



Análise do Desempenho Acústico de Elementos Construtivos na Reabilitação de Edifícios

SONIA CARINA MATOS ABREU

Outubro de 2014



“Análise do Desempenho Acústico de Elementos Construtivos na Reabilitação de Edifícios”

Sónia Carina Matos Abreu

Outubro 2014

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil –

Ramo Construções

Aos meus Pais

À minha Avó

"Deus quer, o Homem sonha e a Obra nasce."

Fernando Pessoa

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação é a conclusão de um sonho, por isso tenho de agradecer aos meus pais a oportunidade que me deram de o poder alcançar e por sempre me terem proporcionado tudo o necessário para lá chegar. Além dos meus pais, tenho de agradecer aos meus irmãos por toda a paciência e incentivo que sempre me deram. E a ti avó que sempre olhaste por mim e sei que continuas olhar.

O percurso académico não é feito só de estudo, mas também é de gargalhadas, palhaçadas, alegrias, tristezas, derrotas, conquistas, vitórias, festas e por isso não poderia deixar de agradecer aos meus amigos e colegas que me acompanharam ao longo destes 6 anos e que comigo compartilharam todos os momentos vividos e todo o espírito de entreaajuda.

Em especial queria agradecer à minha amiga Márcia por ter estado lá desde o início, por ter tido paciência, a palavra certa em momentos menos vitoriosos, por ser um pilar fulcral no qual se tornou, por ser a voz de chamar à razão, por apoiar, acompanhar e sobretudo acreditar que sou capaz.

A ti Daniela porque mesmo ausente, te fazes sempre presente.

A todos os professores que me transmitiram conhecimento, que me fizeram gostar ainda mais daquilo que sempre quis e sonhei ser.

E sobretudo agradeço à minha orientadora Professora Adjunta, a Engenheira Teresa Neto que sempre se mostrou disponível, paciente e que sempre teve uma opinião construtiva, elucidativa para elaboração desta dissertação.

Um muito obrigado a todos, até mesmo aqueles que achavam que eu não era capaz.

RESUMO

Ao longo desta dissertação é apresentada a legislação em vigor em Portugal relacionada com a acústica de edifícios, bem como as normas europeias existentes.

Como caso de estudo optou-se por analisar um edifício recuperado no âmbito do programa de reabilitação urbana do Porto, incidindo o estudo experimental na realização de ensaios acústicos, avaliando e validando através dos mesmos as soluções construtivas preconizadas no projeto de execução do edifício. Assim, para cada uma das soluções construtivas, realizaram-se estimativas de acordo com diferentes métodos preconizados nas normas e na bibliografia da especialidade.

Efetou-se também a avaliação acústica do edifício através do método prescrito pelo Laboratório de Engenharia Civil (LNEC), a qual reverteu numa classificação de acordo com os parâmetros considerados, a qual é apresentada no presente trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: Acústica, Ensaios, RRAE, RGR, Reabilitação

ABSTRACT

This dissertation lays on the study of acoustics in buildings related legislation currently in force in Portugal, as well as existing European standards.

As a case study we chose to analyze a restored building inserted in the Oporto rehabilitation program, focusing the experimental study on the conduction of noise tests, evaluating and validating the constructive solutions adopted in the design of the building.

As a method of verifying the results of the tests performed, calculated estimates were made according to different standards and methods recommended in the specialty literature.

An acoustic assessment of the building by the method prescribed by the National Civil Engineering Laboratory (LNEC) reverted in a classification, according to the parameters considered, and that is presented in this paper.

Keywords: Acoustics, Experiments, RRAE, RGR, Rehabilitation.

Índice Geral

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2.	OBJETIVOS E JUSTIFICAÇÃO.....	2
1.3.	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	3
2.	LEGISLAÇÃO E NORMALIZAÇÃO ACÚSTICA.....	4
2.1.	EXIGÊNCIAS REGULAMENTARES.....	7
2.1.1.	REGULAMENTO GERAL DO RUÍDO.....	7
2.1.2.	REGULAMENTO DE REQUISITOS ACÚSTICOS DOS EDIFÍCIOS.....	10
2.2.	NORMAS A UTILIZAR EM ACÚSTICA DE EDIFÍCIOS.....	14
3.	ISOLAMENTO SONORO.....	16
3.1.	NOÇÕES GERAIS.....	16
3.2.	ISOLAMENTO SONORO A SONS AÉREOS.....	21
3.2.1.	MÉTODOS DE ESTIMATIVA.....	21
3.2.1.1	ELEMENTOS SIMPLES.....	22
3.2.1.2	ELEMENTOS DUPLOS.....	28
3.2.1.3	MODELOS DE CÁLCULO EXPERIMENTAIS.....	30
3.2.1.4	PAREDES EXTERIORES.....	40
3.2.2.	ENSAIO ACÚSTICO.....	43
3.3.	ISOLAMENTO SONORO A SONS DE PERCUSSÃO.....	50
3.3.1.	MÉTODOS DE CÁLCULO.....	50
3.3.2.	ENSAIO ACÚSTICO.....	53
3.4.	TEMPO DE REVERBERAÇÃO.....	56
4.	METODOLOGIA DO LNEC PARA A AVALIAÇÃO ACÚSTICA DOS EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO.....	58
5.	ESTUDO DE CASO.....	68
5.1.	DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO.....	68

5.2. DESCRIÇÃO DAS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS	75
5.3. ESTIMATIVA DO ISOLAMENTO SONORO A SONS AÉREOS	81
5.4. ESTIMATIVA DO ISOLAMENTO SONORO A SONS DE PERCUSSÃO	89
5.5. ENSAIOS ACÚSTICOS	91
5.5.1. EQUIPAMENTO UTILIZADO.....	92
5.5.2. ISOLAMENTO SONORO A SONS DE CONDUÇÃO AÉREA	94
5.5.2.1. ISOLAMENTO ENTRE CAIXA DE ESCADAS E A HABITAÇÃO DO PISO 1.....	95
5.5.2.2. ENTRE HABITAÇÃO DO PISO 2 E DO PISO 1	106
5.5.3. ISOLAMENTO SONORO A SONS DE PERCUSSÃO.....	116
5.5.3.1. ENTRE O COMÉRCIO E A HABITAÇÃO DO PISO 1.....	117
5.5.3.2. ENTRE HABITAÇÃO DO PISO 2 E DO PISO1	123
5.5.4. TEMPO DE REVERBERAÇÃO.....	129
5.6. ANÁLISE COMPARATIVA.....	132
5.7. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DO LNEC AO EDIFÍCIO DE ESTUDO	133
6. CONCLUSÕES	138
6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	138
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	139
7. BIBLIOGRAFIA	140

Índice Figuras

Figura 2.1 - Evolução da legislação acústica em Portugal.....	6
Figura 3.1 - Movimento das moléculas de uma onda sonora.....	16
Figura 3.2 – Níveis de pressão sonora.....	18
Figura 3.3 – Ilustração de Ruído.....	19
Figura 3.4 – Esquema do processo de transmissão.....	22
Figura 3.5 - Comportamento típico dos elementos simples.....	23
Figura 3.6 - Gráfico de estimação do índice de redução sonora.....	27
Figura 3.7 - Evolução do isolamento sonoro a sons aéreos para elementos duplos.....	29
Figura 3.8 – Método gráfico para elementos simples.....	31
Figura 3.9 - Diferentes tipos de caminhos de transmissões marginais existentes.....	32
Figura 3.10 – Esquema de uma junção rígida em T.....	33
Figura 3.11 – Esquema de uma junção rígida em X.....	34
Figura 3.12 – Gráfico de Sharp para elementos duplos.....	36
Figura 3.13 – Método gráfico para o cálculo de acréscimo do índice de redução sonora [Silva,1978].....	39
Figura 3.14 - Tabela para a determinação do efeito de forma da fachada.....	42
Figura 3.15 - Máquina de Percussão Kjaer&Bruel.....	54
Figura 5.1 – Localização da Operação F.....	68
Figura 5.2 – Planta do piso 0.....	70
Figura 5.3 – Planta Piso 1.....	70
Figura 5.4 – Planta Piso 2.....	71
Figura 5.5 – Planta Piso 3.....	71

Figura 5.6 – Planta do piso 4	72
Figura 5.7 – Planta da cobertura	72
Figura 5.8 – Extrato da planta de condicionantes integrada no PDM da câmara do Porto ..	74
Figura 5.9 - Vista Ampliada da localização do edifício	74
Figura 5.10 – Pormenor da Parede exterior.....	75
Figura 5.11 – Vista exterior do edifício.....	76
Figura 5.12 – Pormenor da parede de meiação.....	76
Figura 5.13 – Pormenor da parede divisória.....	76
Figura 5.14 – Pormenor da parede interior de separação entre a caixa de escadas e a habitação	77
Figura 5.15 – Pormenor da laje de um piso intermédio	78
Figura 5.16 – Pormenor da laje de piso entre a habitação e o comércio.....	78
Figura 5.17 – Pormenor da laje do piso térreo do comércio	79
Figura 5.18 – Pormenor da laje da cobertura com um espaço não aquecido	79
Figura 5.19 – Pormenor da ligação da fachada com a cobertura.....	80
Figura 5.20 - Vista real interior da caixilharia.....	80
Figura 5.21 - Pormenor das caixilharias	80
Figura 5.22 – Vista real da porta de acesso à habitação do 1º Piso	81
Figura 5.23 - Conjunto sonómetro e tripé.....	93
Figura 5.24 - Máquina de percussão (Martelos).....	93
Figura 5.25 - Fonte sonora utilizada nos ensaios	94
Figura 5.26 - Esquema de medição	98
Figura 5.27 - Esquema de medição.....	110
Figura 5.28 - Esquema de medição	120

Figura 5.29 – Esquema de medição127

Índice Quadros

Quadro 1 – Requisito acústico para o índice de isolamento acústico a sons de condução aérea padronizado entre o exterior e quartos ou zonas de estar dos fogos	12
Quadro 2 - Requisito acústico para o índice de isolamento acústico a sons de condução aérea entre compartimentos de um fogo e zonas de estar de outro.....	12
Quadro 3 – Requisito acústico para o índice do isolamento a sons de percussão	13
Quadro 4 – Exigências Acústicas a nível do ruído particular de equipamentos coletivos do edifício	13
Quadro 5 – Exigências complementar do nível de potência sonora	13
Quadro 6 – Exigência complementar para a velocidade de circulação do ar nas condutas	14
Quadro 7 – Valores de f_c , η , ν e c_1 para alguns materiais	26
Quadro 8 – Valores do R_w obtidos em laboratório	41
Quadro 9 - Distância mínimas preconizadas na NP EN ISO 140-4	44
Quadro 10 – Fator de correção devido à transmissão marginal K_{TM} (dB).....	51
Quadro 11 – Valores do método do Invariante [Silva, 1978]	52
Quadro 12 – Redução sonora de revestimentos de piso resilientes	52
Quadro 13 – Redução sonora de revestimentos de piso flutuantes	53
Quadro 14 - Distância mínimas preconizadas na NP EN ISO 140-7	54
Quadro 15 – Classificação dos diferentes níveis de acústica (NAA)	59
Quadro 16 – Elementos de avaliação para a Vizinhança.....	60
Quadro 17 – Elementos de avaliação para o edifício	61
Quadro 18 – Coeficientes de ponderação d nível físico habitação.....	67
Quadro 19 – Valores limite de exposição	75
Quadro 20 – Característica da Parede exterior.....	82

Quadro 21 – Índice de redução sonora pelos diferentes métodos de cálculo	83
Quadro 22 – Verificação acústica para a parede exterior	83
Quadro 23 – Características da parede de meação.....	84
Quadro 24 – Cálculo do índice de redução acústica da parede de meação	84
Quadro 25 – Verificação acústica para a parede de meação.....	85
Quadro 26 – Características da parede de separação	85
Quadro 27 – Cálculo do índice de redução sonora para parede entre caixa de escadas e a habitação	86
Quadro 28 - índice de redução sonora do conjunto porta/parede.....	86
Quadro 29 - Verificação acústica para a parede entre caixa de escadas e habitação	86
Quadro 30 – características da laje de piso intermédio	87
Quadro 31 - Cálculo do índice de redução sonora da laje de piso intermédio.....	88
Quadro 32 – Verificação acústica para a laje de piso intermédio	88
Quadro 33 – Características da laje entre o comércio e habitação	88
Quadro 34 - Cálculo do índice de redução sonora do pavimento entre o comércio e a habitação do piso 1	89
Quadro 35 – Verificação acústica entre o comércio e habitação.....	89
Quadro 36 – Verificação da laje de separação do comércio/habitação pelo Método Simplificado	90
Quadro 37 - Verificação da laje de separação do comércio/habitação pelo Método Invariante	90
Quadro 38 – Verificação entre o piso de separação dos pisos intermédios pelo método simplificado.....	90

Quadro 39 - Verificação entre o piso de separação dos pisos intermédios pelo método do Invariante	91
Quadro 40 - Determinação do valor de R_w	102
Quadro 41 - Determinação do valor $D'_{nT,w}$	104
Quadro 42 - Determinação do valor de R_w	113
Quadro 43 - Determinação do valor de R_w	115
Quadro 44 - Valores da curva de referência e respetiva variação	120
Quadro 45 - Determinação do valor de L'_{nT}	122
Quadro 46 - Determinação do valor de L'_{nT}	128
Quadro 47 - Comparação entre os valores calculados e os resultados dos ensaios.....	132
Quadro 48 - Classificação do edifício de estudo segundo a metodologia do LNEC.....	137

Índice de Gráficos

Gráfico 1 - Curva de referência para o ajuste	47
Gráfico 2 - Exemplo do cálculo do índice de redução sonora a sons aéreos após o ajuste à curva de referência.....	48
Gráfico 3 - Curva de referência para os sons de percussão.....	56
Gráfico 4 – Situação aplicável a).....	60
Gráfico 5 – Situação aplicável b).....	61
Gráfico 6 – $D_{2m,nT,w}$ entre o exterior do edifício e quartos ou zonas de estar.....	62
Gráfico 7 – $D_{nT,w}$ entre compartimentos de um fogo (emissão) e quartos ou zonas de estar de outro fogo (receção)	63
Gráfico 8 – $D_{nT,w}$ entre locais de circulação comum do edifício (emissão) e quartos ou zonas de estar dos fogos (receção)	64
Gráfico 9 – $D_{nT,w}$ entre locais do edifício destinados a comércio, indústria, serviços ou diversão (emissão) e quartos ou zonas de estra dos fogos (receção)	64
Gráfico 10 – $L'_{nT,w}$ no interior de quartos ou zonas de estar dos fogos proveniente de pavimentos de outros fogos ou locais de circulação comum	65
Gráfico 11 – $L'_{nT,w}$ no interior dos quartos ou zonas de estar dos fogos provenientes de pavimentos do edifício destinados a comércio, indústria, serviços ou diversão	66
Gráfico 12 – $L_{Ar,nT}$ do ruído particular de equipamentos coletivos do edifício	66
Gráfico 13 – $D_{nT,w}$ entre compartimentos de estar e dormir do mesmo fogo.....	67
Gráfico 14 - Gráfico Representativo da curva de R_w e da curva de referência.....	103
Gráfico 15 - Gráfico representativo da curva de D_{nT} e da curva de referência.....	105
Gráfico 16 - Gráfico Representativo da curva de R_w e da curva de referência.....	114
Gráfico 17 - Gráfico representativo da curva de D_{nT} e da curva de referência.....	116

Gráfico 18 - Gráfico representativo da curva de L'_{nT} e da curva de referência	123
Gráfico 19 - Gráfico representativo da curva de L'_{nT} e da curva de referência	129
Gráfico 20 - Resultados do ensaio do tempo de reverberação da caixa de escadas	130

Lista de Símbolos e Acrônimos

A_0 – Área de absorção sonora de referência

$A_{(f)}$ – Área de absorção equivalente por cada banda de frequência

$A_{2(f)}$ – Área de absorção sonora do compartimento emissor por frequência

b – Espaçamento entre suportes em linha

B – Módulo de rigidez à flexão

c – Celeridade, aceleração do som no meio

C – Termo de adaptação

c_1 – Velocidade de propagação das ondas longitudinais

c_{Li} – Velocidade do som no material

C_{tr} – Termo de adaptação

d – Espessura da caixa-de-ar

$D_{2m,nT,w}$ – Isolamento sonoro a sons de condução aérea, padronizado

D_{nT} – Isolamento a sons de condução aérea padronizado

$D'_{nT,w}$ – Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado

e – Espaçamento de grelha retangular entre pontos de suporte do painel

E – Módulo de young

f – Frequência do elemento

f_c – Frequência de coincidência

f_{res} – Frequência de ressonância

h – Espessura do elemento

j – Índice para os espectros do som $n^{\circ}1$ e $n^{\circ}2$

K – Correção devida às características tonais do ruído

K – Rigidez do elemento

K_{ij} – Índice de redução de transmissão de vibrações pelo caminho ij

K_{TM} – Constante que atende às transmissões marginais

l – Comprimento entre o elemento de separação e o marginal

L_1 – Nível médio de pressão sonora medido no compartimento emissor

$L_{1,2m}$ – Nível médio de pressão sonora exterior

L_2 – Nível sonoro do sinal ajustado

L_2 – Nível médio de pressão sonora medido no local de recepção

LA – Nível sonoro contínuo equivalente ponderado A

$L_{AR,nT}$ – Nível de avaliação padronizado

L_d – Indicador de ruído diurno

L_{den} – Indicador de ruído diurno-entardecer-noturno

L_e – Indicador de ruído entardecer

L_i – Nível sonoro médio medido no compartimento emissor

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

L_n – Indicador de ruído noturno

L'_{nT} – Nível sonoro de percussão padronizado

L_p – Nível de pressão sonora

L_{sb} – Nível sonoro combinado

L_s – Nível sonoro do ruído de fundo

L_w – Nível da potência acústica da fonte

m – Massa superficial do elemento

m_i – Massa superficial do painel i do elemento

n – Número de elementos marginais ($n=4$)

N – Número de elementos

NAA- Nível de avaliação acústica

p_0 – Pressão sonora de referência ($2,0 \times 10^{-5}$ Pa)

p – Pressão sonora

PDM – Plano diretor municipal

P_{ti} – Número de pontos atribuídos a cada realidade física

r – Distância

R – Redução sonora promovida pelo elemento

R_w – Índice de redução sonora

R'_w – Índice de redução sonora aparente

$R_{d,w}$ – Índice de redução sonora para o elemento de separação

$R_{D,w}$ – Índice de redução sonora para o elemento de separação

$R_{D,d,w}$ – Índice de redução sonora relativo à transmissão direta

$R_{Df,w}$ – Índice de redução sonora relativo ao caminho de transmissão Df

$R_{Fd,w}$ – Índice de redução sonora relativo ao caminho de transmissão Fd

$R_{Ff,w}$ – Índice de redução sonora relativo ao caminho de transmissão Ff

RGR – Regulamento Geral do Ruído

$R_{i,w}$ – Índice de redução sonora para o elemento i

$R_{j,w}$ – Índice de redução sonora para o elemento j

RLPS – Regime Legal de Poluição Sonora

RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

$R_{s,w}$ – Índice de redução sonora para o elemento de separação

S – Área do elemento de separação

s' – Rigidez dinâmica

S_i – Superfície de absorção do material i

SRU – Sociedade de Reabilitação Urbana

S_s – Área do elemento de separação

T – Tempo de reverberação do compartimento recetor

T_0 – Tempo de reverberação de referência (=0,5 s)

$T_{(f)}$ – Tempo de reverberação por cada banda de frequência

T_s – Tempo de reverberação espectral

V – Volume do compartimento recetor

W – Pulsação do estímulo sonoro

W_i – Fator de ponderação das realidades físicas

α_i – Coeficiente de absorção do material

α_i – Coeficientes de ponderação do nível físico habitação

τ – Coeficiente de transmissão

ρ_0 – Massa volúmica do ar ($\approx 1,2 \text{ Kg/m}^3$)

ρ – Densidade do elemento

ν – Coeficiente de Poisson

η – Fator de perdas internas

σ – Fator de radiação

ΔL_w – Redução sonora do revestimento

$\Delta R_{ij,w}$ – Acréscimo de isolamento sonoro no caminho ij

1. Introdução

1.1. Considerações Iniciais

O conforto acústico nos edifícios residenciais é um dos parâmetros de estudo, tanto na construção de edifícios novos como na reabilitação dos existentes.

Cada vez mais é uma exigência do proprietário, ou do inquilino que irá usufruir do edifício, morar ou trabalhar em ambientes acusticamente confortáveis.

Na acústica dos edifícios, o desconforto advém essencialmente de ruídos aéreos, de ruídos de percussão e ainda do ruído dos equipamentos e instalações.

Os ruídos aéreos fazem-se sentir através da vibração das moléculas de ar, enquanto os ruídos de percussão sentem-se através da transmissão da energia sonora diretamente no elemento construtivo (geralmente nos pavimentos).

A existência destes ruídos provoca a necessidade de estabelecer exigências de isolamento acústico nos elementos construtivos das habitações, para que assim se possa minimizar os efeitos de desconforto entre os compartimentos, bem como a interferência do ruído exterior através da fachada para o interior da habitação.

Quando se elabora um projeto acústico de um edifício, deve-se ter em consideração as exigências regulamentares para que no futuro não seja necessário proceder a alterações ao edifício, pois qualquer intervenção realizada após o edifício estar concluído pode ser bastante dispendiosa e por vezes de muito difícil execução, nomeadamente pelo edifício já se encontrar em utilização e pela necessidade de diminuir o espaço habitável.

O isolamento sonoro da envolvente dos edifícios será determinado pelos sons com proveniência do exterior. Dependendo da localização do edifício, os ruídos podem resultar

essencialmente da circulação rodoviária, ferroviária ou até mesmo de instalações de divertimento público.

O isolamento sonoro dos elementos de compartimentação interior tem como objetivo a prevenção da incomodidade resultante do ruído proveniente da utilização do próprio edifício pelos seus ocupantes e, eventualmente, de animais ou utilizadores de estabelecimentos comerciais e de serviço.

Relativamente aos ruídos dos equipamentos, para o estudo da acústica do edifício geralmente só são significativos os ruídos provenientes dos sistemas de abastecimento de águas, drenagem de águas residuais (domésticas e pluviais), equipamentos de ventilação e equipamentos coletivos, no caso de edifícios multifamiliar.

1.2. Objetivos e Justificação

Este trabalho tem como principais objetivos:

- Estudo dos conceitos associados à acústica dos edifícios e em particular ao isolamento sonoro;
- Estimativa dos parâmetros do desempenho acústico de soluções construtivas;
- Estudo da metodologia do LNEC;
- Realização de ensaios “*in situ*” num edifício reabilitado;
- Análise comparativa entre estimativas de projeto e os valores obtidos “*in situ*”;
- Aplicação da metodologia do LNEC para a avaliação acústica do edifício de habitação.

1.3. Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em 6 capítulos que abordam a temática da acústica dos edifícios, apresentando a regulamentação e as normas de ensaios e no final é feita a aplicação a um caso prático realizado na cidade do Porto.

No capítulo 1 são feitas as considerações iniciais, bem como a explicação dos objetivos e a justificação do trabalho.

O capítulo 2 refere-se à normalização e à regulamentação, no qual se irá referir todos os limites regulamentares a cumprir e quais as normas que se devem seguir para a realização dos ensaios “in situ”.

Segue-se o capítulo 3, em que se faz referência a algumas noções gerais associadas à acústica de edifícios para uma melhor compressão de alguns conceitos necessários ao longo de toda a dissertação, bem como os métodos de estimativa para determinar o isolamento sonoro a sons de condução aérea e de percussão, e ainda os procedimentos para a realização dos ensaios acústicos.

No capítulo 4 apresenta-se a metodologia do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) para avaliação acústica dos edifícios de habitação novos ou reabilitados.

O capítulo 5 aborda o caso de estudo, fazendo uma descrição do edifício bem como das soluções construtivas que compõem o edifício. São estimados o desempenho acústico dos elementos de construção, relativamente ao isolamento sonoro a sons aéreos e aos sons de percussão, bem como apresentados os resultados dos ensaios. É ainda aplicada a classificação do edifício segundo a metodologia do LNEC.

Por último, o capítulo 6 é dedicado às conclusões finais do trabalho realizado e a possíveis desenvolvimentos futuros.

2. Legislação e Normalização acústica

A primeira legislação que apareceu em Portugal sobre o ruído entrou em vigor em 1988, pelo decreto-lei n.º 251/87 de 24 de junho o qual abordava a acústica de edifícios e atividades comerciais, sendo reconhecido como o primeiro regulamento geral do ruído.

Este decreto-lei estabelecia requisitos para os novos edifícios a serem construídos e avaliava o isolamento sonoro a sons aéreos e a sons de percussão e ainda requisitos de emissão de ruído para licenciamento de estabelecimentos comerciais, serviços ou similares.

Em função do ruído ambiente as zonas acústicas dividem-se em três: pouco ruidosas, ruidosas e muito ruidosas.

Em 2000, a regulamentação portuguesa viria a sofrer alterações profundas com a separação da acústica de edifícios e do ruído ambiental.

Assim, foi criado o regulamento dos requisitos acústicos dos edifícios (decreto-lei n.º 129/2002, de 11 de maio) e o regime legal da poluição sonora (decreto-lei n.º 292/2000, de 14 de novembro).

No ano de 2006, a legislação portuguesa teve de se adaptar às imposições europeias e a legislação existente sobre o ruído deu origem ao decreto-lei n.º 146/2006 de 31 de julho, que transpôs a Diretiva n.º 2002/49/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 25 de Junho. Este decreto-lei veio integrar os indicadores ambientais de ruído, nomeadamente o indicador de ruído diurno-entardecer-noturno (L_{den}) e o indicador de ruído noturno (L_n).

Com esta atualização, o regime legal de poluição sonora (decreto-lei n.º 292/2000 de 14 de novembro) deu lugar ao decreto-lei n.º 9/2007, de 17 de janeiro, denominado Regulamento Geral do Ruído e o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (decreto-lei n.º 129/2002 de 11 de maio) deu origem à republicação do regulamento dos requisitos acústicos dos edifícios.

Este novo documento legislativo dos requisitos acústicos dos edifícios veio alargar o âmbito de aplicação às unidades hoteleiras, auditórios e salas de espetáculos, e implementa as exigências nas escolas, hospitais e nos edifícios de uso similar.

Este regulamento não visa só as construções novas, mas também os edifícios antigos, reconstruções, ampliações ou alterações, e ainda atualiza os parâmetros de desempenho acústico e os indicadores de ruídos de equipamentos e instalações.

Também as normas sofrem atualizações ao longo do tempo, nomeadamente a da verificação do tempo de reverberação (norma ISO 3382).

A ISO 3382 viria a subdividir-se na ISO 3382-1, para auditórios, e na ISO 3382-2, para salas correntes, e atualmente é ainda a norma em vigor para o ensaio do tempo de reverberação “in situ”.

A norma NP 1730 veio dar lugar à norma NP ISO 1996, denominada por “Acústica. Descrição, medição e avaliação do ruído ambiente”, a qual se divide em duas partes. A parte 1 desta norma diz respeito às grandezas fundamentais e métodos de avaliação enquanto a parte 2 corresponde à determinação dos níveis de pressão sonora de ruído ambiente, estabelecendo os procedimentos para a realização dos ensaios acústicos para avaliação dos níveis de ruído exterior e para a avaliação da incomodidade devida ao ruído.

Pode-se sintetizar a publicação da legislação nacional na figura seguinte.

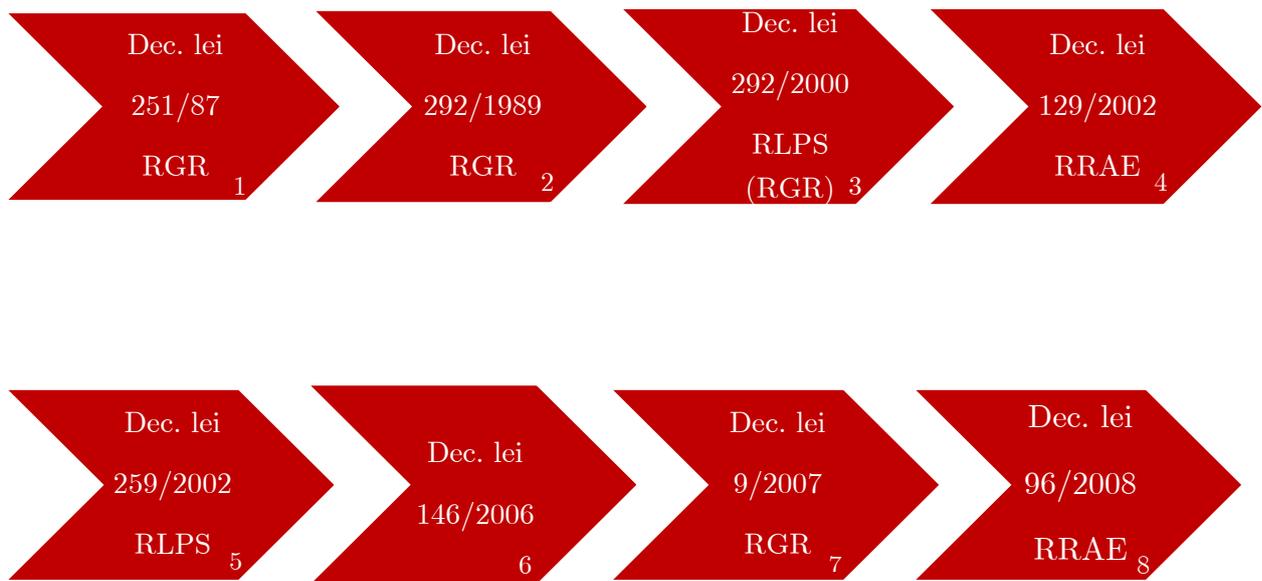


Figura 2.1 - Evolução da legislação acústica em Portugal

Legenda:

- 1- Estabelece um conjunto de normas (requisitos) para a prevenção e combate ao ruído;
- 2- Altera algumas disposições do RGR nomeadamente o nível de ruído de veículos a motor;
- 3- Veio definir o ruído de vizinhança e as atividades ruidosas de forma a prevenir o ruído e controlar a poluição sonora;
- 4- Esclareceu as matérias relacionadas com a qualidade da acústica dos edifícios;
- 5- Transferiu as competências para as autarquias, criando uma licença especial de ruído;
- 6- Transpõe para a ordem jurídica interna a Diretiva nº 2002/49/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 25 de Junho, relativa à avaliação e gestão do ruído ambiente;
- 7- Estabelece o regime de prevenção e controlo da poluição sonora;
- 8- Atualizou os parâmetros de desempenho acústico de edifícios e os indicadores de ruído.

2.1. Exigências Regulamentares

A existência de regulamentação acústica surge da necessidade de uniformizar os padrões de medição do desconforto que as pessoas sentem devido ao ruído ambiente e, eventualmente, ao ruído criado no interior do edifício.

Assim, é necessário avaliar o ruído ambiental de acordo com o Regulamento Geral do Ruído (RGR), bem como a conformidade com o Regulamento de Requisitos Acústicos dos edifícios (RRAE).

Além dos regulamentos acima mencionados existem as normas que servem de base à realização dos ensaios acústicos.

2.1.1. Regulamento Geral do Ruído

O Decreto-lei nº 9/2007, de 17 de Janeiro, mais conhecido como Regulamento Geral do Ruído (RGR), tem como principal objetivo a prevenção e controlo da poluição sonora, tendo em vista a saúde humana e o bem-estar das populações.

Este regulamento aplica-se a atividades ruidosas, permanentes e temporárias, e a outras fontes de ruído suscetíveis de causar incomodidade.

Este regulamento estabelece algumas definições importantes, tais como:

- Indicador de ruído diurno-entardecer-noturno (L_{den}) – Indicador de ruído, expresso em dB(A), associado ao incómodo global, dado pela seguinte expressão:

$$L_{den} = 10 \times \log \frac{1}{24} \times \left[13 \times 10^{\frac{L_d}{10}} + 3 \times 10^{\frac{L_e+5}{10}} + 8 \times 10^{\frac{L_n+10}{10}} \right] \quad (1)$$

Em que L_d corresponde ao indicador de ruído diurno, L_e ao indicador do ruído do entardecer e o L_n ao indicador de ruído noturno, e expressam-se em dB (A).

