisão através de instrumentos padrão (microfones, filtros, analisadores de espectro, osciloscópios, etc.) e os resultados expressos quantitativamente em termos de parâmetros físicos. Pelo contrário, as características *interpretativas* da audição são expressas em termos de parâmetros *subjetivos* que levam as previsões estatísticas da interpretação de um ouvinte médio sob as condições assumidas[1].

No âmbito desta monografia serão descritos temas como o ruído, absorção sonora, nível de pressão sonora, pressão sonora e audibilidade.

2.2. Ruído

O ruído pode ser definido como um som que não é desejável, uma causa de incômodo no trabalho, em muitos casos um obstáculo de comunicações verbais e sonoras, que pode provocar fadiga geral, trauma auditivo e alterações fisiológicas extra auditivas[2].

As ondas sonoras podem transmitir-se da fonte até ao ouvido, tanto diretamente pelo ar, como indiretamente por condução nos materiais – estruturas sólidas, paredes, pavimentos e tetos, que funcionam como fontes secundárias. Quando o ruído atinge determinados níveis, o aparelho auditivo apresenta uma fadiga que, embora inicialmente seja suscetível de

recuperação, pode em casos de exposição prolongada a ruído intenso transformar-se em surdez permanente devido a lesões irreversíveis do ouvido interno[2].

Do ponto de vista físico pode definir-se o ruído como toda a vibração mecânica estatisticamente aleatória de um meio elástico. Do ponto de vista fisiológico, será todo o fenómeno acústico que produz uma sensação auditiva desagradável ou incomodativa.

As suas características principais são: o nível sonoro e a frequência (se se trata de um som puro) ou a composição ou espectro (se se trata de um som complexo).

2.3. Higiene e Segurança do Trabalho

A Segurança, Higiene e Saúde do Trabalho (SHST) é uma área que estuda e promove as condições de trabalhos ajustadas ao exercício da atividade dos trabalhadores, em sintonia com objetivos económicos (produtividade e organização do trabalho), com objetivos sociais (saúde, bem-estar, motivação) e com objetivos jurídicos (acidentes de trabalho, indemnizações e seguro de acidente de trabalho)[2].

Em Portugal a entidade responsável é a Autoridade para as Condições do Trabalho (ACT), que tem por missão a promoção da melhoria das condições de trabalho e o controlo e fiscalização das normas em matéria laboral e de segurança e saúde no trabalho[3].

Na União Europeia a Diretiva Quadro (89/391/CEE), alterada pela Diretiva n.º2007/30/CE, rege a aplicação de medidas destinadas a promover a melhoria da Segurança e da Saúde dos trabalhadores no local de trabalho[3].

A Organização Internacional do Trabalho (OIT) é uma organização intergovernamental criada em 1919, no final da 1ª Guerra Mundial e que tem criado normas (convenções/recomendações), que têm influenciado de forma decisiva o desenvolvimento e aperfeiçoamento da legislação dos estados membros no âmbito da SHST[3].

2.4. Técnicas de Medição

As técnicas de medição de ruído utilizadas dependem dos objetivos que se pretendem alcançar[4], isto é, como por exemplo:

- Determinar a exposição ao ruído de todas as pessoas suscetíveis de serem expostos a ruído excessivo;

- Calcular o risco de perda de audição;
- Obter informações mais específicas que ajudem a decidir quais as medidas a tomar para reduzir a exposição ao ruído;
- O nível necessário para a comunicação e segurança.

A norma ISO¹ 2204 determina três tipos de técnicas de medições de ruído: (1) o método de pesquisa, (2) o método de engenharia e (3) o método de precisão[4].

O método de pesquisa

Este método exige o mínimo de tempo e de equipamento, os níveis de ruído de uma zona de trabalho são medidos com um equipamento de medição adequado e que cumpre todos os requisitos necessários, usando um número limitado de pontos de medição. Embora não haja uma análise detalhada do ambiente acústico, o fator do tempo de medição deve ser tido em consideração, pelo facto do ruído ser constante ou intermitente e pelo tempo de exposição dos trabalhadores. O método de ponderação A é normalmente utilizado neste método de pesquisa, mas quando existe um componente de baixa frequência predominante, o filtro C, ou a resposta de ponderação linear devem ser os apropriados[4].

O método de engenharia

No método de engenharia, a medição do nível sonoro com o filtro A, ou para, aqueles que usam outros filtros de ponderação, são complementados utilizando a banda de oitava ou o filtro de 1/3 de oitava. O número de pontos de medição e o alcance da frequência são selecionados de acordo com os objetivos de medição. Este método é útil para avaliar a interferência na comunicação através da fala, através de cálculos, bem como em programas de engenharia que têm como objetivo a redução de ruídos e para estimar os efeitos auditivos e não auditivos do ruído[4].

O método de precisão

Este método é necessário para situações complexas, onde é necessária a descrição mais completa do problema do ruído. Medidas globais de nível de som são complementadas com banda de oitava ou terço de oitava e os históricos dos tempos são registrados por intervalos de tempo adequados de acordo com a duração e as flutuações do ruído. Por exemplo, pode ser

¹ International Standards Organization

necessário medir os níveis dos picos de impulsos de ruído através de um instrumento adequado, ou medir os níveis de infrassons ou ultrassons, exigindo capacidades especiais de medição de frequências, microfone direcionado, e assim por diante[4].

Em caso do uso do método de precisão deve se certificar que o intervalo dinâmico do instrumento é suficientemente grande para evitar “superação” quando se medem os impulsos e que a resposta de frequência deva ser ampla o suficiente se o infrassom ou ultrassom sejam para ser medidos. O aparelho deve ser capaz de medir frequências tão baixo como 2Hz, no campo do infrassom e até, pelo menos 16kHz no campo do ultrassom.

Os passos seguintes “do senso comum” podem ser úteis para um medidor que seja inexperiente:

1. Ter em atenção as principais características do ruído a serem medidas (qualidades temporais, como qualidades de estado estacionário, intermitentes ou impulso, características de frequência, tais como os de ruído de banda larga, os tons predominantes, infrassom, ultrassom, etc.). Observar as características mais proeminentes;
2. Escolher a instrumentação mais adequada (tipo de medidor de som, dosímetro de ruído, filtros, gravador, etc.)
3. Verificar a calibragem e o desempenho (pilhas, dados de calibração, correção do microfone, etc.) do instrumento;
4. Fazer anotações ou esboço (se estiver usando um sistema) de instrumentação, incluindo modelo e número de série;
5. Fazer um esboço do ruído ambiente a ser medido, incluindo as principais fontes de ruído e do tamanho e as características importantes do ambiente ou ambiente ao ar livre;
6. Medir o ruído e anotar o nível medido para cada rede ou filtro de ponderação. Deve-se referir o medidor de resposta (tais como *slow*, *fast*, *impulse*, etc.), e observar a extensão à qual o medidor oscila (por exemplo, mais ou menos 2 dB).

Se as medições forem feitas ao ar livre, dados meteorológicos pertinentes, tais como, temperatura e humidade devem ser anotadas caso eles sejam importantes. É necessário utilizar sempre um material que possa bloquear a passagem do vento pelo local de medição, quando as medições são efetuadas ao ar livre, e até mesmo para algumas medições internas. As instruções

do fabricante devem ser seguidas para evitar a influência de fatores como vento, humidade, poeira e campos elétricos e magnéticos, que podem afetar as leituras[4].

2.5. Técnicas de Isolamento

Quando o nível de ruído nos locais de trabalho ultrapassa os níveis considerados aceitáveis deve proceder-se a um controlo do mesmo a fim de o reduzir aos níveis pretendidos[2].

Um programa de controlo de ruído poderá admitir as seguintes soluções:

- Medidas construtivas ou de engenharia;
- Medidas organizacionais
- Medidas de proteção individual;

2.5.1. Medidas construtivas ou de engenharia

2.5.1.1. Atuação sobre a fonte produtora de ruído

O método de controlo do ruído mais eficaz[2] é, em princípio, a atuação sobre a fonte produtora de ruído. Muitas vezes, existe a possibilidade de uma atividade muito ruidosa ser substituída por outra equivalente do ponto de vista técnico, porém menos ruidosa. Alguns exemplo: substituição de máquinas lentas e de grande dimensão por máquinas mais pequenas e rápidas; substituição de rebtagem pneumática por soldadura; diminuição da velocidade de rotação de ventiladores; uso de materiais amortecedores de choques e vibrações (ex.: revestimento de mesas metálicas em fundições); uso de silenciadores na saída de jatos de ar/gases; substituição e ajustamento de partes de equipamento soltas/desequilibradas[2].

2.5.1.2. Atuação sobre as vias de propagação

Nem sempre é possível controlar o ruído na fonte e por vezes, apesar de serem tomadas medidas nesse sentido, a redução obtida não é suficiente. Devem então ser consideradas medidas que visem controlar o ruído na sua trajetória de propagação[2]. Alguns exemplos dessas atuações são o isolamento anti vibrátil, o encapsulamento, painéis antirruído e tratamento acústico de superfícies.

Isolamento anti vibrátil

A fim de diminuir a transmissão das vibrações produzidas por uma máquina através de elementos sólidos adjacentes à fonte de ruído, podem ser utilizados suportes adequados, em borracha, cortiça, resinas sintéticas. Estes suportes, que se designam por anti vibráteis, vão permitir igualmente a redução dos níveis de ruído em locais mais ou menos afastados[2]. Neste caso, é ainda importante fazer com que os diferentes elementos usados não se toquem diretamente, usando sempre espumas (figura 2.1), borrachas e o que for conveniente para se anular a vibração.



Figura 2.1 - Suporte de isolamento anti vibrátil de um processador, separado por espuma [3].

Encapsulamento

O encapsulamento (figura2.2) da fonte de ruído, quando, realizável, pode constituir uma medida muito eficaz, se projetada e executada adequadamente. Um encapsulamento deve conferir, simultaneamente, um bom isolamento (através de um material denso e compacto) e uma boa absorção sonora (geralmente, através de um material poroso e pouco denso)[2]. Na figura 2.2 temos o exemplo de um gerador no exterior de uma fábrica, encapsulada de forma a não emitir ruído, que possa prejudicar a comunicação no exterior da fábrica.



Figura 2.2 – Encapsulamento de um gerador de uma fábrica [5].

Painéis antirruído

Estes painéis (figura 2.3) não são tão eficientes como o encapsulamento, porém auxiliam o controlo da propagação do ruído numa determinada direção. Devem ser construídos com material isolante, revestido com material absorvente do lado em que se localiza a fonte do ruído[2].



Figura 2.3 - Painel antirruído [6].

A figura 2.3 mostra um painel antirruído no telhado de um edifício a evitar com que o ruído do motor propague na direção das casas.

Tratamento acústico das superfícies

O tratamento acústico no interior de um ambiente de trabalho visa evitar ou pelo menos diminuir a reverberação no mesmo. As superfícies lisas e duras, que refletem o som, devem ser evitadas[2]. Tais superfícies, quando existentes, podem ser revestidas com placas de materiais absorventes (figura 2.4).

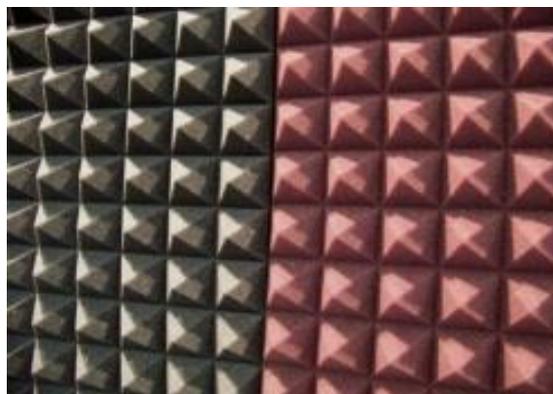


Figura 2.4 – Espuma de absorção acústica[7].

Os refletores e absorventes sonoros (figura2.4) são aplicados frequentemente para produzir umas condições acústicas desejadas para os recintos. Os materiais absorventes

sonoros são aqueles que reduzem o nível do som das múltiplas reflexões sonoras que persistem no tempo[7].

Cabinas acústicas

Em vez de encapsular a fonte de ruído, podem proteger-se as pessoas expostas ao ruído. Tal é necessário sobretudo quando existem muitas fontes produtoras de ruído cuja proteção seja impossível ou muito custosa. O tratamento destas cabinas (figura2.5) baseia-se nos princípios já anteriormente anunciados[2].

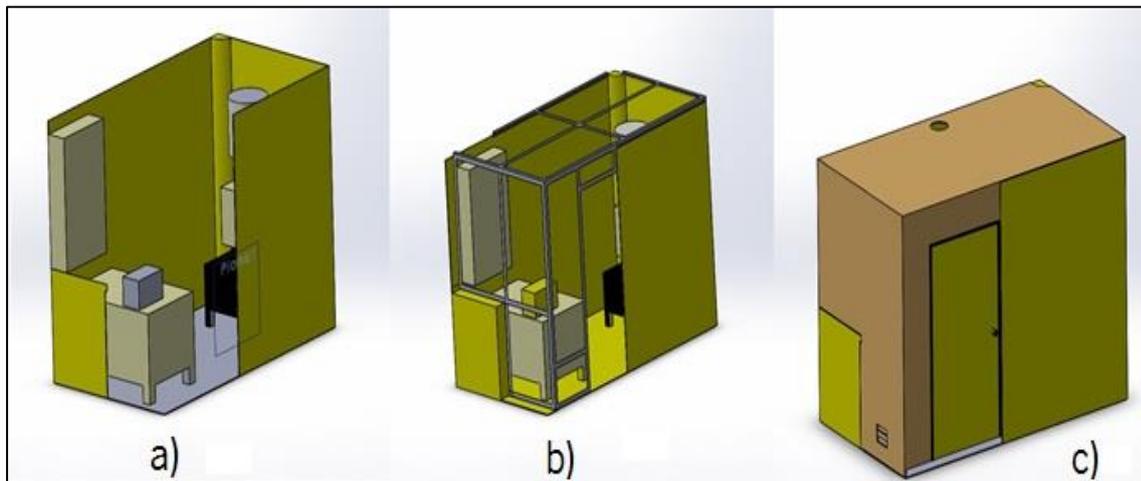


Figura 2.5 – Desenho 3D de uma cabina para o LEM¹.
a) Unidades Hidráulicas do LEM; b) Estrutura metálica para a cabina; c) Cabina de isolamento sonoro.

A figura 2.5 mostra um desenho 3D do que poderia ser uma cabina de insonorização para as unidades hidráulicas do LEM (Anexo B). Essa cabina eliminava ou diminuía o ruído emitido pelas bombas hidráulicas e ao mesmo tempo permitiria que as pessoas que estivessem no laboratório pudessem comunicar entre si, o que já não era possível com a utilização de proteções auriculares.

2.5.2. Medidas organizacionais ou administrativas

As medidas administrativas ou organizacionais têm em vista a redução dos níveis de ruído ou de tempo de exposição. As medidas comuns são: planificação da produção, eliminando postos de trabalhos sujeitos a elevados níveis sonoros; aquisição de equipamentos considerando

¹ Laboratório de Ensaio de Materiais

o fator nível sonoro; rotação periódica do pessoal exposto; realização de trabalhos ruidosos em horas em que haja menos trabalhadores expostos[2].

2.5.3. Medidas de proteção individual

As medidas de proteção individual (figura 2.6) visam atuar sobre o recetor, quando o nível sonoro ultrapassa os valores admissíveis e não é viável (técnica ou economicamente) qualquer das soluções anteriormente descritas[2]. A norma NP EN 458:2006 determina o nível de pressão sonora ponderado A efetivo, resultante do uso de protetores auditivos.



Figura 2.6 - Auricular de proteção auditiva [8].

A figura 2.6 mostra um auricular de proteção auditiva, que é um dos instrumentos mais utilizados em locais de trabalho onde existe propagação de ruído, devido a múltiplos fatores. É um instrumento que tem uma boa eficácia, quando os níveis sonoros não ultrapassam os valores admissíveis.

2.6. Absorção sonora

Quando a solução para o controlo do ruído for a atuação sobre as vias de propagação, existe uma dissipação de energia sonora na superfície exposta do material e a essa dissipação designa-se de absorção sonora. Depende, em termo gerais, da natureza das superfícies, do ângulo de incidência das ondas sonoras nas mesmas e das condições aplicação do sistema que integra o material[9].

2.6.1. Coeficiente de absorção sonora

O coeficiente de absorção sonora, habitualmente designado por α , é definido fisicamente pela razão entre a quantidade de energia que, num determinado intervalo de tempo, se dissipa numa dada área da superfície do material em causa e a energia que, durante o mesmo intervalo de tempo, incide nessa área[9]:

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i} \quad (2.1)$$

em que:

E_a – Energia absorvida;

E_i – Energia incidida.

O coeficiente de absorção sonora, α , varia entre 0 e 1. Um material que possua um coeficiente de absorção sonora igual a 0,5 absorve 50% da energia que nela incide. Para materiais muito refletivos (por ex: o mármore) a absorção é quase nula, sendo os valores situados na casa dos 0,01 ou 0,02. O coeficiente de absorção depende no geral da natureza das superfícies[10].

2.6.2. Características dos materiais com influência na absorção sonora

Aquando da incidência de ondas sonoras na superfície de um material, parte da energia incidente é absorvida transformando-se em energia térmica. Na maior parte dos materiais, a conversão em energia térmica resulta de atrito à passagem de ar, entre os poros, quando a superfície possua características de porosidade. A porosidade pode constar de interstícios entre os pequenos elementos constituintes, caso das lãs minerais ou de vidro, ou de pequenos vazios que comuniquem entre si, como acontece com algumas espumas. Parte da energia pode também ser absorvida pela deformação de lâminas ou painéis, quando solicitados pelas ondas sonoras. Nesta situação a energia sonora é transformada em energia mecânica e só depois em energia térmica[9].

Além das características intrínsecas e de textura do material, é também determinante, na absorção sonora, a sua forma de aplicação. Por esta razão, a comparação de diferentes materiais só é válida quando os resultados forem obtidos nas mesmas condições.

Apresentam-se os diferentes aspetos que podem influenciar o desempenho dos materiais em termos de absorção sonora.

2.6.3. Espessura

Pode considerar-se que o coeficiente de absorção sonora aumenta com a espessura dos materiais, exceto nas altas frequências em que o acréscimo é irrelevante[9].

Constam, das figuras 2.7, as características de absorção sonora de placas rígidas de lã mineral, aglutinada com resina sintética termo endurecida, com massa volúmica de 70 kg/m³, nas mesmas condições de aplicação. [9].

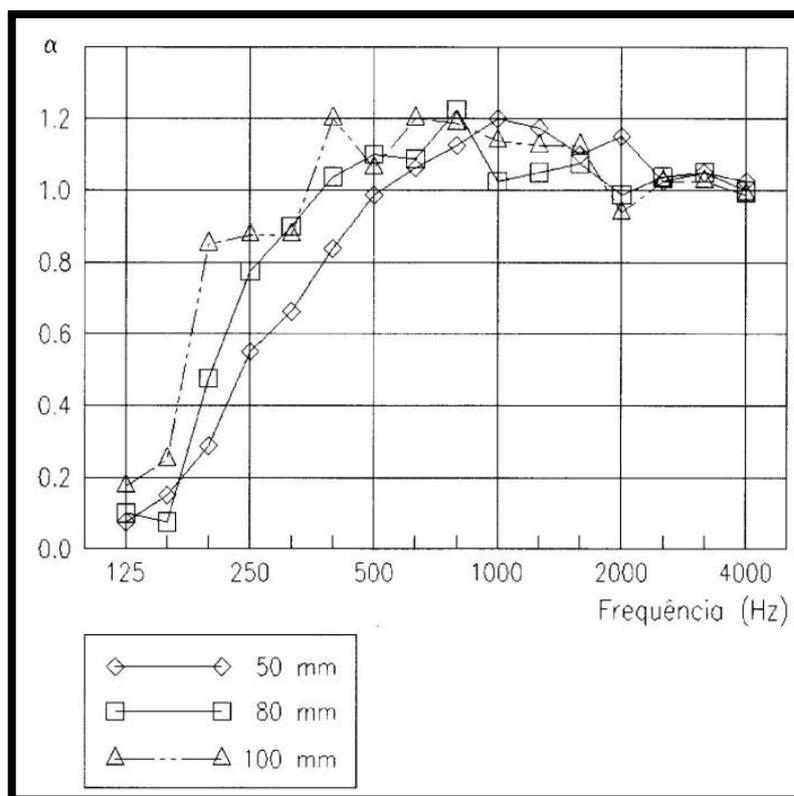


Figura 2.7 – Gráfico da variação da absorção sonora com a espessura [9].