- Período de referência – o intervalo de tempo a que se refere um indicador de ruído, de modo a abranger as atividades humanas típicas, delimitando nos seguintes termos:

- i. Período diurno – das 7 às 20 horas;
- ii. Período do entardecer – das 20 às 23 horas;
- iii. Período noturno – das 23 às 7 horas;

- Zona mista – a área definida em plano municipal de ordenamento do território, cuja ocupação seja afeta a outros usos, existentes ou previstos, para além dos referidos na definição de zona sensível.

- Zona sensível – a área definida em plano municipal de ordenamento do território como vocacionada para uso habitacional, ou para escolas, para hospitais ou similares, podendo conter pequenas unidades de comércio e de serviços destinadas a servir a população local, tais como cafés e outros estabelecimentos de restauração, papelarias e outros estabelecimentos de comércio tradicional, sem funcionamento no período noturno.

- Zona urbana consolidada – a zona sensível ou mista com ocupação estável em termos de edificação.”

A classificação de Zonas sensíveis ou de zonas mistas é realizada nos planos municipais de ordenamento do território e pode implicar que estes sejam revistos ou alterados.

Um dos artigos mais importantes a ter em conta na análise deste regulamento é o artigo 12º que corresponde ao controlo prévio das operações urbanísticas.

De acordo com o ponto nº 2 do presente artigo o cumprimento dos valores limite de exposição relativamente às operações urbanísticas não sujeitas a procedimento de avaliação de impacto ambiental é verificado no âmbito dos procedimentos previstos no regime jurídico de urbanização e da edificação, devendo o interessado apresentar os documentos identificados na portaria nº1110/2001, de 19 de setembro.

Pelo ponto 3 deste mesmo artigo, ao projeto acústico, também designado por projeto de condicionamento acústico, aplica-se o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, aprovado pelo Decreto-Lei nº129/2002, de 11 de Maio.

Ao abrigo do ponto nº.5, a utilização ou alteração da utilização de edifícios e sua frações está sujeita à verificação do cumprimento do projeto acústico a efetuar pela câmara municipal, no âmbito do respetivo procedimento de licença ou autorização da utilização, podendo a câmara, para o efeito exigir a realização de ensaios acústicos.

Segundo o ponto nº. 6 e 7 é interdito o licenciamento ou a autorização de novos edifícios habitacionais, bem como de novas escolas, hospitais ou similares e espaços de lazer enquanto se verifique violação dos valores limites de exposição, com exceção dos novos edifícios habitacionais em zonas urbanas consolidadas, desde que essa zona: seja abrangida por um plano municipal de redução de ruído; ou não exceda em mais de 5 dB(A) os valores limite de exposição e que o projeto acústico considere valores de $D_{2m,nT,w}$ superiores em 3 dB relativamente ao mínimo regulamentar (alínea a) do nº 1 do artigo 3º do RRAE).

Relativamente às atividades ruidosas permanentes, o artigo 13º define no ponto 8 e 9 que quando uma atividade não é sujeita a avaliação de impacte ambiental, a verificação do cumprimento dos valores limites de exposição e do critério de incomodidade é da competência da entidade coordenadora do licenciamento e é efetuada no âmbito do respetivo procedimento de licenciamento, autorização de instalação ou de alteração de atividades ruidosas permanentes. Para o efeito, o interessado deve apresentar à entidade coordenadora do licenciamento uma avaliação acústica.

Por último salienta-se o artigo 34º, em que os ensaios e medições acústicas necessárias à verificação do cumprimento no disposto no RGR são realizados por entidades acreditadas (no âmbito dos sistema português da qualidade).

2.1.2. Regulamento de Requisitos Acústicos dos Edifícios

O Decreto-lei nº 96/2008, de a 9 de Junho, é a republicação do Regulamento de Requisitos acústicos dos Edifícios e tem como objetivo a atualização dos parâmetros de desempenho acústico dos edifícios novos como para edifícios existentes que venham a ser objeto de reconstrução, ampliação ou alteração.

O artigo 1º. deste regulamento refere o objeto e âmbito de aplicação do qual fazem parte os requisitos acústicos dos edifícios necessários para melhorar a qualidade acústica dos mesmos.

No artigo 2º. do presente regulamento são apresentadas algumas definições tais como:

- Tempo de reverberação- intervalo de tempo necessário para que a energia volúmica do campo sonoro de um recinto fechado se reduza a um milionésimo do seu valor inicial;
- Isolamento a sons de condução aérea, padronizado, $D_{2m,nT}$ - diferença entre o nível médio de pressão sonora exterior, medido a 2 m da fachada do edifício ($L_{1,2m}$), e o nível médio de pressão sonora medido no local de receção (L_2), corrigido da influência das condições de reverberação do compartimento recetor, segundo a expressão:

$$D_{2m,nT} = L_{1,2m} - L_2 + 10 \times \log\left(\frac{T}{T_0}\right) \text{ (dB)} \quad (2)$$

Em que:

T- é tempo de reverberação do compartimento recetor (s);

T_0 - é o tempo de reverberação de referência, em segundos. Para compartimentos de habitação ou com dimensões comparáveis, considera $T_0=0,5s$ e para compartimentos em que haja tempo de reverberação atribuível em projeto, o valor de referência a considerar será o do respetivo tempo de dimensionamento.

- Isolamento a sons de condução aérea padronizado, D_{nT} - diferença entre o nível de médio de pressão sonora medido no compartimento emissor (L_1) produzido por uma ou mais fontes

sonoras, e o nível médio de pressão sonora medido no compartimento recetor (L_2), corrigido da influência das condições de reverberação do compartimento recetor, segundo a expressão:

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \times \log\left(\frac{T}{T_0}\right) \text{ (dB)} \quad (3)$$

- Nível sonoro de percussão padronizado, L'_{nT} - nível sonoro médio (L_i) medido no compartimento recetor, proveniente de uma excitação de percussão normalizada exercida sobre um pavimento, corrigido da influência das condições de reverberação do compartimento recetor, segundo a expressão:

$$L'_{nT} = L_i - 10 \times \log\left(\frac{T}{T_0}\right) \text{ (dB)} \quad (4)$$

- Nível de avaliação padronizado, $L_{Ar,nT}$ - o nível sonoro contínuo equivalente ponderado A (L_A), durante um intervalo de tempo especificado, adicionado da correção devida às características tonais do ruído, K, e corrigido da influência das condições de reverberação do compartimento recetor, segundo a expressão:

$$L_{Ar,nT} = L_A + K - 10 \times \log\left(\frac{T}{T_0}\right) \text{ (dB)} \quad (5)$$

- Termo de adaptação, C ou C_{tr} - correção definida na EN ISO 717-1, função das características espectrais do ruído na emissão, a anexar ao índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea.

Segundo o artigo 5º. para edifícios habitacionais e mistos, o edifício e as suas frações que se destinam a uso habitacional, e para além desse uso se destinem também para comércio ou serviços devem cumprir os seguintes requisitos acústicos:

Quadro 1 – Requisito acústico para o índice de isolamento acústico a sons de condução aérea padronizado entre o exterior e quartos ou zonas de estar dos fogos

Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, normalizado e padronizado, $D_{2m,nT,w}$, entre o exterior e:	Zonas Sensíveis	Zonas Mistas
Quartos ou zonas de estar dos fogos	≥ 28 dB	≥ 33 dB

De acordo com o regulamento geral do ruído se os valores limites de exposição, para zonas sensíveis e zonas mistas, forem excedidos em não mais de 5 dB(A) o projeto acústico de edifícios de habitação deve considerar um incremento de isolamento sonoro a sons aéreos para a envolvente exterior de quartos e salas de 3 dB.

Em casos em que a área translúcida for superior a 60% do elemento da fachada em análise, deve ser adicionado ao índice $D_{2m,nT,w}$ o termo de adaptação C ou C_{tr} , conforme o tipo de ruído dominante na emissão, mantendo-se os limites referidos no quadro acima.

Para os elementos de compartimentação interior, os valores dos limites regulamentares estão no quadro seguinte.

Quadro 2 - Requisito acústico para o índice de isolamento acústico a sons de condução aérea entre compartimentos de um fogo e zonas de estar de outro

$D_{nT,w}$	Compartimento emissor	Compartimento recetor
≥ 50 dB	Compartimentos de um fogo	Quartos ou Zonas de estar de outro fogo
≥ 48 dB	Locais de circulação comum	
≥ 40 dB	Caixa-de-escadas se existirem elevadores	
≥ 50 dB	Garagem para automóveis	
≥ 58 dB	Locais destinado a comércio, indústria, serviços ou diversão	

Quadro 3 – Requisito acústico para o índice do isolamento a sons de percussão

$L_{nT,w}$	Compartimento emissor	Compartimento recetor
≤ 60 dB	Compartimentos de um fogo	Quartos ou zonas de estar de outro fogo
≤ 60 dB	Locais de circulação Comum	
≤ 50 dB	Locais destinados a comércio, indústria, serviços ou diversão	

Quadro 4 – Exigências Acústicas a nível do ruído particular de equipamentos coletivos do edifício

Local em análise	Nível de avaliação, $L_{Ar,nT}$ (de equipamentos coletivos do edifício)		
	Funcionamento Intermitente	Funcionamento Contínuo	Grupo Gerador de Emergência
Interior de Quartos e Zonas de Estar dos Fogos	≤ 32 dB(A)	≤ 27 dB(A)	≤ 40 dB(A)

O nível de ruído particular deve ser analisado para os ascensores, grupos hidropressores, sistemas centralizados de ventilação mecânica, automatismos de porta de garagem, postos de transformação corrente elétrica e instalações de escoamentos de águas.

Para além das exigências acústicas acima descritas deve-se ainda, obviamente, verificar complementarmente as exigências para as várias especialidades existentes na conceção do edifício, uma vez que influenciam o comportamento acústico dos espaços projetados.

Quadro 5 – Exigências complementar do nível de potência sonora

Nível de potência sonora L_w de:	
Dispositivos de extração de ar em cozinhas e WC's	≥ 35 dB(A)
Nível de potência sonora L_A de:	
Ventiladores na cobertura do edifício	≥ 65 dB(A) a 2m

Quadro 6 – Exigência complementar para a velocidade de circulação do ar nas condutas

Velocidade máxima de circulação do ar nas condutas	
Conduta principal	≤ 6 m/S
Ramais	≤ 5 m/S
Secção de Saída	≤ 3 m/S

2.2. Normas a utilizar em acústica de edifícios

Algumas das principais normas para o estudo da acústica de edifícios são a EN ISO 140, a NP EN ISO 717 e a NP EN ISO 16032. Estas normas regem os ensaios realizados “in situ”.

A parte 4 da ISO 140 corresponde à medição, in situ”, do isolamento sonoro a sons aéreos entre compartimentos do edifício, estabelecendo os métodos para medição “in situ” desse mesmo isolamento. Os métodos preconizados permitem determinar os valores do isolamento sonoro a sons aéreos, os quais dependem da frequência, podendo ser traduzidos por um valor único (índice) caracterizando assim o comportamento acústico.

A parte 5 diz respeito à medição “in situ” do isolamento sonoro a sons aéreos de fachadas e elementos de fachada e à determinação do respetivo índice de isolamento sonoro.

Para a medição “in situ” do isolamento sonoro a sons aéreos de fachadas e de elementos de fachada, a referida norma prescreve dois métodos: o método de elementos e o método global.

O método de elementos serve para avaliar a redução sonora de um elemento da fachada (ex. janela), ao invés o método global destinam-se a avaliar a diferença de nível sonoro exterior/interior nas condições de tráfego.

A Parte 7 da ISO 140 corresponde à medição “in situ” do isolamento sonoro de pavimentos a sons de percussão, onde é especificado o método para a medição utilizando uma máquina de percussão.

Este método é aplicado tanto a pavimentos sem revestimentos como a pavimentos com revestimentos de piso aplicados.

Para a determinação do valor único (índice) aplica-se a norma NP EN ISO 717-2 “isolamento sonoro a sons de percussão”.

A NP EN ISO 717 subdivide-se na parte 1 e 2. Na parte 1, faz-se a medição do isolamento sonoro a sons de condução aérea de edifícios e de elementos de construção, tais como de paredes, pavimentos, portas e janelas. Tem em consideração os diferentes níveis de pressão sonora devido a diferentes fontes de ruído tanto no interior como no exterior do edifício, e neste caso o tráfego rodoviário.

Na parte 2, define-se os procedimentos para medir o isolamento sonoro a sons de percussão de edifícios e elementos de construção, no entanto em termos de método é análoga a parte 1. A determinação do índice de isolamento as sons de percussão resulta da aplicação da EN ISO 140-7.

A NP EN ISO 16032 indica como efetuar a medição do nível de pressão sonora de equipamentos de serviço de edifícios. Esta norma especifica métodos para a medição do nível sonoro contínuo equivalente, ponderado A, L_{Aeq} , devido ao funcionamento de equipamentos coletivos do edifício, mais especificamente ao funcionamento de instalações sanitárias, ventilação mecânica, equipamento de aquecimento e arrefecimento, elevadores, caldeiras, exaustores, ou outro tipo de equipamentos instalados nos edifícios.

3. Isolamento sonoro

3.1. Noções Gerais

A acústica é a ciência que estuda o som, a sua propagação tanto em meio fluido como sólido, e as suas inter-relações como ser humano numa perspetiva de analisar os efeitos causados.

[Patrício,2003]

O som é uma onda longitudinal que só se propaga em meios materiais (sólidos, líquidos ou gases) e em que as frequências audíveis para o ouvido humano estão compreendidas na faixa entre 20 Hertz e 20 000 Hertz. Ao contrário do que ocorre com a luz, o som não pode se propagar no vácuo, ou seja, não é possível perceber o som se não existir um meio material.

Quando pensamos num som, pensamos que ele se propaga no ar (meio gasoso), no entanto não é o meio mais eficaz para o som se propagar. Ao contrário daquilo que se poderá pensar, o som normalmente atinge velocidades de propagação maiores em meios sólidos ou líquidos.

A propagação da onda sonora existe devido ao movimento oscilatório das moléculas. Considerando as moléculas de ar ao serem excitadas por uma superfície vibrante verificamos que elas oscilam em torno da sua posição de repouso. Este movimento vai transmitir às moléculas vizinhas energia, provocando-lhes assim um movimento oscilatório e assim sucessivamente nas restantes moléculas.



Figura 3.1 - Movimento das moléculas de uma onda sonora

Fonte: <http://www.prof2000.pt/users/mrsd/8ano/Producao.htm>

Este movimento das moléculas provoca zonas de compressão e de rarefação. Nas zonas de compressão a pressão do ar é superior à pressão atmosférica (10^5 Pa) no entanto nas zonas de rarefação acontece o inverso, a pressão do ar é inferior à pressão atmosférica.

As variações de pressão provocadas no meio, pela onda sonora, é o que permite ao ouvido humano conseguir ouvir, assim é importante a medição das diferenças de pressão provocadas pela onda sonora.

O sistema auditivo humano consegue suportar variações de pressão desde 2×10^{-5} (limiar de audição) até 100 Pa (limiar da dor). Uma vez que a perceção do ouvido humano não se processa de uma forma linear é usada uma escala logarítmica para avaliar os níveis de pressão sonora.

O nível de pressão sonora é dado pela seguinte expressão:

$$L_p = 10 \times \log_{10} \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) \text{ (dB)} \quad (6)$$

Em que p corresponde à pressão e p_0 à pressão sonora de referência que é de 2×10^{-5} Pa.

Desta forma passamos de uma escala linear em Pa, para uma escala logarítmica em que a unidade é o dB.

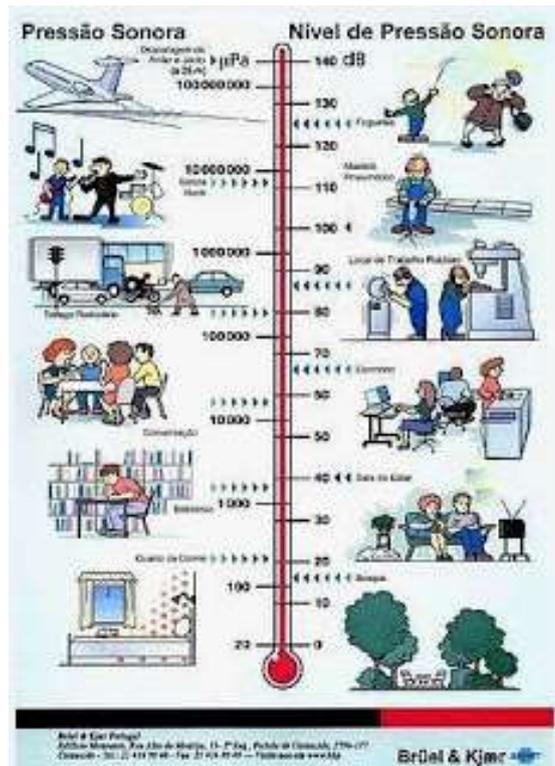


Figura 3.2 – Níveis de pressão sonora

Fonte: Bruel&Kjaer

O nível de pressão sonora de referência p_0 corresponde a $20 \mu\text{Pa}$, é a mínima variação de pressão detetável pelo ouvido humano (limiar da audição). Ao utilizar uma escala logarítmica, não se podem somar diretamente as magnitudes (por exemplo, duas máquinas que tenham uma potência sonora de 80 dB cada uma, produzirão uma potência total de 83 dB, não de 160 dB). Através das definições anteriores, podemos expressar em decibéis a relação entre o nível de potência acústica da fonte, L_w , e nível de pressão sonora, L_p , originada num ponto afastado a uma distância r .

No caso de ondas esféricas provenientes de uma fonte pontual propagando-se no ar obteremos:

$$L_p = L_w - 20 \times \log r - 11 \text{ (dB)} \tag{7}$$

Desta relação pode-se deduzir que, em campo aberto, cada vez que dobramos a distância a pressão sonora diminui em 6 dB.

No caso de fontes lineares, tipo estrada ou caminho-de-ferro, o som propaga-se em forma de ondas cilíndricas e nível de pressão sonora originada num ponto afastado a uma distância r será:

$$L_p = L_w - 10 \times \log r - 8 \text{ (dB)} \quad (8)$$

A diminuição neste caso será de 3 dB dobrando a distância.

O som é uma constante no nosso quotidiano e pode ser percecionado de uma forma desagradável, ou seja, de uma forma incomodativa como tal será considerado ruído face às suas características físicas (amplitude, frequência, duração) e à forma que o nosso ouvido o percebe.

O ruído é definido como sendo qualquer som que seja indesejável e que o ouvido humano consegue detetar geralmente nos ensaios de ruído.

"...Considera-se ruído o conjunto de sons suscetíveis de adquirir para o homem um carácter afetivo desagradável e/ou intolerável, devido sobretudo aos incómodos, à fadiga, à perturbação e não à dor que pode produzir."

(Definição CEE, 1977)

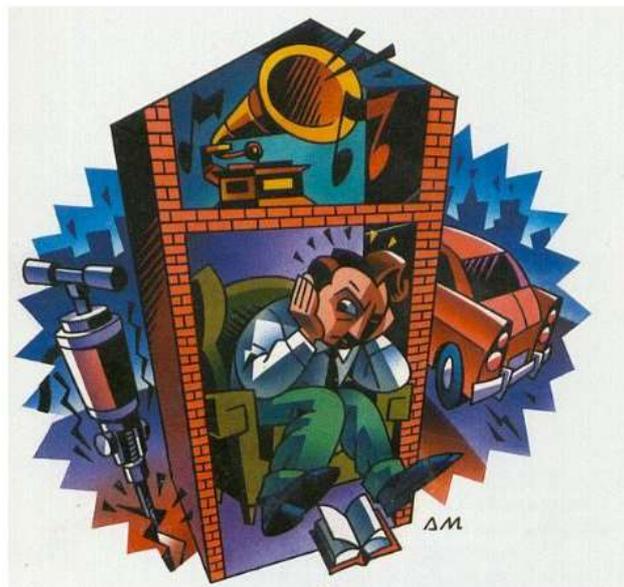


Figura 3.3 – Ilustração de Ruído

Fonte: <http://queconceito.com.br/ruído>

Na acústica de edifícios podemos considerar dois tipos de ruídos: os aéreos e os de percussão. Os Ruídos aéreos são transmitidos essencialmente pelo ar e podem materializar-se por exemplo por vozes, pela televisão, pela música, etc. Já o ruído de percussão resulta de sons por uma ação de choque exercida diretamente sobre um elemento construtivo. Alguns exemplos deste tipo de ruído são a queda de objetos, o bater de portas, arrastar móveis, ou até mesmo os passos.

O ruído ou espectro contínuo é um conjunto de sons aleatórios nos quais existe uma grande quantidade de frequências muito próximas entre si.

Define-se como ruído branco um ruído padrão caracterizado por ter um incremento de 3 dB da pressão sonora em cada aumento de uma banda de oitava. Da mesma maneira define-se como ruído rosa um ruído com bandas de oitavas que possuam o mesmo nível sonoro.

O isolamento acústico é o principal método de controlo da propagação do som nos edifícios. Em particular, o isolamento acústico ocupa-se de reduzir a transmissão do ruído entre dois locais ou entre o exterior e o interior. O isolamento modifica a diferença entre o nível de intensidade acústica L_1 , num local emissor, e o nível de intensidade acústica L_2 , num local recetor. É importante notar que quando se acondiciona acusticamente um local colocando materiais absorventes o que se consegue é baixar o nível de ruído L_1 mas deixa-se inalterada a diferença $L_2 - L_1$.

Os sons aéreos são diretamente transmitidos pelo ar através de uma fonte sonora, em que no caso dos edifícios se pode materializar através de ruído de tráfego rodoviário, ferroviário ou aéreo ou ainda por equipamentos de carácter coletivo ou individual, ou até mesmo da utilização dos seus ocupantes.

Num edifício os sons aéreos podem ter uma proveniência do exterior ou do interior. Os ruídos exteriores definirão o isolamento da envolvente do edifício, enquanto os ruídos na parte interior do edifício definirão o tipo de isolamento a utilizar na compartimentação do edifício

tanto horizontal (pavimentos) como vertical (paredes) e são avaliados pelos índices $D_{nT,w}$ e $L'_{nT,w}$.

Para caracterizarmos o isolamento sonoro a sons aéreos da fachada do edifício utilizamos o índice $D_{2m,nT,w}$. A medição deste índice é feita com o microfone a dois metros da fachada do edifício (2m), e expresso por um valor único (w).

Na medição do isolamento sonoro torna-se importante a distinção do ruído de percussão em que é preciso uma solicitação direta, o ruído de condução aérea por vibração exclusiva do ar e ainda o ruído dos equipamentos e instalações existentes nos edifícios.

3.2. Isolamento sonoro a sons aéreos

Para a determinação do isolamento sonoro geralmente é necessário estimar o índice de redução sonora (R_w). Este índice avalia a capacidade dos elementos dificultarem a propagação do som. Neste subcapítulo serão apresentados os diferentes métodos, tanto teóricos como experimentais para a determinação do R_w , para elementos simples e duplos.

$$R(f) = L_1(f) - L_2(f) + 10 \times \log \frac{A_2(f)}{S} \text{ (dB)} \quad (9)$$

O valor de R dá origem por ajuste à curva de referência ao índice R_w .

3.2.1. Métodos de estimativa

O isolamento sonoro dos elementos construtivos depende do comportamento do próprio elemento ou do facto de existir transmissão entre dois compartimentos, emissor/recetor. Neste último caso não tem só influência o comportamento do elemento separador mas também a restante envolvente.

Para efetuar a estimativa do isolamento sonoro, na fase de projeto existem diferentes modelos de estudo e dividem-se em três grupos distintos: Modelos teóricos que se baseiam

no comportamento dos materiais, Modelos estatísticos em que se baseiam em informação experimental e Modelos informáticos baseados nos dois modelos anteriores.

O comportamento acústico de um elemento construtivo a sons aéreos está muito dependente da sua massa, ou então da duplicação desse mesmo elemento.

Para o cálculo do índice de isolamento a sons de condução aérea padronizado e de acordo com a legislação em vigor, é necessário conhecer o índice de redução sonora, R_w , pois é o que caracteriza as soluções construtivas e muitas vezes é o valor apresentado em catálogos de fornecedores de materiais de construção.

$$R_w = 10 \times \log\left(\frac{1}{\tau}\right) \text{ (dB)} \quad (10)$$

O τ representa o coeficiente de transmissão e quantifica a percentagem de energia sonora transmitida relativamente à incidente, pois nem toda a energia que é irradiada é transmitida.

$$\tau = \frac{I_{transmitida}}{I_{incidente}} \quad (11)$$

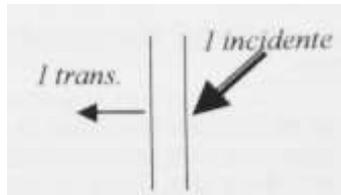


Figura 3.4 – Esquema do processo de transmissão

Fonte: [Carvalho, 2003]

3.2.1.1 Elementos simples

O comportamento de um elemento aos sons aéreos depende essencialmente da sua massa, da frequência crítica, do fator interno de amortecimento (fator de perdas) e do campo sonoro gerado, entre outros.

Pode-se caracterizar a transmissão sonora como sendo um sistema sujeito a estímulos oscilatórios que dependem da gama de frequências.

Como tal, podemos dividir o comportamento do elemento em cinco zonas distintas e que se faz representar pelo seguinte gráfico:

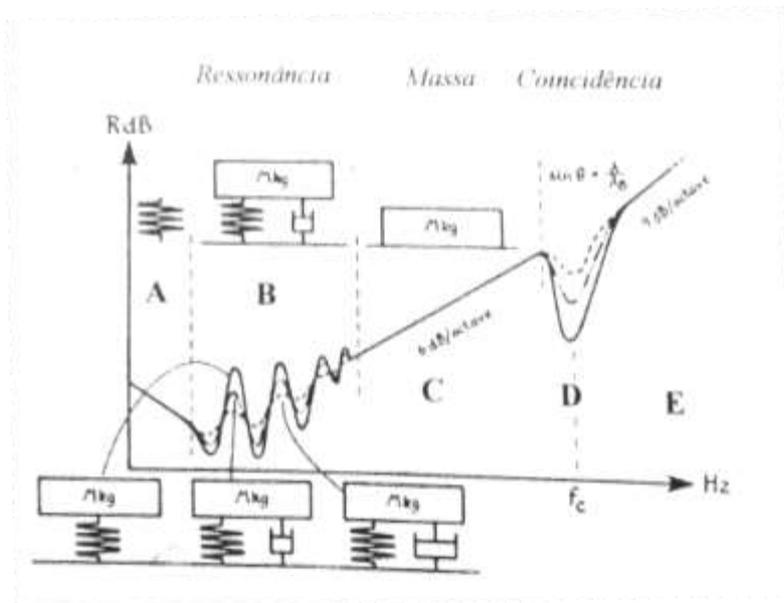


Figura 3.5 - Comportamento típico dos elementos simples

Fonte: [Carvalho, 2003]

Na zona A do gráfico corresponde à zona em que o comportamento do elemento se detém com a sua rigidez e em que o valor de R diminui com o aumento da frequência.

$$R = \text{função} \left(\frac{K}{w} \right) (dB) \quad (12)$$

Em que R corresponde à redução sonora promovida pelo elemento, K à rigidez do elemento e o w diz respeito à pulsação do estímulo sonoro. A pulsação do estímulo sonoro está dependente da frequência como poderemos ver na expressão seguinte.

$$w = 2 \times \pi \times f \quad (13)$$

Está zona encontra-se fora da gama de frequências audível pelo ouvido humano, pelo que não existe um estudo muito detalhado.

Na zona B, o elemento irá vibrar como se tivesse dimensões infinitas (há influência da elasticidade) sendo controlada pela vibração transversal, ou seja, diz-se que o elemento se encontra em ressonância.

O modo de obtenção da frequência de ressonância depende do tipo de apoio do elemento.

- Se estiver simplesmente apoiado será:

$$f_{res} = 0,453h \times \sqrt{\frac{E}{\rho \times (1 - \vartheta^2)}} \times \left[\left(\frac{n}{x}\right)^2 + \left(\frac{m}{y}\right)^2 \right] \quad (14)$$

$$\approx 0,453h \times \sqrt{\frac{E}{\rho}} \times \left[\left(\frac{n}{x}\right)^2 + \left(\frac{m}{y}\right)^2 \right] (Hz)$$

- Caso estejam encastradas será:

$$f_{res} = 0,453h \times \sqrt{\frac{E}{\rho \times (1 - \vartheta^2)}} \times \left[\left(\frac{n}{x}\right)^2 + \left(\frac{m}{y}\right)^2 \right] \quad (15)$$

$$\approx 0,453h \times \sqrt{\frac{E}{\rho}} \times \left[\left(\frac{n}{x}\right)^2 + \left(\frac{m}{y}\right)^2 \right] (Hz)$$

Em que:

h – corresponde à espessura do elemento e expressa-se em metros (m);

E – é o módulo de Young (Pa);

ρ – é a densidade do elemento (Kg/m³)

m e o n – são números inteiros (1,2,3,...) que caracterizam os modos de vibração;

x e y – são as dimensões do elemento (m).

A frequência de ressonância situa-se numa gama muito baixa de frequências, em que por vezes se encontra fora do limiar audível.

A zona C é para frequências que sejam superiores à frequência de ressonância do elemento e é controlado pela massa.

$$R = \text{função}(m \times f) (dB) \quad (16)$$

Neste caso, a redução sonora depende da massa superficial do elemento, m, (kg/m²) e da frequência do estímulo sonoro, f, (Hz).

Desta análise surge a lei da massa para uma incidência da onda sonora de θ graus:

$$R_{\theta} = 20 \times \log \frac{\pi \times m \times f \times \cos \theta}{\rho_0 \times c} \quad (17)$$

$$= 20 \times \log(m \times f) + 20 \times \log \left(\frac{\pi \times \cos \theta}{\rho_0 \times c} \right) (dB)$$

Em que ρ_0 é a massa volúmica do ar ($\approx 1,2 \text{ kg/m}^3$) e o c é a celeridade, ou seja, a aceleração do som no meio (considera-se a velocidade do som no ar).

Em conclusão, para as frequências inferiores à frequência crítica o isolamento sonoro cresce 6 dB por oitava e também nos casos em que se duplique a massa.

Para um campo sonoro difuso a lei da massa traduz-se por:

$$R = 20 \times \log(m \times f) - 47 \text{ (dB)} \quad (18)$$

A zona D, corresponde à zona em que entramos na frequência crítica, ou seja, existe coincidência entre o estímulo sonoro e a frequência do próprio elemento. A frequência crítica depende da massa, da elasticidade, da espessura do elemento e da velocidade do som no ar.

$$f_c = \frac{c^2}{2 \times \pi} \times \sqrt{\frac{m}{B}} \text{ (Hz)} \quad (19)$$

Em que c corresponde à celeridade em m/s^2 , m à massa por unidade de superfície em kg/m^2 , o B ao módulo de rigidez à flexão ($\text{kg} \times \text{m}^2/\text{s}^2$), e o E ao módulo de elasticidade/Young (Pa).

O módulo de rigidez à flexão define-se como sendo:

$$B = \frac{E \times h^3}{12 \times (1 - \nu^2)} \quad (20)$$

Em que o h denomina a espessura do elemento em metros e o ν ao coeficiente de Poisson.

Podemos ainda determinar a frequência de uma forma simplificada, da seguinte forma:

$$f_c = \frac{c^2}{1,8 \times c_l \times h} \text{ (Hz)} \quad (21)$$

Na qual a velocidade de propagação das ondas longitudinais do material, c_l , se expressa em m/s e se expressa por:

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho \times (1 - \nu^2)}} \approx \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (22)$$

Para obtermos a velocidade de propagação das ondas longitudinais no material, frequência crítica e fator de perdas, podemos ainda consultar a seguinte tabela:

Quadro 7 – Valores de f_c , η , ν e c_L para alguns materiais

Material	Massa volúmica (ρ) Kg/m ³	Frequência Crítica (Hz) para h=1cm	Fator de Perdas Internas (η)	Coef. De Poisson (ν)	C_L (m/s)
Borracha	1000	85000	0,1-1,0	0,4-0,5	1600
Cortiça	250	18000	0,13-0,39		
Poliestireno Expandido	14	14000	2		300
Aço	7800	1000	0,0001-0,01	0,28-0,34	5150-5500
Alumínio	2700	1200-1300	0,0001-0,02	0,33-0,36	5150
Chumbo	10600	4850-8000	0,02-0,15		1210
Vidro	2500	1100-1300	0,0006-0,02	0,24	5200-5500
Vidro acrílico (plexiglass)	1150-1200	2900	0,002-0,040	0,4	1800
Alvenaria	900	1600-2700	0,005-0,02		2300
Tijolo maciço	2000-2500	2500-5000	0,01		3000
Tijolo furado	1300		0,003-0,010	≈0,2	2200-2500
Betão	2100-2300-2400	1800	0,005-0,020	0,1-0,15	3500-3850
Betão Poroso (leve)	600-1400	3700-4800	0,010-0,015		1700
Gesso	1000	4000			
Gesso cartonado	760	3100-3500	0,006-0,03	0,27	1600
Madeira (abeto)	550-600	6000-18000	0,04		3800-5400
Madeira (teca)	900		0,02		
Madeira (choupo)	500		0,04		
Madeira (pinho)	480		0,008		
Contraplacado	600	1400-3450	0,01-0,02		2500-3800
	700		0,005-0,01		
Contraplacado Gesso	1000			0,005-0,01	

Para espessuras diferentes de 1cm compatibilizamos a frequência crítica da seguinte forma:

$$f_c(x \text{ cm}) = \frac{f_c(1 \text{ cm})}{x} \quad (23)$$

Da análise do Quadro 7 verifica-se que o betão possui uma frequência crítica muito inferior à do tijolo maciço, para a mesma espessura, e que a borracha é o material com maior frequência crítica.