No gráfico da figura 2.7 demonstra que quando comparada a espessura de 100 mm com a de 50 mm, verifica-se um acréscimo de absorção sonora até próximo de 800 Hz – um valor médio entre 100 Hz e 630 Hz. Após os 800 Hz o comportamento é semelhante havendo mesmo, para a espessura de 100 mm, uma redução da eficácia[9].

2.6.4. Massa volúmica

A absorção sonora dos materiais aumenta com a sua massa volúmica até valores da ordem dos 30 kg/m³. Acima destes valores, a intercomunicabilidade entre espaços de ar

diminui, reduzindo-se as perdas de energia resultantes do atrito sobre as paredes sólidas desses espaços. Constam do gráfico da figura 2.8, as curvas características de absorção sonora de placas rígidas e semirrígidas de lã mineral, com espessura de 50 mm e massas volúmicas entre 30 kg/m^3 e 100 kg/m^3 , para a mesma forma de aplicação. [9].

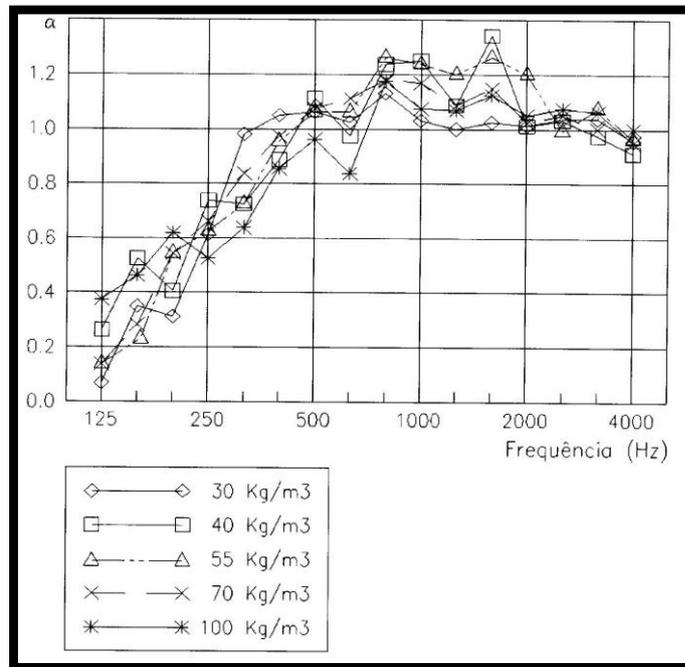


Figura 2.8 – Gráfico da variação da absorção sonora com a massa volúmica [9].

Como se pode verificar no gráfico da figura 2.8, não existe uma clara relação entre absorção sonora e a massa volúmica podendo referir-se, numa apreciação geral, que, para a espessura de 50 mm, a massa volúmica mais adequada parece ser 40 kg/m^3 . Massas volúmicas superiores não traduzem acréscimos de absorção sonora, em termos globais, verificando-se, porém, que nas zonas das baixas frequências a absorção sonora pode assumir valores mais elevados para soluções com massas volúmicas superiores[9].

2.6.5. Materiais e sistemas absorventes sonoros

Todos os materiais ou sistemas absorvem uma maior ou menor quantidade de energia sonora que neles incide. Porém, são designados por absorventes sonoros quando a sua função essencial é a absorção da energia sonora. No âmbito da acústica é comum utilizar a designação de material absorvente sonoro quando a absorção resulta apenas das características físicas do material (espessura, textura superficial, massa volúmica, etc.) e por sistema absorvente sonoro quando, para além das características do material, a absorção sonora resulta, de forma significativa, da sua ligação aos outros elementos de construção[9]. O mecanismo que leva à

transformação da energia sonora, incidente no material, em energia térmica, determina a designação dos materiais ou sistemas absorventes sonoros em:

- Materiais texturados;
- Membranas ressonantes;
- Ressonadores de cavidade.

Duma maneira geral, os materiais texturados absorvem energia nas frequências altas, as membranas ressonantes nas frequências baixas e os ressonadores de cavidade são concebidos para absorver nas frequências médias[9].

2.6.6. Materiais texturados

Neste contexto designam-se por materiais texturados os que representam uma superfície cuja textura potencie a absorção de energia sonora. As superfícies destes materiais, com pequenos interstícios que comunicam entre si, asseguram a permeabilidade e propagação das ondas sonoras de frequências altas. O ar contido nestes interstícios é sujeito a um movimento oscilatório, e é devido ao atrito sobre as paredes sólidas que parte da energia sonora é transformada em energia térmica. Neste processo ocorre maior absorção nas frequências altas que nas frequências baixas: nas frequências baixas a absorção sonora aumenta com a espessura, sendo nas frequências altas independentes desta. Fazem parte dos materiais com esta designação as lãs minerais, os aglomerados de cortiça, as massas porosas, as alcatifas e os tecidos[9].

Lãs minerais

As lãs minerais (figura 2.9), apresentam-se sob forma de placas, ou mantas, conforme a sua flexibilidade e dimensões. As placas caracterizam-se por serem elementos rígidos ou semirrígidos, autoportantes, fornecidos em unidades pré-fabricadas de dimensões faciais e espessura fixas. As diferentes variedades de placas disponíveis, diferem na sua essência, na composição e na textura da superfície. Quanto á composição, os tipos de placa comercializados podem ser constituídas por lã de rocha, de vidro ou de escória de alto-forno. Relativamente à superfície exposta esta pode ter aspeto liso, perfurado, fissurado ou estriado. As placas semirrígidas podem por vezes apresentar uma das faces protegida, por um tecido de fibras de lã mineral ou de fibras de vegetais, cujo objetivo pode ser reduzir a desagregação das fibras ou melhorar a aparência da superfície exposta.

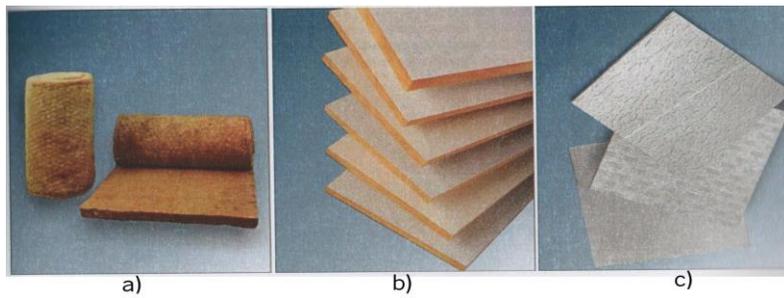


Figura 2.9 - Lãs minerais.
a) Flexíveis; b) Semirrígidos; c) Rígido[9].

Na figura 2.9 mostra as lãs minerais com diferentes tipos de flexibilidade, esta depende da massa volúmica[9] e podem ser designadas por:

- i. **flexíveis**, quando em forma de mantas (figura 2.9 a)) têm massa volúmica inferior a 55 kg/m^3 ;
- ii. **semirrígidos**, quando em forma de placas (figura 2.9 b)) têm a massa volúmica inferior a 55 kg/m^3 ;
- iii. **rígidos**, quando em forma de placas (figura 2.9 c)) têm a massa volúmica superior a 55 kg/m^3 .

As fibras minerais podem ainda apresentar-se sob forma de placas flexíveis e pouco densas, protegidas por película de polietileno e preparadas para serem suspensas. Apresentadas desta forma, denominam-se de absorsores suspensos (figura 2.10) e são normalmente usadas em espaços industriais ou de grande volume.

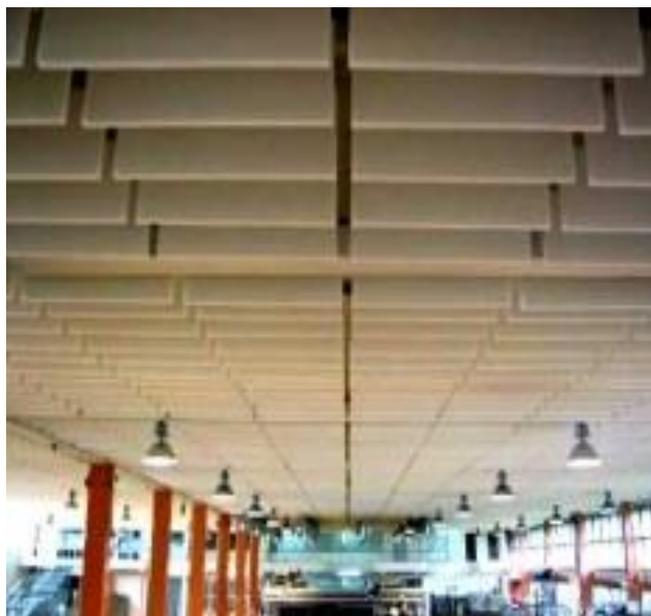


Figura 2.10 - Absorsores suspensos [11]

No gráfico da figura 2.10 apresentam-se os valores dos tempos de reverberação de um ginásio, com aproximadamente 800 m³ de volume, antes e depois da aplicação de 510 absorsores suspensos de lã de rocha, com dimensões de 0,50 m x 1,00 m [9].

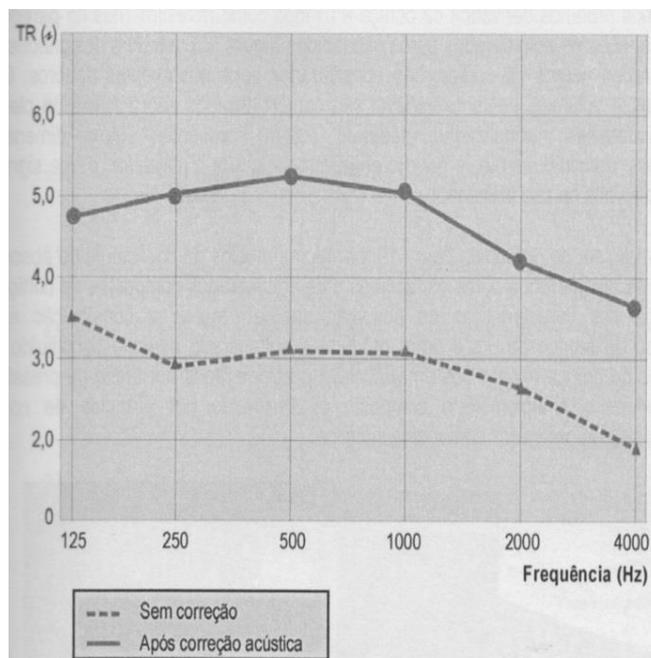


Figura 2.11 – Gráfico com a diminuição dos tempos de reverberação por aplicação de absorsores suspensos [9].

Aglomerados de cortiça

Dos vários produtos derivados da cortiça e usados como revestimentos de paredes e tetos, apenas os aglomerados puros expandidos (à esquerda na figura 2.12), também designados por aglomerados negros de cortiça, são considerados bons absorventes sonoros. Com uma massa volúmica bastante variável são comercializados sob a forma de placas, com dimensões normalizadas, podendo porém apresentar outras dimensões diferentes, definidas mediante acordo entre fabricante e o utilizador, o que significa uma mais valia na sua utilização.



Figura 2.12 – Aglomerado negro e aglomerado composto de cortiça.

Apresentam-se, no gráfico da figura 2.13, os valores médios do coeficiente de absorção sonora de aglomerados puros expandidos e de aglomerados compostos de cortiça.

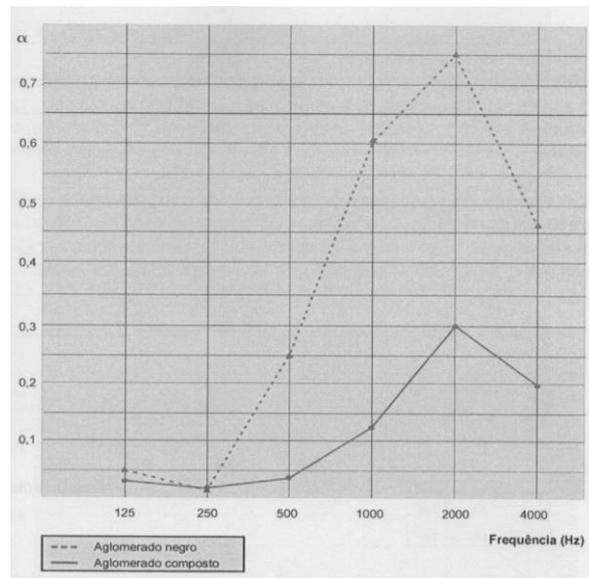


Figura 2.13 – Gráfico com as diferenças de absorção sonora entre aglomerados negro e aglomerados compostos de cortiça [9].

O gráfico da figura 2.13 demonstra que o aglomerado negro tem maiores coeficientes de absorção sonora que o aglomerado composto. A diferença das características de absorção sonora deve-se à constituição e ao processo de fabrico de um outro produto: o aglomerado negro é constituído por grânulos de cortiça expandidos em autoclave e aglomerados por efeito de pressão e temperatura e o aglomerado composto é constituído por grânulos de cortiça prensados e aglomerados com resina sintética[9].

Massas porosas

As massas porosas com fibras minerais ou granulados minerais e aglutinantes apropriados são normalmente aplicadas por projeção sobre o tosco de paredes e tetos. Possuem uma massa volúmica que varia entre 130 kg/m^3 e 165 kg/m^3 e podem tornar-se na melhor opção para aplicar em superfícies irregulares ou em locais sujeitos a grandes variações de humidade relativa do ar ou condensações de vapor de água. No gráfico da figura 2.14 são analisadas as características de absorção sonora de uma massa porosa com espessuras nominais de 13 mm e 25 mm.

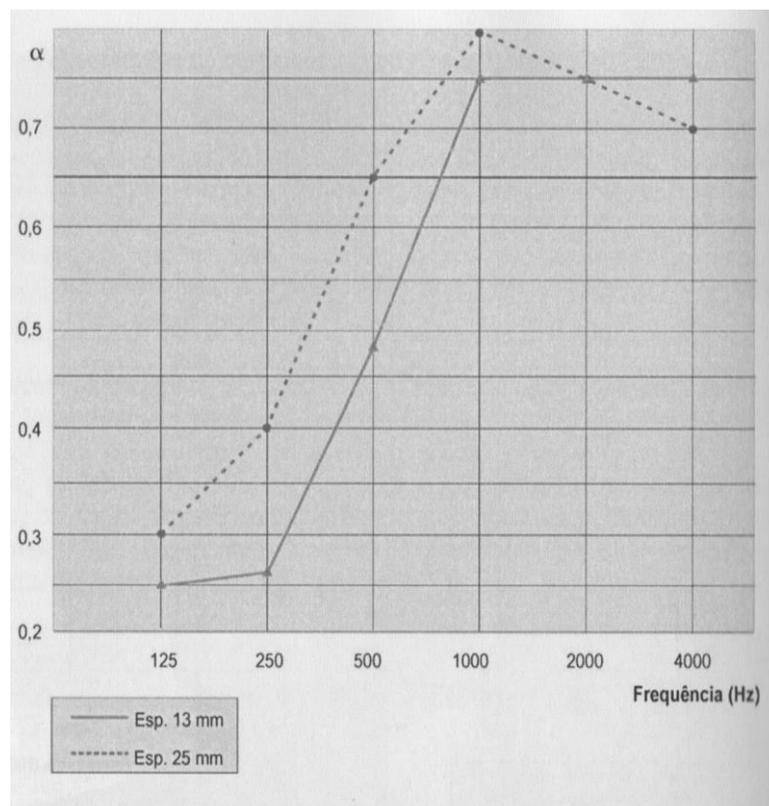


Figura 2.14 - Características de absorção sonora de uma massa porosa com espessuras nominais de 13 mm e 25 mm [9].

Da análise do gráfico da figura 2.14 verifica-se que o aumento da espessura corresponde a uma translação da característica de absorção sonora, no sentido das frequências baixas, sem alteração relevante do coeficiente de absorção sonora na região de frequências altas[9].

Alcatifas e tecidos

As características de absorção sonora de alcatifas podem diferir bastante conforme a espessura do pelo e a textura, e, quando se trata de alcatifas em que a parte inferior do suporte é um forro¹, dependem igualmente da espessura e massa volúmica deste material de suporte.

Em tecidos decorativos, como por exemplo reposteiros, para além das características próprias do tecido, a absorção sonora depende, também, da percentagem de franzido e da distância a que está colocado da parede ou janela. A figura 2.15 apresenta, para o mesmo material, diferentes valores de absorção sonora devidos ao franzimento do tecido.

¹ Camada destinada a melhorar as características de resiliência e as condições de aplicação do revestimento.

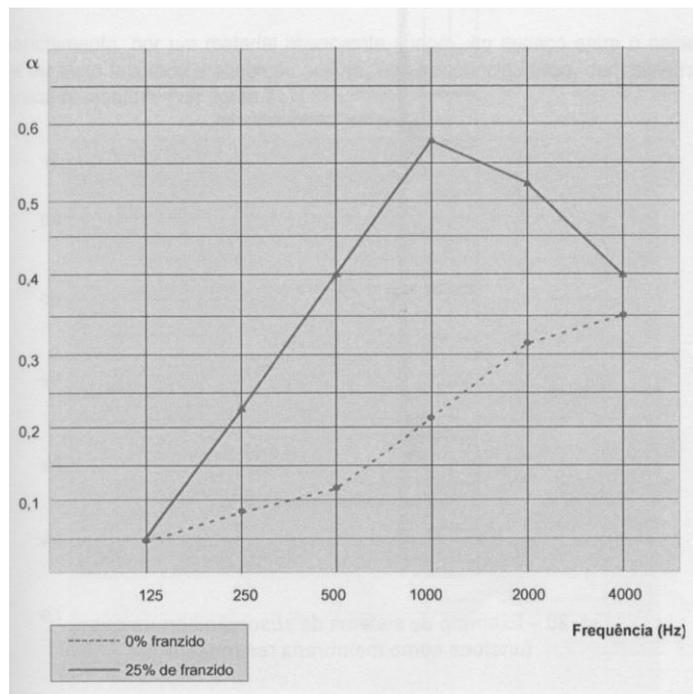


Figura 2.15 - Coeficiente de absorção sonora de um reposteiro de algodão com diferentes percentagens de franzido [9].

2.6.7. Membranas ressonantes

As membranas ressonantes (figura 2.16) funcionam como sistemas absorventes sonoros mediante mecanismos complexos em que intervêm a ressonância destes sistemas e, eventualmente, as características de porosidade do material[9].

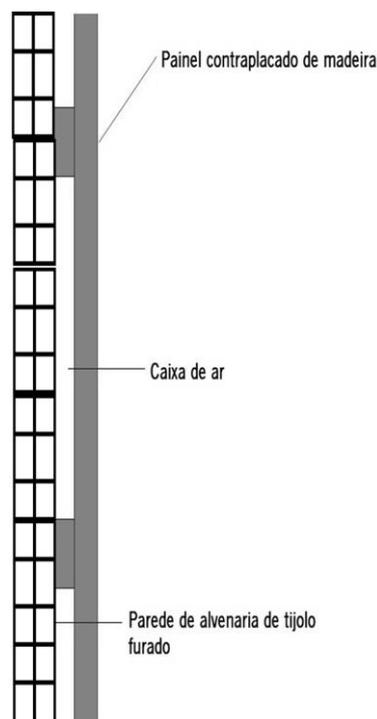


Figura 2.16 - Membrana ressonante.

Considere-se uma placa de contraplacado fixada a uma estrutura de madeira a uma certa distância duma parede (figura 2.16) exposta a ondas de pressão sonora. A placa fica sujeita a um movimento vibratório conseqüente da parte da energia sonora que é transformada em energia mecânica, que depois é transformada em energia térmica. Na figura 2.17 representa-se as características de absorção sonora de sistemas tipo membrana ressonante, com e sem preenchimento por material absorvente na caixa-de-ar¹.