Para frequências superiores à frequência crítica, ou seja, que se encontrem na zona E o isolamento sonoro a ruídos a sons aéreos é dado pela seguinte equação:

$$R = 20 \times \log \frac{\pi \times m \times f}{\rho_0 \times c} + 10 \times \log \frac{f}{f_c} + 10 \times \log \eta - 2 \text{ (dB)} \quad (24)$$

Nesta equação o η corresponde ao fator de perdas, que depende do tipo de material e pode-se encontrar no quadro 7 acima.

Verifica-se que para frequências superiores à frequência crítica o isolamento sonoro R, cresce 9 dB por oitava.

Para o cálculo do índice de redução sonora podemos ainda consultar a figura 3.4 que corresponde ao método gráfico de previsão.

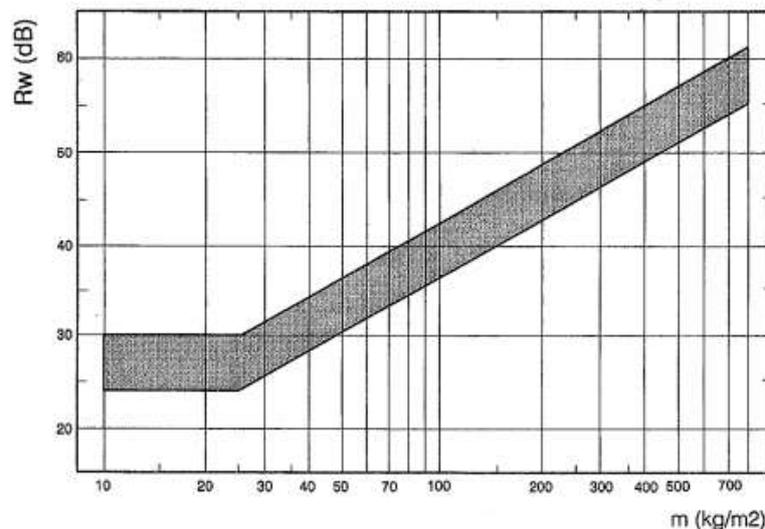


Figura 3.6 - Gráfico de estimativa do índice de redução sonora

Fonte: [ITE45, 2002]

O gráfico apresenta uma área de previsão limitada por valores inferiores que corresponde a uma previsão pessimista e por valores superiores que corresponde a previsão otimista.

Esta representação gráfica pode ser obtida da seguinte expressão:

$$20,4 \times \log(m) - 1,5 \text{ (dB)} \quad m > 25 \text{ Kg/m}^2 \quad (25)$$

A esta expressão podemos somar ou subtrair 3 dB, consoante a nossa perspetiva seja otimista ou pessimista.

3.2.1.2 Elementos duplos

Uma das vantagens de se utilizarem elementos duplos é que devido ao aumento de massa aumenta o isolamento aos sons aéreos.

Pelo método teórico, o estudo dos elementos duplos assume-se que existe um meio elástico, em que normalmente é o ar. Consoante o afastamento entre os elementos, podemos obter até mais 6 dB de isolamento sonoro, relativamente à soma dos R individuais dos elementos constituintes. Verifica-se os 6 dB caso os panos do elemento sejam de igual massa e não seja considerada caixa-de-ar entre eles.

Os elementos duplos constituem um sistema de massa-ar-massa com uma frequência global (massa+ar+massa), como se fosse um único elemento, ou seja, um elemento simples.

Para elementos duplos os modelos teóricos permitem estudar o comportamento dos elementos conforme a frequência, o que permite chegar à frequência de ressonância, f_0 , (conjunto) e à frequência de coincidência, f_c , (de cada elemento). A frequência de coincidência de cada elemento pode ou não ser igual.

$$f_0 = \frac{c}{2 \times \pi} \times \sqrt{\frac{\rho}{d} \times \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} = K \times \sqrt{\frac{1}{d} \times \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \text{ (Hz)} \quad (26)$$

Em que m_1 e m_2 são as massas superficiais dos elementos constituintes do elemento duplo em kg/m^2 , d é a espessura da caixa-de-ar em metros, e K depende se a caixa-de-ar está vazia ou se está totalmente preenchida por material absorvente sendo igual a 60 ou a 43 respetivamente.

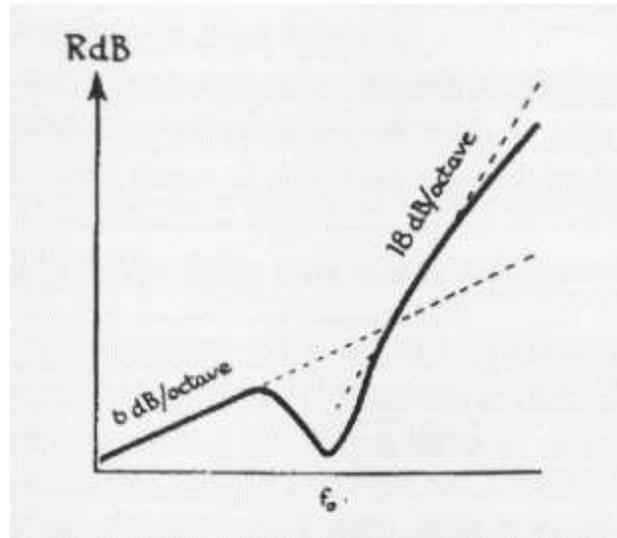


Figura 3.7 - Evolução do isolamento sonoro a sons aéreos para elementos duplos

Fonte: [Carvalho, 2003]

Da análise do gráfico acima, verificamos que a existência de caixa-de-ar não tem qualquer influência até f_0 , ou seja, até à frequência de ressonância comporta-se como um elemento simples. A partir deste ponto em relação aos elementos duplos têm a vantagem em relação aos elementos simples, pois o crescimento é muito superior, 18 dB por oitava enquanto os elementos simples crescem 9 dB por oitava.

Nos elementos duplos quando cada elemento não está em contacto com o outro, a redução sonora pode ser calculada em função da frequência:

- Para frequências que sejam menores que f_0 e até dois terços de f_0 , ou seja, o elemento comporta-se como um elemento simples ($m=m_1+m_2$):

$$R = 20 \times \log[(m_1 + m_2) \times f] - 47 \text{ (dB)} \quad (27)$$

- Para frequências próximas de f_0 a redução sonora sofre um decréscimo, d' :

$$d' \approx -9,45 \times \log \eta_a + 33,5 \quad (28)$$

Em que η_a corresponde ao fator de perdas do material absorvedor existente na caixa-de-ar (%).

- Para frequências superiores a f_0 e inferiores a f_1 , a redução sonora é determinada da seguinte forma:

$$R = R_1 + R_2 + 20 \times \log(f \times d) \text{ (dB)} \quad (29)$$

Em que d corresponde à espessura da caixa-de-ar, R_1 e R_2 são a redução sonora de cada pano do elemento duplo e f_1 é a primeira ressonância do sistema (elemento duplo) e é dada pela seguinte equação:

$$f_1 = \frac{c}{(2\pi \times d)} \approx \frac{55}{d} \text{ (Hz)} \quad (30)$$

- Para frequências superiores à primeira ressonância do sistema, f_1 a redução sonora é dada pela seguinte equação:

$$R = R_1 + R_2 \text{ (dB)} \quad (31)$$

Estas expressões normalmente não são usadas como método de cálculo para o índice de redução sonora, uma vez que não se consegue garantir que os panos do elemento duplo se comportem isoladamente.

3.2.1.3 Modelos de cálculo experimentais

Como os modelos teóricos não abarcam todas as situações reais, deu-se a necessidade de criar modelos experimentais.

Para paredes simples estudou-se dois métodos, o Método de Sharp, o Método Empírico.

Para a quantificação das transmissões marginais, estudou-se o método da norma EN12354 e o método simplificado.

a) Método de Sharp:

O método de Sharp é um método gráfico que determina de forma aproximada o índice de redução sonora. Este método depende da frequência e da massa do elemento.

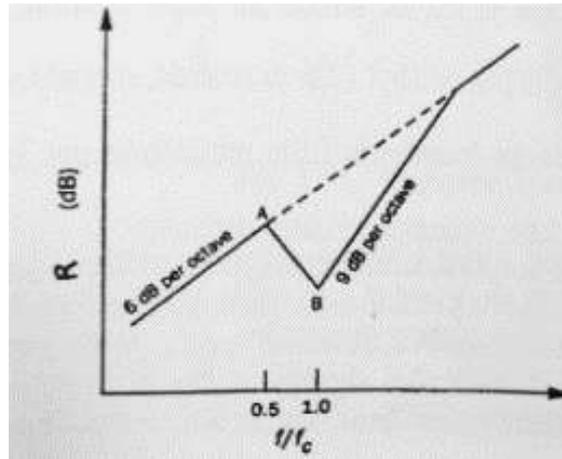


Figura 3.8 – Método gráfico para elementos simples

Fonte: [Carvalho, 2003]

A construção deste gráfico é feita a partir dos declives do segmento de reta de 6 e 9dB por oitava e pelos pontos A e B, que se obtêm pelas seguintes equações:

$$R_A = 20 \times \log(f_c \times m) - 54 \text{ (dB)} \quad (32)$$

$$R_B = 20 \times \log(f_c \times m) + 10 \times \log \eta - 45 \text{ (dB)} \quad (33)$$

Sendo que η corresponde ao fator de perdas, que se pode encontrar no Quadro 7, e m é a massa superficial do elemento expresso em kg/m^2 e f_c é a frequência crítica em Hz.

b) Método Empírico (Método de Sharp Simplificado)

O método empírico permite o cálculo do índice de redução sonora sem a contabilização das transmissões marginais, para tal podemos utilizar as seguintes equações:

$$R_w = 20,4 \times \log(m) - 1,5 (\pm 3 \text{ dB}) \text{ se } m < 25 \text{ kg/m}^2 \text{ (dB)} \quad (34)$$

$$R_w = 12,6 \times \log(m) + 12,6 \text{ se } 25 \leq m \leq 150 \text{ kg/m}^2 \text{ (dB)} \quad (35)$$

$$R_w = 37,5 \times \log(m) - 42 \text{ se } m > 150 \text{ kg/m}^2 \text{ (dB)} \quad (36)$$

c) Transmissões Marginais – Método da Norma EN12354

Normalmente os ruídos de percussão transmitem-se mais facilmente que os ruídos aéreos por todo o edifício, tendo dois modos de propagação, por via direta ou marginal.

A contabilização das transmissões marginais no cálculo do índice de redução sonora é importante quando estudamos dois compartimentos, através do seu elemento de separação. A metodologia preconizada na Norma EN12354-1 é direcionada a elementos homogêneos, e consiste na aplicação da seguinte expressão:

$$R'_w = -10 \times \log_{10} \left(10^{\frac{-R_{Dd,w}}{10}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{\frac{-R_{Ff,w}}{10}} + \sum_{f=1}^n 10^{\frac{-R_{Df,w}}{10}} + \sum_{F=1}^n 10^{\frac{-R_{Fd,w}}{10}} \right) (dB) \quad (37)$$

Em que:

$R_{Dd,w}$ – corresponde ao índice de redução sonora relativo à transmissão direta;

$R_{Ff,w}$ – é o índice de redução sonora relativo ao caminho de transmissão Ff;

$R_{Df,w}$ – é o índice de redução sonora relativo ao caminho de transmissão Df;

$R_{Fd,w}$ – é o índice e redução sonora relativo ao caminho Fd;

n – corresponde ao número total de elementos marginais (n=4).

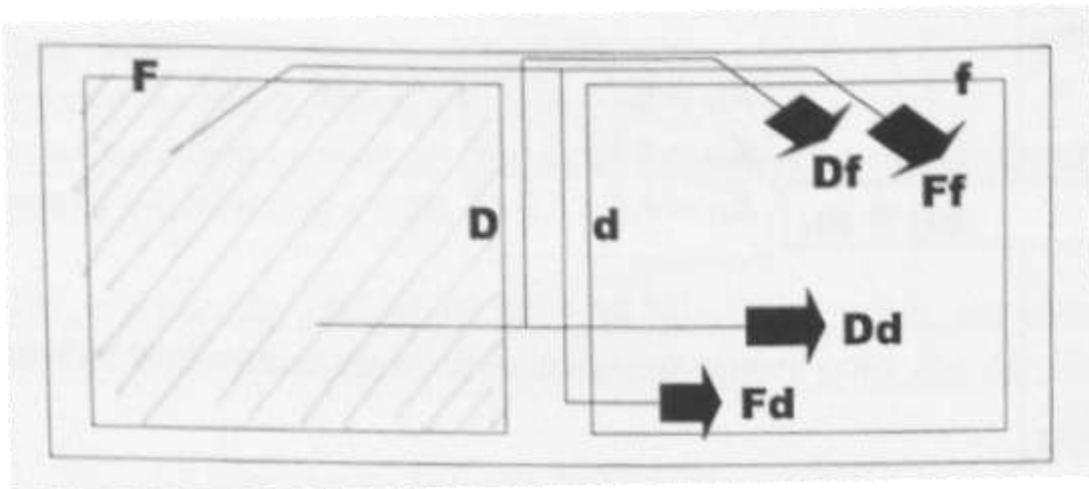


Figura 3.9 - Diferentes tipos de caminhos de transmissões marginais existentes

Fonte: [Carvalho, 2003]

O índice de redução sonora relativo às transmissões diretas, $R_{Dd,w}$, é igual ao índice de redução sonora do elemento de separação, R_w . Já os restantes índices de redução sonora relativos aos caminhos marginais são calculados pelas seguintes expressões:

$$R_{F,w} = \frac{R_{F,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Ff,w} + K_{Ff} + 10 \times \log\left(\frac{S_s}{l}\right) \text{ (dB)} \quad (38)$$

$$R_{Fd,w} = \frac{R_{F,w} + R_{d,w}}{2} + \Delta R_{Fd,w} + K_{Fd} + 10 \times \log\left(\frac{S_s}{l}\right) \text{ (dB)} \quad (39)$$

$$R_{Df,w} = \frac{R_{D,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Df,w} + K_{Df} + 10 \times \log\left(\frac{S_s}{l}\right) \text{ (dB)} \quad (40)$$

Em que:

$R_{i,w}$ – é o índice de redução sonora para o elemento i (dB);

$R_{j,w}$ é o índice de redução sonora, para o elemento j (dB);

$R_{d,w}=R_{D,w}=R_{s,w}$ – são o índice de redução sonora para o elemento de separação (dB);

$\Delta R_{ij,w}$ – corresponde ao acréscimo de isolamento sonoro no caminho ij (dB);

K_{ij} – é o índice de redução de transmissão de vibrações pelo caminho ij (dB);

S_s – é a superfície do elemento de separação e é expressa em m^2 ;

l – corresponde ao comprimento comum entre o elemento de separação e o marginal em metros.

- Para uma junção em T temos os seguintes índices de redução de transmissão de vibrações:

$$K_{13} = 5,7 + 14,1M + 5,7M^2 \text{ (dB)} \quad (41)$$

$$K_{12} = 5,7 + 5,7M^2 \text{ (dB)} \quad (42)$$

$$K_{23} = 5,7 + 5,7M^2 \text{ (dB)} \quad (43)$$

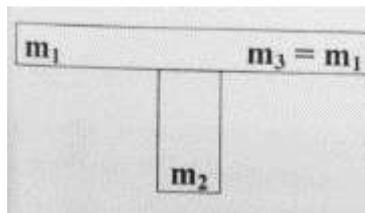


Figura 3.10 – Esquema de uma junção rígida em T

Fonte: [EN12354-1]

- Para uma junção rígida em X temos os seguintes índices de redução de transmissão de vibrações:

$$K_{13} = 8,7 + 17,1M + 5,7M^2 \text{ (dB)} \quad (44)$$

$$K_{12} = 8,7 + 5,7M^2 \text{ (dB)} \quad (45)$$

$$K_{23} = 8,7 + 5,7M^2 \text{ (dB)} \quad (46)$$

Em ambos os tipos de junções:

$$M = \log\left(\frac{m_2}{m_1}\right) \quad (47)$$

O valor de m^2 corresponde à massa superficial da parede com transmissão direta e expressa-se em kg/m^2 .

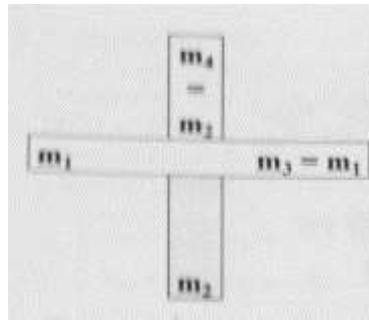


Figura 3.11 – Esquema de uma junção rígida em X

Fonte: [EN12354-1]

d) Transmissões Marginais pelo método simplificado

Caso se queira considerar as transmissões marginais de um modo muito simplificado podemos determinar o valor do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado, $D'_{nT,w}$, pela seguinte expressão:

$$\begin{aligned} D_{nT,w} &= R'_w + 10 \times \log\left(\frac{0,16 \times V}{S \times T_0}\right) = (R_w - K_{TM}) + 10 \times \log\left(\frac{0,16 \times V}{S \times T_0}\right) \\ &= R_w + 10 \times \log\left(\frac{0,16 \times V}{S \times T_0}\right) - K_{TM} \end{aligned} \quad (48)$$

Em que:

S – corresponde à área do elemento de separação em m^2 ;

V – é o volume do compartimento recetor em m^3 ;

K_{TM} – é a constante que atende às transmissões marginais (de 0 a 7 dB).

Podemos considerar que, em casos mais correntes, para elementos em que o índice de redução sonora esteja entre os 35 a 45 dB podemos considerar que o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea corresponde à seguinte expressão:

$$D_{nT,w} \approx R_w - 2 \text{ (dB)} \quad (49)$$

Segundo o ITE8 do LNEC:

- Se $R_w < 35$ dB, despreza-se o efeito das transmissões marginais;
- Se $35 \leq R_w \leq 45$ dB, $TM=3$ dB;
- Se $R_w > 45$ dB é aconselhável recorrer à verificação do comportamento no local, pois as previsões podem ser bastantes falíveis (podem assumir valores da ordem dos 5 dB, ou superiores, excepcionalmente até 10 dB).

Para paredes duplas existem várias metodologias para o cálculo de $R(f)$ ou R_w , entre elas destacam-se o Método de Sharp, o Método de Meisser, o Método empírico e o cálculo das transmissões marginais pela Norma EN12354.

e) Método de Sharp para elementos duplos

Tal como para elementos simples, o método de Sharp para elementos duplos consiste num método gráfico que depende da frequência.

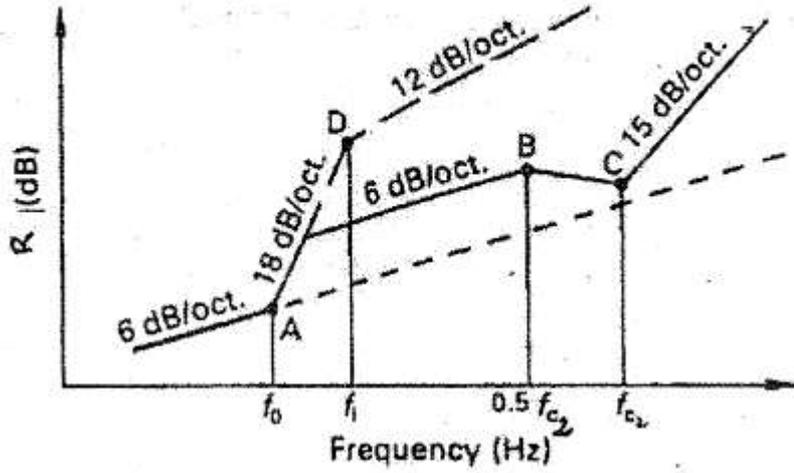


Figura 3.12 – Gráfico de Sharp para elementos duplos

Para a construção deste gráfico tem-se o auxílio das seguintes expressões:

$$f_0 = 80 \times \sqrt{\frac{(m_1 m_2)}{d \times (m_1 m_2)}} \quad (50)$$

$$f_1 = \frac{55}{d} \quad (51)$$

$$f_{c_2} = \frac{55 \times c^2}{c_{L2} \times h_2} \quad (52)$$

$$RA = 20 \times \log(m_1 + m_2) + 20 \times \log(f_0) - 48 \quad (53)$$

RB coincide com RB1 caso a caixa-de-ar não seja preenchida por um material absorvente, caso contrário corresponde a maior dos valores de RB1 e RB2:

$$RB1 = RA + 20 \times \log\left(\frac{f_{c_1}}{f_0}\right) - 6 \quad (54)$$

$$RB2 = 20 \log(m_1) + 20 \log b + 30 \log f_{c_2} + 20 \log \left[1 + \frac{(m_2 f_{c_1}^{0,5})}{(m_1 f_{c_2}^{0,5})} \right] \quad (55)$$

- Caso os apoios estejam em linha-linha (tipo mais adequado):

$$RB2 = 20 \log(e \times m_1) + 40 \log(f_{c_2}) - 99 \quad (56)$$

- Caso estejam em linha-Ponto:

$$RB2 = 20 \log(e \times m_1) + 40 \log(f_{c_2}) - 99 + 20 \log \left[1 + \frac{(m_2 f_{c_1})}{(m_1 f_{c_2})} \right] - 105 \quad (57)$$

- Caso estejam em ponto-ponto:

$$RC = RB + 6 + 10 \log \eta_2 \text{ se } fc_2 \neq fc_1 \quad (58)$$

$$RC = RB + 6 + 10 \log \eta_2 + 5 \log \eta_1 \text{ se } fc_2 = fc_1 \quad (59)$$

Em que:

m_i – corresponde à massa superficial do painel i do elemento em kg/m^2 ;

c – é a velocidade do som no ar em m/s ;

c_{Li} – é a velocidade do som no material (consultar quadro 7);

h_i – é espessura do material em metros, e e é o espaçamento de grelha retangular entre pontos de suporte do painel em metros;

b – é o espaçamento entre os suportes em linha em metros;

d – corresponde à espessura de caixa-de-ar e expressa-se em metros.

f) Método de Meisser para elementos duplos

Para a obtenção o valor do índice de redução sonora, segundo Meisser temos que determinar a redução sonora para a frequência de 500 Hz de acordo com a seguinte expressão:

$$R_{500 \text{ Hz}} = 13,3 \times \log(m_1 + m_2) + K + 13,4 \text{ (dB)} \quad (60)$$

Os valores de K variam com a espessura da caixa-de-ar, podendo ser igual a 4 dB quando a caixa-de-ar tem cerca de 4 a 5 cm e estão preenchida com matéria absorvente, e igual a 9 dB para caixa-de-ar com espessura superior a 10 cm.

Por conseguinte com o valor calculado para a frequência dos 500 Hz a partir traça-se um segmento de reta com declive de 6 dB por oitava. O eixo das abcissas segue uma escala linear enquanto o eixo das ordenadas representa uma escala logarítmica.

No eixo das abcissas representam-se a frequência de ressonância do conjunto (f_0), as frequências críticas de cada painel do elemento duplo (f_{c1} e f_{c2}) e ressonância da caixa-de-ar, f_{n1} . A frequência de ressonância será obtida pela seguinte expressão:

$$f_0 = 84 \times \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{d \times m_1 \times m_2}} \text{ (Hz)} \quad (61)$$

A distância entre os elementos é dado por d e expressa-se em metros.

g) Método Empírico

Para elementos duplos também podemos determinar de uma forma muito singular os valores do índice de redução sonora, R_w através as formulas acima citadas (30), (31) e (32) para elementos simples, com um acréscimo de 3 a 5 dB.

h) Transmissões Marginais – Norma EN 12354

As transmissões marginais calculam-se através do mesmo método de cálculo acima referido para os elementos simples.

i) Reforço de elementos simples

Para os elementos duplos, podemos ainda recorrer ao método de reforço de elementos simples, o qual corresponde a um método gráfico, em que se estima o aumento da redução sonora (ΔR_w) através do segundo elemento constituinte da solução construtiva.

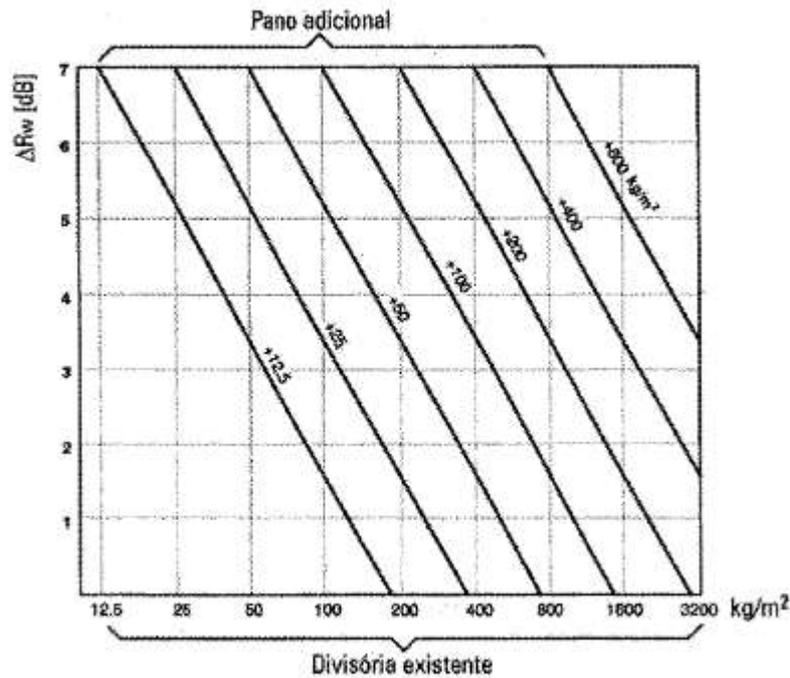


Figura 3.13 – Método gráfico para o cálculo de acréscimo do índice de redução sonora [Silva,1978]

Este acréscimo de isolamento sonoro depende da frequência de ressonância do conjunto total, ou seja, a parede simples mais o reforço adicional.

$$f_0 = K \times \sqrt{\left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}\right)} \quad (dB) \quad (62)$$

Em que m corresponde à massa superficial em kg/m^2 e em que K depende se o reforço é colocado diretamente sobre a estrutura base ou se é colocado com montantes de madeira ou metal. Dependendo de cada situação utiliza-se as seguintes expressões:

$$K = 160 \times \sqrt{s'} \quad (63)$$

$$K = \sqrt{\frac{2842}{d}} \quad (64)$$

Em que s' corresponde à rigidez dinâmica MN/m^3 , e d corresponde à espessura da caixa-de-ar em metros.

3.2.1.4 Paredes Exteriores

O isolamento sonoro de paredes exteriores, $D_{2m,nT,w}$, pode ser determinado experimentalmente ou estimado através do Método de previsão.

Segundo o método experimental o cálculo deste isolamento faz-se pela medição do nível de pressão sonora medido a 2 metros da fachada do edifício ($L_{1,2m}$) e do nível de pressão sonora do interior do edifício (L_2), o qual se corrige para um tempo de reverberação de referência igual a 0,5s.

Assim podemos obter o isolamento sonoro de paredes exteriores através da seguinte expressão:

$$D_{2m,nT,w} = L_{1,2m} - L_2 - 10 \times \log\left(\frac{T_0}{T_2}\right) \text{ (dB)} \quad (65)$$

Dos 16 valores da banda de frequência obtém-se o valor único por ajuste com a curva de referência que se encontra na Norma NP 717-1.

Por o método de previsão o $D_{2m,nT,w}$ é determinado com recurso ao $R_{\text{médio}}$ da parede exterior.

O $R_{\text{médio}}$ é calculado pela homogeneização da parede opaca com a zona de envidraçados.

$$R_{\text{médio}} = 10 \times \log\left(\frac{1}{\tau_m}\right) = 10 \times \log\left[\frac{\sum S_i}{\sum(\tau_i \times S_i)}\right] = 10 \times \log\left[\frac{S_T}{\sum\left(10^{\frac{-R_i}{10}} \times S_i\right)}\right] \quad (66)$$

Para o valor do índice de redução sonora dos envidraçados podemos consultar os catálogos dos fabricantes consoante o tipo de envidraçado usado na solução construtiva ou então consultar o seguinte quadro:

Quadro 8 – Valores do R_w obtidos em laboratório

Elemento	125 (Hz)	250 (Hz)	500 (Hz)	1000 (Hz)	2000 (Hz)	4000 (Hz)	R_w (dB)
Tijolo de 7cm com 2cm de argamassa	33	29	36	39	44	46	39
Tijolo de 11cm com 2cm de argamassa	34	33	41	50	56	58	45
Alvenaria de blocos de betão normal (9 cm)	36	32	42	50	56	58	45
Alvenaria de blocos de betão normal (17 cm)	39	42	50	58	64	67	54
Betão normal	36	36	45	51	58	63	48
Betão armado	32	42	49	55	61	66	52
Dupla de alvenaria de tijolo com caixa-de-ar com lã mineral (17 cm de espessura total)	38	42	45	46	53	59	49
Contraplacado (6mm)	17	15	20	24	28	27	24
Contraplacado (18mm)	24	22	27	28	25	27	27
Vidro simples (6mm) com caixilho (pesado)	11	24	28	32	27	35	29
Vidro simples (8mm) com caixilho (pesado)	18	25	31	32	28	36	31
Vidro simples 4mm	17	20	26	32	33	-	29
Vidro simples 5mm	19	22	29	33	29	-	30
Vidro simples 6mm	18	23	30	35	27	-	31
Vidro laminado 6mm	20	23	29	34	32	-	32
Vidro laminado 8mm	20	25	32	35	34	-	33
Vidro duplo 4-(6 a 16)-4	21	17	25	35	37	-	29
Vidro duplo 6-(6 a 16)-4	21	20	26	38	37	-	32
Vidro duplo 6-(6 a 16)-6	20	18	28	38	34	-	31
Porta leve (43mm de espessura e 9 kg/m ²)	12	13	14	16	18	24	17
Porta maciça (43mm de espessura e 28 kg/m ²)	17	21	26	29	31	34	29

Fonte: Adaptado de Silva,1978/Bies&Hansen,1996 e EN12354

O índice de isolamento sonoro da parede exterior, $D_{2m,nT,w}$ é influenciado pelas transmissões marginais, sendo-lhe retirado 2 dB ao $R_{médio}$.

$$D_{2m,nT,w} \approx R_{médio,w} - 2 \text{ (dB)} \quad (67)$$

Assim o valor do índice de isolamento sonoro entre o exterior dos edifícios e os compartimentos interiores calcula-se a partir do R'_w com a seguinte expressão:

$$D_{2m,nT,w} = R'_w + 10 \times \log \left(\frac{0,16 \times V}{S \times T_0} \right) \text{ (dB)} \quad (68)$$

Em que, R'_w corresponde ao índice de redução sonora aparente “in situ” em dB, A_0 é a área de absorção sonora de referência e igual a 10 m^2 , T_0 é o tempo de reverberação de referência igual a $0,5\text{s}$, V é o volume do compartimento recetor em m^3 e o S é a área do elemento de separação em m^2 .

As transmissões marginais podem ser desprezados, dado que normalmente os valores do isolamento sonoro a sons de condução aérea são baixos. No entanto adota-se um valor de 2 dB para contabilizar as transmissões que eventualmente possam existir.

Na determinação do índice de redução sonora deve-se ainda ter em conta a forma da fachada e a qual é simbolizada pelo ΔL_{fs} , que pode ser considerado no pior caso como um decréscimo de 1 dB no isolamento sonoro, ou então consultado na figura a baixo.

$$R'_w \approx R_w - TM|TP + \Delta L_{fs} \approx R_w - 2 - 1 = R_w - 3 \text{ (dB)} \quad (69)$$

ΔL_{fs} [dB]	plane facade	gallery			gallery			gallery			gallery		
absorption coef (α_w)	does not apply	$\geq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\geq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\geq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\geq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$
line-of-sight on facade:											does not apply		
<1,5 m	0	-1	-1	0	-1	-1	0	0	0	1			
1,5-2,5m	0	does not apply			-1	0	2	0	1	3			
>2,5m	0				1	1	2	2	2	3	3	4	6

Figura 3.14 - Tabela para a determinação do efeito de forma da fachada

Fonte: [EN12354-3]

3.2.2. Ensaio acústico

A realização do ensaio segue as orientações prescritas na Norma NP EN ISO 140-4.

Esta norma descreve a forma de se proceder ao ensaio tendo em conta o tipo de equipamento utilizado, o campo sonoro da sala emissora, a distância entre microfones (quando usado mais que um) altifalantes e superfície do compartimento de estudo e o número de posições mínimo para o microfone e para o altifalante.

O nível de pressão sonora entre os compartimentos em que se está a realizar os ensaios é obtido pela criação de um campo sonoro no compartimento emissor, medindo-se o nível de pressão sonora no compartimento emissor e no compartimento recetor. Estas medições não devem ser efetuadas caso existam interferências devido a fenômenos da natureza (tais como trovões ou chuvas fortes).

Mediante a gama de frequências definidas (100 a 3150 Hz) a fonte deve ser fixa e ter um espectro sonoro contínuo.

Todas as medições efetuadas devem ser realizadas em terços de oitava, sendo que o espectro sonoro do compartimento emissor não deve apresentar uma diferença superior a 6 dB em bandas de terço de oitavas adjacentes.

A potência sonora deve ser suficientemente alta para que o nível de pressão no compartimento recetor seja no mínimo superior em 10 dB ao ruído de fundo, assim caso tal não se verifique deve proceder-se à aplicação de correções descritas na presente norma.

Para a realização deste ensaio pode-se usar uma ou mais que uma fonte sonora. Neste caso de estudo foi utilizada uma única fonte sonora, como tal devemos perfazer pelo menos duas posições.

Ao estudar compartimentos com volumes diferentes, o que tiver maior volume deve ser considerado como compartimento emissor, uma vez que será avaliada a diferença padronizada de nível D_{nT} .

Relativamente aos equipamentos utilizados a norma indica a distância mínima de separação entre eles.

Quadro 9 - Distância mínimas preconizadas na NP EN ISO 140-4

Entre posições do microfone	0,70m entre posições
Entre posições da fonte sonora	0,70m entre posições
Entre qualquer posição do microfone e contorno do compartimento	0,50m entre o microfone e o contorno
Entre qualquer posição da fonte sonora e contorno do compartimento	0,50m entre a fonte sonora e o contorno
Entre qualquer posição do microfone e da fonte sonora	1,0m entre a posição do microfone e da fonte
Entre pelo menos duas posições da fonte sonora	1,4m entre a posição da fonte sonora

No ensaio realizado foi utilizado um único microfone, como tal segundo a norma são necessárias pelo menos 5 posições do microfone diferentes dentro do compartimento recetor e pelo menos duas posições diferentes da fonte sonora no compartimento emissor, assim sendo um número total de 10 medições (uma medição para cada posição do microfone em cada posição do altifalante).

O tempo de medição para cada medição é de 6s para cada frequência abaixo dos 400Hz, sendo que para frequências superiores acima dos 400Hz poderá ser reduzido este tempo para 4s.

Neste tipo de ensaio é conveniente medir o nível de ruído de fundo garantindo assim que o nível no compartimento recetor não é afetado de sons indesejados.

O nível de ruído de fundo deve ser inferior a 6 dB (preferencialmente mais que 10 dB) em relação à sobreposição (combinação) do ruído de fundo sinal emitido. Caso esta diferença se

encontre entre 6 e os 10 dB deve-se proceder a uma correção do nível sonoro, para tal será usada a seguinte expressão:

$$L_2 = 10 \times \log \left(10^{\frac{L_{sb}}{10}} - 10^{\frac{L_b}{10}} \right) \quad (70)$$

Em que:

L_2 -Nível sonoro do sinal ajustado (dB);

L_{sb} - Nível sonoro combinado (do sinal mais o ruído de fundo) (dB);

L_s - Nível sonoro do ruído de fundo (dB);

As medições para o tempo de reverberação, segundo a norma, deve resultar pelo menos seis medições de decaimento para cada banda de frequência e para tal o altifalante deve ter uma única posição enquanto o microfone deve ser posicionado em posições distintas. Para cada posição proceder-se-á respetivas medições correspondentes à gama de frequências pré-definidas.

A norma ISO 717-1 permite, a partir dos valores obtidos em cada frequência, chegar a um único valor, designado por índice.

O valor do índice de isolamento sonoro a sons aéreos corresponderá ao valor correspondente à frequência de 500 Hz, depois de ser feito o ajuste da curva de referência à curva real.

O método para proceder ao ajuste está descrito na presente norma e corresponde a mover a curva de referência, para cima ou para baixo, fazendo incrementos de 1 dB até que a soma dos desvios desfavoráveis seja próximo de 32 dB.

O desvio desfavorável corresponde à diferença entre o valor medido e o valor de referência, quando o valor medido é menor que o valor de referência.

Para a determinação do isolamento sonoro R é feito um ensaio em bandas de frequência de terços de oitava, em que as frequências variam entre 100 Hz e 3150 Hz das quais resultarão 16 resultados materializados pela seguinte expressão:

$$R(f) = L_1(f) - L_2(f) + 10 \times \log \left(\frac{S}{A_2(f)} \right) \quad (71)$$

Em que:

L1 (f) – Nível sonoro do compartimento emissor (dB);

L2 (f) – Nível sonoro do compartimento recetor (dB);

S – Superfície do elemento construtivo que separa os compartimentos (m²);

A_{2(f)} – Superfície de absorção sonora do compartimento recetor por frequência (m²)

Para a obtenção do nível sonoro do compartimento recetor usamos a seguinte expressão:

$$L_2(f) = 10 \times \log \left(10^{\frac{L_2\alpha}{10}} - 10^{\frac{L_{ref}}{10}} \right) \quad (72)$$

L₂α corresponde ao nível sonoro do compartimento recetor e que resulta da combinação do som proveniente da fonte e do ruído de fundo e o L_{ref} é o nível devido ao ruído de fundo no compartimento recetor.

Para chegarmos à superfície de absorção sonora do compartimento emissor, utilizamos o valor do tempo de reverberação de cada frequência e o volume do compartimento recetor como demonstra a seguinte expressão:

$$T_2(f) = \frac{0,16 \times V}{A_2(f)} \leftrightarrow A_2(f) = \frac{0,16 \times V}{T_2(f)} \quad (73)$$

O V corresponde ao volume do compartimento recetor e expressa-se em m³, enquanto o T₂ caracteriza o tempo de reverberação e expressa-se em segundos (s).

Através dos 16 valores a que se chega constrói-se uma curva que relaciona o respetivo R com cada frequência considerada. Esta curva sobrepõe-se com a curva de referência dada pela norma EN ISO 717-1, abaixo referenciada:

Tabela 1 – Valores da curva de referência

Frequência (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
Valor Referência	33	36	39	42	45	48	51	52	53	54	55	56	56	56	56	56

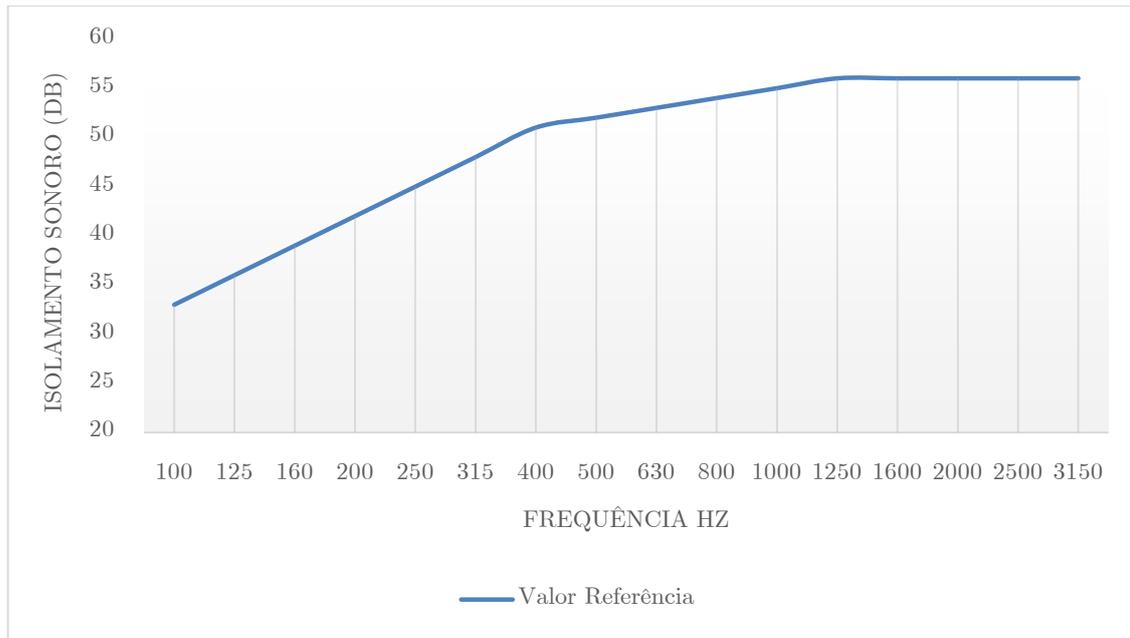


Gráfico 1 - Curva de referência para o ajuste

Após o ajuste à frequência de 500 Hz temos o valor único correspondente ao índice de redução sonora R_w .

Com as medições feitas nos ensaios chegamos a um valor de R'_w que corresponde ao R_w com a consideração das transmissões marginais.

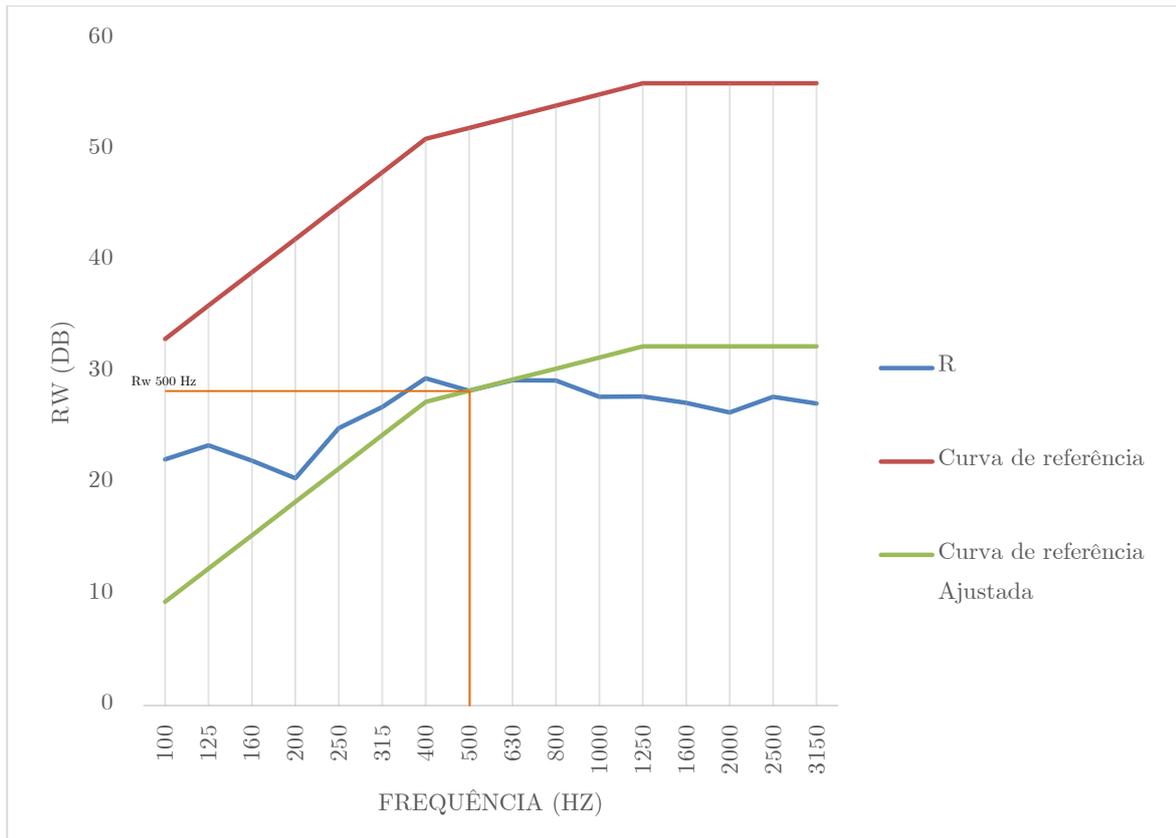


Gráfico 2 - Exemplo do cálculo do índice de redução sonora a sons aéreos após o ajuste à curva de referência

O índice de isolamento sonoro pode ser definido por:

$$D_{nT}(f) = L_1(f) - L_2(f) + 10 \times \log\left(\frac{T_2(f)}{T_0}\right) \quad (74)$$

em que T_2 e T_0 representam o tempo de reverberação no compartimento de receção e o tempo de reverberação de referência (que toma o valor de 0,5 s), respetivamente. Tendo em atenção a definição destas duas grandezas percebe-se que, quanto maior for a diferença entre os níveis de pressão nos compartimentos emissor e recetor, maiores serão os índices de redução sonora e de isolamento sonoro e melhor será o isolamento oferecido pelo elemento de separação.

O cálculo do termo de adaptação correspondente, C ou C_{tr} , tem em conta o espectro considerado, neste caso em bandas de 1/3 de oitavas.

O termo de adaptação C_{tr} é utilizado no cálculo do isolamento de fachadas, pois é o que corresponde ao ruído de tráfego urbano, enquanto no cálculo do isolamento entre compartimentos deve-se usar o termo de adaptação C . No entanto segundo a norma ISO 717-1 pode-se apresentar ambos os termos de adaptação.

Os termos de adaptação podem ser determinados por:

$$C_j = X_{Aj} - X_w \quad (75)$$

Em que, o j é índice para os espectros do som $n^{\circ}1$ e $n^{\circ}2$, sendo que o $n^{\circ} 1$ corresponde ao espectro para o cálculo do C e o $n^{\circ} 2$ ao espectro do C_{tr} .

O termo X_{Aj} é calculado pela seguinte expressão:

$$X_{Aj} = -10 \times \log \sum 10^{\frac{(L_{ij}-X_i)}{10}} \quad (dB) \quad (76)$$

O termo X_j é o valor da curva de referência correspondente à frequência de 500 Hz, quando se verifica a condição em que o somatório dos desvios desfavoráveis em módulo, ou seja, o somatório da diferença entre os valores da curva de referência e dos valores obtidos nas medições seja inferior a 32 dB.

$$\left| \sum (D_{ref^a} - D_n) \right| < 32 \text{ dB} \quad (77)$$

O termo de adaptação, nos casos em que a percentagem de área de envidraçado em relação à área da fachada que se está a avaliar é inferior a 60%, pode ser desprezado (C_{tr} ou $C=0$).

3.3. Isolamento sonoro a sons de percussão

3.3.1. Métodos de Cálculo

Para o cálculo do isolamento a sons de percussão temos 3 métodos possíveis de cálculo, o Método de Cremer, o Método Simplificado e o Método do invariante.

a) Método de Cremer

O Método de Cremer encontra-se descrito na Norma EN12354-2:2000 no anexo B, este método consiste na aplicação da seguinte expressão:

$$L_n \approx 155 - 30 \times \log(m) + 10 \times \log(T_s) + 10 \times \log(\sigma) + 10 \times \log\left(\frac{f}{1000}\right) \quad (78)$$

(dB por terço oit.)

Sendo que m é a massa superficial do elemento em kg/m^2 , T_s o tempo de reverberação estrutural em segundos e σ é o fator de radiação.

b) Método simplificado

Uma vez que calcular o T_s e o σ é muito complexo, a Norma EN12354-2:2000 propõe um método simplificado para calcular o índice de isolamento a sons de percussão.

Este método consiste em aplicar a seguinte expressão:

$$L'_{nT,w} = L_{n,w} + K_{TM} - B = (164 - 35 \times \log m) - 10 \times \log\left(\frac{0,16 \times V}{A_0 T_0}\right) + K_{TM} \quad (79)$$

Para obtermos o valor de K_{TM} tem-se de consulta o quadro 10, abaixo indicado.

Quadro 10 – Fator de correção devido à transmissão marginal K_{TM} (dB)

Massa do Pavimento (kg/m ²)	Massa média superficial das paredes do compartimento inferior (kg/m ²)								
	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	1	0	0	0	0	0	0	0	0
150	1	1	0	0	0	0	0	0	0
200	2	1	1	0	0	0	0	0	0
250	2	1	1	1	0	0	0	0	0
300	3	2	1	1	1	0	0	0	0
350	3	2	1	1	1	1	0	0	0
400	4	2	2	1	1	1	1	0	0
450	4	3	2	2	1	1	1	1	1
500	4	3	2	2	1	1	1	1	1
600	5	4	3	2	2	1	1	1	1
700	5	4	3	3	2	2	1	1	1
800	6	4	4	3	2	2	1	1	1
900	6	5	4	3	3	2	2	2	2

Fonte: EN ISO 12354 – 2 (2000)

No que diz respeito a transmissões que se dão na horizontal, ou na diagonal a expressão (75) é afetada de um fator que decresce entre 2 a 7 dB e é dado em função da massa superficial da massa vertical.

c) Método do invariante

O Método do Invariante utiliza um valor global $R_w + L_{n,w}$, em que após o cálculo do R_w e com recurso ao quadro 11 podemos determinar o valor referente ao $L_{n,w}$, o qual depende do tipo revestimento da laje.

$$L'_{nT,w} = L_{nT,w} + TM \quad (=) \quad L_{nT} = (L_{nw} + R_w) - R_w - \Delta L_w - 10 \times \log \left(\frac{0,16 \times V}{A_0 \times T_o} \right) \quad (80)$$

Quadro 11 – Valores do método do Invariante [Silva, 1978]

Tipo de Pavimento	$R_w + L_{n,w}$ (dB/oitava)
Laje de betão não revestida (espessuras correntes)	135
Laje de betão revestida com tacos de madeira	120
Laje de betão com lajeta flutuante revestida com tacos de madeira	115
Pavimento de vigotas pré-esforçadas c/blocos de cofragem e betão	125
Laje de betão c/ piso flutuante de madeira	117

Pode-se ainda calcular pela expressão (76) por banda de frequência.

$$R + L_n = K + 30 \times \log f \quad (81)$$

O valor de K depende do tipo de banda considerado. Como tal se for considerado banda de 1/1 oitava o valor de K é igual a 43, se for 1/3 oitava o valor de K é igual a 38.

Os valores de redução da transmissão de sons de percussão, devida ao revestimento de piso (ΔL_w) depende se o piso é resiliente ou flutuante e existem várias propostas.

Quadro 12 – Redução sonora de revestimentos de piso resilientes

Natureza do Revestimento de Piso			ΔL_w (dB)
Designação	Características		
	Massa Volúmica (kg/m ³)	Espessura (mm)	
Aglomerado composto de cortiça	400	6	16
	490	12	15
	750	3	11
	530	4	17
	430	4	14
Alcatifa	Tufada com base de látex		33
	Tufada com base de favos de borracha		35
	Flocada sobre tecido de juta		23
Revestimento resiliente composto	Aglom. Cortiça + MDF + Aglom. Cortiça (2mm)		20
	Aglom. Cortiça + MDF + Aglom. Cortiça (5mm)		20
	Aglom. Cortiça + MDF + Rubber Cork (2mm)		22
	Folha de madeira + MDF + Aglom. Cortiça (2mm)		20
	Folha de madeira + MDF + Aglom. Cortiça (5mm)		21
	Folha de madeira + MDF + Rubber Cork (2mm)		21

Quadro 13 – Redução sonora de revestimentos de piso flutuantes

Natureza do Revestimento de Piso			ΔL_w (dB)	
Designação	Características			
	Massa Volúmica (kg/m^3)	Espessura (mm)		
Lajeta Flutuante de 40 mm de espessura, com face aparente revestida com tacos de pinho	Aglomerado negro de cortiça	95	10	19
		100	20	20
		100	10	18
		102	6	17
		112	10	18
		120	40	20
		140	12	18
		194	5	15
Massa Volúmica do Regranulado (kg/m^3)				
	Feltro betuminoso com regranulação de cortiça	52		19
		66		20
		114		21
		146		20

3.3.2. Ensaio Acústico

O ensaio de isolamento sonoro a sons de percussão segue as diretrizes preconizadas na norma ISO 140-7:2008.

Tal como no ensaio do isolamento sonoro a sons aéreos, o ensaio é efetuado em terços de oitava e antes de se começar a fazer as medições dever-se estabilizar a fonte sonora durante cerca de 5s.

Para a medição do ruído de fundo segue as mesmas indicações que a norma estabelece para os sons aéreos.

O equipamento utilizado neste ensaio é uma máquina de percussão, colocada em 4 posições distintas distribuídas pelo compartimento emissor.



Figura 3.15 - Máquina de Percussão Kjaer&Bruel

A máquina de percussão deve estar a pelo menos 0,5m de distância das paredes do compartimento.

As medições do nível sonoro são feitas no compartimento recetor do ruído e realizam-se 6 medições combinando com as 4 posições da máquina de percussão com 4 posições do microfone.

As distâncias preconizadas na norma apresentam-se no quadro seguinte:

Quadro 14 - Distância mínimas preconizadas na NP EN ISO 140-7

Entre posições do microfone	0,70m entre posições
Entre qualquer posição do microfone e o limite do compartimento	0,50m entre o microfone e o contorno
Entre qualquer posição da fonte sonora e o contorno do compartimento	0,50m entre a fonte sonora e o contorno
Entre qualquer posição do microfone e da fonte sonora	1,0m entre a posição do microfone e da fonte
Colocação do microfone do sonómetro	1,2m a 1,5m do pavimento em análise

Para cada posição do microfone a medição deve ter um tempo de cerca de 6s.

O nível do ruído de fundo deve ser mais elevado 10 dB no compartimento recetor do que o nível de cada frequência considerada na banda de frequências.

O isolamento sonoro a sons de percussão (padronizado) é determinado pela seguinte expressão:

$$L'_{nT} = L_i(f) - 10 \times \log\left(\frac{T_2(f)}{T_0}\right) \text{ dB} \quad (82)$$

Em que L_i corresponde ao nível de pressão sonora medido no compartimento recetor e T_2 e T_0 são respetivamente o tempo de reverberação do compartimento recetor e o tempo de reverberação de referência (0,5s), ambos são dados em segundos (s). O L'_{nT} é o nível de pressão sonora médio padronizado.

As correções devidas ao ruído de fundo procedem-se da mesma forma que as correções para os sons aéreos.

O termo de adaptação usado no cálculo do índice de isolamento sonoro a sons de percussão é representado por C_l e determina-se pela seguinte expressão:

$$C_l = L - 15 - L'_{nT,w} \quad (83)$$

O valor de $L'_{nT,w}$ corresponde ao valor da curva de referência correspondente à frequência de 500 Hz, para a condição em que o somatório dos desvios desfavoráveis em módulo, ou seja, o somatório da diferença entre os valores da curva de referência e dos valores obtidos nas medições (L_n) seja inferior a 32 dB.

$$\left| \sum (L_{ref^a} - L_n) \right| < 32 \text{ dB} \quad (84)$$

O L_{ref^a} corresponde aos valores da curva de referência e o L_n aos valores obtidos nas medições dos sons de percussão.

Tabela 2 – Valores da curva de referência para sons de percussão

Frequência (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
Valor Referência	62	62	62	62	62	62	61	60	59	58	57	54	51	48	45	42

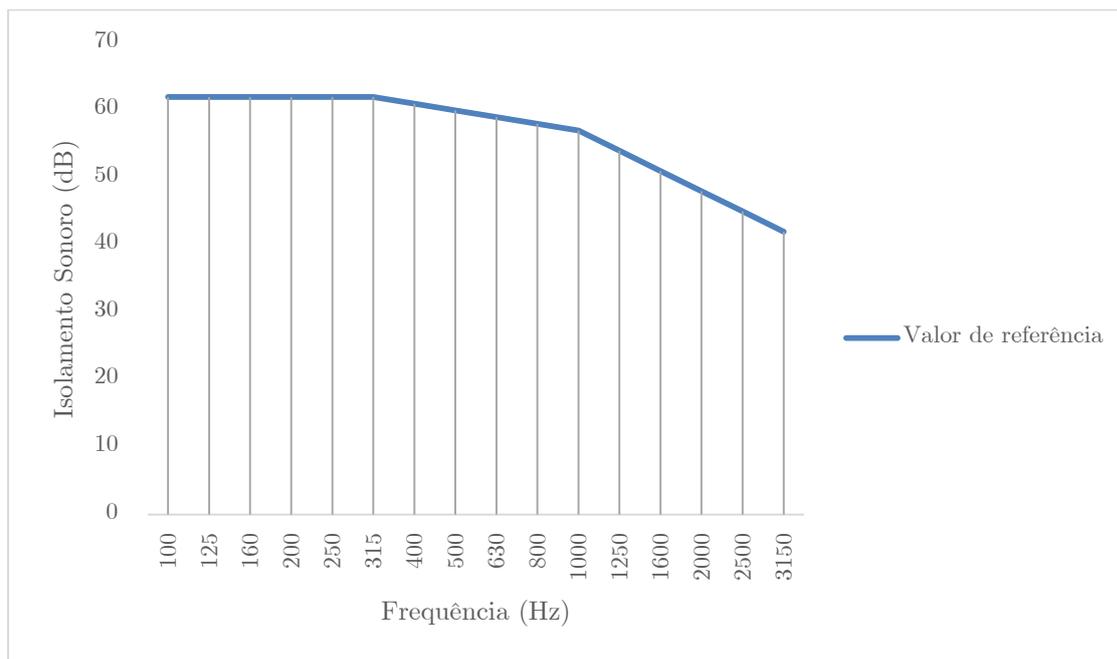


Gráfico 3 - Curva de referência para os sons de percussão

3.4. Tempo de reverberação

O tempo de reverberação define-se como sendo o intervalo de tempo que um som demora a extinguir-se após várias reflexões.

“Por definição é o tempo em que o nível de pressão sonora demora a decair 60 dB desde que a fonte sonora para de emitir.”

As ondas emitidas pela fonte sonora vão percorrer todo o espaço que está a ser estudado. Estas podem chegar diretamente ao microfone (recetor) ou então por reflexão após a interceção com os vários objetos existentes no compartimento em estudo. A cada reflexão que a onda sofre vai-se tornando mais fraca, devido às várias absorções que vai sofrendo ao longo do seu percurso até ao recetor e pela absorção do ar, criando assim o efeito de reverberação.

O efeito de reverberação pode ser quantificado através da fórmula de Sabine, a qual relaciona a absorção sonora, o volume e o tempo de reverberação.

$$T_2(f) = \frac{0,16 \times V}{A_2(f)} \leftrightarrow T = \frac{0,16 \times V}{\sum_{i=1}^n \alpha_i \times S_i} \quad (85)$$

Sendo:

$T_{(f)}$ – Tempo de reverberação para cada banda de frequência, em s;

V – Volume do compartimento, em m³;

$A_{(f)}$ – Área de absorção equivalente para cada banda de frequência, m²;

α_i – coeficiente de absorção do material i;

S_i – Superfície do material i, m².

É importante a medição do tempo de reverberação do compartimento recetor de forma a ser possível caracterizar o índice de isolamento padronizado para medições entre compartimentos e para a medição de fachadas.

A metodologia preconizada para a medição do tempo de reverberação encontra-se descrita na norma EN ISO 354:2003.

Na norma são estabelecidas as distâncias mínimas do posicionamento do microfone e deve respeitar as seguintes distâncias regulamentares:

- 1,7m entre posições diferentes do microfone;
- 1,0m entre a posição do microfone e as delimitações do compartimento;
- 2,0m entre o microfone e a fonte sonora;

Quanto ao posicionamento da fonte sonora omnidirecional esta deve estar separada entre posições de 3m e deve respeitar um número mínimo de duas posições, enquanto o microfone ter um mínimo de três posições por cada posição da fonte sonora, perfazendo assim um total de 6 posições.

Relativamente ao nível sonoro produzido pela fonte sonora utilizada deve garantir-se o valor mais baixo do nível sonoro no espectro de frequências considerado exceda o ruído de fundo verificado no compartimento de estudo em pelo menos 10 dB.

4. Metodologia do LNEC para a avaliação acústica dos edifícios de habitação

A metodologia do LNEC tem como objetivo a obtenção de uma classificação acústica para edifícios habitacionais localizados em zonas urbanas.

Esta metodologia avalia os edifícios atendendo o seu comportamento em relação ao ruído ambiente exterior, aos isolamentos sonoros entre espaços interiores e entre estes e o exterior, ao ruído de equipamentos de uso coletivo, aos tempos de reverberação de espaços e à distribuição dos espaços do próprio edifício.

Esta proposta de classificação assenta na avaliação de realidades físicas (níveis): uma relacionada com a vizinhança próxima; outra com o próprio edifício e outra relacionada com as características do desempenho do fogo (habitação).

Para avaliação do ambiente interior esta metodologia rege-se pelo Regulamento Geral do Ruído (RGR).

A aplicação desta metodologia consiste numa atribuição de pontuação de valoração (Pt) aos diversos indicadores ou à apreciação das condições específicas mencionadas nesta publicação.

O nível de avaliação acústica final (NAA) de cada nível físico (vizinhança, edifício, habitação) pode subdividir-se em 4 níveis, os quais são apresentados no seguinte quadro:

Quadro 15 – Classificação dos diferentes níveis de acústica (NAA)

Nível de avaliação acústica (NAA)	Classificação	Observação
$NAA \geq 2,5$	Tipo A	Permite assegurar padrões de conforto acústico de alto nível exigencial (qualidade muito boa)
$1,5 \leq NAA < 2,5$	Tipo B	Cumprir patamar exigencial de conforto acústico, superior ao preconizado pela regulamentação
$1,0 \leq NAA < 1,5$	Tipo C	Cumprir, genericamente, com o disposto na regulamentação aplicável e/ou assegurar condições
$NAA < 1,0$	Tipo D	Não cumprir à legislação e/ou não assegurando desempenho acústico adequado

Embora esta metodologia não tenha sido concebida diretamente para edifícios já construídos e que queiram uma atribuição desta metodologia de avaliação, pode ser aplicada aos edifícios reabilitados desde que se tenha em consideração os parâmetros e exigências regulamentares atualmente em vigor.

Cada nível acústico será calculado da seguinte forma:

$$\text{Nível de avaliação Acústica (NAA)} = \frac{\sum_i W_i P_{t_i}}{\sum_i W_i} \quad (86)$$

Em que,

W_i - fatores de ponderação das realidades físicas em avaliação consideradas, respetivamente:

Vizinhança (0,25), Edifício (0,1) e habitação (0,65);

P_{t_i} - número de pontos atribuído a cada realidade física em avaliação.

Na avaliação do nível físico vizinhança serão avaliados dois elementos, disposições gerais e o nível sonoro do ruído ambiente (L_{den} , L_n).