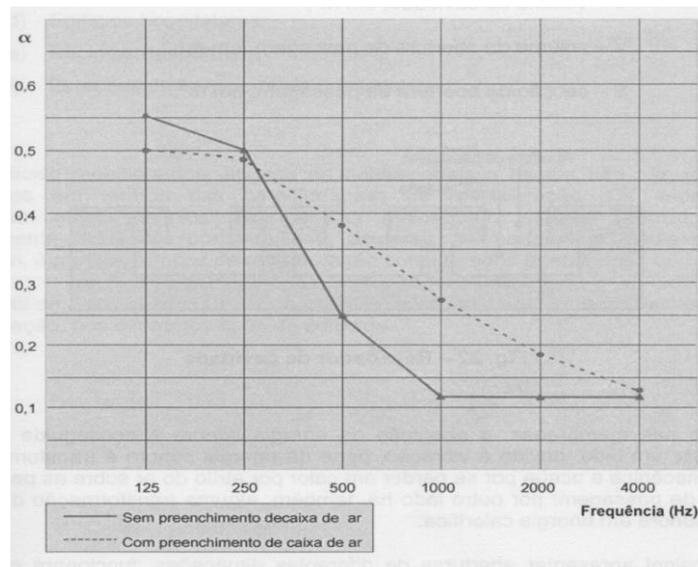


Figura 2.17 - Características de absorção sonora de sistemas tipo membrana ressonante, com e sem preenchimento por material absorvente na caixa-de-ar [9].

Na caracterização da membrana, verifica-se que a frequência f para qual a membrana tem um coeficiente de absorção sonora máximo (frequência de ressonância) é dada pela expressão:

$$f = \frac{c}{2\pi} \frac{\rho}{md} \quad (2.2)$$

em que:

c – velocidade de propagação do som do ar, em m/s;

ρ – massa volúmica do ar, em kg/m³;

m – massa superficial do painel, em kg/m²;

d – espessura da caixa de ar, em m.

¹ Espaço entre um material absorvente sonoro e um elemento rígido.

O preenchimento, por um material absorvente sonoro, do espaço entre o painel e a parede ou teto favorece a absorção sonora, nas frequências altas, dum sistema tipo membrana ressonante (ver figura 2.18).

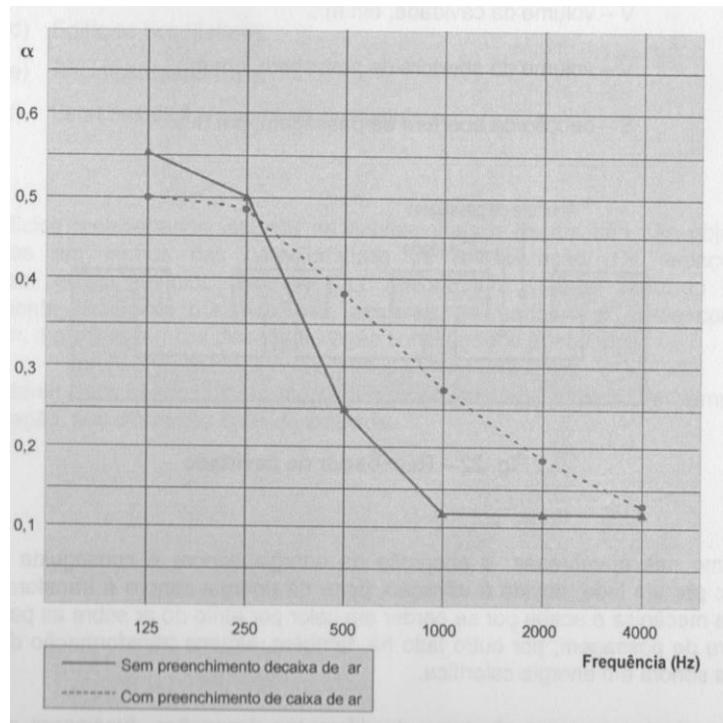


Figura 2.18 - Características de absorção sonora de sistema tipo membrana ressonante, com e sem preenchimento por material absorvente na caixa-de-ar [9].

2.6.8. Ressonadores de cavidade

Chama-se ressonador de cavidade a um sistema de absorção sonora cujos mecanismos de absorção são semelhantes aos das membranas ressonantes, sendo também concebidos para que a sua absorção seja máxima numa determinada frequência[9].

A figura 2.19 mostra o exemplo de um tipo de ressonador de cavidade cuja frequência, f , para a qual o coeficiente de absorção sonora é máximo, é dada pela expressão:

$$f = \frac{c}{2\pi} \frac{S}{(vV)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.3)$$

em que:

c – velocidade de propagação do som do ar, em m/s;

V – volume da cavidade, em m^3 ;

V – volume da abertura de passagem, em m^3 ;

S – secção da abertura de passagem, em m^2 ;

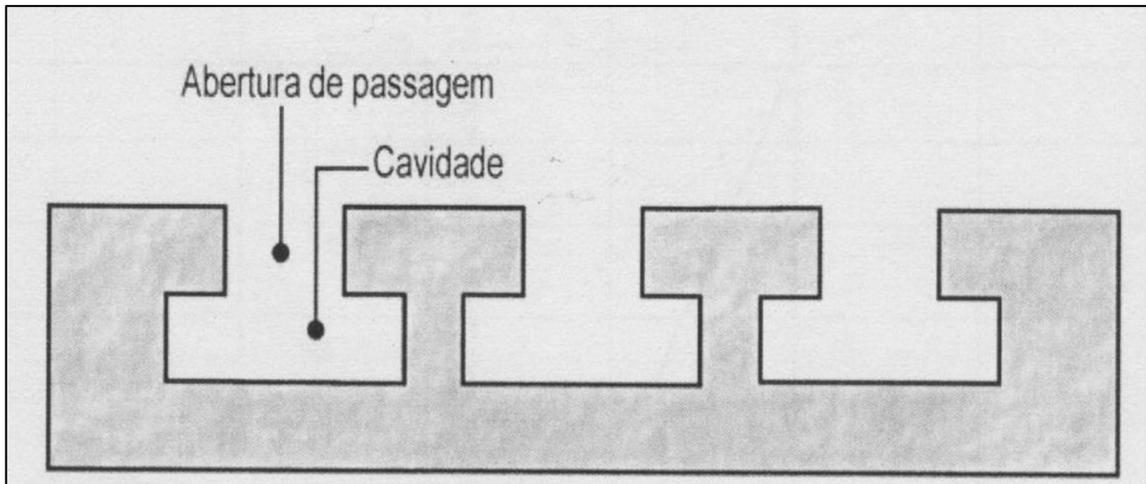


Figura 2.19 - Ressorador de cavidade[9].

Tal como nas membranas, a absorção da energia sonora é conseguida de duas formas: por um lado, devido à vibração, parte da energia sonora é transformada em energia mecânica e acaba por se perder em calor por atrito do ar sobre as paredes da abertura de passagem; por outro lado há, também, alguma transformação direta de energia sonora.

Se um painel apresentar aberturas de diferentes dimensões, funcionará como um conjunto de ressoadores de cavidade, correspondendo a cada tipo de perfuração uma frequência própria diferente.

2.7. Resumo e implicações no desenvolvimento do trabalho

Foram apresentadas neste capítulo os conceitos de ruído, higiene e segurança do trabalho, as técnicas de medição, as técnicas de isolamento e o conceito de absorção sonora. Estes fatores são preponderantes na compreensão e execução do trabalho. Com esses conceitos teóricos será possível determinar o tipo de medição a executar, determinar se os níveis de pressão sonora estão dentro dos limites aceitáveis e preparar a execução de um projeto de proteção auditiva para o caso de estudo.

CAPÍTULO 3

Propriedades da Propagação Sonora

3.1. Introdução

Neste capítulo é feita a abordagem das propriedades do ruído, o efeito do ruído no corpo humano, a introdução ao tratamento do sinal e o enquadramento desses temas no desenvolvimento do trabalho.

3.2. Grandezas e Propriedades Envolvidas

3.2.1. Nível Sonoro

Qualquer fonte sonora emite uma determinada potência acústica, característica e de valor fixo, relacionada com a saída da mesma. As vibrações sonoras originadas pela fonte têm, no entanto, valores variáveis dependentes de fatores externos, tais como distância e orientação do recetor, variações de temperatura, tipo de local, etc.[12].

A intensidade das vibrações sonoras ou das variações de pressão que lhes estão associadas exprime-se em newton por metro quadrado ($N.m^{-2}$) ou pascal (Pa) e designa-se por pressão sonora. A medida da pressão sonora numa escala linear é contudo impraticável, pois compreende cerca de 1 milhão de unidades. Com efeito, o limiar da audibilidade a 1000 hertz (Hz) é provocado por uma pressão de 20μ pascal (μPa), enquanto o limiar da dor ocorre a uma pressão de 100 pascal. Além disso, o ouvido não responde linearmente aos estímulos, mas sim logaritmicamente. Por estas razões, as medidas dos parâmetros acústicos são feitas numa escala logarítmica expressa em decibéis (dB). O decibel é, por definição, o logaritmo da razão entre o valor medido e um valor de referência padronizado e corresponde praticamente à mais pequena variação da pressão sonora que um ouvido humano normal pode distinguir nas condições normais de audição[12].

De acordo com a norma portuguesa NP-1730 : 1996, o nível de pressão sonora, L_p , em decibéis, é dado pela seguinte expressão:

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (3.1)$$

em que:

p é o valor eficaz ou RMS¹ da pressão sonora, em pascal;

p_0 o valor eficaz da pressão sonora de referência (2×10^{-5} Pa).

De forma análoga se exprime o nível de potência sonora, L_w , em decibéis:

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0} = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (3.2)$$

em que:

w é o valor eficaz ou RMS da potência sonora, em watts;

w_0 o valor eficaz da potência sonora de referência.

Por vezes utiliza-se o nível de intensidade sonora L_I , igualmente expresso em decibéis, cuja expressão é:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (3.3)$$

em que:

I é o valor eficaz da intensidade sonora em watt.m^{-2} ;

I_0 é o valor eficaz da intensidade sonora de referência (10^{-12} W.m^{-2}).

A figura 3.1 apresenta o habitualmente denominado termómetro acústico, onde as duas escalas (pressão sonora e nível de pressão sonora) são comparadas.

¹ *Root Mean Square* ou Valor Eficaz



Figura 3.1 – Termómetro acústico de relação entre pressão sonora e nível de pressão sonora[13].

A figura 3.1 assinala também as situações habituais a que os diversos níveis de pressão sonora correspondem.

3.2.2. Relação entre Níveis de Pressão Sonora, Potência e Intensidade Sonora

Se considerarmos uma onda esférica progressiva, propagando-se em campo livre, temos que:

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \quad (3.4)$$

sendo:

I e p , respetivamente, os valores eficazes da intensidade e pressão sonoras,

ρ a massa específica do ar (em Kg.m^{-3});

c a velocidade de propagação da onda sonora no meio (ar) em (m.s^{-1});

ρc é a impedância acústica do meio (em $\text{Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$).

Substituindo esta expressão na expressão de L_i , teremos:

$$L_I = 10 \log \left(\frac{p^2}{\rho c I_0} \right) \quad (3.5)$$

Em condições atmosféricas padrão $\rho c = 406 \text{ kg.m}^2.\text{s}^{-1}$.

Assim, a equação 3.5 reduz-se à seguinte expressão (tendo em conta que $I_0 = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$):

$$L_I = L_p \quad (3.6)$$

Ou seja, para efeitos práticos, consideram-se iguais os níveis de pressão e intensidade sonoras.

Por sua vez a intensidade sonora é igual à razão entre a potência sonora e área.

No caso de uma fonte pontual em campo livre admite-se a propagação de uma onda esférica, pelo que a intensidade sonora à distância r da fonte é dada pela expressão:

$$I = \frac{W}{4 \pi r^2} \quad (3.7)$$

Supondo uma superfície de 1 m^2 , teremos:

$$L_W = 10 \log \frac{I}{I_0} + 10 \log(4 \pi r^2) = L_I + 20 \log r + 11 \text{ (dB)} \quad (3.8)$$

ou

$$L_W = L_p + 20 \log r + 11 \text{ (dB)} \quad (3.9)$$

3.2.3. Adição de Níveis Sonoros

Sejam $L_{w1}, L_{w2}, \dots, L_{wn}$ os níveis de potência sonora de n fontes de ruído. A *soma* é dada pela seguinte expressão:

$$\begin{aligned} L_W &= 10 \log \left(10^{\frac{L_{w1}}{10}} + 10^{\frac{L_{w2}}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_{wn}}{10}} \right) \\ &= 10 \log \left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{wi}}{10}} \right) \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\text{Se } L_{w1} = L_{w2} = \dots = L_{wn}$$

então:

$$L_W = L_{w1} + 10 \log n \quad (3.11)$$

Exemplo:

Consideremos duas fontes sonoras de 90 dB.

O nível de *soma* será igual a $(90 + 10 \log 2)$ dB = 93dB.

3.2.4. Frequência de Espectro

Ao considerar-se um ponto da onda verifica-se que a pressão oscila um determinado número de vezes por segundo à volta da pressão atmosférica[2].

O número de flutuações ou períodos por segundo (hertz) define a frequência ou altura do som.

$$f = \frac{1}{T} \quad (3.12)$$

em que:

f é a frequência em Hertz;

T é o período em segundos.

Pode demonstra-se a seguinte relação entre o comprimento de onda λ , expresso em metros, e a frequência, f , expressa em hertz:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.13)$$

em que **c** representa a velocidade de propagação do som em metros por segundo. Contudo, a maior parte dos ruídos industriais não são sons puros, mas sim ruídos complexos. Para se ter uma noção exata da composição do ruído é necessário determinar o nível sonoro de cada frequência. Este tipo de análise chama-se análise espectral ou análise por frequência e costuma ser representada graficamente num sistema de eixos onde as frequências se situam no eixo das abcissas e os níveis sonoros no eixo das ordenadas.

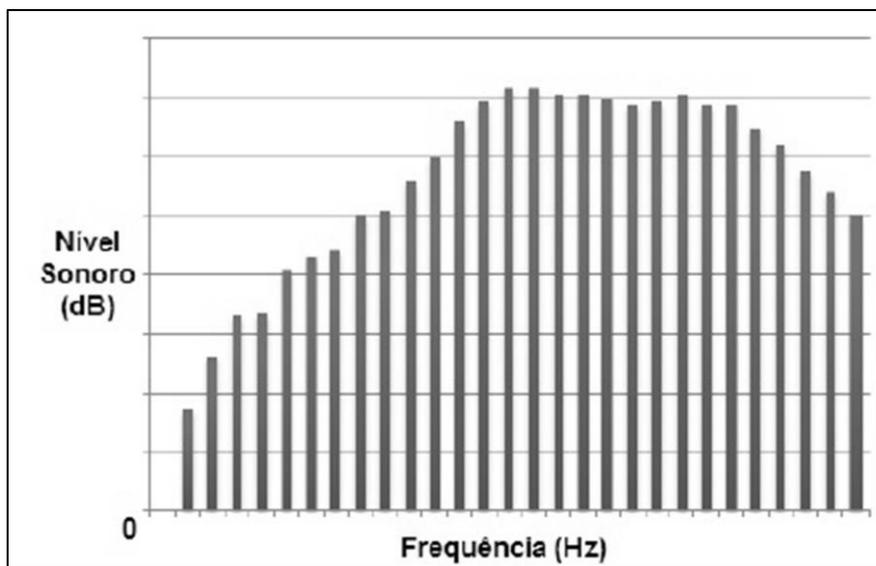


Figura 3.2 - Exemplo de uma análise espectral ou análise por frequência[14].

A escala de frequências é usualmente dividida em três grandes grupos:

- infrassons;
- gama de frequência audível;
- ultrassons.

A gama audível compreende os sons cujas frequências vão desde 20 a 20 000 Hz e, como o seu nome sugere, é suscetível de provocar reação ao nível da audição humana. Abaixo de 20 Hz situam-se os infrassons, e acima de 20 000 Hz os ultrassons. A gama audível está dividida em 10 grupos de frequências designados por oitavas (figura 3.3). Cada oitava, por seu turno, está subdividida em 3 grupos de terços de oitava.

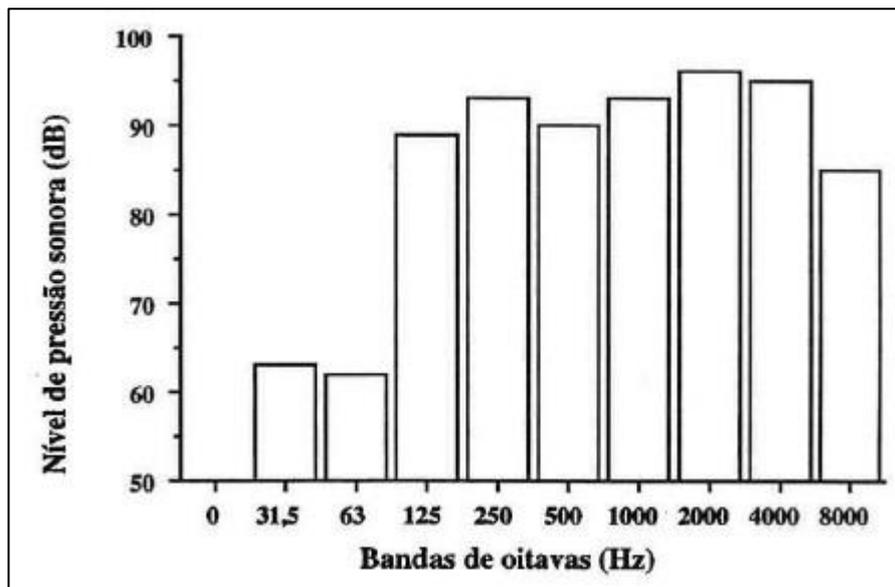


Figura 3.3 – Análise espectral ou análise por frequências na banda de oitavas[13].

A designação de cada oitava corresponde à sua frequência central f_c , que é o dobro da frequência central da oitava antecedente e a média geométrica das frequências limite. Na mesma oitava, a frequência limite superior f_L é dupla da frequência limite inferior f_i [2].

Temos portanto:

$$f_c = \sqrt{f_i \times f_L} = \sqrt{2} \times f_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \times f_L \quad (3.14)$$

Por exemplo, para $f_c = 500$ Hz, $f_L = 707$ Hz e $f_i = 354$ Hz.

3.2.5. Audibilidade

Em virtude da estrutura do nosso aparelho auditivo e das características do sistema nervoso relacionadas com a audição, reagimos de modo diverso aos sons de diferentes frequências, não obstante um mesmo nível de pressão sonora.

O nível de audibilidade é medido em fones (F) e corresponde ao nível de pressão sonora de um som com uma frequência de 1000 Hz. A unidade de intensidade audível é o sone (S), definido como a intensidade audível de um estímulo sonoro com a frequência de 1000 Hz e um nível de pressão de 40 dB[2]. A relação existente entre estas duas grandezas é o seguinte:

$$S = 2 \frac{F-40}{10} \quad (3.15)$$

Assim, uma alteração de 10 fones em um nível de intensidade audível corresponde a duplicar ou reduzir a metade a intensidade audível.

Experimentalmente é possível estabelecer linhas isofônicas (figura 3.3) ou de igual nível de audibilidade a partir do estudo estatístico das variações na sensação sonora experimentada por um elevado número de indivíduos jovens com audição normal. Tal é o objetivo da norma ISO 226:1987.

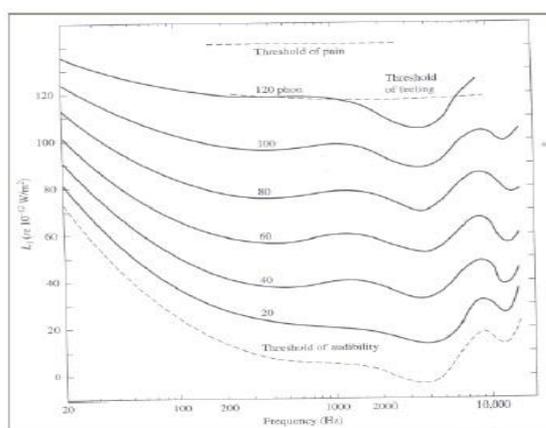


Figura 3.4 - Representação gráfica das linhas isofônicas[1].

Analisando as linhas da figura 3.4 verifica-se que, sendo baixo nível sonoro, a audibilidade é muito dependente da frequência. Por exemplo, um som com a frequência de 1000Hz e um nível sonoro de 70 dB terá um nível de audibilidade de 70 fones, enquanto os mesmos 70 dB a 63 Hz correspondem somente a 56 fones. O campo mínimo perceptível (MAF) ou limiar de sensação auditiva, representado pela curva a tracejado, corresponde à linha isofônica de 4,2 fones. Por sua vez, o limiar da sensação dolorosa é de cerca de 120 fone. A maior sensibilidade auditiva situa-se entre 250 e 5000 Hz. Na prática, para que um aparelho de medição do ruído se comporte como o ouvido é necessário introduzir-lhe um filtro. Existem vários tipos de filtros normalizados que correspondem, de uma forma não linear, às diferentes frequências, designando-se geralmente por filtros de ponderação (A, B, C, D). A mais importante a nível de ruído industrial é a malha de ponderação, A, que traduz aproximadamente a resposta do ouvido humano. Os valores das medições feitas através da malha A são seguidos pela designação decibel A, dB(A)[2]. Na figura 3.5 comparam-se os vários filtros de ponderação.

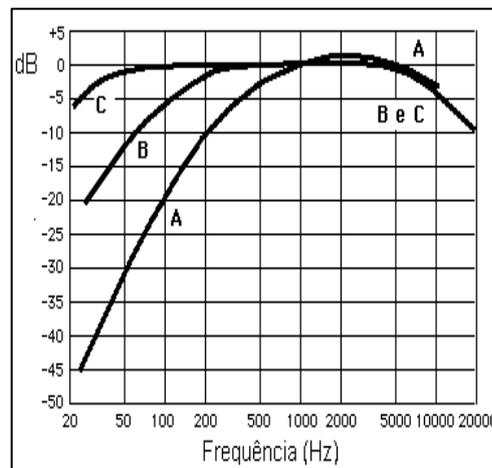


Figura 3.5 - Filtro de ponderação [15].

3.2.6. Valor eficaz ou *Root Mean Square*

Pode-se quantificar o valor de uma vibração sonora medindo a maior amplitude de vibração ou Pico, mas se no caso de haver duas leituras, uma poderá ter o pico superior, mas a outra poderá apresentar valores superiores a maior parte do tempo. Para a tradução das leituras, ou seja fazer uma comparação mais adequada, utiliza-se o cálculo do Valor Eficaz (equação 3.16) ou *Root Mean Square* (RMS), podendo assim ser possível comparar o resultado de duas ou mais medições numa escala mais ajustada[13].

O RMS para uma seleção de N valores (x_1, x_2, \dots, x_n) é dado pela equação 3.16.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} x_i^2}{N}} = \sqrt{\frac{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_i^2 + \dots + x_{N-1}^2}{N}} \quad (3.16)$$

Para uma função variável contínua $f(t)$ definida sobre o intervalo $T_1 \leq t \leq T_2$ o RMS é dado pela equação 3.17.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{-T}^T [f(t)]^2 dt} \quad 3.17$$

O valor RMS para uma função ao longo do tempo é dado pela equação 3.18.

$$RMS = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\sqrt{\frac{1}{2T} \int_{-T}^T [f(t)]^2 dt} \right) \quad 3.18$$

sendo que:

t é o tempo em Segundos (s);

f é a frequência em Hertz (Hz).

Estas expressões traduzem de uma forma aproximada o valor médio do nível sonoro dentro da gama de frequência utilizada[13].

3.3. Efeito do Ruído no Corpo Humano

Os ouvidos são mecanismos complexos e muito delicados, e conseqüentemente relativamente frágeis. Quando uma parte do ouvido perde a sua funcionalidade ocorre uma perda de audição. As perdas auditivas podem ser de condução ou neuro- sensoriais, dependendo da parte do ouvido em que ocorreu o problema[2]. Uma perda auditiva de condução é causada por uma obstrução mecânica à transmissão do ruído entre o ouvido externo e o ouvido médio. Uma perda auditiva neuro-sensorial é causada por um problema no ouvido interno, normalmente nas células ciliadas da cóclea mas eventualmente também no nervo auditivo que faz a ligação ao cérebro. Por vezes podem ocorrer os dois tipos de perdas auditivas em simultâneo. As perdas auditivas podem variar desde perdas auditivas ligeiras até surdez total. Normalmente o nível de perdas auditivas pode ser determinado por meio de exames audiométricos. O padrão das perdas auditivas pode apresentar diversas características, com maiores perdas nas frequências altas, nas frequências baixas, ou com perdas uniformes ao longo da frequência. Na origem das perdas auditivas podem estar diversas causas, apresentando algumas um padrão típico de perdas auditivas[2]. A figura 3.6 mostra a constituição do aparelho auditivo.

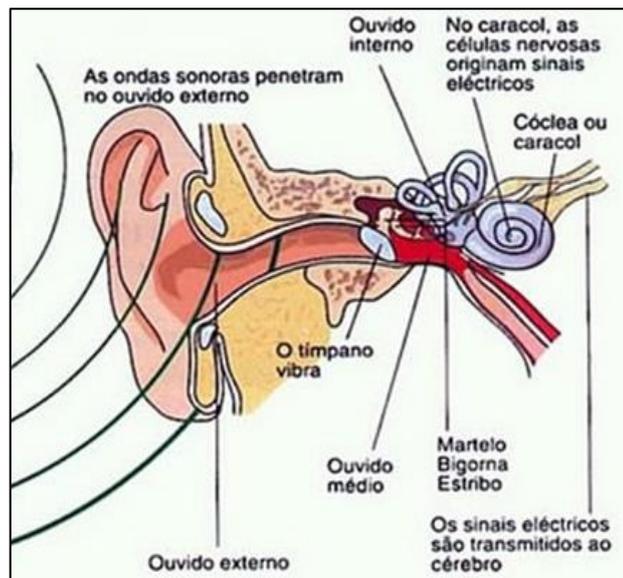


Figura 3.6- Anatomia do ouvido [16].

A maioria das perdas auditivas neuro-sensoriais provém de problemas nas células ciliadas da cóclea (figura 3.6).

Ainda não é possível, apesar dos desenvolvimentos da medicina, corrigir problemas ocorridos nestas células. Estes problemas são provocados por diversas formas como por exemplo:

- Uma infecção grave ao nível do ouvido interno;
- Alguns fármacos utilizados em medicamentos, como estreptomicina ou a gentamicina;
- Um efeito normal e conhecido da idade avançada (presbiacusia);
- A exposição a níveis sonoros elevados.

A exposição a níveis sonoros elevados pode estar na origem de dois tipos principais de perdas auditivas:

- A perda da sensibilidade temporária que ocorre quando a exposição ao ruído se situa dentro dos limites aceitáveis – hipacusia temporária – desaparece naturalmente após um período de repouso e a pessoa readquire normalmente a acuidade auditiva. Infelizmente, a relação entre estas perdas auditivas temporárias e a sua evolução para uma situação de lesão auditiva permanente varia grandemente de indivíduo para indivíduo, o que inviabiliza a sua utilização como fator de previsão deste tipo de evolução.

- À medida que aumenta a duração da exposição a níveis elevados, como acontece com frequência em ambientes industriais, a perda de sensibilidade temporária evolui para uma situação de lesão auditiva permanente. A exposição a níveis excepcionalmente elevados pode até provocar lesões auditivas permanentes de imediato – situação trauma auditivo.
- Uma única exposição a níveis sonoros excepcionalmente elevados, em particular com características impulsivas, como ocorrem numa explosão ou num disparo de armas de fogo, pode provocar lesões auditivas permanente que normalmente são mais graves no ouvido que se encontra próximo da fonte sonora. Normalmente esta exposição origina uma perda auditiva do tipo neuro-sensorial, embora um nível sonoro muito elevado, acima de 140 dB de nível sonoro, possa causar uma perfuração do tímpano[2].

A figura 3.7 mostra a evolução da surdez profissional.

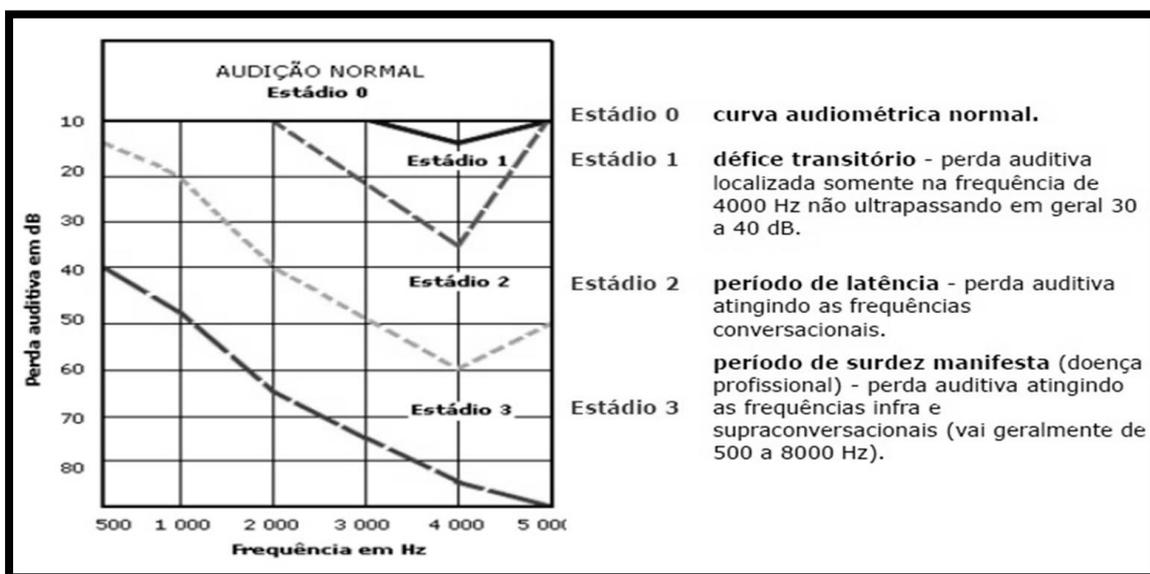


Figura 3.7- Desenvolvimento das perdas auditivas induzidas pela exposição ao ruído[2].

3.3.1. Nível sonoro equivalente

O conceito de tempo de exposição sonora, tem uma importância fundamental, para a definição do risco do trauma auditivo. Os efeitos são validados a partir de determinado nível de ruído, sendo que o efeito deletério depende do produto do nível sonoro pelo tempo de exposição. Sendo o cálculo deste produto de simples determinação, mas só é válido se o ruído for estável e contínuo durante um determinado tempo. O nível sonoro varia na sua generalidade com o tempo, o que leva a determinar uma relação entre o nível e a sua duração. Tal objetivo é conseguido através do nível sonoro contínuo equivalente, que representa um nível sonoro

constante que, se estivesse presente durante todo o tempo de exposição, produziria os mesmos, efeitos de energia, que o nível variável. A decisão acerca da tolerabilidade para uma exposição de curta duração a ruídos contínuos depende da forma como se estima que o ouvido faz a integração da quantidade de ruído recebido num determinado intervalo de tempo. Há dois critérios diferentes para esta integração[2].

O primeiro é recomendado pela ISO¹ e estabelece a seguinte expressão para o cálculo do nível sonoro contínuo equivalente ($L_{Aeq, T}$):

$$L_{Aeq, T} (ISO) = 10 \log \left(\int_0^T \left(\frac{p}{p_2} \right)^2 dt \right) \quad (3.19)$$

Segundo o critério OSHA², que é um critério de igual pressão corrigido, a expressão dotada é a seguinte:

$$L_{Aeq, T} (OSHA) = 16,7 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p}{p_0} \right)^{1,2} dt \right) \quad (3.20)$$

Na tabela 3.1 estabelece-se uma comparação entre os dois critérios:

Tabela 3.1 - Comparação do nível de pressão sonora do critério OSHA e do critério ISO[2].

Tempo de Exposição	Nível Sonoro Recomendado (dB(A))	
	Critério OSHA	Critério ISO
8 horas	85	85
4 horas	90	88
2 horas	95	91
1 hora	100	94
30 minutos	105	97
15 minutos	110	100
7,5 minutos	115	103

¹ International Standard Organisation

² Occupational Safety and Health Administration

Por sua vez, a norma portuguesa NP-1730 : 1996 considera a seguinte expressão para o nível sonoro contínuo equivalente ponderado A num determinado intervalo de tempo, com início em t_1 e fim em t_2 :

$$L_{A_{eq},T} = 10 \log \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} 10^{\frac{L(t)}{10}} dt \right) \quad (3.21)$$

ou nas suas formas equivalentes

$$L_{A_{eq},T} = 10 \log \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_i} 10^{\frac{LpA_i}{10}} \right) \quad (3.22)$$

segundo um critério de amostragem dos níveis de pressão sonora,

$$L_{A_{eq},T} = 10 \log \left(\frac{1}{100} \sum_{i=1}^n f_i 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \quad (3.23)$$

Por aplicação de distribuição estatística das leituras dos níveis de pressão sonora ponderados **A**, utilizando uma técnica de amostragem por intervalos de tempo.

sendo:

L_{pA_i} o nível de pressão sonora em dB(A) para a amostra i;

T o período de referência em que ocorre o ruído perturbador;

L_i o nível sonoro em dB(A) correspondente ao valor central da classe de ordem i;

f_i a fração, expressa em percentagem, do período de referência em que o valor do nível sonoro pertence à gama de valores da classe de ordem i;

N o número total de amostras $\left(N = \frac{t_2 - t_1}{\Delta t} \right)$;

Δt o intervalo de tempo entre duas amostras consecutivas consideradas pelo aparelho;

n o número de classes.

O primeiro é o critério de igual energia, que postula que quantidades iguais de energia acústica alcançando o ouvido produzem o mesmo efeito, seja qual for a sua distribuição no tempo e o segundo critério é o critério de igual pressão, que admite que a integração se realiza na dependência da pressão sonora.

3.4. Introdução ao Tratamento de Sinal

No sentido de efetuar a caracterização de campos sonoros, tanto em espaço livre como em recintos fechados, é utilizada uma cadeia de medição cuja finalidade é a de traduzir a pressão sonora estabelecida em informação e facilmente utilizável. Esta cadeia de medição é constituída fundamentalmente por um transdutor que converte a pressão sonora em sinal elétrico – comumente designado por microfone -, um sistema de amplificação de sinal, um circuito de ponderação em frequência (p. ex. malha A), um circuito de obtenção de valores eficazes e um mostrador. Atualmente a cadeia de medição em causa encontra-se comercializada num equipamento único designado por sonómetro[17]. Existe uma grande variedade de sonómetros desde os que dão apenas valores aproximados de níveis sonoros, passando por sonómetros, com filtros de ponderação (A, B, C, D), respostas a impulsos e outros, até sonómetros que indicam o nível sonoro contínuo equivalente. O sonómetro pode ser acoplado a um analisador de frequências (filtro de oitavas ou de terço de oitava), se se pretender efetuar uma determinação do espectro de ruído[18].

Quase todos os aparelhos apresentam várias constantes de tempo, sendo as mais utilizadas as seguintes:

- *slow* (resposta lenta), com elevado amortecimento e um tempo de integração de, aproximadamente, 1 s;
- *fast* (resposta rápida), com um amortecimento pequeno e um tempo de integração de 125 ms;
- *impulse* (impulso), com um tempo de subida muito rápido e um tempo de descida amortecido (35 ms);
- *peak* (pico), com um tempo de subida muito rápido e sem tempo de descida.

Um sonómetro da classe **0** é entendido como padrão de laboratório. A classe **1** é indicada, especialmente, para utilização em laboratório e para uso geral, quando o ambiente acústico possa ser especificado ou controlado de maneira precisa. A classe **2** é indicada para aplicações gerais e a classe **3** sobretudo para ações de fiscalização (ultrapassagem de limites admissíveis)[2].

Para levar a cabo medições de campo existe ainda uma diversidade de aparelhagem portátil como, por exemplo, dosímetros, registadores gráficos e registadores em fita magnética.

Os dosímetros são aparelhos de bolso que, em casos de exposição a ruído muito variável, permitem uma aplicação pessoal e respetiva determinação da dose de ruído a que foi exposto. Os registadores gráficos portáteis permitem a obtenção simultânea dos níveis sonoros e do registo gráfico dos mesmos. Os registadores em fita magnética utilizam-se normalmente quando é necessário efetuar uma análise laboratorial posterior[17].

A figura 3.8 mostra um sonómetro de precisão com análise espectral em tempo real.



Figura 3.8 - Sonómetro de precisão com análise espectral em tempo real.

3.5. Resumo e Implicações no Desenvolvimento do trabalho

Foram apresentadas neste capítulo os conceitos de nível sonoro, frequência, audibilidade, valor eficaz e nível sonoro equivalente. Com esses conceitos será possível determinar o tipo de nível de ruído emitido pelas unidade hidráulicas e posteriormente fazer a comparação com os níveis das normas em vigor, verificando se esta exposição ao ruído pode ter consequências na saúde de quem trabalha no LEM.

CAPÍTULO 4

Aplicação num Caso Prático

4.1. Introdução

O Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) da Universidade do Minho (UM) está equipado com algum equipamento de ensaio, destacando-se os que possuem unidades hidráulicas de acionamento que apresentam níveis de ruído consideráveis quando estão em funções. Foi assim colocado o desafio de analisar os níveis acústicos para que seja possível elaborar um condicionamento acústico para as unidades hidráulicas do laboratório.

Assim, descrevem-se de seguida os procedimentos e meios envolvidos, bem como o enquadramento normativo. Assim foram efetuadas sete ensaios sonoros relativos as unidades hidráulicas do laboratório. O 1º ensaio consiste na análise do ruído ambiente laboratório, quando as bombas hidráulicas não estão em funcionamento. O 2º e 3º ensaios consistem na análise ao ruído produzida pela bomba hidráulica da mesa de testes de tração. No 4º e 5º ensaios foram analisadas a emissão de ruído na bomba hidráulica da máquina de tração Instron. Por último, nos 6º e 7º ensaios foram analisadas o ruído das duas bombas hidráulicas funcionando em simultâneo.

No organigrama da figura 4.1 esquematiza-se a organização escolhida para os ensaios realizados.

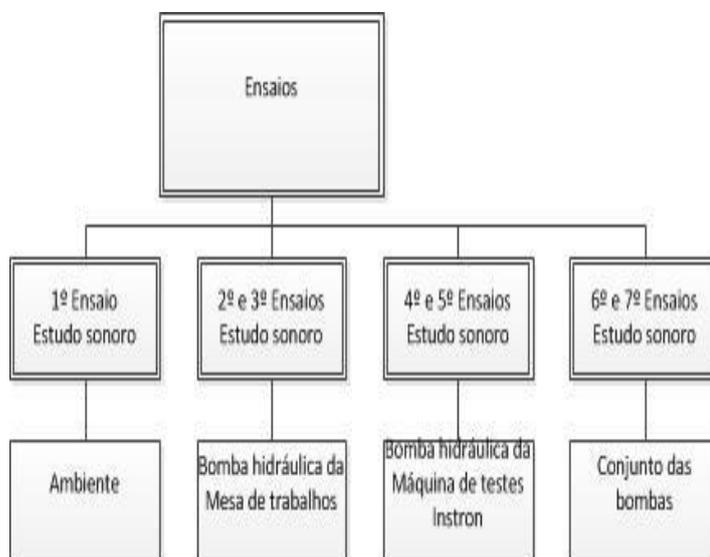


Figura 4.1 - Organigrama dos ensaios.

4.2. Ensaaios

Neste subcapítulo, são descritos as bombas hidráulicas e suas funções, a metodologia empregue e as técnicas de medição.

4.2.1. Descrição das Bombas Hidráulicas

A máquina de teste Instron® 8874 é um instrumento de ensaio servo-hidráulico biaxial, proporcionando um atuador axial combinado dinâmico e de torção na parte superior da cruzeta. Com uma estrutura de duas colunas alinhadas com precisão e uma mesa inferior, o 8874 atende às demandas desafiadoras de uma variada gama de requisitos de testes estáticos e dinâmicos. A máquina de testes Instron® 8874 encontra-se acoplada a um computador desktop. A máquina tem uma capacidade de exercer força axial de até 25kN e uma capacidade de torque de até 100 Nm.