Quadro 16 – Elementos de avaliação para a Vizinhança

Nível físico: Vizinhança		
Elementos de avaliação		
1. Disposições Gerais		
a) Está especificada a existência de mapa do ruído?	V	2 Pts
	F	0 Pts
b) Não existem na envolvente próxima zonas potencialmente ruidosas (vias de tráfego, parques industriais, espaços de diversão, etc.)?	V	4 Pts
	F	0 Pts
c) A integração ambiental do edifício assenta em classificação administrativa de zonamento acústico?	V	3 Pts
	F	1 Pts
2. Nível sonoro do ruído ambiente exterior medido (L_{den} , L_n); considerar o diferencial mais elevado em relação ao valor regulamentar; (escolher a situação aplicável a) ou b)):	a)	Consultar gráfico
	b)	Consultar gráfico

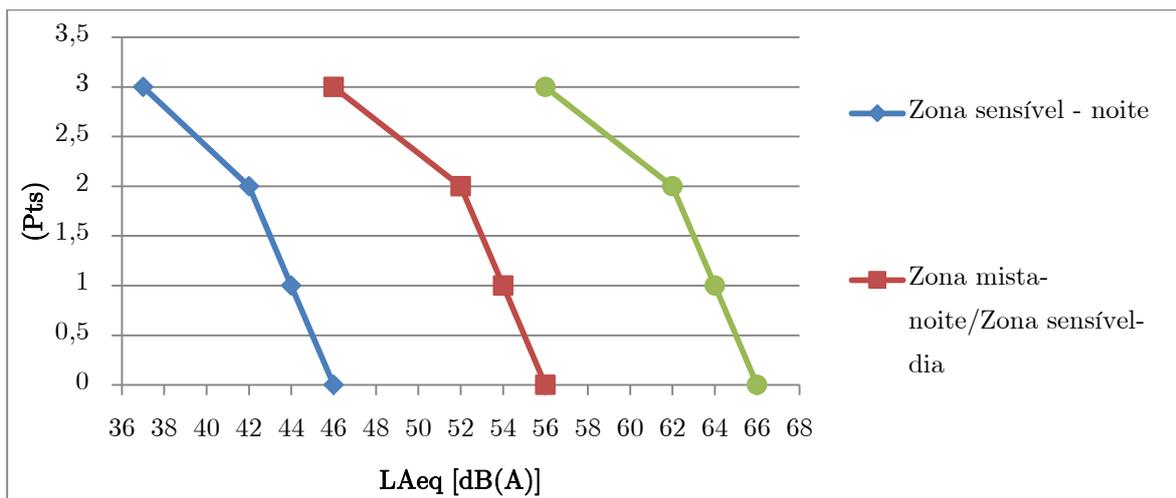


Gráfico 4 – Situação aplicável a)

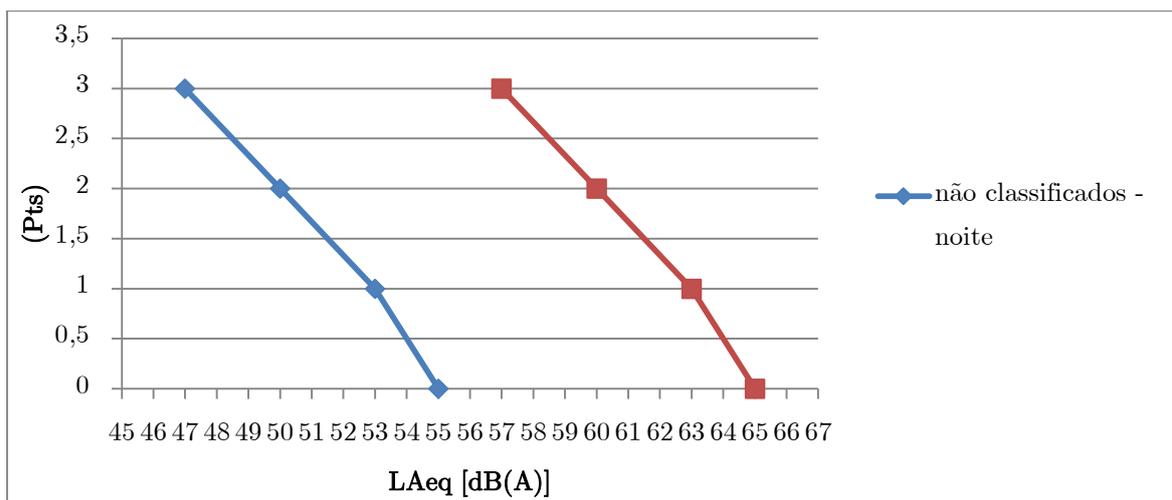


Gráfico 5 – Situação aplicável b)

Para a avaliação global do nível físico vizinhança usamos a seguinte expressão:

$$Vizinhança = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Pt_i \quad (87)$$

Onde, N é o número de elementos considerados para esta avaliação.

Quadro 17 – Elementos de avaliação para o edifício

Nível físico: Edifício		
Elementos de avaliação		
1. Disposições Gerais de condicionamento acústico dos espaços e acessos comuns:		
a) Na entrada do edifício foram consideradas exigências de isolamento a sons aéreos relativamente ao exterior?	V	2 Pts
	F	1 Pts
b) Nos acessos comuns foram consideradas disposições visando a redução do tempo de reverberação?	V	5 Pts
	F	0 Pts
c) Nos espaços e acessos comuns foram consideradas disposições de condicionamento de ruído de equipamentos de carácter coletivo?	V	3 Pts
	F	0 Pts
d) Nos espaços e acessos comuns foram consideradas disposições de condicionamento do ruído de instalações de escoamento de águas e esgotos?	V	3 Pts
	F	1 Pts
e) Foi providenciada análise relativa ao isolamento sonoro da cobertura, quando há corpo de escadas de acesso coletivo?	V	2 Pts
	F	0 Pts
2. Disposições específicas de arquitetura disposição relativa interior:		
a) Não existe sobreposição vertical de compartimentos com vocação de utilização diferenciada (ex: salas sobre quartos)?	V	2 Pts
	F	0 Pts

b) Não existe adjacência na horizontal de compartimentos principais com vocação de utilização diferenciada (ex: cozinhas anexas a quartos)?	V	2 Pts
	F	0 Pts
c) Os compartimentos de dormir e de estar não se encontram virados para zonas potencialmente ruidosas (ex: vias de tráfego terrestre)?	V	3 Pts
	F	1 Pts
d) Não existem no edifício espaços comerciais, de serviços ou de diversão noturna?	V	5 Pts
	F	0 Pts

No nível físico Edifício, o elemento de avaliação são as disposições gerais de condicionamento acústico dos espaços e acessos comuns.

Esta avaliação é dada pela seguinte expressão:

$$Edificio = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Pt_i \quad (88)$$

A nível da habitação será avaliado o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{2m,nT,w'}$ e $D_{nT,w'}$), o índice de isolamento sonoro a sons de percussão ($L'_{nT,w'}$), e o nível de ruído particular de equipamentos ($L_{Ar,nT}$).

Os elementos de avaliação para o nível físico habitação são:

- 1- Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, padronizado, $D_{2m,nT,w'}$ entre o exterior do edifício e quartos ou zonas de estar dos fogos.

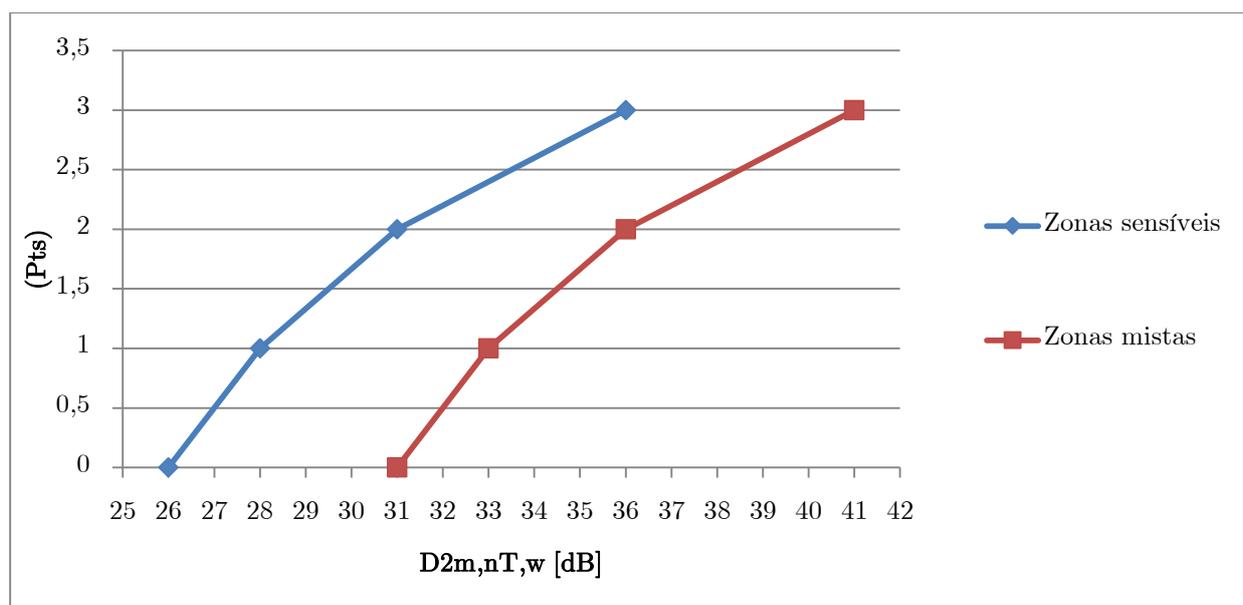


Gráfico 6 – $D_{2m,nT,w'}$ entre o exterior do edifício e quartos ou zonas de estar

- 2- Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, padronizado, $D_{nT,w}$, entre compartimentos de um fogo (emissão) e quartos ou zonas de estar de outro fogo (receção).

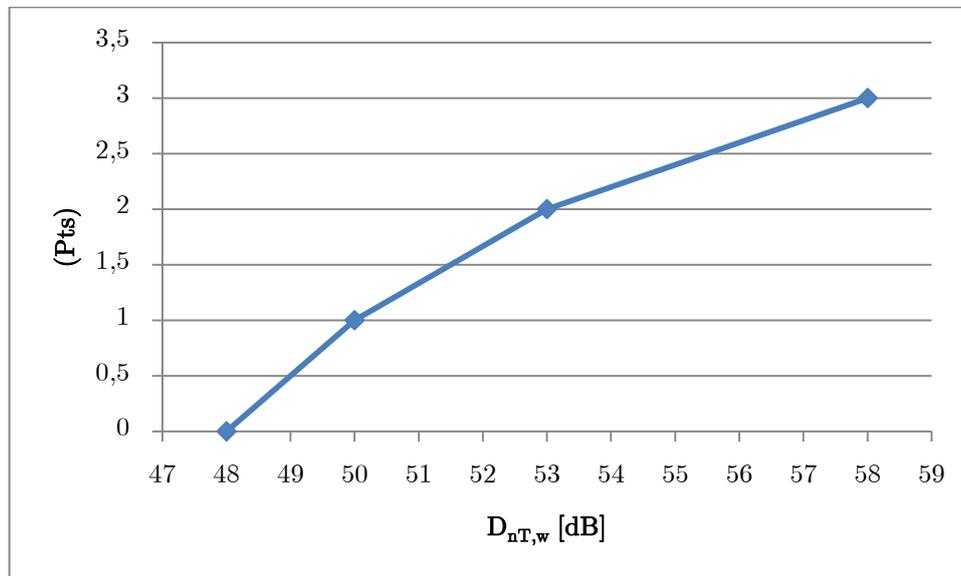


Gráfico 7 – $D_{nT,w}$ entre compartimentos de um fogo (emissão) e quartos ou zonas de estar de outro fogo (receção)

- 3- Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, padronizado, $D_{nT,w}$, entre locais de circulação comum do edifício (emissão) e quartos ou zonas de estar dos fogos (receção).

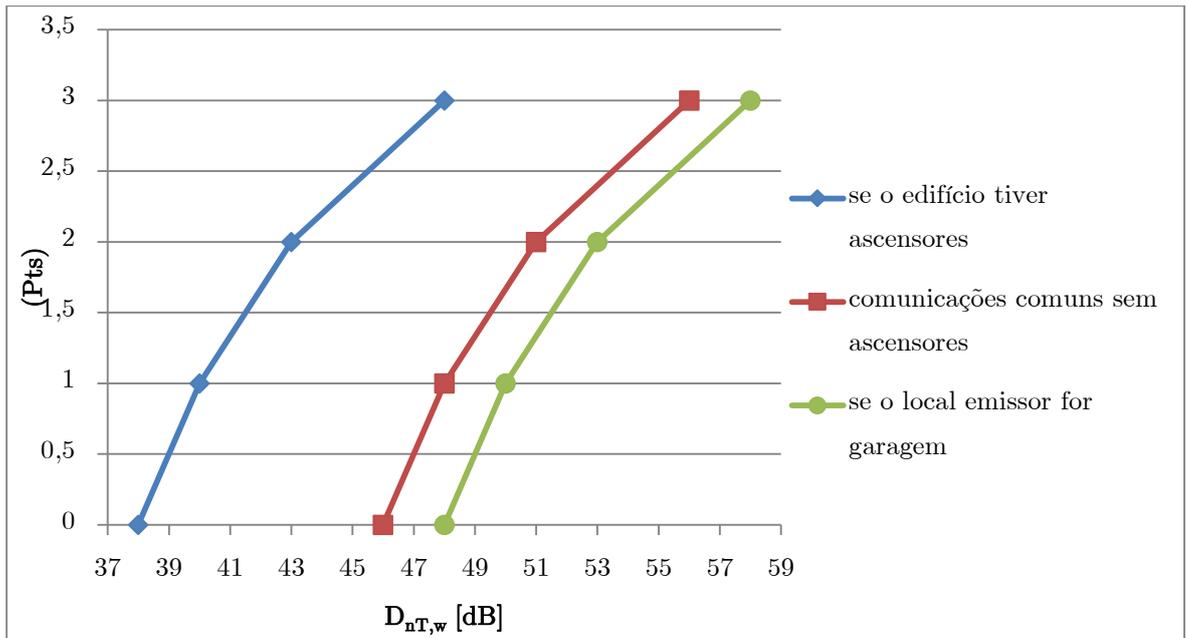


Gráfico 8 – $D_{nT,w}$ entre locais de circulação comum do edifício (emissão) e quartos ou zonas de estar dos fogos (recepção)

- 4- Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, padroniza, $D_{nT,w}$ entre locais do edifício destinados a comércio, indústria, serviços ou diversão (emissão) e quartos ou zonas de estar dos fogos (recepção).

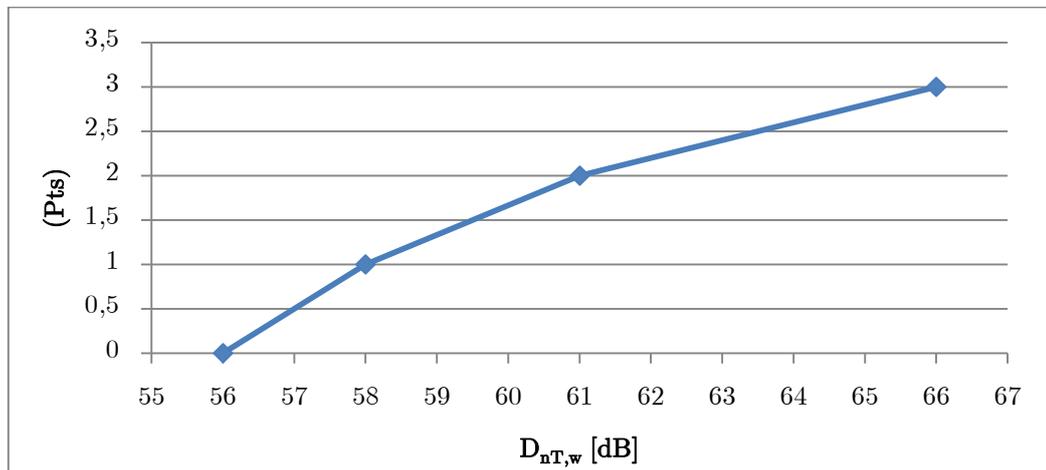


Gráfico 9 – $D_{nT,w}$ entre locais do edifício destinados a comércio, indústria, serviços ou diversão (emissão) e quartos ou zonas de estra dos fogos (recepção)

- 5- Índice de isolamento sonoro a sons de percussão, padronizado, $L'_{nT,w}$, no interior dos quartos ou zonas de estar dos fogos (receção), proveniente de uma percussão normalizada exercida sobre pavimentos de outros fogos ou locais de circulação comum (receção).

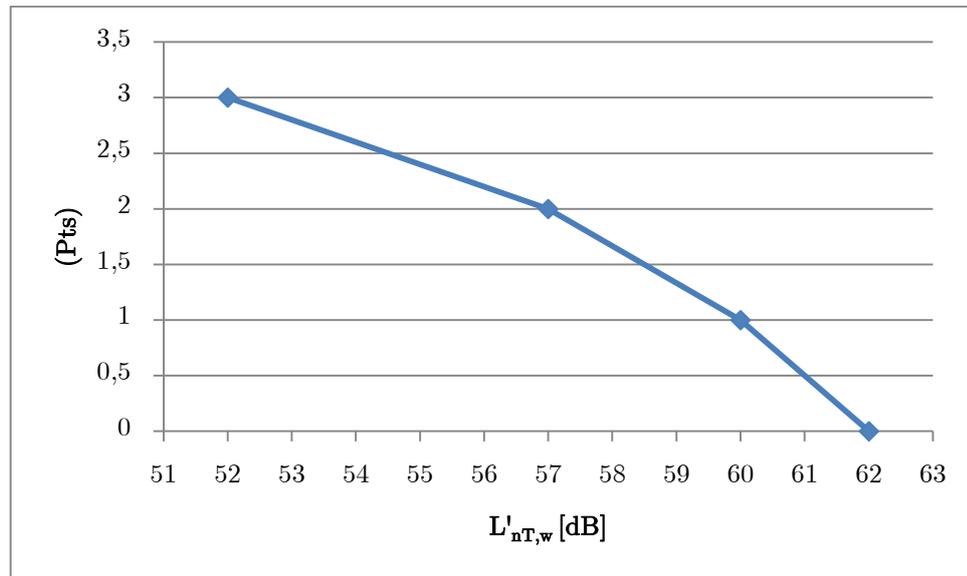


Gráfico 10 – $L'_{nT,w}$ no interior de quartos ou zonas de estar dos fogos proveniente de pavimentos de outros fogos ou locais de circulação comum

- 6- Índice de isolamento sonoro a sons de percussão, padronizado, $L'_{nT,w}$, no interior dos quartos ou zonas de estar dos fogos (receção), proveniente de uma percussão normalizada exercida sobre pavimentos de locais do edifício destinados a comércio, indústria, serviços ou diversão (emissão).

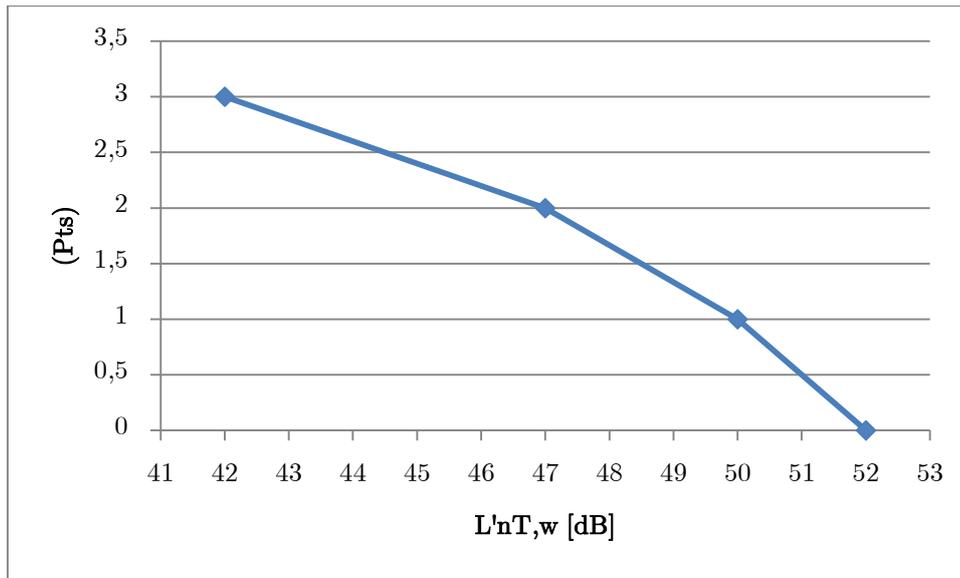


Gráfico 11 – $L'_{nT,w}$ no interior dos quartos ou zonas de estar dos fogos provenientes de pavimentos do edifício destinados a comércio, indústria, serviços ou diversão

7- Nível de avaliação, $L'_{Ar,nT}$ do ruído particular de equipamentos coletivos do edifício, tais como ascensores, grupo hidropressores, sistemas centralizados de ventilação mecânica, automatismos de portas de garagem, postos de transformação e escoamento de águas no interior dos quartos e zonas de estar dos fogos.

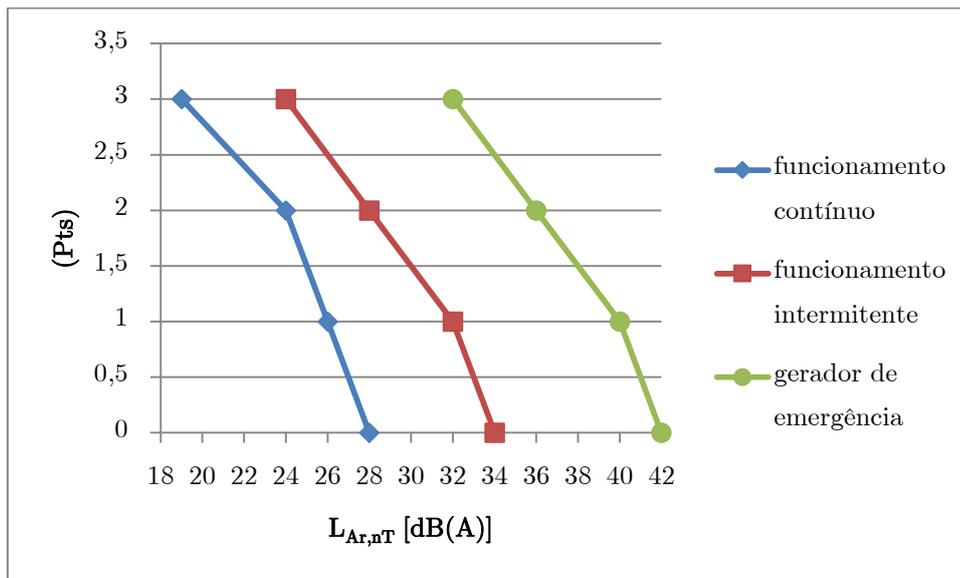


Gráfico 12 – $L_{Ar,nT}$ do ruído particular de equipamentos coletivos do edifício

- 8- Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, padronizado, $D_{nT,w}$, entre compartimentos de estar e dormir do mesmo fogo.

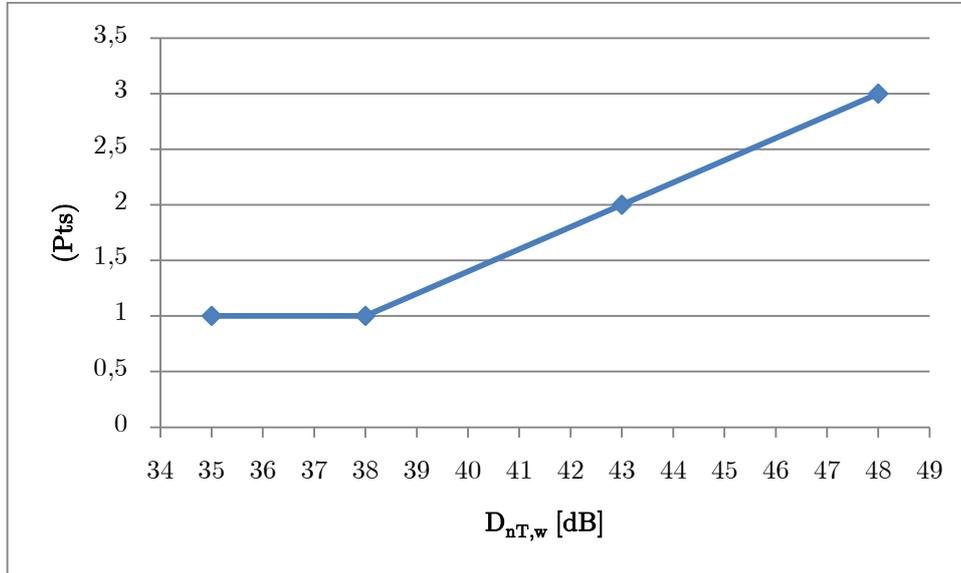


Gráfico 13 – $D_{nT,w}$ entre compartimentos de estar e dormir do mesmo fogo

A avaliação global do nível físico habitação é calculada pela seguinte expressão:

$$Habitação = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i P_{t_i}}{\sum_{i=1}^N \alpha_i} \quad (89)$$

Onde,

N- Número de elementos considerados para a avaliação;

P_{t_i} - Pontuação média atribuída a cada elemento;

α_i - Ponderação correspondente.

Quadro 18 – Coeficientes de ponderação d nível físico habitação

Elemento de avaliação	1	2	3	4	5	6	7	8
Ponderação α_i	4	6	2	8	8	6	5	1

5. Estudo de Caso

5.1. Descrição do edifício

O edifício em estudo faz parte do programa de reabilitação urbana do Morro da Sé desenvolvido pela Sociedade de Reabilitação Urbana do Porto, o qual Procurou reabilitar os edifícios degradados realojando, assim, as famílias aí anteriormente residentes.

Este programa dividem-se em 10 operações estando o edifício em estudo enquadrado na operação F e situado no nº 50/52 da Rua da Bainharia, no Porto.

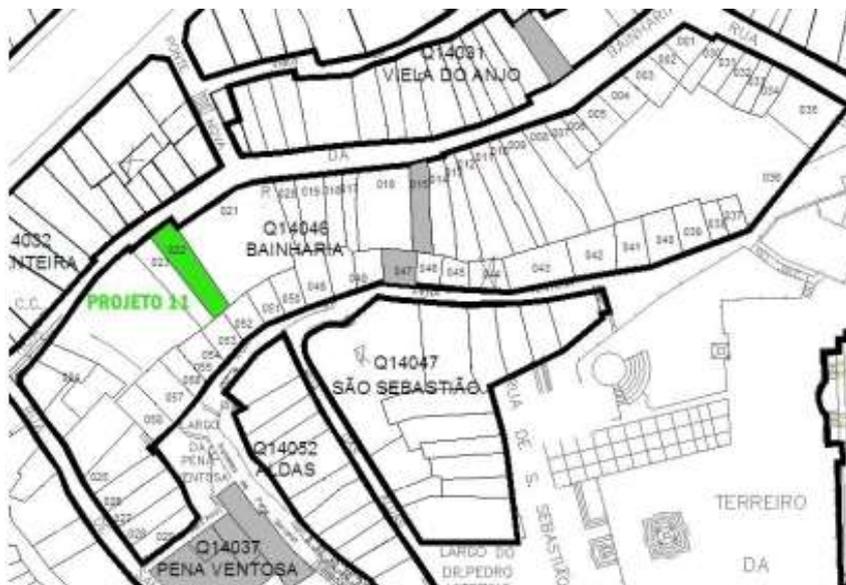


Figura 5.1 – Localização da Operação F

Fonte: [SRU]

Toda a documentação referente a este edifício, projeto e fotografias foram disponibilizadas amavelmente pela Sociedade de Reabilitação Urbana do Porto (SRU), permitindo ainda a realização dos ensaios acústicos no interior do mesmo.

O edifício é de habitação multifamiliar com comércio no rés-do-chão e 4 pisos para habitação.

No rés-do-chão, situa-se o comércio e o hall de entrada que dá acesso às habitações. Os restantes pisos são habitações com diferentes tipologias. O 1º e 2º piso são frações de tipologia T0 compostos por uma cozinha, uma sala/quarto e uma instalação sanitária, enquanto no 3º e 4º pisos é uma habitação do tipo duplex de tipologia T2. No 3º piso fica a sala, a cozinha e a instalação sanitária e no 4º piso estão os quartos.

Podemos verificar a distribuição dos espaços interiores dos diferentes pisos através das plantas apresentadas.