Figura 4.2 Máquina de testes Instron® do LEM.

O banco de ensaios de tração e compressão (figura 4.3) é uma estrutura que funciona com montagem de estruturas quadriaxiais, utilizando o mesmo princípio de funcionamento da máquina Instron®, embora esteja equipado com 4 cilindros hidráulicos.



Figura 4.3 - Mesa de testes de tração do LEM.

Para o funcionamento da máquina de testes Instron®, existe uma bomba hidráulica (figura 4.4) que transmite uma potência de 15 kW, com uma frequência de 50 Hz e para o funcionamento do banco de ensaios, existe uma bomba hidráulica (figura 4.5) de 11 kW, com uma frequência de 50 Hz.



Figura 4.4 - Bomba hidráulica da máquina de testes Instron®.



Figura 4.5 - Bomba hidráulica do banco de ensaios.

Como ilustra a figura 4.6, as duas bombas encontram-se no mesmo local e quando estão em funcionamento emitem sons que provocam desconforto acústico nas pessoas que se encontrem a trabalhar no LEM.

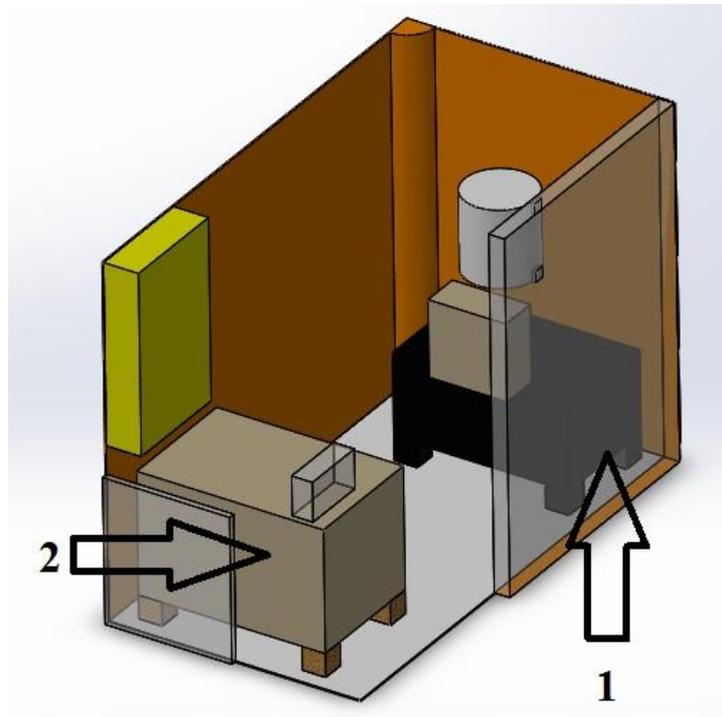


Figura 4.6 - Desenho 3D da localização das unidades hidráulicas.

1 – Bomba hidráulica da máquina de tração Instron®; 2 – Bomba hidráulica do banco de ensaios.

Com o fim de reduzir o incómodo provocado por estes equipamentos, estuda-se neste trabalho um método de isolamento do ruído.

4.2.2. Metodologia de Ensaio

4.2.2.1. Primeiro ensaio

O primeiro ensaio consistiu na medição do som ambiente do LEM, de modo a registar o ruído existente, sem que as bombas estivessem a funcionar.

O ensaio foi realizado segundo a norma NP EN ISO 1996, que especifica que deve haver um ou mais indicadores de ruído, determina a localização onde os limites de ruído devem ser verificados, determina a fonte sonora, o seu modo de funcionamento e a sua envolvente e os critérios para a avaliação da conformidade com os valores limites.

4.2.2.2. Segundo e terceiro ensaios

O segundo e terceiros ensaios, consistiu na medição da pressão sonora da bomba hidráulica do banco de ensaios de tração e compressão, na qual o microfone foi colocado em 2 posições assimétricas, segundo a norma NP EN ISO 9612:2011. Esta norma estabelece alguns procedimentos, como a análise do conteúdo do trabalho, seleção da estratégia de medição, medições e apresentação de resultados. Também especifica estratégias para a medição, como a medição baseada em tarefas e a medição baseada nos postos de trabalho.

4.2.2.3. Quarto e quinto ensaios

O quarto e quinto ensaios, consistiu na medição da pressão sonora da bomba hidráulica da máquina de testes Instron®, na qual o microfone foi colocado em 2 posições assimétricas, segundo a norma NP EN ISO 9612:2011.

4.2.2.4. Sexto e sétimo ensaios

O sexto e sétimos ensaios, consistiu na medição da pressão sonora duas bombas hidráulicas em simultâneo, na qual o microfone foi colocado em 2 posições diferentes, segundo a norma NP EN ISO 9612:2011.

4.2.3. Técnicas de Medição

Foi necessário implementar técnicas de medição para se poder uniformizar a realização das mesmas e o método de engenharia para o tratamento e obtenção de resultados.

4.2.3.1. Primeiro ensaio

No primeiro ensaio o microfone foi colocado no centro do laboratório, com a finalidade de analisar o som ambiente do laboratório.

4.2.3.2. Segundo e terceiro ensaios

No segundo ensaio o microfone foi colocado na parte superior (figura 4.7) bomba hidráulica do banco de ensaios de tração e compressão. No terceiro ensaio o microfone foi colocado na parte frontal (figura 4.7) da bomba hidráulica. As posições escolhidas são duas posições equidistantes onde foi possível colocar o microfone devido á geometria do local.

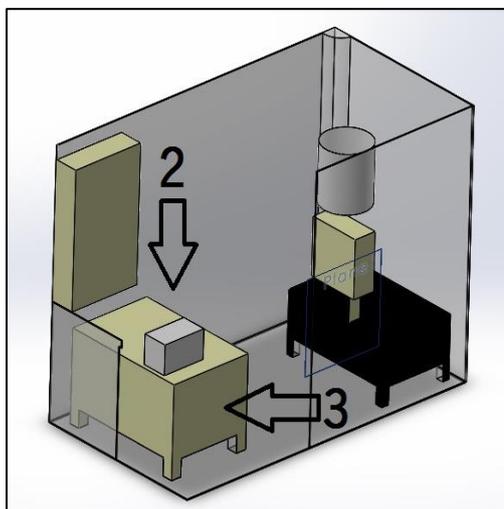


Figura 4.7 - Desenho 3D dos locais do segundo e terceiro ensaios na bomba hidráulica da mesa de testes de tração. 2 – Parte superior; 3 Parte frontal.

4.2.3.3. – Quarto e quinto ensaios

No terceiro ensaio o microfone foi colocado na parte superior (figura 4.8) da bomba hidráulica da máquina de tração Instron®. No quarto ensaio o microfone foi colocado na parte frontal (figura 4.8) da bomba hidráulica, tendo sido seguido os mesmos parâmetros do segundo e terceiro ensaios.

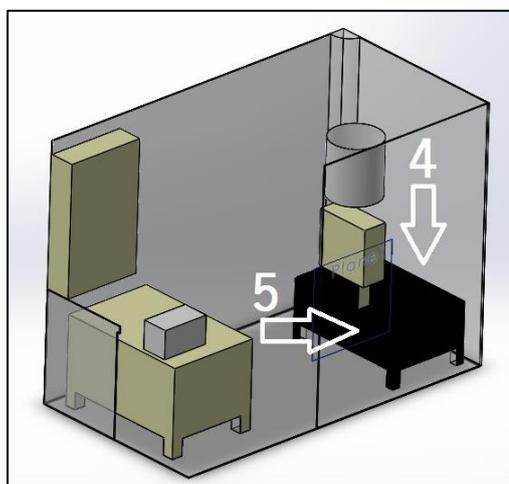


Figura 4.8 – Esquema do quarto ensaio (vista da frente) e quinto ensaio (vista de cima), na bomba hidráulica da máquina de testes Instron®. 4Parte superior; 5 – Parte frontal.

4.2.3.4. – Sexto e sétimos ensaios

No sexto ensaio o microfone foi colocado entre as duas bombas hidráulicas (figura 4.9). e no oitavo ensaio o microfone foi colocado na parte exterior do canto onde se encontram as duas bombas hidráulicas (figura 4.9).

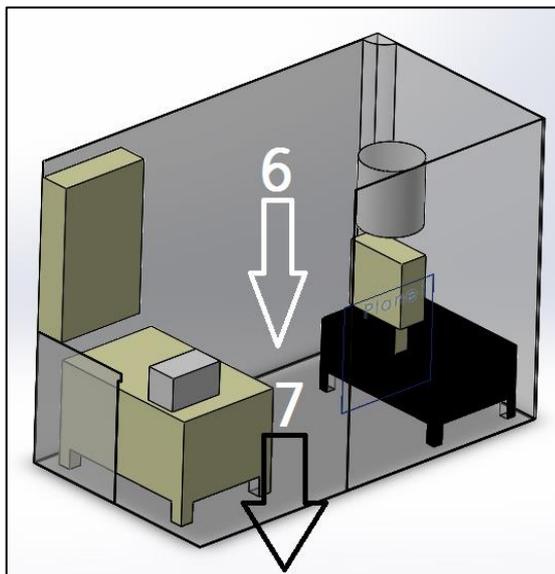


Figura 4.9 – Esquema do ensaio sonoro nas duas bombas a funcionar em simultâneo (vista de cima).
6 – Parte interior; 7 – Parte exterior.

4.3. Equipamentos Experimentais

Para a realização dos ensaios de ruído, seguiu-se o procedimento mostrado na figura 4.10.

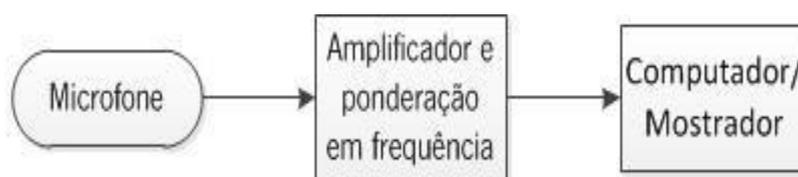


Figura 4.10 – Cadeia procedimentos de medição utilizado nos equipamentos do LEM.

4.3.1. Equipamentos de Medição e Processamento

No estudo sonoro foram utilizados equipamentos que permitem a medição da pressão sonora (sensor de pressão sonora, processador, e analisador).

Microfone

Para a conversão da pressão sonora num sinal elétrico foi utilizada um microfone cuja calibração segue a conformidade das normas ISO 9001, ISO 10012-1 e ANSI/NCSL Z540-1-

1994. O microfone é do fabrico da empresa *PCB piezotronics, Inc.* designado por *ICP® Microphone*, modelo número 130D20, ilustrado na figura 4.11. Neste microfone está incorporado um pré-amplificador integrado e consegue um alcance dinâmico até 122dB.

Este microfone transmite o sinal captado para um analisador, através do conector elétrico BNC, para posterior tratamento dos dados do *software* descrito na unidade de processamento de sinal.[19].



Figura 4.11 - Microfone do grupo ICP®, modelo número 130D20 [20].

Unidade de processamento de sinal

Os baixos níveis dos fenómenos sonoros lineares, convertidos pelo microfone, são amplificados e em seguida ponderados através da unidade de processamento de sinal *LMS SCADAS Mobile SCM01*, representado na figura 4.12 a). Esta unidade possui vários filtros de ponderação (A, B, C e D) e também permite efetuar medições sem ponderação (*no weithing*).

Na secção de análise e leitura de sinal foi utilizado o programa *LMS TestXpress*, o qual permite extrair do sinal com médias exponenciais com três constantes de tempo designadas por *Fast*, *Slow* e *Impulse*. Esta unidade possui filtros de bandas de oitava, de bandas de terços de oitava e de bandas ainda inferiores. O programa *LMS Test.Xpress* permite a perfeita combinação da capacidade de aquisição e análise, com a obtenção de testes de medição qualificados, em tempo real (figura 4.12 b))[19].

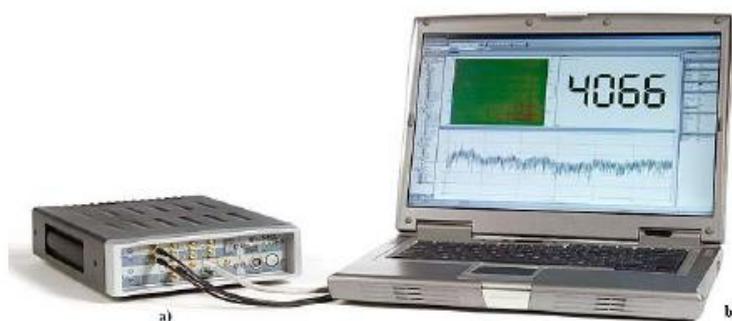


Figura 4.12 - a) Unidade de processamento “LMS SCADAS Mobile SCM01”, b) Unidade de análise e leitura de sinal “LMS Test.Xpress” [21] .

CAPÍTULO 5

Apresentação e Discussão de Resultados

5.1. Primeiro ensaio

Os resultados obtidos no primeiro ensaio, resultam do ruído ambiente que existe no LEM¹, e dos equipamentos existentes nos vários laboratórios do departamento.

5.1.1. Resultados obtidos

No gráfico da figura 5.1 estão representadas os valores da pressão sonora existente no laboratório.

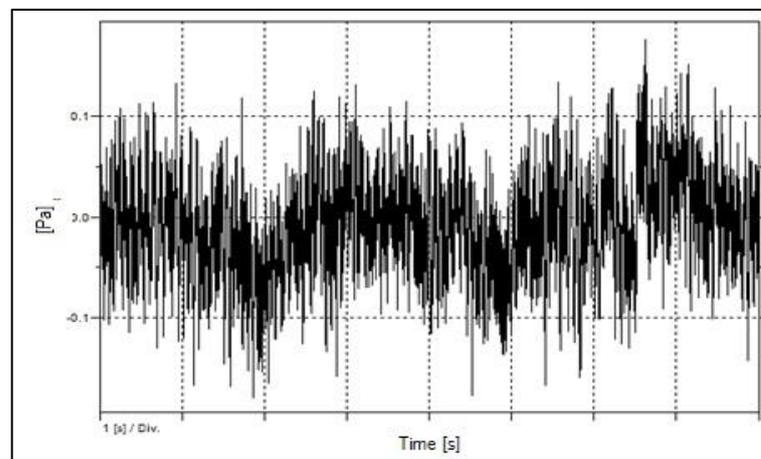


Figura 5.1 – Variação da pressão sonora no laboratório, com as bombas desligadas.

O gráfico da figura 5.1 representa a variação da pressão sonora no espaço de tempo que demora o ensaio, sendo os valores importantes dessa variação apresentadas na tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Variação da pressão sonora do primeiro ensaio.

Y-Unit	[Pa]
Valor Max.	0,177
Valor Min.	-0,179
Valor Med	-0,009
RMS	0,061

A tabela 5.1 apresenta os dados fornecidos pelo programa *LMS TextXpress*, que foi utilizado para o ensaio de medição de pressão sonora.

¹ Laboratório de Ensaio de Materiais

Para além dos valores da pressão sonora o programa apresenta os valores do nível de pressão sonora (figura 5.2) com o filtro de ponderação A (dB(A)).

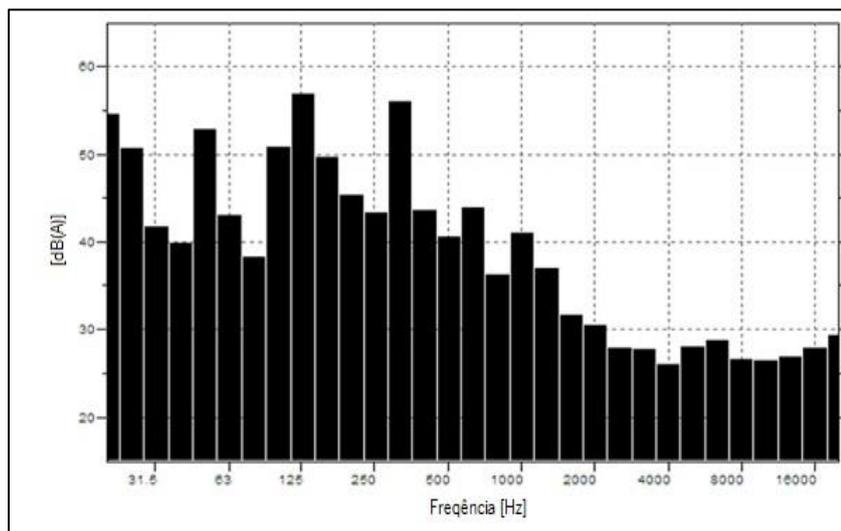


Figura 5.2 – Gráfico com os níveis de pressão sonora do primeiro ensaio, com filtro de ponderação A (dB(A)).

No gráfico da figura 5.2 podem ser visualizados a variação dos níveis de pressão sonora na banda de oitava que está dentro da frequência audível. Na tabela 5.2 são apresentadas os valores que são importantes para a determinação das consequências do ruído.

Tabela 5.2 - Valores dos níveis pressão sonora do primeiro ensaio.

Y-Unit	[dB(A)]
Valor Max.	57,029
Valor Min.	26,217
Valor Med.	47,978
RMS	62,892

No capítulo 3, foi apresentada uma tabela com os valores ISO¹ e valores OSHA², dos níveis de pressão sonora, com filtro de ponderação sonora A (dB(A)) com os respetivos tempos máximos de exposição. Na tabela 5.3 estão representadas os valores ISO e OSHA admissíveis e o valor RMS do primeiro ensaio, realçando se existe algum tipo de influência ou se existe alguma exposição ao ruído que seja prejudicial à saúde.

¹ International Standard Organization

² Occupational Safety and Health Administration

Tabela 5.3 - Comparação entre os níveis de pressão sonora admissíveis e o RMS do nível sonoro do primeiro ensaio.

Tempo de Exposição	Nível Sonoro Recomendado (dB(A))		RMS do 1º Ensaio dB(A)
	Critério OSHA	Critério ISO	
			62,89
8 horas	85	85	
4 horas	90	88	
2 horas	95	91	
1 hora	100	94	
30 minutos	105	97	
15 minutos	110	100	
7,5 minutos	115	103	

Segundo os critérios referidos na tabela acima, o Valor Eficaz (RMS) do primeiro ensaio não indica nenhum risco para o trabalhador, sendo que o valor mínimo admissível para as oito horas de trabalho é de 85 dB(A) tanto para o critério ISO¹ como para o critério OSHA² e o valor do primeiro ensaio é de 62.89 dB(A).

5.2. Segundo e terceiro ensaios

O segundo e terceiro ensaios apresentam respetivamente os resultados das medições feitas na parte superior e frontal da bomba hidráulica do banco de ensaios de tração e compressão.

5.2.1. Resultados obtidos

No gráfico da figura 5.3 estão representadas os valores das variações de pressão sonora, medidas na parte superior da bomba hidráulica da mesa de testes de tração.

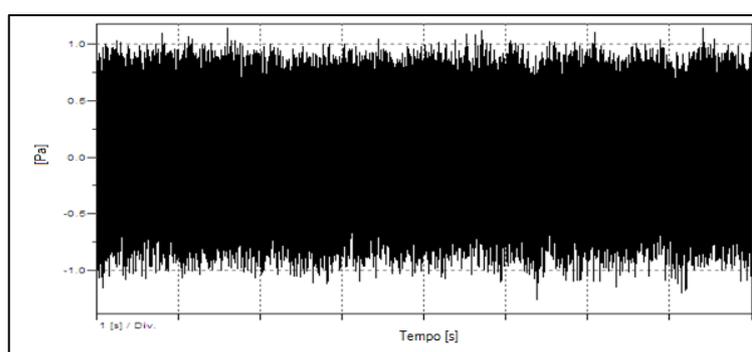


Figura 5.3 - Variação da pressão sonora no laboratório na parte superior da bomba hidráulica do banco de ensaios de tração e compressão.

No gráfico da figura 5.3 já é possível verificar que existe um maior registo de atividade em relação ao gráfico da figura 5.1, pelo que a leitura visual do gráfico por si só já indica algum tipo

¹ International Standards Organization

² Occupational Safety and Health Administration

de perigo, a nível de audição, para os utilizadores do laboratório. O gráfico da figura 5.3 representa a variação da pressão sonora no espaço de tempo que demora o segundo ensaio, sendo os valores importantes dessa variação apresentadas na tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Variação da pressão sonora do segundo ensaio.