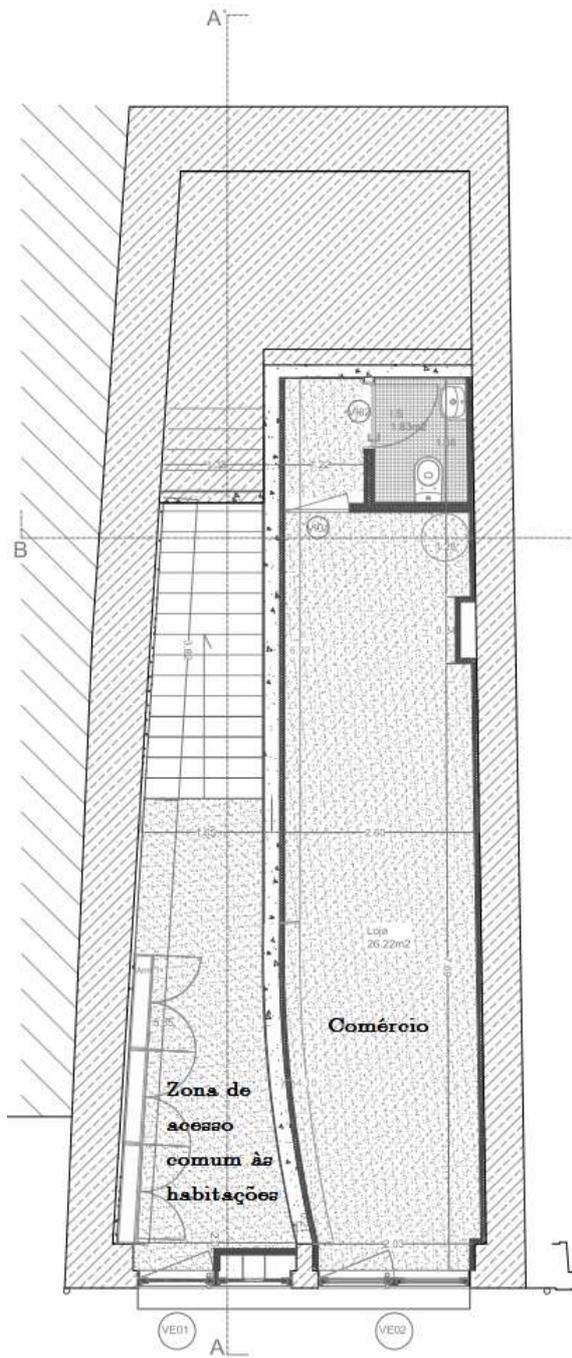


Figura 5.2 – Planta do piso 0

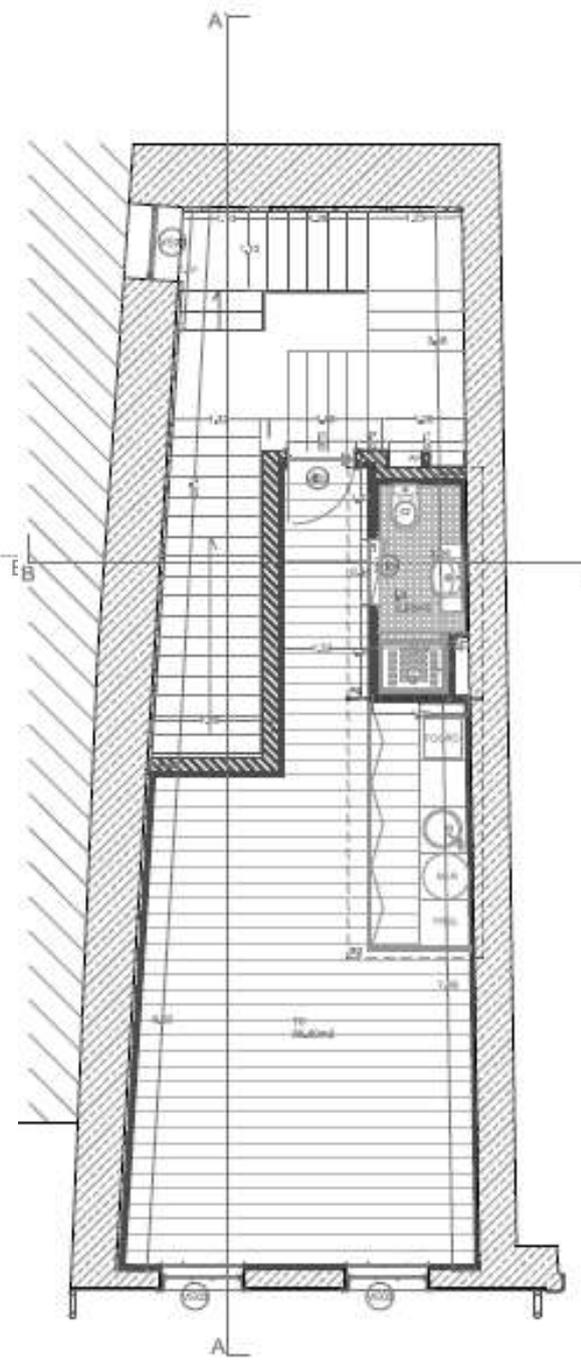


Figura 5.3 – Planta Piso 1

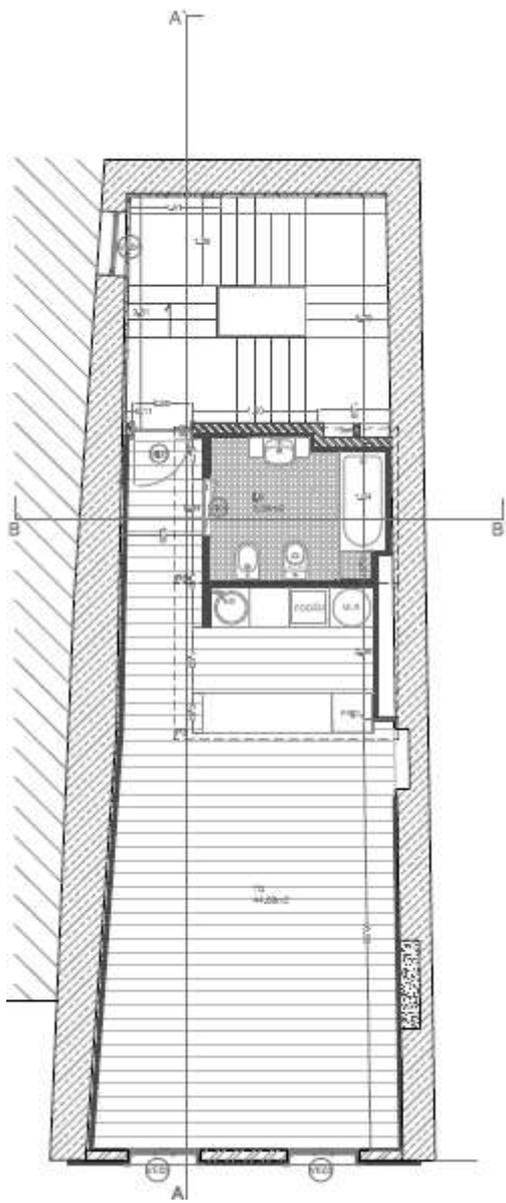


Figura 5.4 – Planta Piso 2

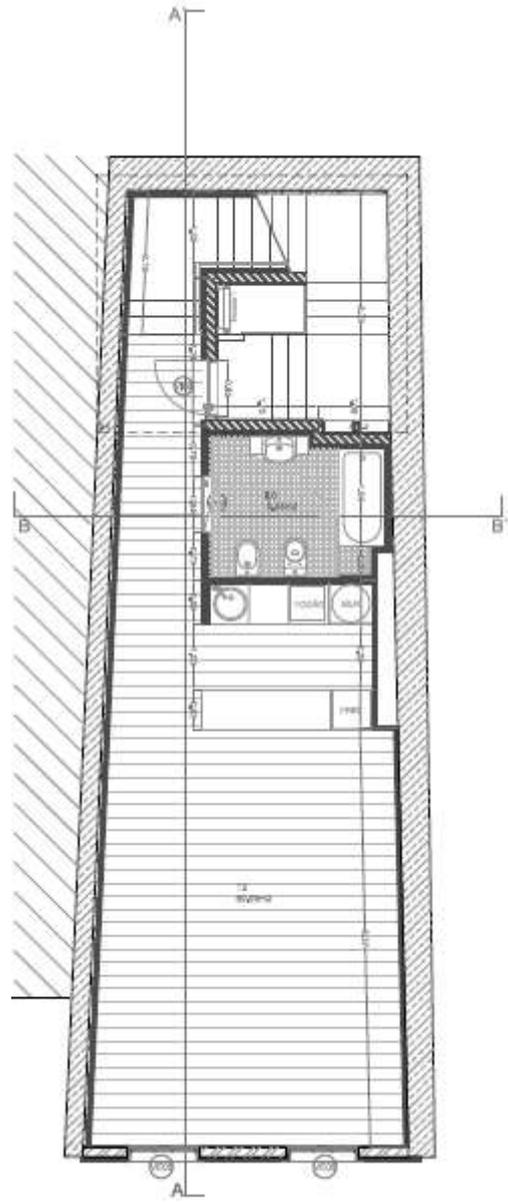


Figura 5.5 – Planta Piso 3

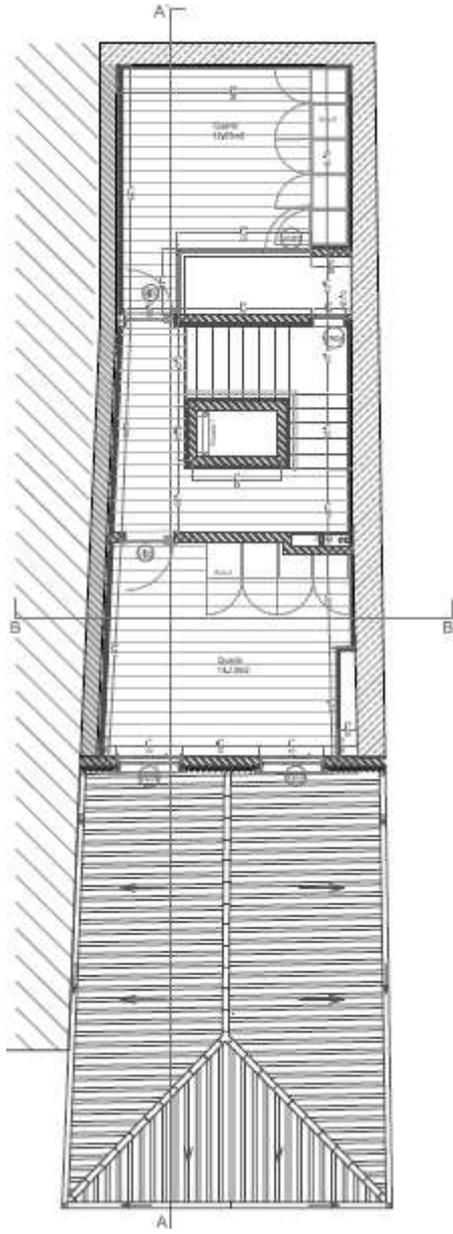


Figura 5.6 – Planta do piso 4

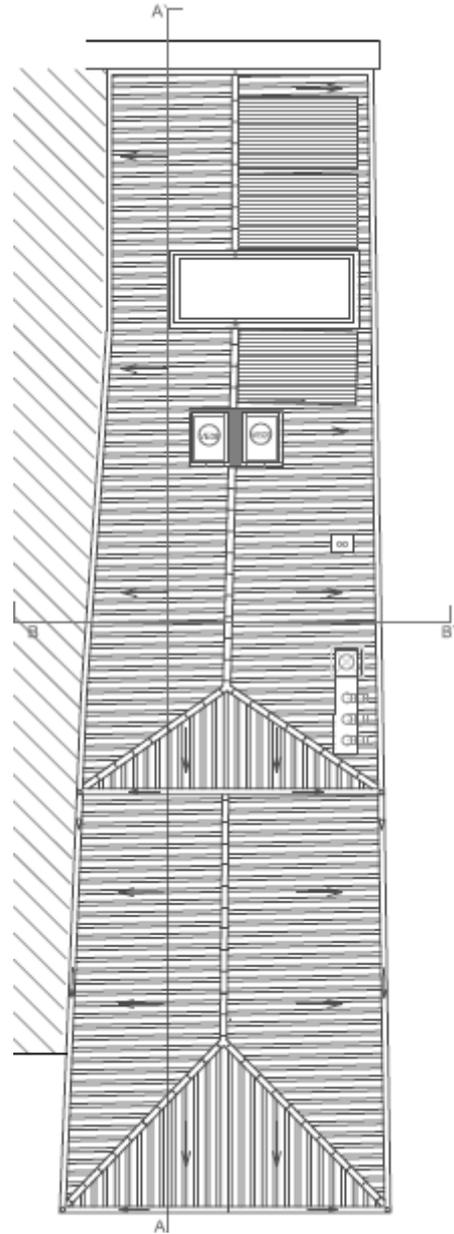


Figura 5.7 – Planta da cobertura

Neste edifício não se encontra prevista a instalação de sistemas de aquecimento e ar condicionado. A ventilação será feita por um sistema de ventilação mecânica em que os equipamentos se encontram na cobertura e têm como funcionalidade a extração do ar nas casas de banho. Além destes, serão também instalados exautores na cozinha de cada uma das habitações do edifício e ainda no estabelecimento comercial.

O edifício situa-se numa zona residencial, comércio e serviços, sendo o nível de ruído característico deste tipo de zona.

A frente do edifício de estudo situa-se junto a uma rua com um volume de tráfego moderado, durante o dia e o entardecer, e reduzido, durante a noite.

Face ao disposto segundo o Regulamento Geral do Ruído (DL 9/2007), a zona de implantação do edifício é classificada como zona sensível, uma vez que segundo o plano municipal do ordenamento do território é uma área vocacionada para uso habitacional existente ou previsto, podendo conter pequenas unidades de comércio, com função de servir a população local.

Tal como é referido no regulamento geral do ruído, as câmaras municipais elaboram mapas do ruído para apoiar a elaboração, alteração e revisão dos planos diretores municipais e dos planos de urbanização.

No plano diretor municipal da cidade do Porto estão delimitadas as zonas classificadas como zonas sensíveis ou mistas. Como podemos verificar na imagem abaixo, o edifício em estudo, simbolicamente representado por um ponto “A”, situa-se na zona sensível.



Figura 5.8 – Extrato da planta de condicionantes integrada no PDM da câmara do Porto

Fonte: <http://sigweb.cm-porto.pt/mipwebportal/>

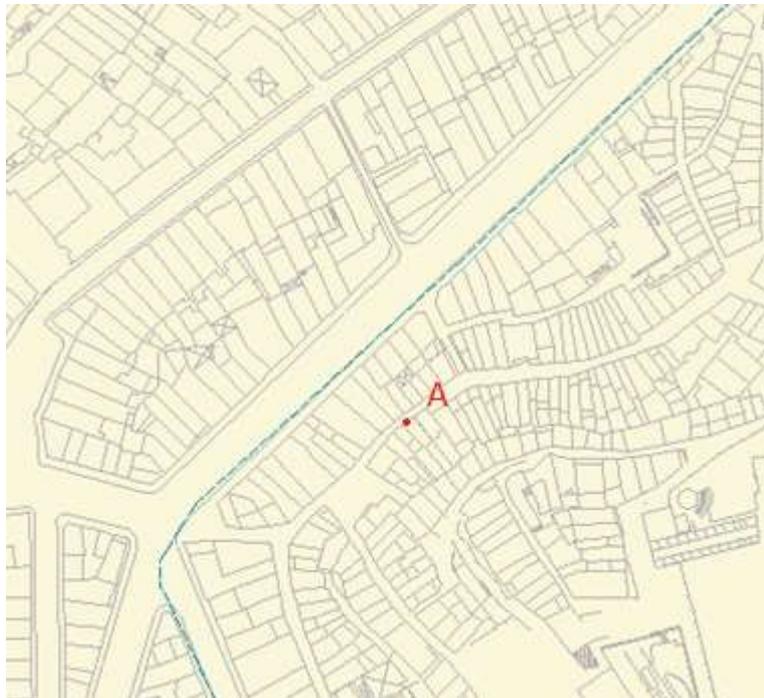


Figura 5.9 - Vista Ampliada da localização do edifício

Fonte: <http://sigweb.cm-porto.pt/mipwebportal/>

Assim sendo os valores limite de exposição devem respeitar os impostos para a zona sensível.

Quadro 19 – Valores limite de exposição

Zona	Valores limite de exposição	
	L_{den} dB(A)	L_n dB(A)
Sensível	≤ 55	≤ 45
Mista	≤ 65	≤ 55

Foi posta a hipótese de verificar “in situ” os valores de ruído ambiente exterior. No entanto devido à localização do edifício e ao ensaio ter de ser feito à noite, por questões de segurança do equipamento e do operador optou-se por não se fazer este esse mesmo ensaio, não sendo possível avaliar os limites exposição de ruído ambiente.

5.2. Descrição das soluções construtivas

A parede exterior que constitui a fachada principal do edifício, e faz fronteira com a rede viária, é constituída por tijolo vazado, argamassa de impermeabilização, placa rígida de poliestireno expandido (isolamento térmico), e uma chapa zincada grampeada. A chapa só foi aplicada no 4º andar, sendo que nos restantes pisos o acabamento final será reboco pintado.

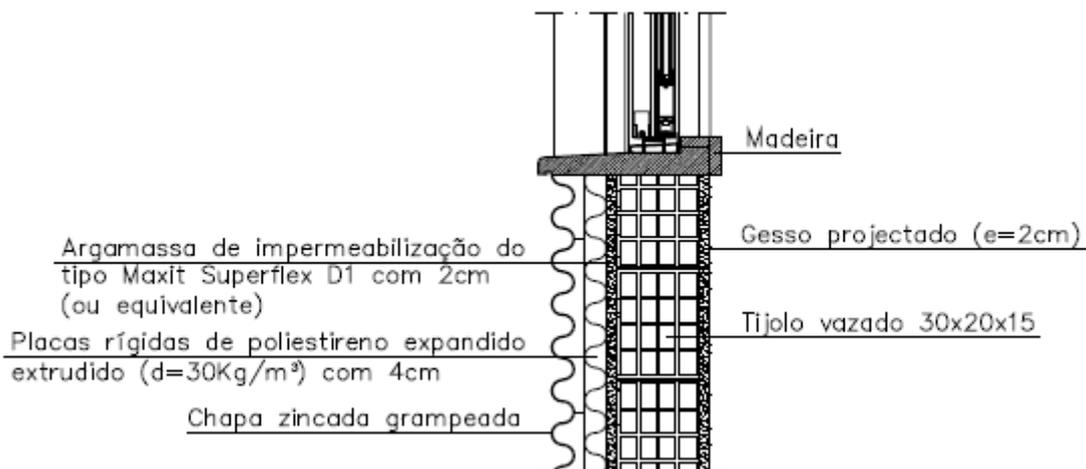


Figura 5.10 – Pormenor da Parede exterior



Figura 5.11 – Vista exterior do edifício

Para as paredes de meação que fazem a ligação aos edifícios adjacentes, a solução construtiva é constituída por placas de gesso cartonado pelo interior, caixa-de-ar, lã mineral de alta densidade e alvenaria de granito.

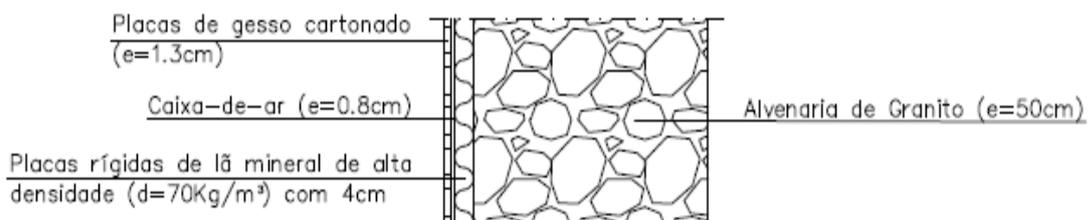


Figura 5.12 – Pormenor da parede de meação

Na divisão e compartimentação interior de cada habitação utilizaram-se paredes divisórias em tijolo vazado de 15cm com gesso projetado em ambas as faces.

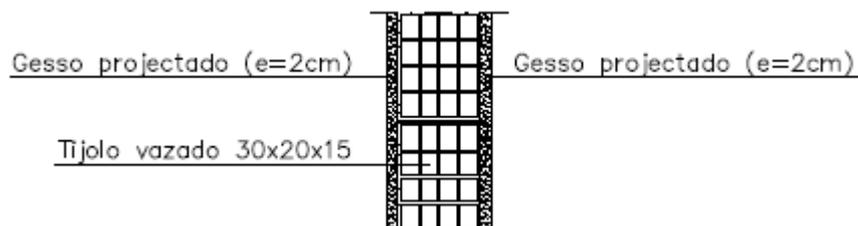


Figura 5.13 – Pormenor da parede divisória

A solução da parede interior entre a caixa-de-escadas e a habitação é semelhante à das paredes divisórias, no entanto na face da caixa-de-escadas em vez ser utilizado gesso projetado foram colocadas placas rígidas de lã mineral de alta densidade revestidas com gesso cartonado.

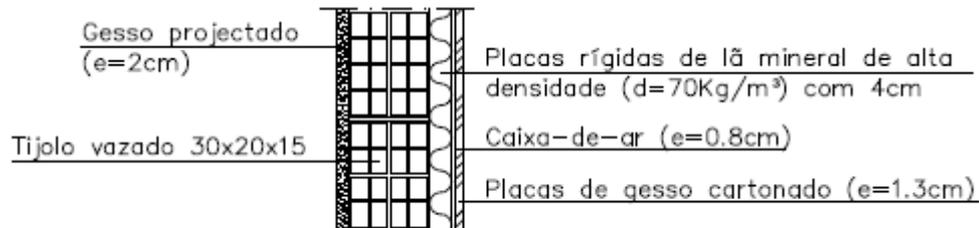


Figura 5.14 – Pormenor da parede interior de separação entre a caixa de escadas e a habitação

As soluções construtivas utilizadas nos pavimentos são semelhantes em todos os pisos com exceção no rés-do-chão, e entre o rés-do-chão e o primeiro piso, pois no rés-do-chão o espaço é destinado a um estabelecimento comercial.

A solução preconizada para os pavimentos consiste na utilização revestimento de madeira do tipo flutuante, lajeta de inércia, isolante acústico (tipo impactodam), camada de enchimento de betão leve, laje aligeirada, caixa-de-ar e teto falso (com placas de gesso cartonado).

No pavimento em contacto com o comércio incrementou-se placas de lã mineral de alta densidade sob a laje aligeirada.

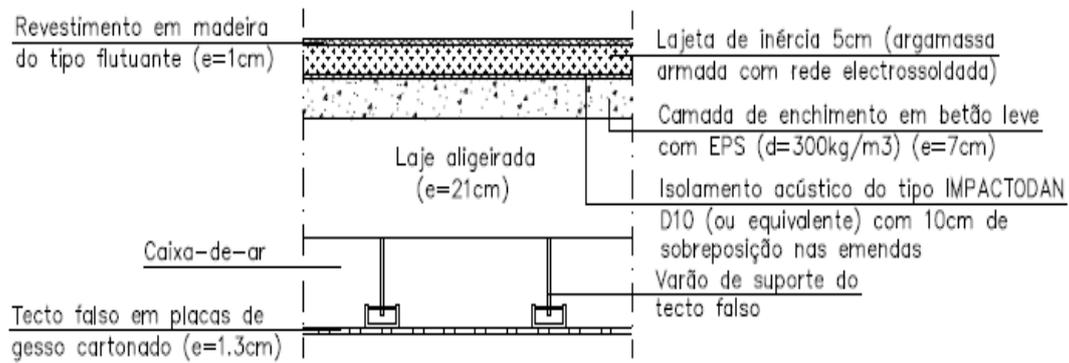


Figura 5.15 – Pormenor da laje de um piso intermédio

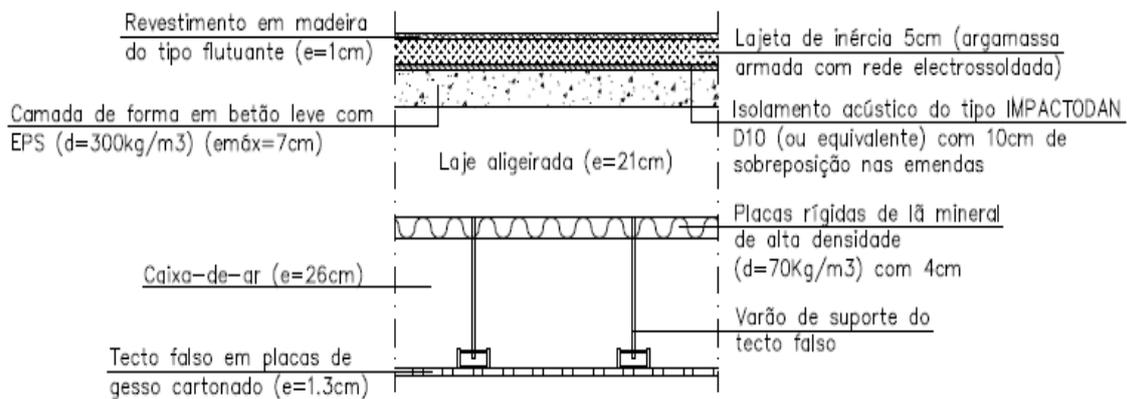


Figura 5.16 – Pormenor da laje de piso entre a habitação e o comércio

Para o piso térreo a solução usada foi betonilha afagada, lajeta de inércia, isolante acústico (tipo impactodan), camada de enchimento de betão leve, laje de betão, folha de polietileno, brita, geotêxtil (em contacto com o terreno).

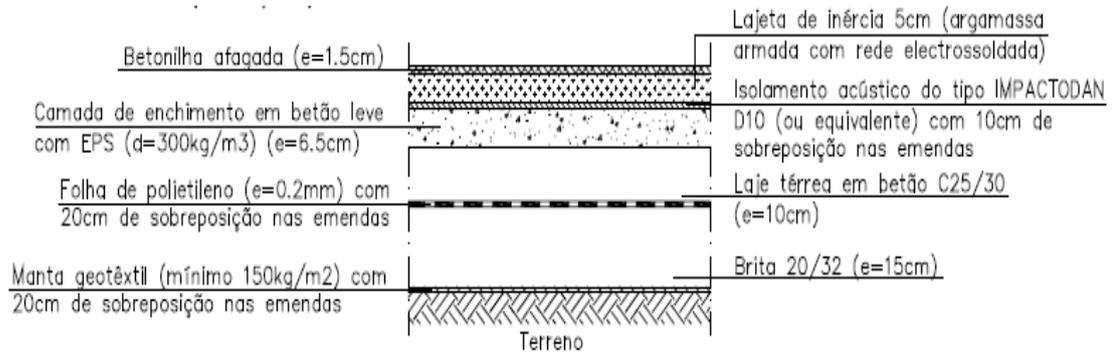


Figura 5.17 – Pormenor da laje do piso térreo do comércio

A solução para a cobertura consiste numa solução inclinada com um revestimento de telha cerâmica, ripado para suporte da telha, subtelha sobre um placas de madeira OSB que estão apoiadas nas vigas de madeira da própria cobertura.

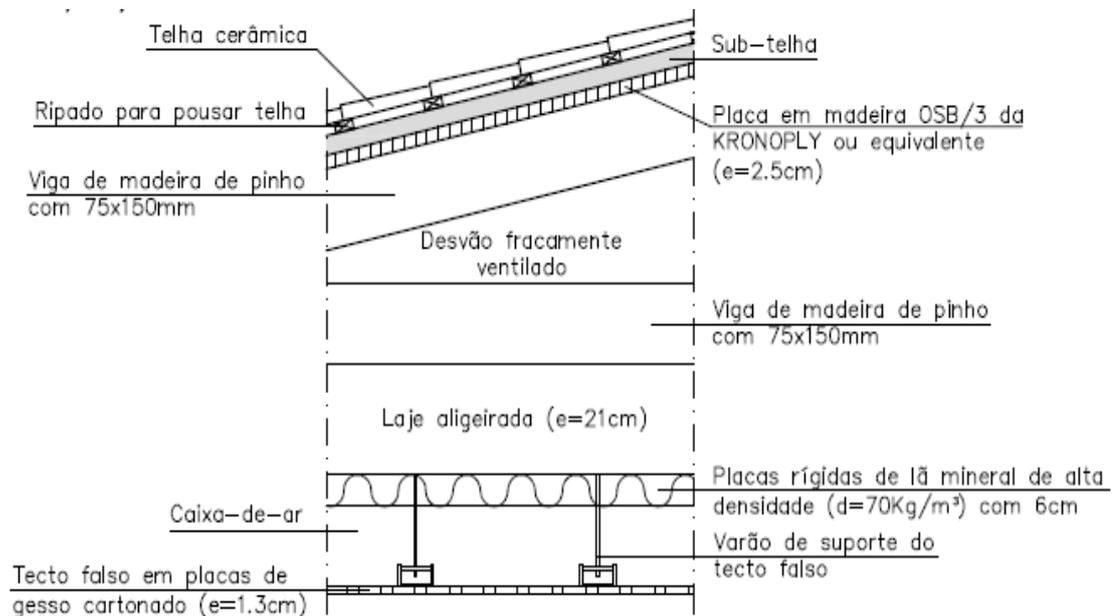


Figura 5.18 – Pormenor da laje da cobertura com um espaço não aquecido

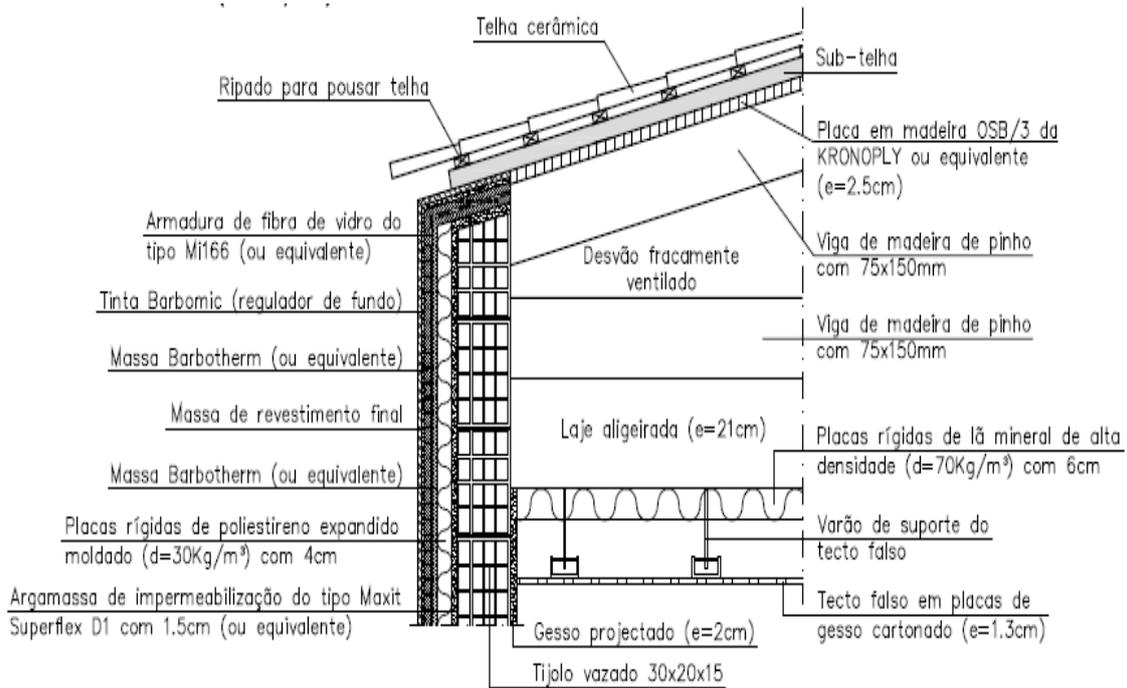


Figura 5.19 – Pormenor da ligação da fachada com a cobertura

A solução preconizada para os envidraçados prevê a reutilização da caixilharia de madeira de kambala com a solução de vidros duplos.



Figura 5.20 - Vista real interior da caixilharia

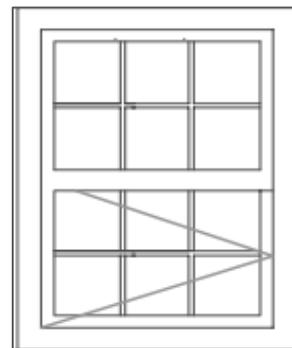


Figura 5.21 - Pormenor das caixilhariás

As portas exteriores que dão acesso à zona comum e ao comércio são em madeira maciça de kambala com grelhas em aço inox, enquanto as portas de acesso a cada habitação são da classe E30 forradas a MDF (placa de fibra de GRITE madeira de média densidade) com aros de madeira maciça de mogno pintados. Dentro de cada habitação a portas interiores são em MDF com aros de madeira maciça.



Figura 5.22 – Vista real da porta de acesso à habitação do 1º Piso

5.3. Estimativa do isolamento sonoro a sons aéreos

A estimativa do isolamento sonoro a sons de condução aérea foi realizada para a parede exterior, para as paredes interiores (meação e separação entre a caixa de escadas e habitação do piso 1) e para os pavimentos (laje de piso intermédio e a laje separação do comércio com a habitação do piso 1).

Todas características das soluções construtivas necessárias para os diversos cálculos, foram as consideradas no projeto de execução, tendo sido considerado que em obra não foram feitas alterações ao projeto.

a) Parede exterior

A parede exterior é um elemento composto, ou seja, além da parede opaca apresenta eventuais aberturas como envidraçados, grelhas de ventilação, caixa de estores, entre outros. Assim, o índice de redução sonora do conjunto é calculado através do coeficiente de transmissão do conjunto τ .

O cálculo do coeficiente de transmissão do conjunto é calculado pela seguinte expressão:

$$\tau_{conjunto} = \frac{\sum \tau_i \times S_i}{\sum S_i} \leftrightarrow \tau_{conjunto} = \frac{10^{-\frac{R_{w1}}{10}} \times S_1 + 10^{-\frac{R_{w2}}{10}} \times S_2}{S_1 + S_2} \quad (90)$$

Por conseguinte o índice de redução sonora é dado pela seguinte expressão:

$$R_w = 10 \times \log \frac{1}{\tau_{conjunto}} \quad (91)$$

Assim poderemos calcular o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado entre o exterior do edifício e o interior e é obtido através da expressão seguinte:

$$D_{2m,nT,w} = R_w + 10 \log \frac{0,16 \times V}{S \times T_o} - TM \quad (92)$$

Em que:

R_w - índice de redução sonora (dB)

V- volume de espaço recetor (m^3)

S- Área do elemento separador entre o exterior e os compartimentos interiores (m^2)

T_o - tempo de reverberação de referência do compartimento recetor (0,5s)

TM- correção devido às transmissões marginais (dB).

No quadro 20 são apresentados os elementos constituintes da parede exterior.

Quadro 20 – Característica da Parede exterior

Parede exterior areada – Pe2		
Constituição	Espessura (cm)	Massa (Kg/m2)
Gesso projetado	2,00	16,00
Tijolo Vazado	15,00	180,00
Argamassa de impermeabilização	2,00	
Poliestireno expandido extrudido (XPS)	4,00	-
Chapa Zincada Grampeada	0,50	-
Total	23,50	196,00

Com base nos métodos de estimativa mencionados no subcapítulo 3.2, chegamos ao índice de redução sonora para cada método de estimativa.

Quadro 21 – Índice de redução sonora pelos diferentes métodos de cálculo

Método	R _w (dB)
Método do comportamento teórico	41
Método gráfico de previsão	44
Método Empírico	38

O índice de redução sonora considerado para cálculo é valor médio de todos os resultados obtidos pelos diversos métodos considerados.

Com a área envidraçado exterior existente em cada piso, e com a área da zona de parede opaca, determinamos o coeficiente de transmissão do conjunto que nos permitirá chegar ao índice de redução sonora. Por fim com a aplicação da expressão (92) chegamos ao valor do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea da parede exterior, $D_{2m,nT,w}$.

Este valor será comparado com o disposto no RRAE para zonas sensíveis.

As transmissões marginais na parede exterior são consideradas desprezáveis.

Quadro 22 – Verificação acústica para a parede exterior

Compartimentos	Parede Opaca		Envidraçado			T _{conjunto}	Rw _{conjunto}	V (m ³)	TM	S ₀ (m ²)	T ₀ (s)	D _{2m,nT,w}	Verificação regulamentar
	Rw (dB)	A (m ²)	Rw (dB)	A (m ²)	Aenv. /Atot (%)								
1º Andar	41	8,65	33	3,87	30,91	2,10E-04	37	106	0	10	0,5	42	OK!
2º Andar	41	7,81	33	3,39	30,26	2,07E-04	37	117	0	10	0,5	43	OK!
3º Andar	41	7,72	33	3,39	30,49	2,08E-04	37	233	0	10	0,5	46	OK!
4º Andar/Quarto	41	7,73	33	3,27	29,7	2,05E-04	37	35,3	0	10	0,5	37	OK!

Uma vez que a área de envidraçados é inferior a 60% da área da parede exterior o termo de adaptação é considerado igual a zero, ou seja, não entra para o cálculo.

Como se pode verificar pelo Quadro 22, todos os valores são superiores a 28 dB, como tal verificam o limite imposto pelo RRAE.

b) Paredes interiores

As paredes interiores estudadas foram a parede de meação, ou seja, a parede de separação do nosso edifício para o edifício adjacente, e a parede entre habitações e a zona de circulação comum.

O quadro 23 apresenta as características da parede de meação, consoante o preconizado no projeto.

Quadro 23 – Características da parede de meação

Parede de meação-Pi2			
Constituição	Espessura (cm)	Peso (kg/m²)	Melhoria (dB)
Parede resistente de granito	50,00	1300,00	
Placas rígidas de lã mineral	4,00	-	4
Lâmina de ar	0,80	-	
Gesso Cartonado	1,30	-	
Total	56,10	1300,00	

De acordo com os diferentes métodos de estimativa, os valores do índice de redução sonora apresentam-se no seguinte quadro:

Quadro 24 – Cálculo do índice de redução acústica da parede de meação

Método	R_w (dB)
Método do comportamento teórico	42
Método gráfico de previsão	58
Método Empírico	75

O valor do método empírico não foi considerado por ser muito diferente dos resultados obtidos para os restantes métodos. Tal facto resultou do enorme valor da massa do elemento construtivo.

O valor do índice de redução sonora considerado corresponde a um valor médio dos Métodos considerados, com exceção do método empírico.

Com base na seguinte expressão:

$$D_{nT,w} = R_w + 10 \log \frac{0,16 \times V}{S \times T_0} - TM \quad (93)$$

Foi verificado o limite regulamentar para a parede de meação, $D_{nT,w} \geq 50$ dB.

As transmissões marginais foram consideradas pelo método simplificado pelo que como o R_w é superior a 45 dB, o valor a considerar são 5 dB.

Quadro 25 – Verificação acústica para a parede de meação

	Compartimento	S (m ²)	V (m ³)	T ₀ (s)	R _w (dB)	TM (dB)	D _{nT,w} (dB)	Limite regulamentar (dB)	Verificação
1º Andar	Pi2 este	19,33	85,56	0,5	50	5	51	≥ 50 dB	KO!
	Pi2 oeste	21,84	85,56	0,5	50	5	50	≥ 50 dB	KO!
2º Andar	Pi2 este	26,75	96,49	0,5	50	5	50	≥ 50 dB	KO!
	Pi2 oeste	17,12	96,49	0,5	50	5	52	≥ 50 dB	KO!

Também foi determinado o índice de isolamento a sons de condução aérea entre a parede de separação da caixa de escadas com a habitação 1.

Quadro 26 – Características da parede de separação

Parede de separação caixa de escadas e habitação			
Constituição	Espessura (cm)	Peso (kg/m ²)	Melhoria (dB)
Gesso Projetado	2,00	16,00	
Tijolo Vazado	15,00	140,00	
Placas rígidas de lã mineral	4,00	-	4
Caixa-de-ar	0,80	-	
Gesso Cartonado	1,30	9,88	
Total	23,10	165,88	

O índice de redução considerado entre a caixa de escadas e a habitação corresponde à média dos métodos considerados mais a melhoria devida à lã mineral e que é igual a 4 dB.

Quadro 27 – Cálculo do índice de redução sonora para parede entre caixa de escadas e a habitação

Método	R _w (dB)
Método do comportamento teórico	42
Método gráfico de previsão	42
Método Empírico	41

Tal como na parede exterior o índice de redução sonora para as paredes divisórias corresponde ao $R_{wconjunto}$, uma vez que para além da parede por vezes também temos as portas. Para o valor do índice de redução sonora da porta, considerou-se que o R_w é igual a 42 dB. Este valor foi fornecido pelo fabricante.

O índice de redução sonora da parede é igual aos 42 dB e resulta da média dos métodos.

Por aplicação da expressão (91) chegamos ao $R_{wconjunto}$ de 42 dB.

Quadro 28 - índice de redução sonora do conjunto porta/parede

Elemento	Área (m ²)	R _w (dB)
Parede	38,75	42
Porta	1,83	42
	R_w conjunto (dB)	42

Para a determinação do isolamento a sons de condução aérea o valor a considerar para o índice de redução sonora resulta do valor encontrado para o conjunto, parede/porta, e da soma da melhoria de 4 dB, resultante da presença de lã mineral na solução construtiva.

Quadro 29 - Verificação acústica para a parede entre caixa de escadas e habitação

	Compartimento	S (m ²)	V (m ³)	T ₀ (s)	R _w (dB)	TM (dB)	D _{nT,w} (dB)	Limite regulamentar (dB)	Verificação
2º Andar	Pi4	38,75	85,94	0,5	46	5	40	≥ 48 dB	KO!

Nesta fase da análise do isolamento sonoro considera-se que esta solução não verifica a legislação. O que demonstra o que o valor do índice de redução sonora da porta está sobrevalorizado.

Uma vez que a legislação obriga a que o desempenho acústico seja verificado “in situ”, é considerada uma margem de erro de 3 dB, apenas para os valores obtidos nos ensaios acústicos.

c) Pavimentos

Além do da parede exterior e das paredes interiores também foram estudados os pavimentos: a laje intermédia entre habitações e a laje de separação do comércio da habitação do piso 1.

Quadro 30 – características da laje de piso intermédio

Laje de piso intermédio-Pavil			
Constituição	Espessura (cm)	Peso (kg/m²)	Melhoria (dB)
Gesso Projetado	2,00	16,00	
Laje de vigotas pré-esforçadas aligeirada com blocos cerâmicos	21,00	311,93	
Camada de enchimento em betão leve com EPS	7,00	-	
Material Resiliente	1,00	-	
Laje de inércia em argamassa armada	5,00	-	
Revestimento de piso em madeira flutuante	1,00	-	
Total	37,00	327,93	

O R_w considerado corresponde à média dos métodos considerados para elementos simples, como podemos verificar pelo quadro 31 o valor correspondente ao método teórico do comportamento é relativamente inferior aos restantes métodos. Assim excetua-se do cálculo o mesmo.

Quadro 31 - Cálculo do índice de redução sonora da laje de piso intermédio

Método	RW (dB)
Método do comportamento teórico	30
Método gráfico de previsão	58
Método Empírico	52

A contabilização das transmissões marginais foi feita pelo método simplificado, ou seja, como o R_w é superior a 45 dB, consideramos um valor igual a 4 dB.

Quadro 32 – Verificação acústica para a laje de piso intermédio

Local a estudar (emissor-recetor)	S (m2)	V (m3)	T_0 (s)	R_w (dB)	TM (dB)	$D_{nT,w}$ (dB)	Limite regulamentar (dB)	Verificação
Piso1-Piso2	36,97	85,94	0,5	55	4	50	≥ 48 dB	OK!

Quadro 33 – Características da laje entre o comércio e habitação

Laje de separação entre o comércio e habitação-Pavi3			
Constituição	Espessura (cm)	Peso (kg/m2)	Melhoria (dB)
Teto falso-placas de gesso cartonado	1,30	-	
Placas rígidas de lã mineral	4,00	-	8
Laje de vigotas pré-esforçadas aligeirada com blocos cerâmicos	21,00	320	
Camada de enchimento em betão leve com EPS	7,00	-	
Material resiliente	1,00	-	
Laje de inércia em argamassa armada	5,00	125,00	
Revestimento de piso em madeira flutuante	1,00	-	
Total	40,30	445,00	

Tal como no estudo da laje de piso intermédio o índice de redução sonora corresponde à média dos métodos de estimativa. No entanto pelo quadro 34 verifica-se que o valor do

método do comportamento teórico é inferior aos restantes valores, pelo para a media só se considerou os valores do método gráfico de previsão e do método empírico.

Quadro 34 - Cálculo do índice de redução sonora do pavimento entre o comércio e a habitação do piso 1

Método	RW (dB)
Método do comportamento teórico	33
Método gráfico de previsão	58
Método Empírico	57

Como o valor correspondente é superior a 45 dB, também o valor das transmissões marginais a considerar pelo método simplificado corresponde a 5 dB.

Quadro 35 – Verificação acústica entre o comércio e habitação

Local a estudar	S (m ²)	V (m ³)	T ₀ (s)	R _w (dB)	TM (dB)	D _{nT,w} (dB)	Limite regulamentar (dB)	Verificação
Piso0-Piso1	29,23	85,94	0,5	66	5	61	≥ 58 dB	OK!

5.4. Estimativa do isolamento sonoro a sons de percussão

A estimativa do isolamento a sons de percussão foi calculada para o pavimento de separação entre habitações (piso intermédio) e entre o comércio e a habitação do piso1.

Tal como o referido no subcapítulo 3.3.1 o método de Cremer é muito complexo pelo que será considerado o método simplificado para o cálculo e o método do invariante.

A contabilização das transmissões marginais serão contabilizadas consultado o quadro 10, o qual consta na norma EN12354-2.

Como no descrito no subcapítulo 3.3.1 o método simplificado traduz-se na aplicação da expressão (79) e com a qual chegamos ao valor do isolamento a sons de percussão presente no quadro abaixo indicado.

Quadro 36 – Verificação da laje de separação do comércio/habitação pelo Método Simplificado

Local a estudar	S (m ²)	V (m ³)	T ₀ (s)	K _{TM} (dB)	L' _{nT,w} (dB)	Limite regulamentar (dB)	Verificação
Piso2 - Piso1	29,23	85,94	0,5	1	52	≤60 dB	OK!

Calculou-se também através do Método do Invariante o isolamento sonoro a sons de percussão entre o comércio e a habitação do piso 1.

Quadro 37 - Verificação da laje de separação do comércio/habitação pelo Método Invariante

Local a estudar	S (m ²)	V (m ³)	T ₀ (s)	R _w (dB)	R _w +L _{n,w} (dB/oitava)	L' _{nT,w} (dB)	Limite regulamentar (dB)	Verificação
Piso2 - Piso1	29,23	85,94	0,5	66	125	34	≤60 dB	OK!

Tal como o piso de separação entre o comércio e a habitação do piso 1 o piso o isolamento a sons de percussão para o piso intermédio foi determinado pela expressão (79), a qual corresponde ao método simplificado.

Quadro 38 – Verificação entre o piso de separação dos pisos intermédios pelo método simplificado

Local a estudar	S (m ²)	V (m ³)	T ₀ (s)	K _{TM} (dB)	L' _{nT,w} (dB)	Limite regulamentar (dB)	Verificação
Piso2 - Piso1	36,97	85,94	0,5	1	47	≤60 dB	OK!

O isolamento a sons de percussão para a laje de piso intermédio também foi determinado pelo método do Invariante.

Quadro 39 - Verificação entre o piso de separação dos pisos intermédios pelo método do Invariante

Local a estudar	S (m ²)	V (m ³)	T ₀ (s)	R _w (dB)	R _w +L _{n,w} (dB/oitava)	L' _{nT,w} (dB)	Limite regulamentar (dB)	Verificação
Piso2 - Piso1	36,97	85,94	0,5	55	125	45	≤60 dB	OK!

Tanto para o cálculo do isolamento sonoro a sons de percussão entre o comércio e habitação e entre as habitações do piso 1 e 2 foram consideradas reduções sonoras (ΔL_w) de 21 dB.

5.5. Ensaios acústicos

A realização de ensaios “in situ” permite a verificação dos limites regulamentares e em alguns casos é necessário para a obtenção da licença de utilização.

Caso as soluções implementadas não cumpram os limites impostos na legislação deverão ser propostas correções, no entanto é de salientar que por vezes não são de fácil execução pois a sua aplicação implica o aumento de custos e por vezes implica a redução do espaço interior habitável.

Para a verificação dos limites regulamentares referentes a este edifício foram realizados os seguintes ensaios de isolamento:

- Ensaio a sons de condução aérea entre o comércio e a habitação do piso 1;
- Ensaio a sons de condução aérea entre a habitação do piso 1 e a habitação do piso 2;
- Ensaio a sons de condução aérea entre caixa de escadas e a habitação do piso 1;
- Ensaio a sons de percussão entre o comércio e a habitação 1;
- Ensaio a sons de percussão entre as habitações do piso 2 e a habitação do piso 1.

5.5.1. Equipamento utilizado

Para a realização dos ensaios é necessário a utilização de equipamentos de acordo com o previsto nas normas. Todos os equipamentos devem estar devidamente calibrados.

Tabela 3 - Equipamento a usar em cada ensaio

Ensaio	Equipamento
Isolamentos a sons aéreos (de fachada e entre compartimentos)	Sonómetro e respetivo calibrador
	Fonte sonora
	Amplificador
Isolamentos a sons de percussão	Sonómetro e respetivo calibrador
	Fonte sonora
	Máquina de percussão
	Amplificador
Tempo de reverberação	Sonómetro e respetivo calibrador
	Fonte sonora
	Amplificador
Nível de avaliação	Sonómetro e respetivo calibrador
	Fonte sonora
	Amplificador

Todos os equipamentos utilizados nos ensaios pertencem ao laboratório de Física das Construções do Departamento de Engenharia Civil, do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

O sonómetro a utilizar pelos laboratórios acreditados tem de ser de classe 1, estar devidamente homologados, funcionar como sonómetro integrador e ser um analisador espectral em tempo real, por bandas de oitava e terços de oitava.



Figura 5.23 - Conjunto sonómetro e tripé

A máquina de percussão é uma máquina de impacto normalizada que gera ruído de impacto normalizado para a medição do isolamento acústico entre compartimentos. Esta máquina é composta por 6 martelos em que cada um cai livremente de uma altura normalizada.



Figura 5.24 - Máquina de percussão (Martelos)

A fonte sonora é composta por um altifalante e por um amplificador (gerador de ruído).

O gerador de ruído possui um gerador de ruído rosa e um gerador de ruído branco e ainda um amplificador.

O altifalante é composto por 12 altifalantes que formam um baffle dodecaédrico que permite uma emissão omnidirecional do som produzido. Assim, o som é emitido de igual forma em todas as direções do espaço em estudo (quartos/salas de estar e circulação comum).



Figura 5.25 - Fonte sonora utilizada nos ensaios

5.5.2. Isolamento sonoro a sons de condução aérea

Foram realizados dois ensaios de isolamento sonoro a sons de condução aérea: um entre a caixa de escadas e fração de habitação do piso 1 e o segundo foi entre as frações do piso 2 e do piso 1.

Os resultados obtidos nos ensaios foram comparados com os limites impostos pelos regulamentos em vigor para assim verificar se as soluções construtivas preconizadas em projeto e executadas em obra cumprem os requisitos regulamentares.

Antes de dar início ao ensaio, foram medidas a área e o volume do compartimento de estudo.

5.5.2.1. Isolamento entre caixa de escadas e a habitação do piso 1

Para a realização do ensaio entre a caixa de escadas a fração de habitação do piso 1 colocou-se o sonómetro e a fonte sonora na caixa de escadas para assim medir o nível sonoro do compartimento emissor (L_1), para tal foram realizadas 10 leituras.

Tabela 4 - Valores do nível sonoro do compartimento emissor

f (Hz)	L_1 (dB)										L_1 (dB)
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a	10 ^a	Média
100	67	68,1	67,4	67,2	67,5	66,2	67,2	66,9	66,0	66,1	67,0
125	81,02	80,3	80,4	80,8	81,0	73,2	75,1	74,7	75,6	75,0	78,7
160	83,32	83,5	83,1	82,7	81,8	77,4	78,2	77,3	77,0	77,1	81,0
200	81,44	82,4	82,0	81,5	81,6	79,2	79,3	78,5	78,5	78,6	80,6
250	88,88	88,9	88,3	88,6	87,7	83,9	84,3	83,7	83,9	84,1	86,8
315	88,93	88,7	87,6	89,8	89,5	84,8	85,6	84,9	85,4	85,8	87,5
400	89,87	88,6	89,3	89,2	89,0	85,1	85,6	86,2	85,1	85,8	87,8
500	87,59	87,3	87,1	87,3	87,8	81,9	82,6	82,9	83,3	83,1	85,7
630	84,31	85,2	84,6	84,7	85,2	80,0	80,9	81,1	80,9	81,6	83,3
800	84,73	85,2	84,7	85,3	85,1	79,8	79,7	79,3	80,4	80,6	83,2
1000	84,18	84,5	83,6	83,7	84,1	79,6	79,6	79,8	80,1	80,1	82,4
1250	82,98	82,3	82,6	82,6	82,0	76,8	77,2	77,0	77,7	77,2	80,6
1600	83,87	83,8	83,5	83,3	83,7	78,2	78,6	78,4	78,4	77,9	81,7
2000	83,99	83,9	83,9	83,8	83,7	77,8	78,6	78,7	78,3	78,5	81,9
2500	83,14	83,2	83,1	83,1	82,6	76,4	77,5	77,5	77,3	77,7	81,1
3150	80,75	80,9	81,0	80,8	81,1	74,4	75,9	76,1	75,6	75,8	79,0

O valor único do nível médio de pressão sonora do compartimento emissor (caixa de escadas)

é dado pela seguinte expressão:

$$L_1 = 10 \times \log \left[\frac{1}{10} \times \left(10^{\left(\frac{L_{1,1}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{L_{1,2}}{10}\right)} + \dots + 10^{\left(\frac{L_{1,10}}{10}\right)} \right) \right] \text{ (dB)} \quad (94)$$

Alternamos a posição do sonómetro, colocando-o no interior da fração da habitação para assim media o nível sonoro do compartimento recetor (L_2), sendo necessário também realizar 10 leituras.

Tabela 5 - Valores do nível sonoro do compartimento recetor

f (Hz)	L ₂ (dB)										L' ₂ (dB)
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a	10 ^a	Média
100	45,4	45,3	45,6	46,4	46,3	50,2	49,8	49,7	49,0	47,2	47,6
125	60,0	61,1	61,0	53,2	54,9	57,7	58,4	58,5	62,4	63,3	59,9
160	62,5	63,0	61,8	56,7	55,5	64,2	63,1	63,4	66,9	66,4	63,4
200	58,0	58,1	58,1	55,3	55,2	68,3	68,3	67,9	67,9	67,7	65,3
250	64,1	64,7	63,8	64,0	64,1	70,7	70,5	70,2	70,8	71,4	68,4
315	66,2	66,5	66,3	64,7	64,3	68,5	69,0	68,0	69,7	68,7	67,3
400	61,1	61,3	61,7	60,1	60,4	65,1	65,0	64,9	68,7	68,1	64,6
500	58,3	58,6	58,2	56,6	56,5	64,5	64,1	64,0	65,1	65,4	62,3
630	55,9	55,9	56,1	53,1	53,2	60,6	60,4	60,4	61,8	61,9	58,9
800	55,8	55,9	55,8	55,3	55,8	62,4	62,3	62,5	64,0	63,9	60,7
1000	57,7	57,3	57,7	56,4	56,7	63,4	63,7	64,2	65,1	65,2	62,0
1250	56,5	56,0	56,5	54,8	54,9	61,3	61,6	61,7	64,0	63,8	60,3
1600	58,0	57,6	57,6	56,6	56,5	63,2	63,2	63,5	65,3	65,4	61,9
2000	57,3	57,7	57,2	55,5	55,8	63,7	63,4	63,7	66,3	66,5	62,5
2500	54,2	54,5	54,0	53,1	52,9	60,5	60,7	60,6	63,6	64,0	59,6
3150	52,7	52,8	52,5	51,0	50,7	59,5	59,5	59,5	62,1	61,9	58,1

Conforme o prescrito nas normas foram alternadas as posições do sonómetro e da fonte sonora.

Tal como no software da Bruel o nível sonoro do compartimento recetor (habitação do piso 1) é designado por L'2 e é dado pela seguinte expressão:

$$L_2 = 10 \times \log \left[\frac{1}{10} \times \left(10^{\left(\frac{L_{2,1}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{L_{2,2}}{10}\right)} + \dots + 10^{\left(\frac{L_{2,10}}{10}\right)} \right) \right] \text{ (dB)} \quad (95)$$

O nível sonoro do compartimento recetor engloba o ruído de fundo, assim para termos o nível sonoro sem a sua influência temos de calcular o nível sonoro da seguinte forma:

$$L'_2 = 10 \times \log \left(10^{\frac{L'_2}{10}} - 10^{\frac{B_2}{10}} \right) \text{ (dB)} \quad (96)$$

O ruído de fundo é medido apenas com o recurso ao sonómetro e através de 6 leituras, as quais estão representadas no seguinte quadro:

Tabela 6 - Valores obtidos do ruído de fundo no compartimento recetor

f (hz)	B ₂ - ruído de fundo (dB)						B ₂ (dB)
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	Média
100	14,8	19,2	24,7	16,8	16,5	18,3	19,7
125	14,5	22,4	27,0	15,3	16,4	16,4	21,4
160	16,2	24,1	27,5	15,6	22,2	18,5	22,7
200	12,8	20,5	24,0	16,0	15,3	21,1	19,9
250	12,7	18,9	26,0	16,6	18,7	16,0	20,3
315	13,8	17,6	21,1	19,0	27,6	18,2	21,9
400	10,1	13,8	18,6	17,8	22,6	16,2	18,1
500	8,3	13,7	17,8	17,8	23,5	15,6	18,3
630	7,3	14,3	17,0	15,9	21,6	11,7	16,7
800	8,0	14,9	18,8	9,7	20,7	10,6	16,2
1000	8,3	15,1	18,4	11,5	20,6	12,4	16,3
1250	7,5	14,1	18,3	13,8	17,2	11,3	15,0
1600	8,2	12,8	17,9	14,2	16,5	9,9	14,5
2000	7,5	11,6	18,8	9,1	12,0	9,0	13,3
2500	6,7	10,0	19,3	8,7	12,0	7,7	13,3
3150	7,3	10,1	18,1	9,0	11,7	8,7	12,6

Para a determinação do valor médio do ruído de fundo de cada frequência utiliza-se a seguinte expressão:

$$B_2 = 10 \times \log \left[\frac{1}{6} \times \left(10^{\frac{B_{2,1}}{10}} + 10^{\frac{B_{2,2}}{10}} + \dots + 10^{\frac{B_{2,6}}{10}} \right) \right] \text{ (dB)} \quad (97)$$

Além dos níveis sonoros dos compartimentos e do ruído de fundo, neste ensaio também é necessário a determinação do tempo de reverberação do compartimento recetor (T₂). Como tal foram colocados todos os equipamentos dentro fração da habitação procedendo assim às 6 medições necessárias.

Tabela 7 – Valores do tempo de reverberação do compartimento recetor

f (Hz)	T ₂ (s)						T ₂ (s) Média
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
100	0,70	0,62	0,74	0,74	0,79	0,84	0,74
125	1,10	1,09	1,06	1,21	1,22	1,24	1,15
160	1,05	1,14	1,19	1,03	1,10	1,09	1,10
200	1,38	1,39	1,36	1,33	1,27	1,30	1,34
250	1,82	1,62	1,59	2,10	1,57	2,03	1,79
315	1,87	1,61	1,67	2,06	1,68	2,10	1,83
400	1,68	1,53	1,61	1,86	1,67	1,73	1,68
500	1,16	1,12	1,23	1,20	1,29	1,35	1,23
630	1,31	1,21	1,16	1,23	1,20	1,19	1,22
800	1,74	1,83	1,78	1,98	2,02	1,91	1,88
1000	2,14	2,08	2,15	2,12	2,12	2,26	2,15
1250	2,20	2,12	2,25	2,25	2,21	2,31	2,22
1600	2,15	2,15	2,14	2,15	2,18	2,22	2,17
2000	1,96	2,00	2,03	1,96	1,97	1,97	1,98
2500	1,68	1,73	1,75	1,67	1,69	1,65	1,70
3150	1,64	1,67	1,65	1,73	1,66	1,68	1,67

O valor médio do tempo de reverberação é calculado com recurso à seguinte expressão:

$$T_2 = \frac{T_{2,1} + T_{2,2} + \dots + T_{2,6}}{6} \text{ (s)} \quad (98)$$

Na figura abaixo indicada ilustra-se o esquema do ensaio realizado entre a caixa de escadas e a habitação do piso 1.

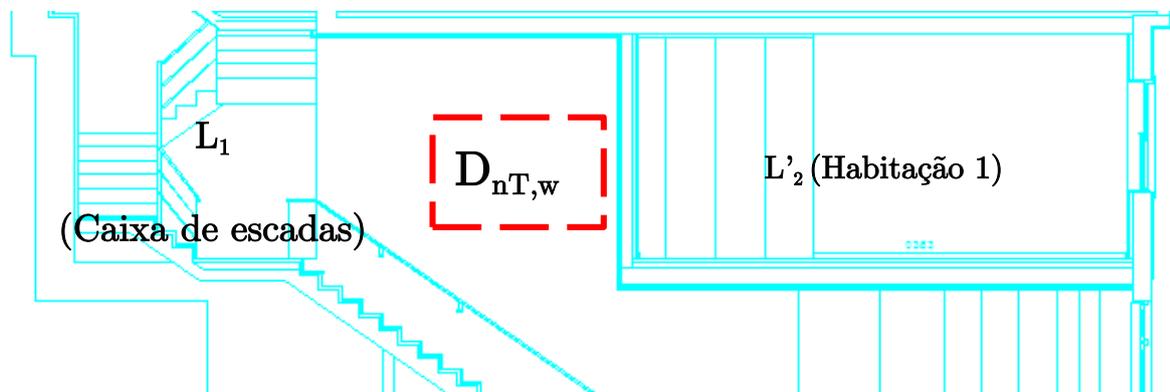


Figura 5.26 - Esquema de medição

O índice de isolamento sonoro a sons aéreos entre a caixa de escadas e a habitação do piso 1 é dada pela seguinte expressão:

$$\begin{aligned} D_{nT,w} &= D + 10 \times \log\left(\frac{T}{T_0}\right) \\ &= (L_1 - L'_2) + 10 \times \log\left(\frac{T}{T_0}\right) = R' + 10 \times \log\left(\frac{0,16 \times V}{S \times T_0}\right) \text{ (dB)} \end{aligned} \quad (99)$$

Sendo que,

A_0 – área de absorção sonora equivalente de referência (=10 m²)

A – área de absorção sonora equivalente existente no compartimento recetor (m²)

T_0 – tempo de reverberação de referência (= 0,5s)

T – tempo de reverberação existente no compartimento recetor (s)

S – superfície do elemento de separação (m²)

O índice de redução sonora será por:

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \times \log\frac{A_0}{A_2} \text{ (dB)} \quad (100)$$

Em que A_2 corresponde à absorção sonora do compartimento emissor, expresso em m² e é quantificado através do respetivo tempo de reverberação:

$$T_2 = \frac{0,16 \times V}{A_2} \leftrightarrow A_2 = \frac{0,16 \times V}{T_2} \text{ (m}^2\text{)} \quad (101)$$

Por fim para determinar o isolamento sonoro a sons aéreos normalizado usamos:

$$\begin{aligned} D_n &= D + 10 \times \log\left(\frac{A_0}{A}\right) \\ &= (L_1 - L'_2) + 10 \times \log\left(\frac{A_0}{A}\right) = R' + 10 \times \log\left(\frac{A_0}{A}\right) \text{ (dB)} \end{aligned} \quad (102)$$

Ou então para termo o isolamento a sons aéreos padronizado:

$$\begin{aligned} D_{nT} &= D + 10 \times \log\left(\frac{T}{T_0}\right) \\ &= (L_1 - L'_2) + 10 \times \log\left(\frac{T}{T_0}\right) = R' + 10 \times \log\left(\frac{T}{T_0}\right) \text{ (dB)} \end{aligned} \quad (103)$$

De acordo com a norma ISO 717-1 para determinarmos o índice de redução sonora ponderado, R_w e o índice de isolamento sonoro padronizado ponderado, $D'_{nT,w}$ temos de

ajustar a curva de referência à curva dos valores medidos para cada frequência dos valores de R e D_{nT} .

Assim sendo fixamos o valor de R referente à frequência de 500 Hz e calculamos os valores para as restantes frequências da banda de frequências considerada de acordo com o ajuste da curva de referência.

Na tabela abaixo estarão indicados os valores da curva de referência e as variações depois do ajuste.

Tabela 8 - Valores da curva de referência e respetivas variações

f (Hz)	Δ	$L_{ajustado}$
100	-3	33
125	-3	36
160	-3	39
200	-3	42
250	-3	45
315	-3	48
400	-1	51
500	Valor fixo	52
630	+1	53
800	+1	54
1000	+1	55
1250	+1	56
1600	+0	56
2000	+0	56
2500	+0	56
3150	+0	56

Para o cálculo de R_w fixamos o valor do isolamento sonoro referente à frequência dos 500 Hz, o que neste ensaio corresponde em fixar em 28 dB e ajustamos os restantes valores segundo os declives apresentados pela curva de referência. Os desvios favoráveis são determinados pela diferença entre os valores de R e os valores do L ajustado para cada frequência. Os desvios desfavoráveis correspondem ao somatório dos valores da curva que se encontra abaixo da curva de referência ajustada à frequência de 500 Hz, ou seja, correspondem aos valores negativos da diferença entre os valores de R e a curva ajustada. Foram feitas duas iterações para que o somatório dos desvios desfavoráveis se aproxima-se o máximo possível de 32 dB, pois a norma define que estes não devem ser superior ao número de bandas de frequência vezes dois. Na primeira iteração o somatório dos desvios deu inferior aos 32 dB, assim procedeu-se a uma segunda iteração na qual excedia os 32 dB. Então o índice de redução sonora será os 28 dB.

Quadro 40 - Determinação do valor de R_w

f (Hz)	L ₁ (dB)	L ₂ (dB)	B ₂ (dB)	L ₂ (dB)	T ₂ (s)	A ₂ (m ²)	1ª tentativa			2ª tentativa			3ª tentativa		
							Lajustado	Δ	Desvios Desfavoráv.	Lajustado	Δ	Desvios Desfavoráv.	Lajustado	Δ	Desvios Desfavoráv.
100	67,0	47,6	19,7	47,6	0,74	18,59	9	13	0	10	12	0			
125	78,7	59,9	21,4	59,9	1,15	11,97	12	11	0	13	10	0			
160	81,0	63,4	22,7	63,4	1,10	12,51	15	7	0	16	6	0			
200	80,6	65,4	19,9	65,4	1,34	10,27	18	2	0	19	1	0			
250	86,8	68,4	20,3	68,4	1,79	7,69	21	4	0	22	3	0			
315	87,5	67,3	21,9	67,3	1,83	7,52	24	3	0	25	2	0			
400	87,8	64,6	18,1	64,6	1,68	8,19	27	2	0	28	1	0			
500	85,7	62,3	18,3	62,3	1,23	11,19	28	0	0	29	-1	1			
630	83,3	58,9	16,7	58,9	1,22	11,28	29	0	0	30	-1	1			
800	83,2	60,7	16,2	60,7	1,88	7,32	30	-1	1	31	-2	2			
1000	82,4	62,0	16,3	62,0	2,15	6,40	31	-4	4	32	-4	4			
1250	80,6	60,3	15,0	60,3	2,22	6,20	32	-5	5	33	-5	5			
1600	81,7	61,9	14,5	61,9	2,17	6,34	32	-5	5	33	-6	6			
2000	81,9	62,5	13,3	62,5	1,98	6,95	32	-6	6	33	-7	7			
2500	81,1	59,6	13,3	59,6	1,70	8,09	32	-5	5	33	-5	5			
3150	79,0	58,1	12,6	58,1	1,67	8,24	32	-5	5	33	-6	6			
							SOMA=	30		SOMA=	36		SOMA=	0	

Para uma melhor compreensão do ajuste da curva de referência à curva real é apresentado o gráfico com a curva de referência, a curva real e a curva depois de efetuado o ajuste à frequência de 500 Hz.