Y-Unit	[Pa]
Valor Max.	1,151
Valor Min.	-1,263
Valor Med.	0,005
RMS	0,874

Em paralelo com as pressões sonoras, foram também obtidas neste ensaio os valores dos níveis de pressão sonora (figura 5.4).

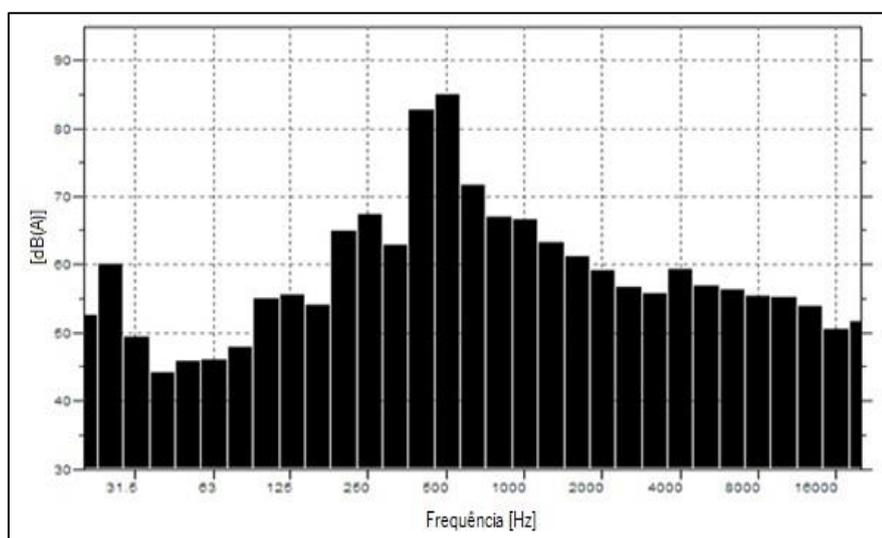


Figura 5.4 - Gráfico com os níveis de pressão sonora do segundo ensaio na bomba hidráulica do banco de ensaios de tração e compressão.

Os valores de pico e os valores médios dos níveis de pressão sonora encontram-se apresentados na tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Valores dos níveis de pressão sonora do segundo ensaio.

Y-Unit	[dB(A)]
Valor Max.	85,119
Valor Min.	44,290
Valor Med.	72,595
RMS	87,509

Para o terceiro ensaio, o ensaio frontal, foram utilizados os mesmos procedimentos do segundo ensaio, para obtenção dos resultados. Na figura 5.5 estão representados em forma de gráfico a variação das pressões sonoras ao longo do tempo de ensaio.

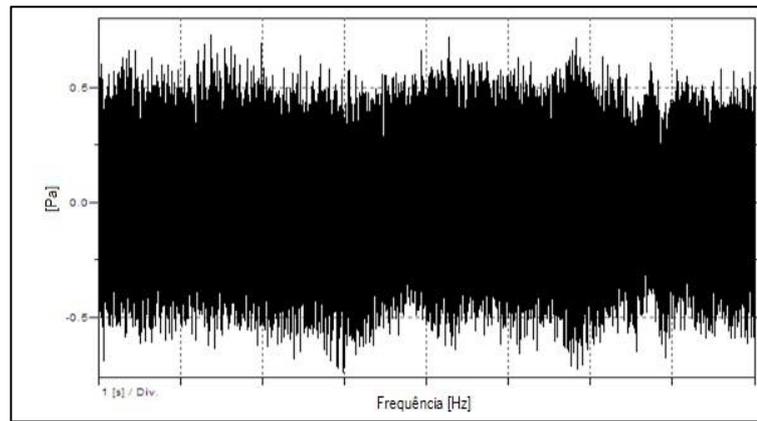


Figura 5.5 - - Variação da pressão sonora no laboratório na parte frontal da bomba hidráulica do banco de ensaios de tração e compressão.

O gráfico da figura 5.3 representa a variação da pressão sonora no espaço de tempo que demora o terceiro ensaio, sendo os valores de pico e os valores médios dessa medição apresentadas na tabela 5.5.

Tabela 5.6 - Variação da pressão sonora do terceiro ensaio.

Y-Unit	[Pa]
Max Value	0,734
Min Value	-0,742
Mean Value	-0,006
Rms Value	0,485

Na figura 5.6 está representada o gráfico com os valores da variação dos níveis de pressão sonora, do terceiro ensaio, ao longo da frequência da banda de oitava.

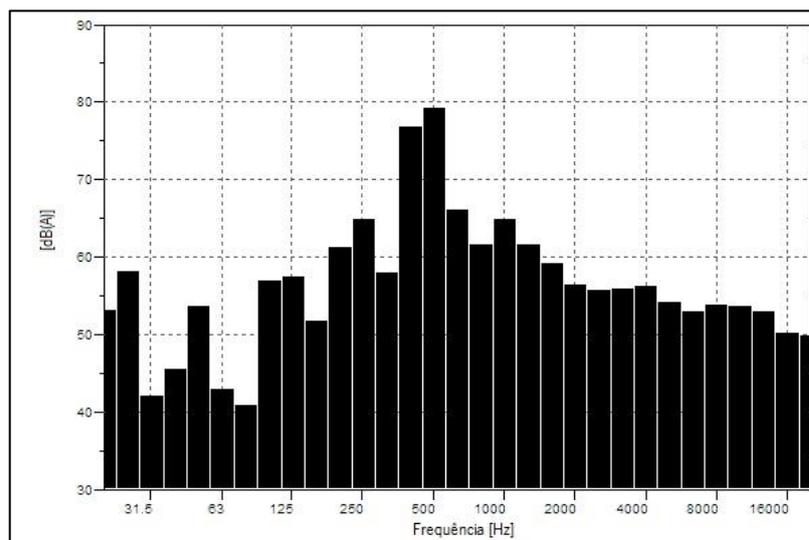


Figura 5.6 - Gráfico com os níveis de pressão sonora do terceiro ensaio na bomba hidráulica do banco de ensaios de tração e compressão.

Na tabela 5.7 encontram-se os valores dos níveis de pressão sonora médios e de picos do terceiro ensaio.

Tabela 5.7 - Valores dos níveis pressão sonora do terceiro ensaio.

Y-Unit	[dB(A)]
Max Value	79,260
Min Value	40,896
Mean Value	66,959
Rms Value	81,873

Para efeitos de comparação com os critérios existentes, que avaliam o risco de exposição ao ruído, foi calculado a média dos dois ensaios e dessa média foi elaborada um gráfico (figura 5.7), com a variação dos níveis de pressão sonora com filtro de ponderação A (dB(A)) na bomba hidráulica da mesa de testes de tração

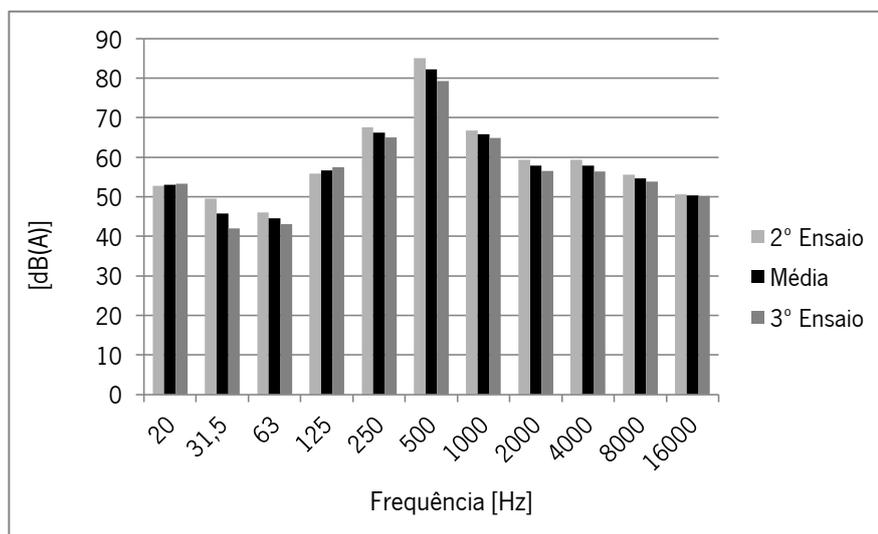


Figura 5.7 - Gráfico com a média dos níveis de pressão sonora na bomba hidráulica do banco de ensaios de tração e compressão.

O gráfico da figura 5.7 representa a medição do segundo e terceiro ensaios e a média dos dois ensaios. Os valores de pico e os valores médios da barra que representa a média das medições, encontram-se na tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Média dos valores dos níveis de pressão sonora na bomba hidráulica do banco de ensaios de tração e compressão.

Y-Unit	[dB(A)]
Valor Max.	82,189
Valor Min.	44,561
Valor Méd.	57,741
RMS	84,691

Para avaliar o impacto da exposição ao ruído da bomba hidráulica do banco de ensaios de tração e compressão é necessário fazer uma comparação (tabela 5.9) do RMS médio dos ensaios com a tabela dos valores ISO e OSHA.

Tabela 5.9 - Comparação entre os níveis de pressão sonora admissíveis e o RMS médio do níveis de pressão sonora do segundo e terceiro ensaios.

Tempo de Exposição	Nível Sonoro Recomendado (dB(A))		RMS Médio dB(A)
	Critério OSHA	Critério ISO	
8 horas	85	85	84,691
4 horas	90	88	
2 horas	95	91	
1 hora	100	94	
30 minutos	105	97	
15 minutos	110	100	
7,5 minutos	115	103	

Através da tabela 5.9 podemos concluir que o nível de exposição ao ruído emitido pela bomba hidráulica da mesa de trabalhos, encontra-se no limite do tempo de exposição de oito horas, tanto no critério ISO como no critério OSHA, não sendo aconselhável uma exposição que ultrapasse esse tempo.

5.3. Quarto e quinto ensaios

O quarto e quinto ensaios apresentam respetivamente os resultados das medições feitas na parte superior e frontal da bomba hidráulica da máquina de tração Instron®.

5.3.1. Resultados obtidos

No gráfico da figura 5.3 estão representadas os valores das variações de pressão sonora, medidas na parte superior (quarto ensaio) da Bomba Hidráulica da Mesa de Trabalhos.

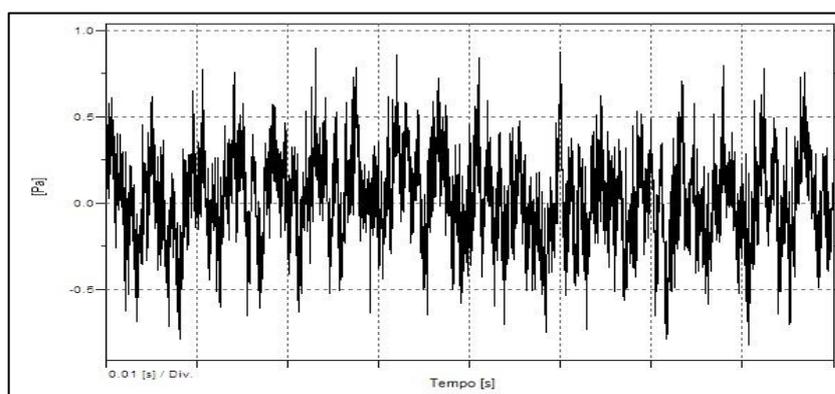


Figura 5.8 – Gráfico com os níveis de pressão sonora do quarto ensaio (parte superior) na bomba hidráulica da máquina de tração Instron®.

Através da leitura visual do gráfico da figura 5.8 pode se verificar que o espaçamento entre os picos é maior, não sendo tão compacto como nos ensaios da bomba hidráulica da mesa de trabalhos. Na tabela 5.10 encontram-se os valores médios e dos picos desse ensaio.

Tabela 5.10 - Variação da pressão sonora do quarto ensaio.

Y-Unit	[Pa]
Valor Máx.	0,903
Valor Min.	-0,820
Valor Méd.	0,022
RMS	0,285

Na figura 5.8 está representada o gráfico com os valores da variação dos níveis de pressão sonora, do quarto ensaio, segundo a banda de frequências de terço de oitava.

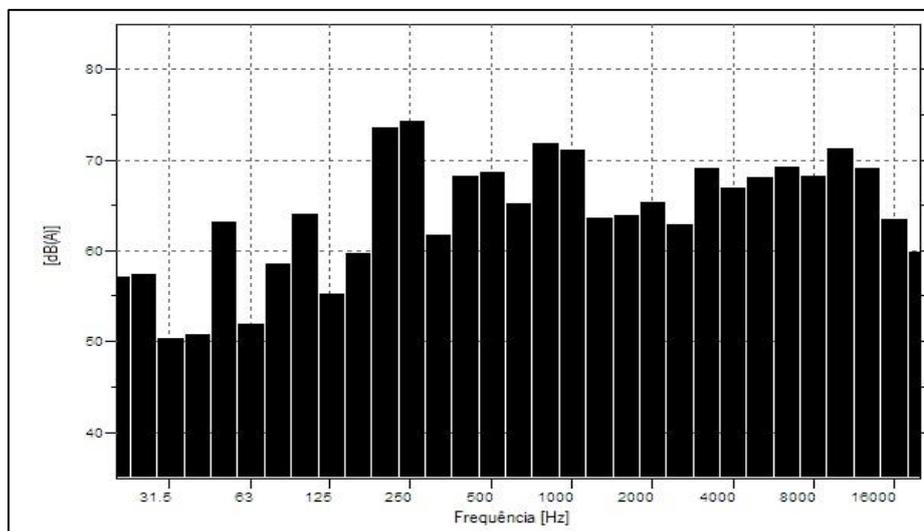


Figura 5.9 - Gráfico com os níveis de pressão sonora do quarto ensaio na bomba hidráulica da máquina de tração Instron®.

Na tabela 5.11 encontram-se os valores dos níveis de pressão sonora médios e de pico do quarto ensaio.

Tabela 5.11 - Valores dos níveis pressão sonora do quarto ensaio.

Y-Unit	[dB(A)]
Valor Máx.	74,212
Valor Min.	50,338
Valor Méd.	67,486
RMS	82,400

Para o quinto ensaio, o ensaio frontal, foram utilizados os mesmos procedimentos do quarto ensaio, para obtenção dos resultados. Na figura 5.10 estão representados em forma de gráfico a variação das pressões sonoras ao longo do tempo de ensaio.

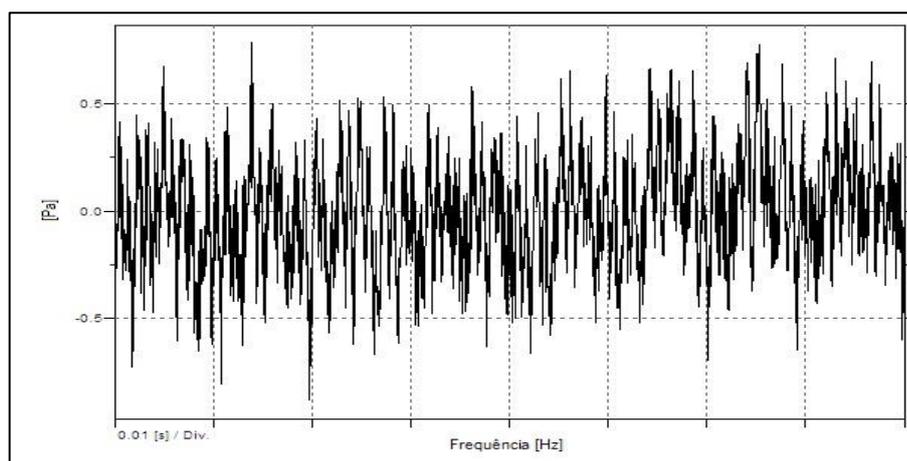


Figura 5.10 - Gráfico com os níveis de pressão sonora do quinto ensaio (parte frontal) na bomba hidráulica da máquina de tração Instron®.

Os valores médios e de pico da pressão sonora do quinto ensaio encontram-se na tabela 5.12.

Tabela 5.12 - Variação da pressão sonora do quinto ensaio.

Y-Unit	[Pa]
Valor Máx.	0,787
Valor Min.	-0,881
Valor Méd.	-0,003
RMS	0,266

Na figura 5.11 está representada o gráfico com os valores da variação dos níveis de pressão sonora, do quinto ensaio, segundo a banda de frequências de terço de oitava.

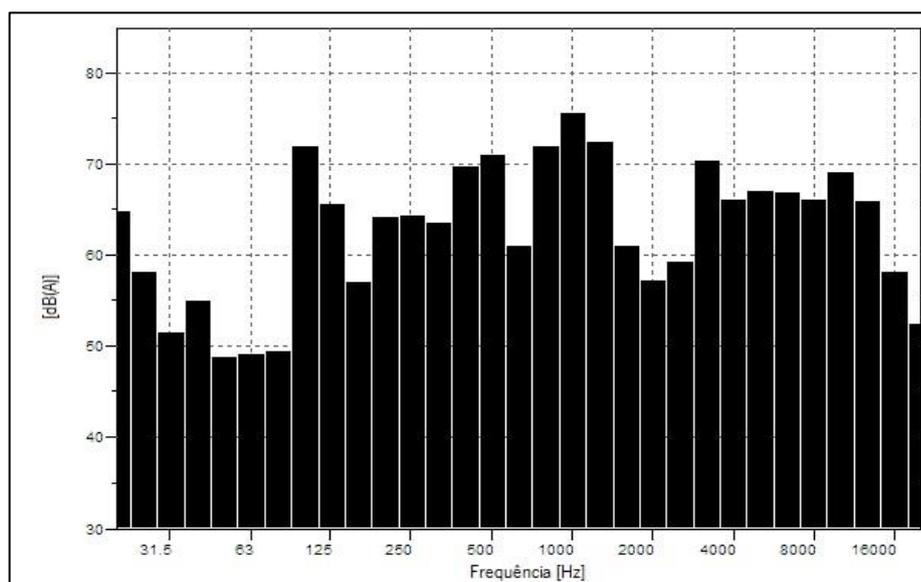


Figura 5.11 - Gráfico com os níveis de pressão sonora do quinto ensaio na bomba hidráulica da máquina de tração Instron®.

Na tabela 5.13 encontram-se os valores de picos e os valores médios do quinto ensaio.

Tabela 5.13 - Valores dos níveis pressão sonora do quinto ensaio.

Y-Unit	[dB(A)]
Valor Máx.	75,684
Valor Min.	48,848
Valor Méd.	67,444
RMS	82,358

Seguindo os mesmos procedimentos que foram efetuados para o segundo e terceiro ensaios, foi calculado a média dos dois ensaios, para se poder avaliar o risco de exposição ao ruído. No gráfico da figura 5.12 estão representados os dois ensaios e a média desses ensaios.

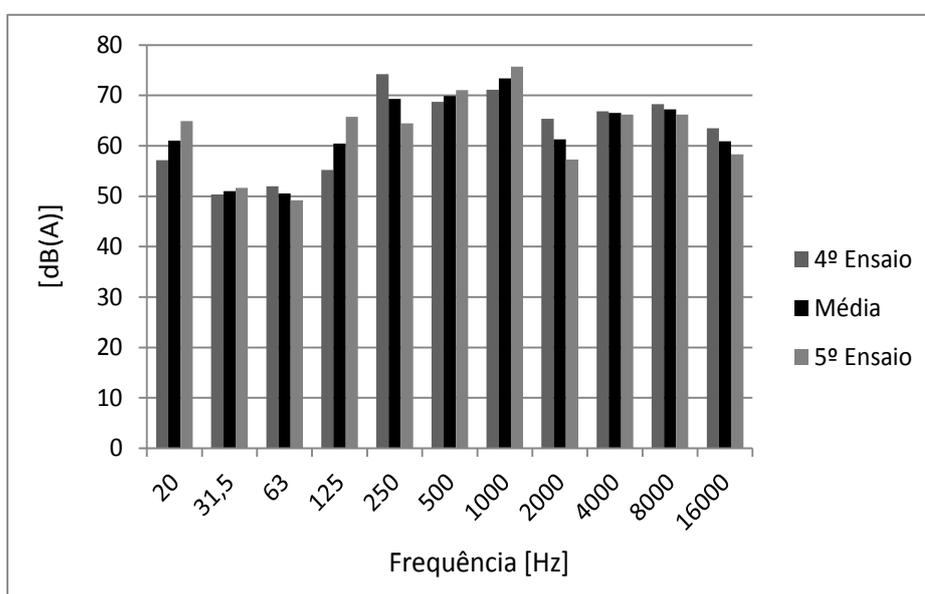


Figura 5.12 - Gráfico com a média dos níveis de pressão sonora na bomba hidráulica da máquina de tração Instron®.

Os valores de pico e os valores médios da média dos dois ensaios estão na tabela 5.14.

Tabela 5.14 – Média dos valores dos níveis de pressão sonora na bomba hidráulica da máquina de tração Instron®.

Y-Unit	[dB(A)]
Valor Máx.	74,948
Valor Min.	49,593
Valor Méd.	67,465
RMS	82,370

Para avaliar o impacto da exposição ao ruído da bomba hidráulica da máquina de tração Instron® é necessário fazer uma comparação (tabela 5.15) do RMS médio dos ensaios com a tabela dos valores ISO e OSHA.

Tabela 5.15 - Comparação entre os níveis de pressão sonora admissíveis e o RMS médio dos níveis de pressão sonora do quarto e quinto ensaios.

Tempo de Exposição	Nível Sonoro Recomendado (dB(A))		RMS Médio dB(A)
	Critério OSHA	Critério ISO	
			82,370
8 horas	85	85	
4 horas	90	88	
2 horas	95	91	
1 hora	100	94	
30 minutos	105	97	
15 minutos	110	100	
7,5 minutos	115	103	

Através da tabela 5.15 podemos concluir que o nível de exposição ao ruído emitido pela bomba hidráulica da máquina de tração Instron®, encontra-se abaixo do limite do tempo de exposição de oito horas, tanto no critério ISO como no critério OSHA, não havendo risco instantâneo para a saúde auditiva.

5.4. Sexto e sétimo ensaios

O sexto e sétimo ensaios apresentam respetivamente os resultados das medições feitas na parte interior e exterior das bombas hidráulicas.

5.4.1. Resultados obtidos

No gráfico da figura 5.13 estão representadas os valores das variações de pressão sonora, medidas na parte interior (sexto ensaio) entre as duas bombas hidráulicas.

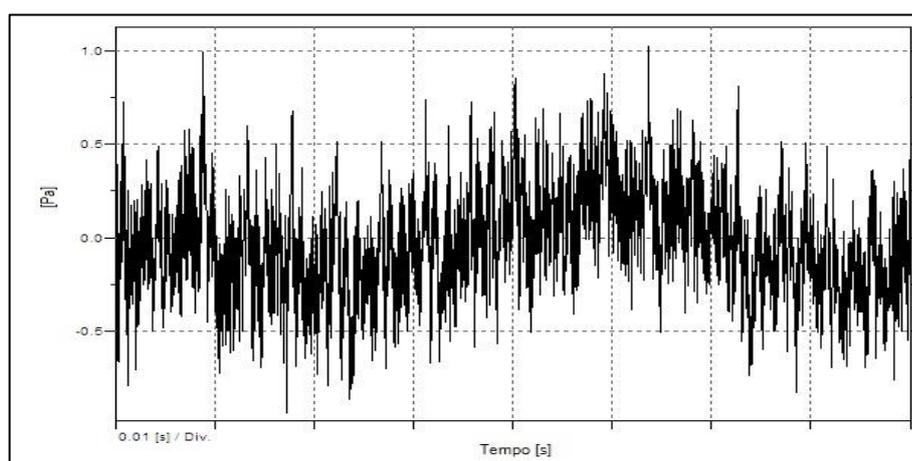


Figura 5.13 - Gráfico com os níveis de pressão sonora do sexto ensaio (parte interior) das bombas hidráulicas.

Os valores da variação da pressão sonora e os valores médios estão discriminados na tabela 5.16.

Tabela 5.16 - Variação da pressão sonora do sexto ensaio.

Y-Unit	[Pa]
Valor Máx.	1,033
Valor Min.	-0,940
Valor Med.	-0,026
RMS	0,311

Na figura 5.14 está representada o gráfico com os valores da variação dos níveis de pressão sonora, do sexto ensaio, segundo a banda de frequências de terço de oitava.

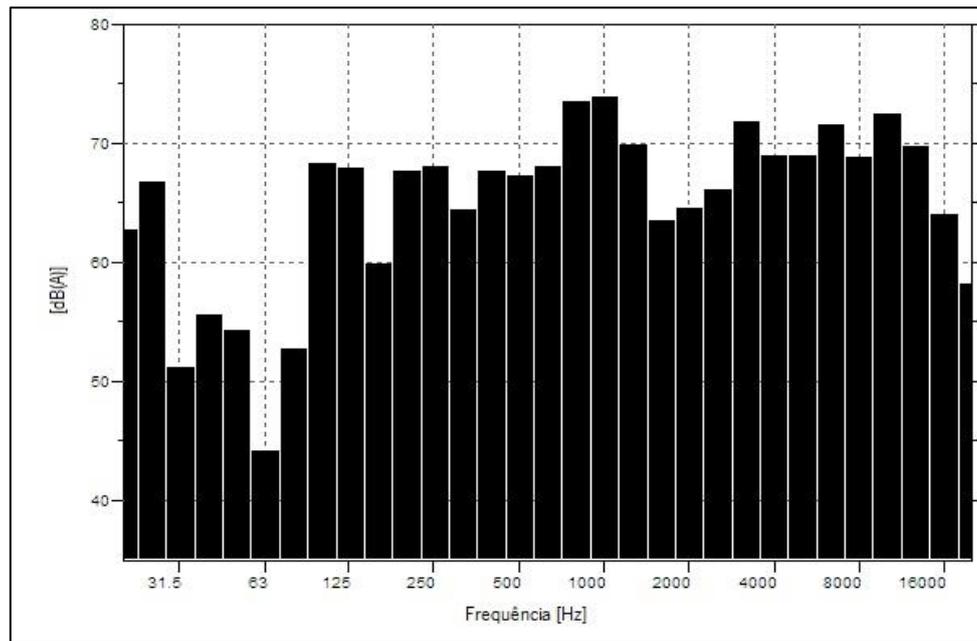


Figura 5.14 - Gráfico com os níveis de pressão sonora do sexto ensaio nas bombas hidráulicas.

Na tabela 5.17 encontram-se os valores médios e os valores extremos dos níveis de pressão sonora do sexto ensaio.

Tabela 5.17 - Valores dos níveis pressão sonora do sexto ensaio.

Y-Unit	[dB(A)]
Valor Máx.	73,885
Valor Min.	44,150
Valor Med.	68,129
RMS	83,043

Devido á geografia do local onde estão colocados as duas bombas hidráulicas, as duas medições não poderiam ser equidistantes das duas bombas, então serão feitas comparações para detetar se existe risco de exposição ao ruído. Na tabela 5.18 encontra-se a comparação entre os critérios ISO e OSHA e o RMS do sexto ensaio.

Tabela 5.18 - Comparação entre os níveis de pressão sonora admissíveis e o RMS do sexto ensaio.

Tempo de Exposição	Nível Sonoro Recomendado (dB(A))		RMS 6º Ensaio dB(A)
	Critério OSHA	Critério ISO	
			83,043
8 horas	85	85	
4 horas	90	88	
2 horas	95	91	
1 hora	100	94	
30 minutos	105	97	
15 minutos	110	100	
7,5 minutos	115	103	

Através da tabela 5.18, podemos determinar que na posição interior, ou seja entre as bombas, o ruído não constitui um risco eminente para a saúde auditiva das pessoas que frequentam o laboratório de ensaio de materiais.

No sétimo e último ensaio sonoro, o microfone foi colocado na parte exterior ao canto onde se encontram as bombas hidráulicas. No gráfico da figura 5.15 está representada a variação da pressão sonora durante o ensaio.

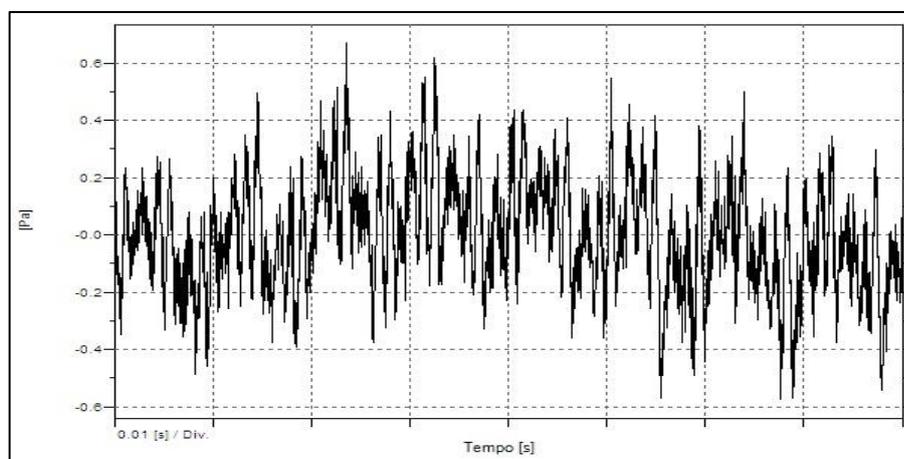


Figura 5.15 - Gráfico com os níveis de pressão sonora do sétimo ensaio (parte exterior) das bombas hidráulicas.

Os valores da variação da pressão sonora e os valores médios estão discriminados na tabela 5.19.

Tabela 5.19 - Variação da pressão sonora do sétimo ensaio.

Y-Unit	[Pa]
Valor Máx.	0,674
Valor Min.	-0,577
Valor Med.	-0,001
RMS	0,196

Para os valores dos níveis de pressão sonora do sétimo ensaio, o gráfico da figura 5.16, representa a sua variação na banda de frequências de terço de oitava.

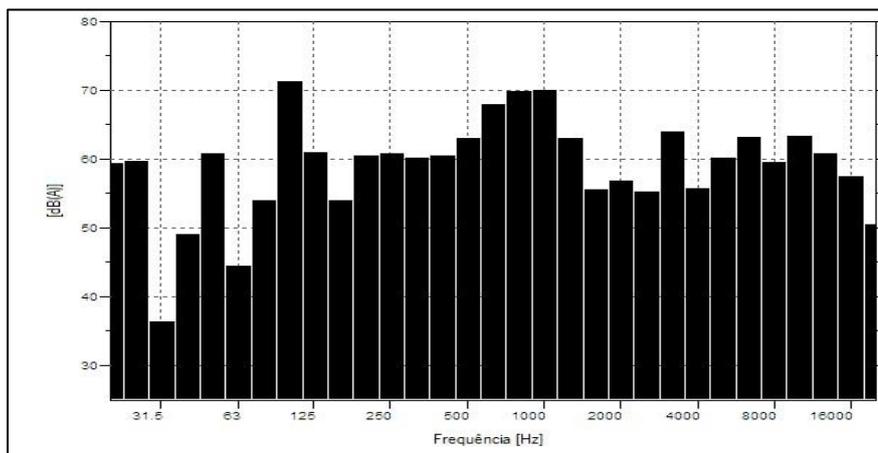


Figura 5.16 - Gráfico com os níveis de pressão sonora do sétimo ensaio nas bombas hidráulicas.

Os valores médios e os valores extremos dos níveis de pressão sonora do sétimo ensaio encontram-se na tabela 5.20.

Tabela 5.20 - Valores dos níveis pressão sonora do sétimo ensaio.

Y-Unit	[dB(A)]
Valor Máx.	71,188
Valor Min.	36,388
Valor Med.	63,174
RMS	78,088

Para avaliar os riscos de exposição ao ruído, os valores do critério ISO e OSHA e o valor do RMS do sétimo ensaio encontram-se na tabela 5.21.

Tabela 5.21 - Comparação entre os níveis de pressão sonora admissíveis e o RMS do sétimo ensaio.

Tempo de Exposição	Nível Sonoro Recomendado (dB(A))		RMS 7º Ensaio dB(A)
	Critério OSHA	Critério ISO	
			78,088
8 horas	85	85	
4 horas	90	88	
2 horas	95	91	
1 hora	100	94	
30 minutos	105	97	
15 minutos	110	100	
7,5 minutos	115	103	

O valor RMS do sétimo ensaio, demonstra que na parte exterior às bombas hidráulicas o valor não ultrapassa o recomendável pela ISO e OSHA, por isso não existe nenhum risco eminente para a saúde auditiva.

5.5. Discussão de Resultados

Os resultados dos ensaios realizados mostram que nenhum dos valores ultrapassa o limite mínimo do nível de pressão sonora para oito horas de trabalho definido pelos critérios ISO e OSHA, mas também mostram que os valores apesar de não atingir esse limite ficam perto do mínimo recomendável. São resultados que indicam que apesar de não representarem perigo para a saúde auditiva não deixam de causar incómodo num local onde se necessita de muitas vezes de concentração e de boa comunicação entre as pessoas.

CAPÍTULO 6

Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros

6.1. Conclusões

O objetivo primordial do trabalho foi o desenvolvimento da capacidade de análise e aplicação do conhecimento dos fenômenos acústicos e das representações modelares disponíveis para o seu tratamento e consequente melhoria do ambiente de trabalho.

O trabalho foi realizado por etapas, que permitem que o conhecimento do tema seja assimilado com maior facilidade.

No capítulo 1 foi introduzido os objetivos do trabalho com metas a serem alcançadas e com temas a serem abordadas. Também foi apresentado as metodologias e abordagem ao trabalho, resumindo o trabalho e apresentado os temas abordados em cada capítulo.

O capítulo do estado da arte apresenta o conceito do ruído na sua definição teórica, permitindo com que se familiarize com o tema e demonstrando que é um tema do cotidiano laboral. Para a contextualização do ruído na questão de saúde apresenta-se neste capítulo as entidades nacionais e internacionais que regulamentam este setor do trabalho. São apresentadas as técnicas de medição que serão utilizadas mais adiante na análise da unidades hidráulicas em estudo, bem como técnicas de isolamento e entrando nesse campo é fundamental que se conheça os parâmetros da absorção sonora, para que se possa decidir sobre o tipo de isolamento acústico.

Para uma análise em termos de “quantificação” da propagação sonora é abordado no capítulo 3 as grandezas e propriedades do som. Com os métodos de cálculo é possível calcular os valores traduzindo esses valores em valores que são importantes para a análise dos efeitos do ruído na saúde auditiva.

Na fase final, foi necessária a colocação em prática do conhecimento teórico da análise de dados, através das metodologias de ensaio adequadas a cada situação. Realizou-se um ensaio de medição para determinar o ruído ambiente do laboratório, sendo que neste caso as unidades hidráulicas encontravam-se desligadas e depois foram realizadas mais seis ensaios, sendo realizadas dois ensaios para bomba hidráulica da mesa de testes de tração, dois ensaios para a bomba hidráulica da máquina de tração Instron® e mais dois ensaios com as duas bombas a

funcionar em simultâneo. A decisão de se realizar dois ensaios foi no âmbito da uniformização dos ensaios com as bombas hidráulicas. Os resultados obtidos não ultrapassam os limites, mas estão á volta do limite de oito horas de trabalho definido por dois critérios, o que demonstra que apesar de não prejudicar no instante a saúde auditiva, causa uma certa incomodidade para quem trabalha no laboratório.

Numa análise global os objetivos foram alcançados com sucesso, excetuando a elaboração do projeto de condicionamento acústico, mas ficam as bases para a realização num trabalho futuro.

6.2. Propostas para Trabalhos Futuros

Como sugestão para trabalhos futuros propõe-se que sejam efetuados cálculos dos resultados que se podem obter com diferentes tipos de materiais de absorção sonora, conclusão do projeto de isolamento acústico e depois do projeto elaborado voltar a efetuar novas medições e comparar os resultados.

Bibliografia

- [1] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*. 2000.
- [2] A. S. Miguel, *Manual de HIGIENE E SEGURANÇA DO TRABALHO*. 2006.
- [3] A. S. Colim, “Higiene e Segurança no Trabalho: Ruído Ocupacional. Gestão da Atividade Industrial.” 2012.
- [4] ILO, “<http://www.ilo.org/oshenc/part-vi/noise/item/752-noise-measurement-and-exposure-evaluation>,” 2013. .
- [5] Silencio, “<http://www.silencio.pt/portfolio/detail/id/133/>,” consultado em 20 de Agosto de 2013. .
- [6] eNoiseControl, “www.enoisecontrol.com,” consultado em 20 de Agosto de 2013. .
- [7] Engenhariacivil.com, “<http://www.engenhariacivil.com/acustica-isolamento-sonoro-edificios>,” consultado em 1 de Setembro de 2013. .
- [8] M. & M. Protek, “www.mmprotek.pt,” consultado em 30 de Agosto de 2013. .
- [9] O. Domingues, *A ACÚSTICA NOS EDIFÍCIOS; MATERIAIS E SISTEMAS ABSORVENTES SONOROS*. 2005.
- [10] G. V. de C. P. Martins, “CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE MATERIAIS FONOABSORVENTES À BASE DE FILMES DE POLÍMERO MONOCOMPONENTES SOBRE LÃ MINERAL FIBRADA,” 2008.
- [11] Pronorma, “<http://www.pronorma.pt/specs/AbsorsoresSuspensos.pdf>,” consultado em 15 de Setembro de 2013. .
- [12] P. M. F. M. Arezes, “Percepção do Risco de Exposição Ocupacional ao Ruído,” 2002.
- [13] J. Meireles, “Noções de Acústica e Controlo de Ruído; Conceção e Estruturas.” p. 88, 2012.
- [14] S. M. M. Abreu, “Estudo da influência da proteção auditiva na percepção de sinais de alerta na presença de ruído de fundo,” 2012.
- [15] Audiolist, “<http://audiolist.org/forum/kb.php?mode=article&k=34>,” consultado em 20 de Outubro de 2013. .
- [16] MundoEducação, “www.mundoeducacao.com,” consultado em 20 de Setembro de 2013. .
- [17] J. Patrício, “ISOLAMENTO SONORO A SONS AÉREOS E DE PERCUSSÃO; METODOLOGIAS DE CARACTERIZAÇÃO,” 1999.
- [18] J. Patrício, *ASPECTOS REGULAMENTARES E NORMATIVOS NO DOMÍNIO DO RUÍDO E DAS VIBRAÇÕES*. 2000.
- [19] L. G. de P. Afonso, “Estudo do Comportamento Físico-Mecânico de Pisos Flutuantes,” 2010.
- [20] P. Piezotronics, “www.pcb.com,” consultado em 30 de Setembro de 2013. .
- [21] LMS, “www.lmsintl.com,” consultado em 30 de Setembro 2013. .

ANEXOS

Anexo A

Resultado dos níveis de pressão sonora dos ensaios

Nível de pressão sonora do 1º ensaio, na gama de frequência audível

X	Y
[Hz]	[dB(A)]
20	54,6494220
25	50,8051340
31,5	41,8535540
40	39,9675220
50	53,0249480
63	43,1328130
80	38,4628870
100	50,9726370
125	57,0289760
160	49,7860340
200	45,5039750
250	43,4049150
315	56,0930250
400	43,6737250
500	40,6574290
630	44,0654600
800	36,4064060
1000	41,1095620
1250	37,1594890
1600	31,8264920
2000	30,5876580
2500	28,0845950
3150	27,9308470
4000	26,2168500
5000	28,1771770
6300	28,8193050
8000	26,7305450
10000	26,6220170
12500	27,0609890
16000	28,0473020
20000	29,4155430

Nível de pressão sonora do 2º ensaio, na gama de frequência audível

X	Y
[Hz]	[dB(A)]
20	52,7045250
25	60,2227330
31,5	49,5478520
40	44,2903670
50	45,9657590
63	46,0914000
80	48,0894620
100	55,2068180
125	55,8210140
160	54,3159710
200	65,0784150
250	67,5187680
315	63,0401500
400	82,8273540
500	85,1189350
630	71,7714310
800	67,1592860
1000	66,7808070
1250	63,3778230
1600	61,3389130
2000	59,3712430
2500	56,8995930
3150	55,8875960
4000	59,4102860
5000	57,1218260
6300	56,5292660
8000	55,5566330
10000	55,4324870
12500	54,0617680
16000	50,6104320
20000	51,8015330

Nível de pressão sonora do 3º ensaio, na gama de frequência audível

X	Y
[Hz]	[Pa]
20	53,2426910
25	58,1160850
31,5	42,0697480
40	45,5271000
50	53,7143520
63	43,0313530
80	40,8964770
100	56,9262620
125	57,4994540
160	51,7384410
200	61,3822560
250	64,9663240
315	57,9909060
400	76,8318180
500	79,2597660
630	66,0648190
800	61,6699980
1000	64,8444060
1250	61,6233980
1600	59,2162780
2000	56,4961400
2500	55,7536740
3150	56,0053100
4000	56,3575630
5000	54,2209400
6300	53,0291790
8000	53,8082730
10000	53,6588860
12500	53,0003010
16000	50,1924360
20000	49,8886760

Nível de pressão sonora do 4º ensaio, na gama de frequência audível

X	Y
[Hz]	[dB(A)]
20	57,1313740
25	57,3812030
31,5	50,3375510
40	50,7810100
50	63,1159900
63	51,9617770
80	58,5262340
100	64,1184390
125	55,1895940
160	59,7390140
200	73,5622630
250	74,2123340
315	61,7451630
400	68,1750560
500	68,7085650
630	65,2210010
800	71,8782650
1000	71,1246340
1250	63,6381300
1600	63,9286540
2000	65,3433690
2500	62,9623410
3150	69,0432130
4000	66,8652950
5000	68,1527860
6300	69,2617950
8000	68,2417830
10000	71,2700420
12500	69,1135480
16000	63,4520950

Nível de pressão sonora do 5º ensaio, na gama de frequência audível

X	Y
[Hz]	[dB(A)]
20	64,8909760
25	58,3117330
31,5	51,6405560
40	55,1394540
50	48,8476330
63	49,2027930
80	49,5087700
100	72,0423360
125	65,7631230
160	57,0627670
200	64,2217410
250	64,4507600
315	63,6016240
400	69,8811570
500	71,0255890
630	61,1024440
800	71,9963990
1000	75,6838990
1250	72,4741520
1600	61,1127890
2000	57,2467380
2500	59,3185650
3150	70,4683000
4000	66,1794820
5000	67,1468580
6300	66,9241330
8000	66,1953810
10000	69,1679310
12500	66,0702510
16000	58,3041040

Nível de pressão sonora do 6º ensaio, na gama de frequência audível

X	Y
[Hz]	[dB(A)]
20	62,7659150
25	66,7666470
31,5	51,2214550
40	55,5715030
50	54,3297040
63	44,1498870
80	52,7242740
100	68,3286440
125	67,8482820
160	59,7900540
200	67,6813050
250	68,0489810
315	64,3860240
400	67,6248780
500	67,2838590
630	68,0405580
800	73,4833830
1000	73,8846050
1250	69,8658520
1600	63,4209060
2000	64,4620670
2500	66,0193940
3150	71,7319640
4000	68,8795470
5000	68,9593200
6300	71,5056000
8000	68,8200150
10000	72,3699340
12500	69,7380370
16000	64,0096440
20000	58,1433560

Nível de pressão sonora do 7º ensaio, na gama de frequência audível

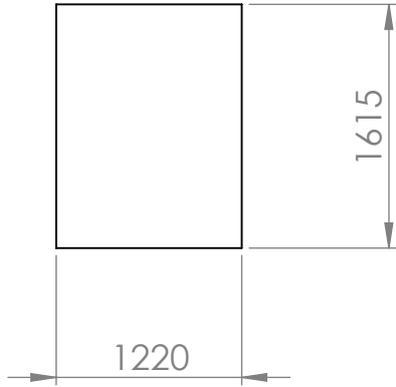
X	Y
[Hz]	[dB(A)]
20	59,3357120
25	59,6481820
31,5	36,3883250
40	49,0540120
50	60,8459210
63	44,3971020
80	53,9710850
100	71,1882250
125	60,9201050
160	54,0423360
200	60,4073100
250	60,8588940
315	60,2071270
400	60,4491350
500	63,0459750
630	67,8998870
800	69,8526760
1000	70,0034870
1250	63,0411990
1600	55,6258050
2000	56,8112830
2500	55,2508470
3150	64,0138550
4000	55,6540830
5000	60,0800700
6300	63,1387600
8000	59,4731250
10000	63,3357320
12500	60,7687030
16000	57,4100800
20000	50,4715270

Anexo B

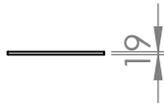
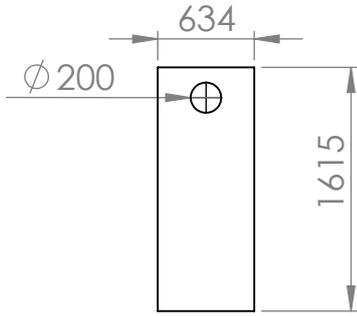
Projeto da cabina de isolamento acústico

Tabela de custo de materiais existentes no mercado para execução de uma cabina de isolamento

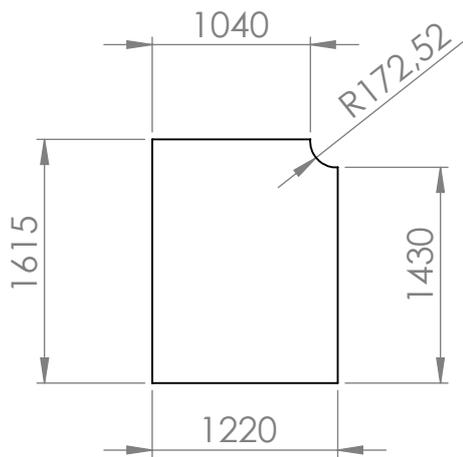
Material	Dimensões	Qt	Custo Unitário	Custo Total
Cantoneira	35,5x35,5x1,5mm, 2m	10	10,25 €	102,50 €
Barra Metálica	35x26mm, 2m	2	18,95 €	37,90 €
10 Parafusos de ligação com porca	D6xL25mm	1	1,85 €	1,85 €
26 anilhas	D6xL25mm	1	2,00 €	2,00 €
Porta	200x75x3,5cm			28,95 €
Sistema fecho porta		1	20,45 €	20,45 €
Veda porta rolo duplo		1	12,50 €	12,50 €
Dobradiça		3	1,25 €	3,75 €
Painel aglomerado	122x244x19mm	4	23,60 €	94,40 €
Buchas		1	10,00 €	10,00 €
Interruptor		1	3,95 €	3,95 €
Tomada		1	1,80 €	1,80 €
Tubo de saída de ar		1	4,45 €	4,45 €
				324,50 €



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHK'D						Paine Aglomerado de Madeira com G			
APPV'D									
MFG						MATERIAL:		DWG NO. 2100	
Q.A						WEIGHT:		SCALE:1:50	
								SHEET 1 OF 1	
								A4	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
CHK'D						Painel de Madeira Aglomerada			
APPV'D									
MFG						MATERIAL:		DWG NO. 2150	
Q.A								A4	
						WEIGHT:		SCALE:1:50	
								SHEET 1 OF 1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A				MATERIAL:	
				WEIGHT:	

TITLE:

Painel de Madeira Aglomerada

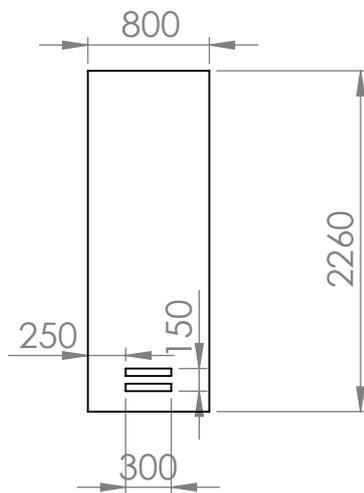
DWG NO.

2200

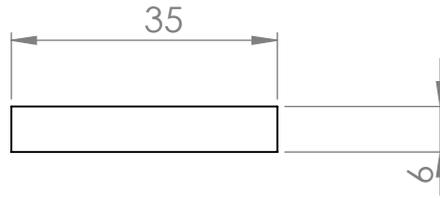
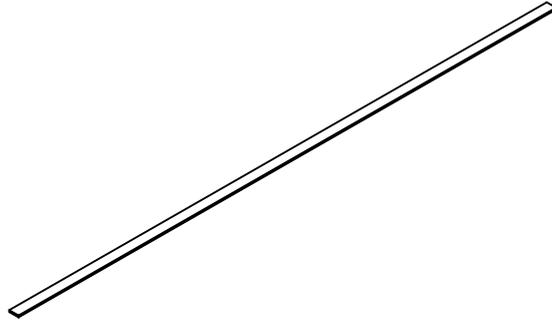
A4

SCALE:1:50

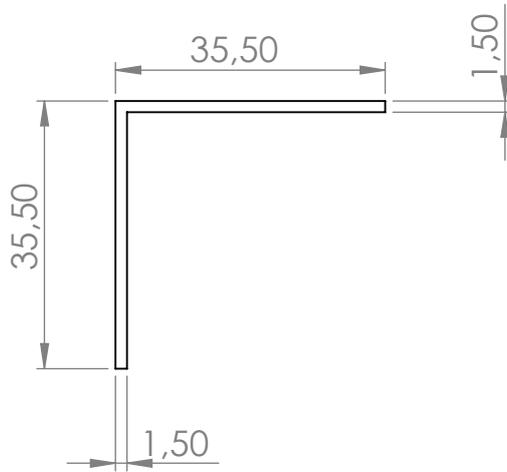
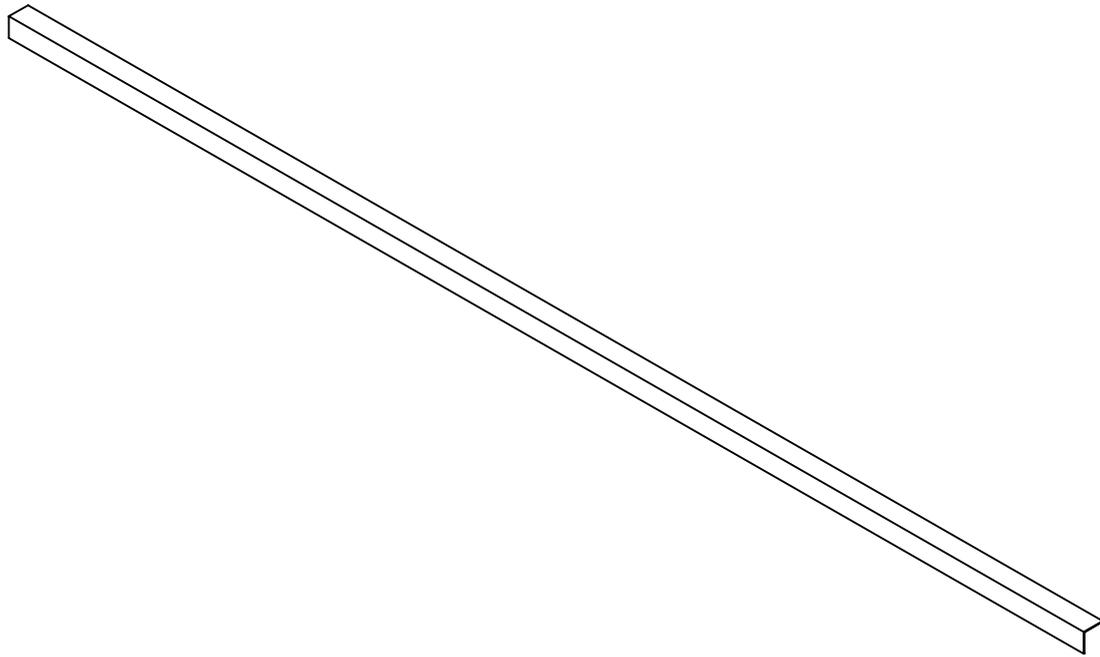
SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE: Painel de Madeira Aglomerada			
CHK'D						DWG NO.		2250	
APPV'D						SCALE:1:50		SHEET 1 OF 1	
MFG						WEIGHT:			
Q.A						MATERIAL:		A4	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
DRAWN						DWG NO. Barra Metálica			
CHK'D									
APPV'D									
MFG									
Q.A				MATERIAL:		A4			
				WEIGHT:		SCALE:1:1		SHEET 1 OF 1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

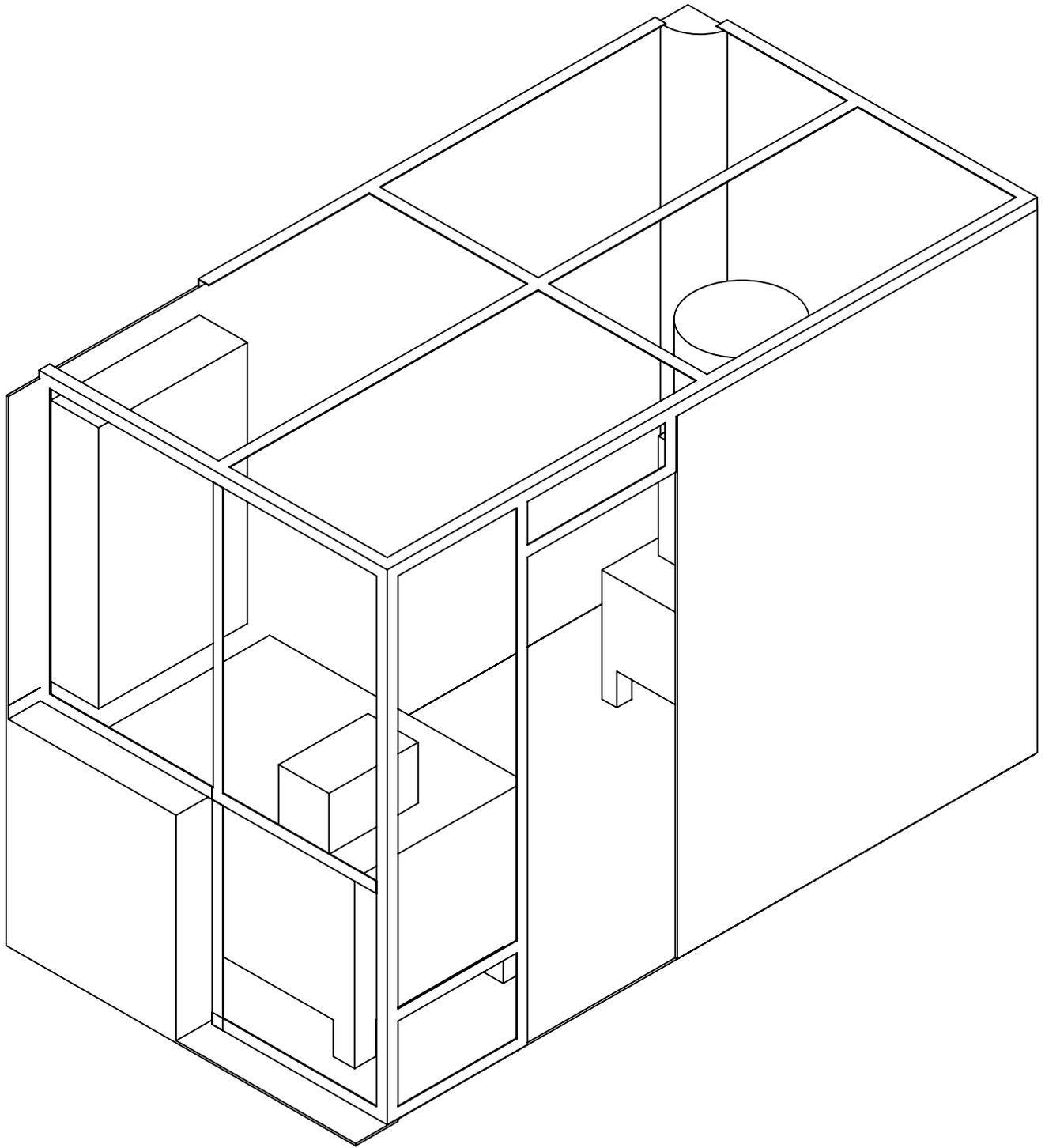
DEBUR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A				MATERIAL:	
				WEIGHT:	

TITLE:	<h1>Cantoneira</h1>	
DWG NO.		
SCALE:1:1	SHEET 1 OF 1	A4



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A				MATERIAL:	
				WEIGHT:	

TITLE:

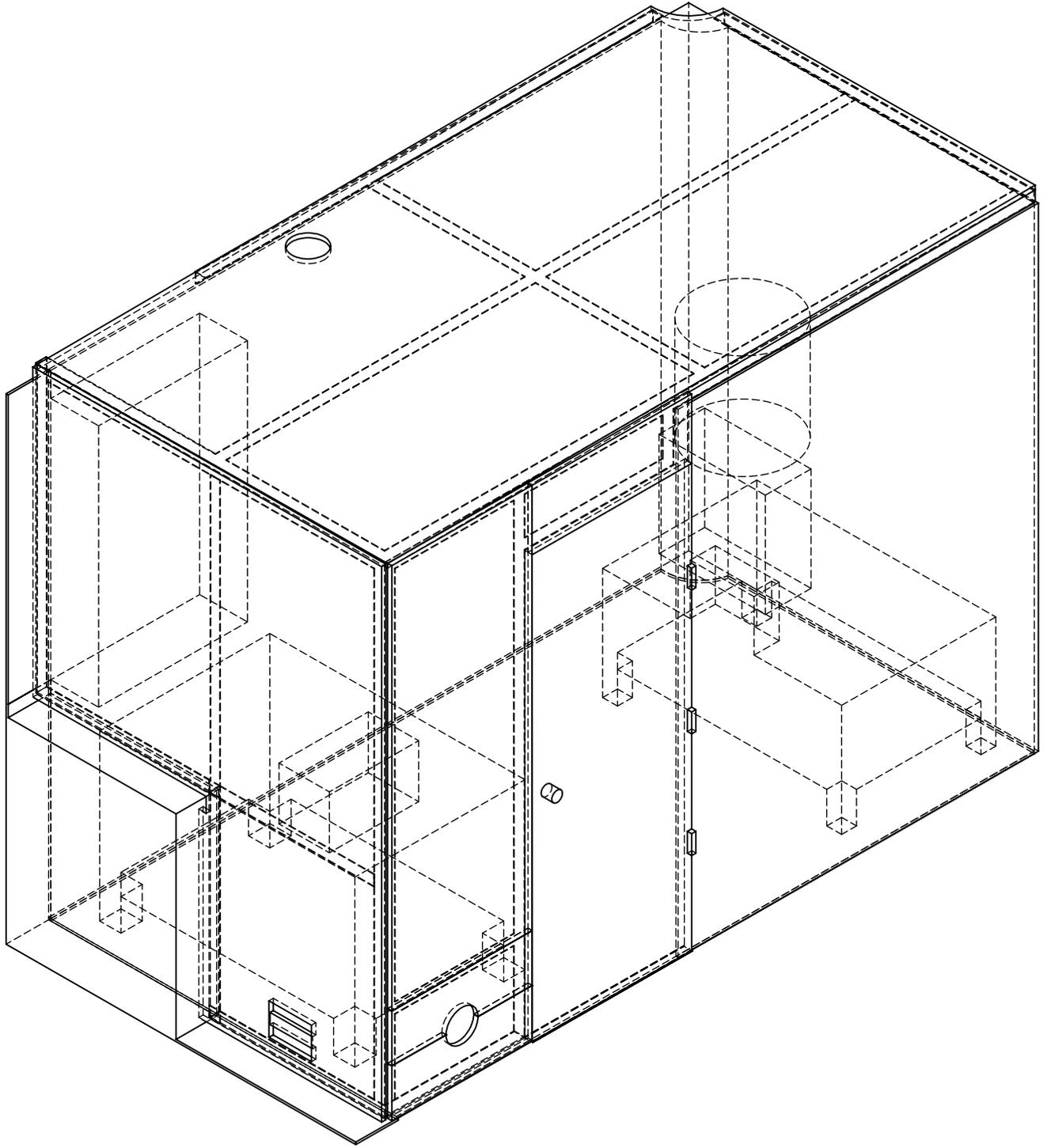
Estrutura Metálica Montada

DWG NO.

A4

SCALE:1:100

SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

FINISH:

DEBUR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A				MATERIAL:	
				WEIGHT:	

TITLE:

Estrutura metálica e isolamento montado

DWG NO.

A4

SCALE:1:100

SHEET 1 OF 1