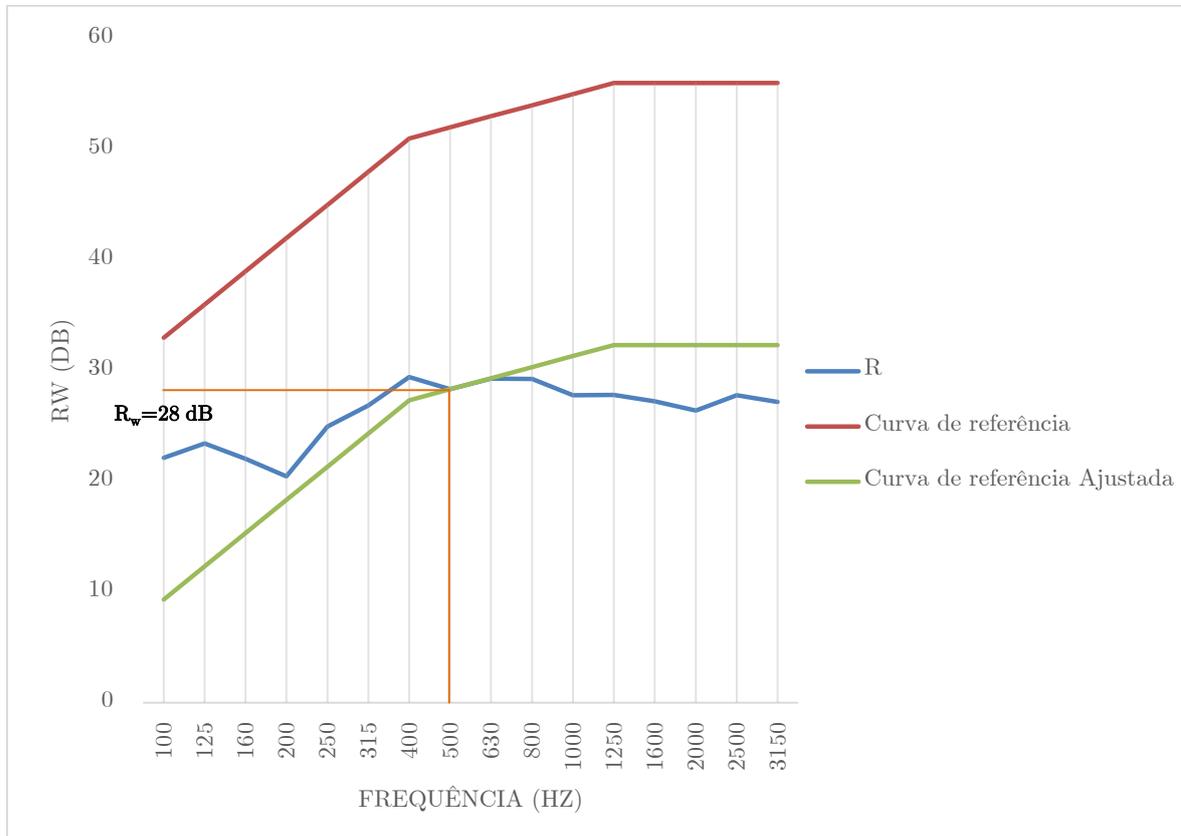


Gráfico 14 - Gráfico Representativo da curva de R_w e da curva de referência

O cálculo do índice isolamento a sons aéreos padronizado, $D'_{nT,w}$, é análogo ao efetuado para o índice de redução sonora. Fixou-se o valor em 27 dB, o qual corresponde à frequência de 500 Hz e procedeu-se ao ajuste da curva de referência à curva real. Verificou-se que o somatório dos desvios desfavoráveis ainda não excedia o 32 dB embora já estivesse num valor aproximado e fez-se uma nova iteração, na qual se verificou que o somatório dos desvios excedia o limite de 32 dB. Como tal verificamos que o índice de isolamento a sons aéreos padronizado é de 27 dB.

Quadro 41 – Determinação do valor $D'_{nT,w}$

f (hz)	L ₁ (dB)	L' ₂ (dB)	B ₂ (dB)	L ₂ (dB)	T ₂ (s)	D _{nT} (dB)	1ª tentativa			2ª tentativa			3ª tentativa		
							Lajustado	Δ	Desvios Desfavoráv.	Lajustado	Δ	Desvios Desfavoráv.	Lajustado	Δ	Desvios Desfavoráv.
100	67,0	47,6	19,7	47,6	0,74	21	8	13	0	9	12	0			
125	78,7	59,9	21,4	59,9	1,15	22	11	11	0	12	10	0			
160	81,0	63,4	22,7	63,4	1,10	21	14	7	0	15	6	0			
200	80,6	65,4	19,9	65,4	1,34	19	17	2	0	18	1	0			
250	86,8	68,4	20,3	68,4	1,79	24	20	4	0	21	3	0			
315	87,5	67,3	21,9	67,3	1,83	26	23	3	0	24	2	0			
400	87,8	64,6	18,1	64,6	1,68	28	26	2	0	27	1	0			
500	85,7	62,3	18,3	62,3	1,23	27	27	0	0	28	-1	1			
630	83,3	58,9	16,7	58,9	1,22	28	28	0	0	29	-1	1			
800	83,2	60,7	16,2	60,7	1,88	28	29	-1	1	30	-2	2			
1000	82,4	62,0	16,3	62,0	2,15	27	30	-4	4	31	-4	4			
1250	80,6	60,3	15,0	60,3	2,22	27	31	-5	5	32	-5	5			
1600	81,7	61,9	14,5	61,9	2,17	26	31	-5	5	32	-6	6			
2000	81,9	62,5	13,3	62,5	1,98	25	31	-6	6	32	-7	7			
2500	81,1	59,6	13,3	59,6	1,70	27	31	-5	5	32	-5	5			
3150	79,0	58,1	12,6	58,1	1,67	26	31	-5	5	32	-6	6			
							SOMA= 30			SOMA= 36			SOMA= 0		

O ajuste da curva de referência à curva real está representada no Gráfico a seguir indicado.

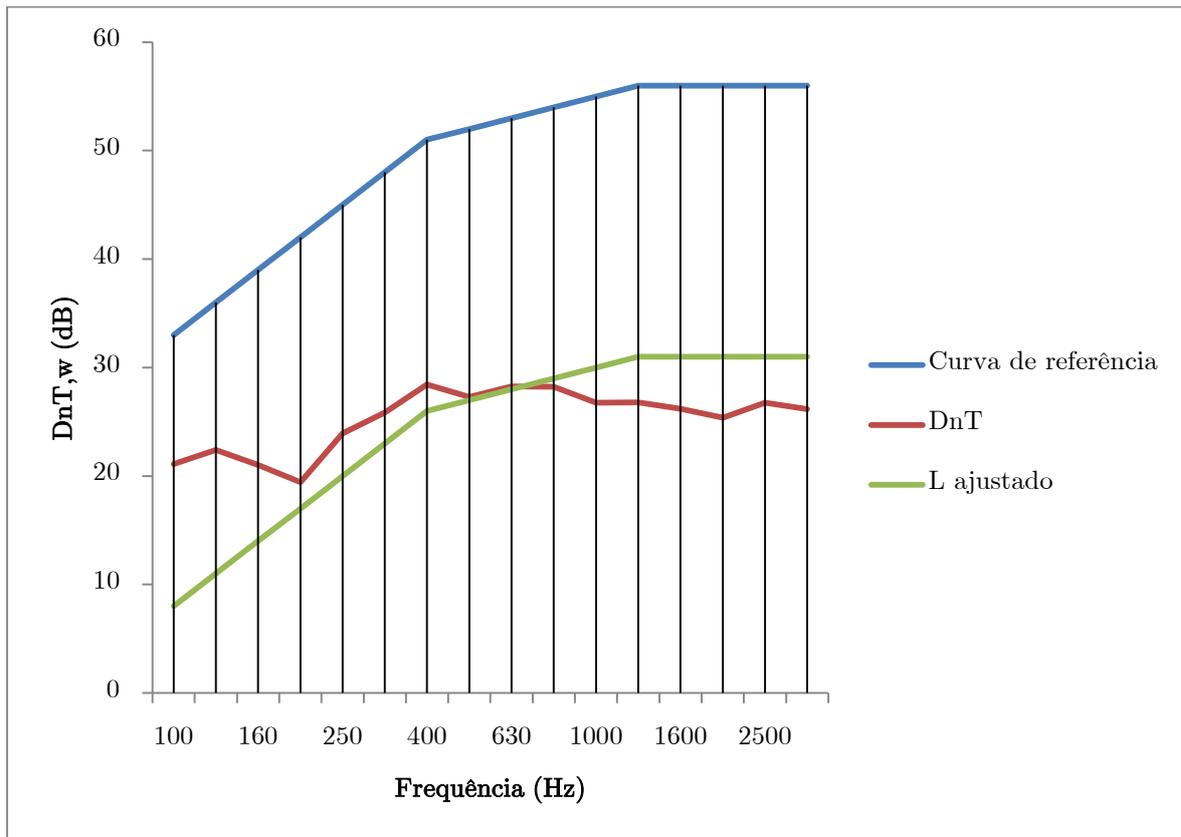


Gráfico 15 - Gráfico representativo da curva de D_{nT} e da curva de referência

5.5.2.2. Entre habitação do piso 2 e do piso 1

Para a realização do ensaio entre a habitação do piso 2 e da habitação do piso 1 colocou-se o sonómetro e a fonte sonora na habitação do piso 1 para assim medir o nível sonoro do compartimento emissor (L_1), para tal foram realizadas 10 leituras.

Tabela 9 - Valores do nível sonoro do compartimento emissor

f (hz)	L_1 (dB)										L_1 (dB)
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a	10 ^a	Média
100	75,6	76,2	76,0	75,7	75,6	75,8	75,9	76,1	75,9	75,4	75,8
125	76,5	77,3	77,1	77,7	77,9	77,6	77,3	77,3	78,3	76,8	77,4
160	83,7	84,8	84,5	83,6	84,1	84,0	84,6	85,0	84,0	84,5	84,3
200	84,4	83,6	83,8	83,3	84,7	84,6	85,9	84,5	84,7	84,3	84,4
250	85,8	86,2	86,2	85,9	85,9	86,0	86,4	85,4	86,2	85,2	85,9
315	88,5	88,8	87,9	88,2	87,3	87,9	87,6	87,3	87,7	88,2	88,0
400	88,7	88,6	88,9	88,7	89,3	89,5	89,7	89,3	89,4	88,8	89,1
500	85,7	85,1	85,3	85,3	85,7	86,0	86,3	85,9	85,2	85,5	85,6
630	83,7	83,2	83,5	83,8	82,2	82,7	82,8	82,5	82,0	82,1	82,9
800	83,8	83,5	83,7	83,5	83,4	83,6	83,7	84,0	84,0	83,8	83,7
1000	85,7	85,4	85,7	86,1	85,6	85,5	85,5	85,8	85,3	85,4	85,6
1250	83,8	83,3	83,4	83,2	82,9	83,0	82,5	82,6	82,3	82,6	83,0
1600	85,7	85,2	85,4	85,3	85,6	85,8	85,8	85,8	85,5	85,8	85,6
2000	84,8	84,5	84,8	84,9	84,2	84,3	84,8	84,6	84,2	84,2	84,5
2500	82,6	82,7	82,9	82,9	83,1	83,3	83,1	83,2	83,0	83,0	83,0
3150	81,2	81,1	81,0	81,2	81,8	82,0	82,0	81,9	81,7	81,5	81,6

O valor único do nível médio de pressão sonora do compartimento emissor (habitação do piso 1) é dado pela seguinte expressão:

$$L_1 = 10 \times \log \left[\frac{1}{10} \times \left(10^{\left(\frac{L_{1,1}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{L_{1,2}}{10}\right)} + \dots + 10^{\left(\frac{L_{1,10}}{10}\right)} \right) \right] \text{ (dB)} \quad (104)$$

Alteramos a posição do sonómetro, colocando-o no interior da fração da habitação do piso 1 para assim medir o nível sonoro do compartimento recetor (L_2), sendo necessário também realizar 10 leituras.

Tabela 10 - Valores do nível sonoro do compartimento recetor

f (hz)	L_2 (dB)										L_2 (dB)
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª	9ª	10ª	Média
100	34,7	32,9	35,4	33,9	34,2	37,5	34,8	35,0	34,9	35,4	35,0
125	34,8	35,5	35,5	35,6	36,3	38,9	36,8	36,4	36,6	37,6	36,6
160	42,6	42,7	42,4	42,1	41,9	42,3	41,0	41,1	41,0	40,2	41,8
200	45,4	46,0	46,3	45,3	45,7	51,8	50,9	51,1	52,5	50,8	49,5
250	47,3	47,2	47,5	47,8	48,0	48,0	47,4	47,8	48,0	48,1	47,7
315	45,0	45,3	45,5	44,6	45,8	45,5	45,6	45,7	46,2	45,2	45,5
400	39,7	39,8	39,7	39,6	39,0	39,8	39,1	39,2	39,4	41,4	39,7
500	38,4	38,2	38,0	38,3	38,9	41,5	40,9	40,3	39,9	40,7	39,7
630	33,2	33,2	33,0	33,1	32,0	36,2	35,1	34,9	34,6	34,3	34,1
800	37,8	37,9	38,2	37,8	38,1	39,5	39,4	39,4	38,7	40,0	38,8
1000	38,4	38,2	38,3	38,1	38,6	38,4	38,8	38,7	37,9	38,9	38,4
1250	35,4	35,2	35,5	35,2	34,8	35,1	34,7	34,8	34,9	35,4	35,1
1600	36,0	36,3	35,9	35,9	36,4	36,3	36,4	36,3	36,4	36,8	36,3
2000	36,0	36,4	36,3	36,2	36,7	37,0	36,8	36,9	37,0	38,2	36,8
2500	33,9	34,1	34,2	34,3	34,2	35,9	35,3	35,3	35,5	36,2	34,9
3150	33,4	33,5	33,7	33,5	32,7	34,3	33,9	33,9	33,9	34,8	33,8

Conforme o prescrito nas normas foram alternadas as posições do sonómetro e da fonte sonora.

Tal como no software da Bruel o nível sonoro do compartimento recetor (habitação do piso 1) é designado por L'_2 e é dado pela seguinte expressão:

$$L_2 = 10 \times \log \left[\frac{1}{10} \times \left(10^{\left(\frac{L_{2,1}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{L_{2,2}}{10}\right)} + \dots + 10^{\left(\frac{L_{2,10}}{10}\right)} \right) \right] \text{ (dB)} \quad (105)$$

O nível sonoro do compartimento recetor engloba o ruído de fundo, assim para termos o nível sonoro sem a sua influência temos de calcular o nível sonoro da seguinte forma:

$$L'_2 = 10 \times \log \left(10^{\frac{L_2}{10}} - 10^{\frac{B_2}{10}} \right) \text{ (dB)} \quad (106)$$

O ruído de fundo é medido apenas com o recurso ao sonómetro e através de 6 leituras, as quais estão representadas no seguinte quadro:

Tabela 11 - Valores obtidos do ruído de fundo no compartimento recetor

f (Hz)	B ₂ - ruído de fundo (dB)						B ₂ (dB)
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	Média
100	17,7	16,4	16,8	15,9	15,6	17,4	16,7
125	15,8	14,6	13,5	14,0	14,1	16,5	14,9
160	19,6	17,3	16,1	17,5	16,8	19,7	18,1
200	15,4	15,4	13,3	17,0	15,2	15,9	15,5
250	15,5	14,5	11,2	15,7	15,3	16,3	15,0
315	17,2	15,7	14,6	16,8	16,3	16,4	16,2
400	12,9	10,9	9,9	13,3	11,2	10,8	11,7
500	11,0	8,4	6,3	12,3	10,5	10,0	10,2
630	8,6	6,9	6,2	12,1	9,0	8,4	9,0
800	11,5	9,0	8,7	14,7	11,0	9,4	11,3
1000	10,5	8,2	8,4	14,4	12,9	8,8	11,2
1250	10,0	8,0	8,2	14,7	13,6	8,6	11,4
1600	9,7	8,2	10,0	14,7	13,6	9,6	11,6
2000	7,8	8,0	8,2	14,7	14,0	8,5	11,3
2500	7,7	6,8	7,5	13,8	13,4	8,9	10,7
3150	8,0	7,2	7,0	13,3	13,1	8,9	10,4

Para a determinação do valor médio do ruído de fundo de cada frequência utiliza-se a seguinte expressão:

$$B_2 = 10 \times \log \left[\frac{1}{6} \times \left(10^{\frac{B_{2,1}}{10}} + 10^{\frac{B_{2,2}}{10}} + \dots + 10^{\frac{B_{2,6}}{10}} \right) \right] \text{ (dB)} \quad (107)$$

Além dos níveis sonoros dos compartimentos e do ruído de fundo, neste ensaio também é necessário a determinação do tempo de reverberação do compartimento recetor (T₂). Como tal foram colocados todos os equipamentos dentro fração da habitação procedendo assim às 6 medições necessárias.

Tabela 12 - Valores do tempo de reverberação do compartimento recetor

f (Hz)	T ₂ (s)						T ₂ (s) Média
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
100	2,02	0,98	1,25	3,64	1,41	4,10	2,23
125	1,08	1,09	1,05	1,18	0,89	1,02	1,05
160	1,03	0,93	1,10	1,06	0,94	0,82	0,98
200	1,52	1,21	1,34	1,49	1,47	1,17	1,37
250	1,37	1,61	1,90	1,91	1,64	1,67	1,68
315	1,40	1,43	1,37	1,59	1,39	1,44	1,44
400	1,59	1,45	1,56	1,52	1,55	1,56	1,54
500	1,27	1,24	1,32	1,35	1,20	1,20	1,26
630	1,28	1,31	1,26	1,28	1,23	1,25	1,27
800	1,81	1,74	1,77	1,74	1,80	1,80	1,78
1000	2,13	2,21	2,15	2,11	2,18	2,15	2,16
1250	2,20	2,29	2,27	2,27	2,20	2,17	2,23
1600	2,22	2,26	2,26	2,21	2,23	2,22	2,23
2000	2,01	2,00	2,00	2,09	2,15	2,15	2,07
2500	1,66	1,70	1,65	1,68	1,75	1,78	1,70
3150	1,74	1,78	1,75	1,74	1,79	1,79	1,77

O valor médio do tempo de reverberação é calculado com recurso à seguinte expressão:

$$T_2 = \frac{T_{2,1} + T_{2,2} + \dots + T_{2,6}}{6} \text{ (s)} \quad (108)$$

Na figura abaixo indicada ilustra-se o esquema do ensaio realizado entre a habitação do piso 2 e a habitação do piso 1.

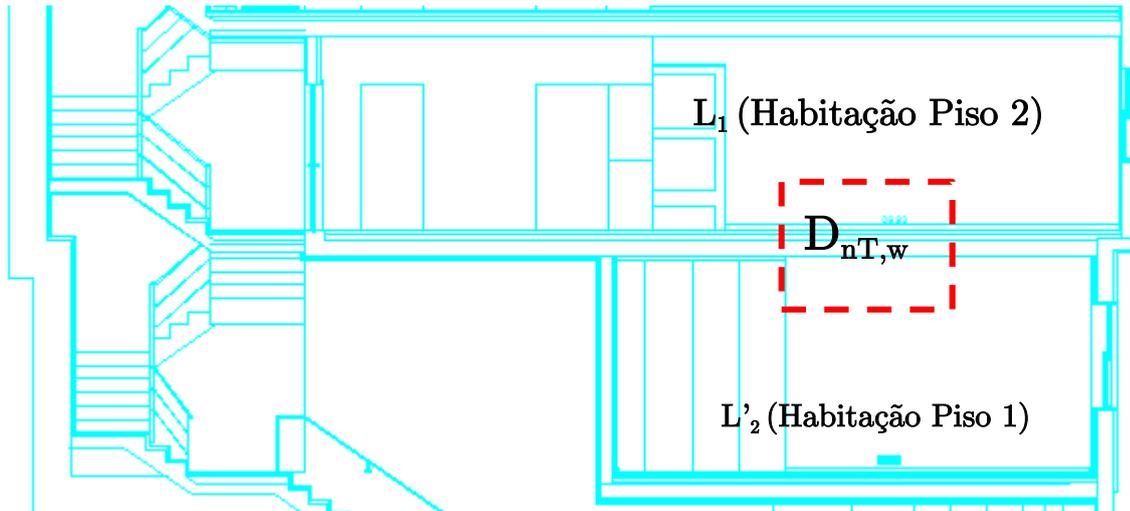


Figura 5.27 - Esquema de medição

O índice de isolamento sonoro a sons aéreos entre a habitação do piso 2 e a habitação do piso 1 é dada pela seguinte expressão:

$$\begin{aligned}
 D_{nT,w} &= D + 1 \times \log\left(\frac{T}{T_0}\right) \\
 &= (L_1 - L'_2) + 10 \times \log\left(\frac{T}{T_0}\right) = R' + 10 \times \log\left(\frac{0,16 \times V}{S \times T_0}\right) \text{ (dB)}
 \end{aligned}
 \tag{109}$$

Sendo que,

A_0 – área de absorção sonora equivalente de referência (=10 m²)

A – área de absorção sonora equivalente existente no compartimento recetor (m²)

T_0 – tempo de reverberação de referência (= 0,5s)

T – tempo de reverberação existente no compartimento recetor (s)

S – superfície do elemento de separação (m²)

O índice de redução sonora será dado por:

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \times \log\frac{A_0}{A_2} \text{ (dB)}
 \tag{110}$$

Em que A_2 corresponde à absorção sonora do compartimento emissor, expresso em m² e é quantificado através do respetivo tempo de reverberação:

$$T_2 = \frac{0,16 \times V}{A_2} \leftrightarrow A_2 = \frac{0,16 \times V}{T_2} \text{ (m}^2\text{)} \quad (111)$$

Por fim para determinar o isolamento sonoro a sons aéreos normalizado usamos:

$$\begin{aligned} D_n &= D + 10 \times \log\left(\frac{A_0}{A}\right) \\ &= (L_1 - L'_2) + 10 \times \log\left(\frac{A_0}{A}\right) = R' + 10 \times \log\left(\frac{A_0}{A}\right) \text{ (dB)} \end{aligned} \quad (112)$$

Ou então para termo o isolamento a sons aéreos padronizado:

$$\begin{aligned} D_{nT} &= D + 10 \times \log\left(\frac{T}{T_0}\right) \\ &= (L_1 - L'_2) + 10 \times \log\left(\frac{T}{T_0}\right) = R' + 10 \times \log\left(\frac{T}{T_0}\right) \text{ (dB)} \end{aligned} \quad (113)$$

De acordo com a norma ISO 717-1 para determinarmos o índice de redução sonora ponderado, R_w e o índice de isolamento sonoro padronizado ponderado, $D'_{nT,w}$ temos de ajustar a curva de referência à curva dos valores medidos para cada frequência dos valores de R e D_{nT} .

Assim sendo fixamos o valor de R referente à frequência de 500 Hz e calculamos os valores para as restantes frequências da banda de frequências considerada de acordo com o ajuste da curva de referência.

Na tabela 12 estão indicados os valores da curva de referência e as variações depois do ajuste.

Para o cálculo de R_w fixamos o valor do isolamento sonoro referente à frequência dos 500 Hz, o que neste ensaio corresponde em fixar em 51 dB e ajustamos os restantes valores segundo os declives apresentados pela curva de referência. Os desvios favoráveis são determinados pela diferença entre os valores de R e os valores do L ajustado para cada frequência. Os desvios desfavoráveis correspondem ao somatório dos valores da curva que se encontra abaixo da curva de referência ajustada à frequência de 500 Hz, ou seja, correspondem aos valores negativos da diferença entre os valores de R e a curva ajustada.

Foram feitas três iterações para que o somatório dos desvios desfavoráveis se aproxima-se o máximo possível de 32 dB, pois a norma define que estes não devem ser superior ao número de bandas de frequência vezes dois. Na primeira iteração o somatório dos desvios deu inferior aos 32 dB, assim procedeu-se a uma segunda iteração a qual ainda ficava aquém dos 32 dB, precisando de uma terceira iteração a qual excedia os 32 dB. Então o índice de redução sonora será igual aos 53 dB.

Quadro 42 - Determinação do valor de R_w

f (hz)	L ₁ (dB)	L ₂ (dB)	B ₂ (dB)	L ₂ (dB)	T ₂ (s)	A ₂ (m ²)	R' (dB)	1ª tentativa			2ª tentativa			3ª tentativa		
								Lajustado	Δ	Desvíos Desfavoráv.	Lajustado	Δ	Desvíos Desfavoráv.	Lajustado	Δ	Desvíos Desfavoráv.
100	75,8	35,0	16,7	34,9	2,23	6,16	48	32	16	0	34	14	0	35	13	0
125	77,4	36,6	14,9	36,5	1,05	13,08	45	35	10	0	37	8	0	38	7	0
160	84,3	41,8	18,1	41,8	0,98	14,04	46	38	8	0	40	6	0	41	5	0
200	84,4	49,5	15,5	49,5	1,37	10,07	40	41	-1	1	43	-3	3	44	-4	4
250	85,9	47,7	15,0	47,7	1,68	8,17	45	44	1	0	46	-1	1	47	-2	2
315	88,0	45,5	16,2	45,5	1,44	9,58	48	47	1	0	49	-1	1	50	-2	2
400	89,1	39,7	11,7	39,7	1,54	8,94	55	50	5	0	52	3	0	53	2	0
500	85,6	39,7	10,2	39,7	1,26	10,89	51	51	0	0	53	-2	2	54	-3	3
630	82,9	34,1	9,0	34,1	1,27	10,85	54	52	2	0	54	0	0	55	-1	1
800	83,7	38,8	11,3	38,8	1,78	7,74	51	53	-2	2	55	-4	4	56	-5	5
1000	85,6	38,4	11,2	38,4	2,16	6,39	55	54	1	0	56	-1	1	57	-2	2
1250	83,0	35,1	11,4	35,1	2,23	6,16	55	55	0	0	57	-2	2	58	-3	3
1600	85,6	36,3	11,6	36,3	2,23	6,16	57	55	2	0	57	0	0	58	-1	1
2000	84,5	36,8	11,3	36,8	2,07	6,66	55	55	0	0	57	-2	2	58	-3	3
2500	83,0	34,9	10,7	34,9	1,70	8,08	54	55	-1	1	57	-3	3	58	-4	4
3150	81,6	33,8	10,4	33,8	1,77	7,80	54	55	-1	1	57	-3	3	58	-4	4
								SOMA= 3			SOMA= 21			SOMA= 33		

Para uma melhor compreensão do ajuste da curva de referência à curva real é apresentado o gráfico com a curva de referência, a curva real e a curva depois de efetuado o ajuste à frequência de 500 Hz.

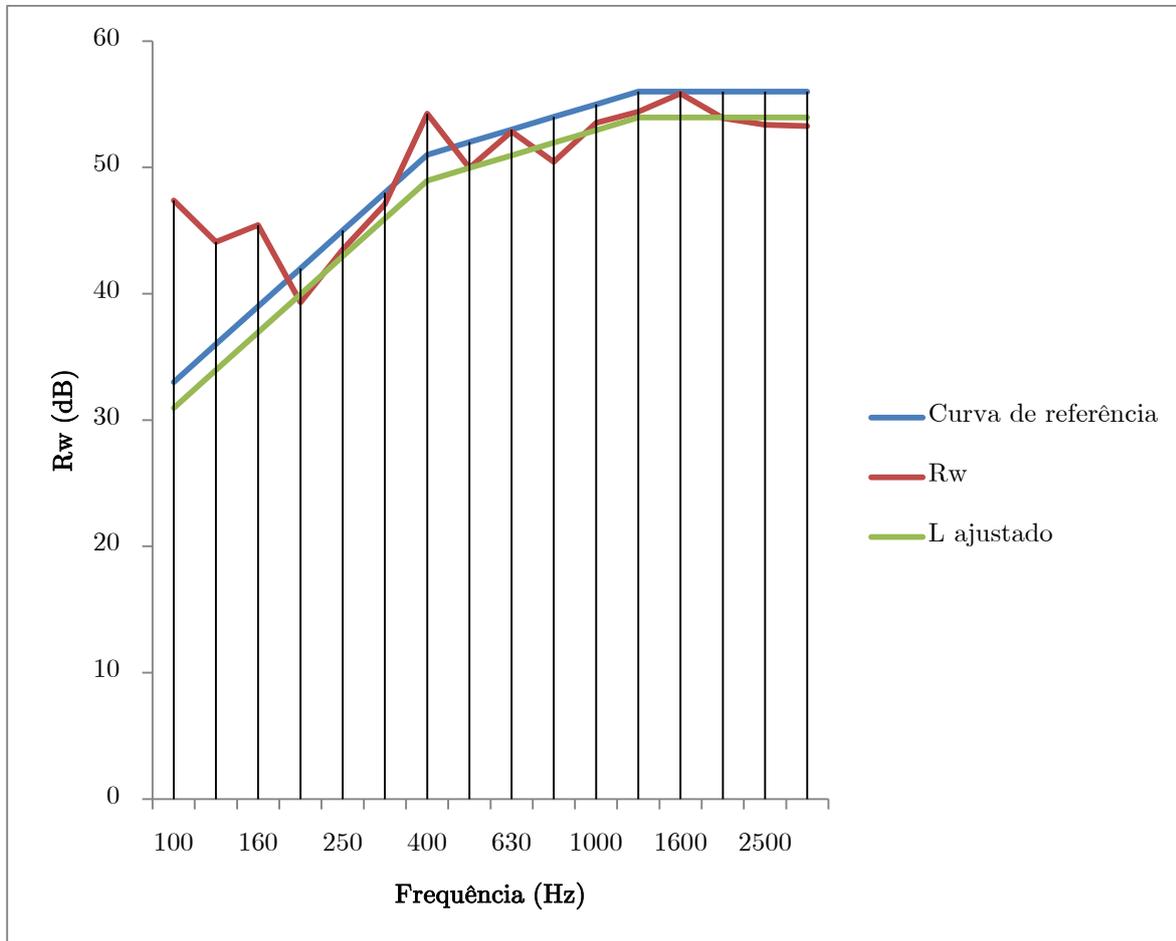


Gráfico 16 - Gráfico Representativo da curva de R_w e da curva de referência

O cálculo do índice de isolamento a sons aéreos padronizado, $D'_{nT,w}$, é análogo ao efetuado para o índice de redução sonora. Fixou-se o valor em 50 dB, o qual corresponde à frequência de 500 Hz e procedeu-se ao ajuste da curva de referência à curva real. Verificou-se que o somatório dos desvios desfavoráveis ainda não excedia o 32 dB embora já estivesse num valor aproximado e fez-se uma nova iteração, na qual se verificou que o somatório dos desvios excedia o limite de 32 dB. Como tal verificamos que o índice de isolamento a sons aéreos padronizado é de 52 dB.

O ajuste da curva de referência à curva real está representada no Gráfico a seguir indicado.

Quadro 43 - Determinação do valor de $D'_{n,T}$

f (hz)	L ₁ (dB)	L' ₂ (dB)	B ₂ (dB)	L ₂ (dB)	T ₂ (s)	D _{n,T} (dB)	1ª tentativa			2ª tentativa			3ª tentativa					
							Lajustado	Δ	Desvios Desfavoráv.	Lajustado	Δ	Desvios Desfavoráv.	Lajustado	Δ	Desvios Desfavoráv.			
100	75,8	34,9	16,7	35,0	2,03	47	31	16	0	33	14	0	34	13	0			
125	77,4	36,6	14,9	36,6	1,04	44	34	10	0	36	8	0	37	7	0			
160	84,3	41,8	18,1	41,8	0,97	45	37	8	0	39	6	0	40	5	0			
200	84,4	49,5	15,5	49,5	1,39	39	40	-1	0	42	-3	0	43	-4	-4			
250	85,9	47,7	15,0	47,7	1,70	44	43	1	0	45	-1	0	46	-2	-2			
315	88,0	45,5	16,2	45,5	1,43	47	46	1	0	48	-1	0	49	-2	-2			
400	89,1	39,7	11,7	39,7	1,53	54	49	5	0	51	3	0	52	2	0			
500	85,6	39,7	10,2	39,7	1,25	50	50	0	0	52	-2	-2	53	-3	-3			
630	82,9	34,1	9,0	34,1	1,25	53	51	2	0	53	0	0	54	-1	-1			
800	83,7	38,8	11,3	38,8	1,78	50	52	-1	-1	54	-4	-4	55	-5	-5			
1000	85,6	38,4	11,2	38,4	2,16	54	53	1	1	55	-1	-1	56	-2	-2			
1250	83,0	35,1	11,4	35,1	2,22	54	53	1	1	55	-1	-1	57	-3	-3			
1600	85,6	36,3	11,6	36,3	2,24	56	53	3	3	55	1	1	57	-1	-1			
2000	84,5	36,8	11,3	36,8	2,08	54	53	1	1	55	-1	-1	57	-3	-3			
2500	83,0	34,9	10,7	34,9	1,72	53	53	1	1	55	-2	-2	57	-4	-4			
3150	81,6	33,8	10,4	33,8	1,77	53	53	0	0	55	-2	-2	57	-4	-4			
							SOMA=	6				SOMA=	12				SOMA=	34

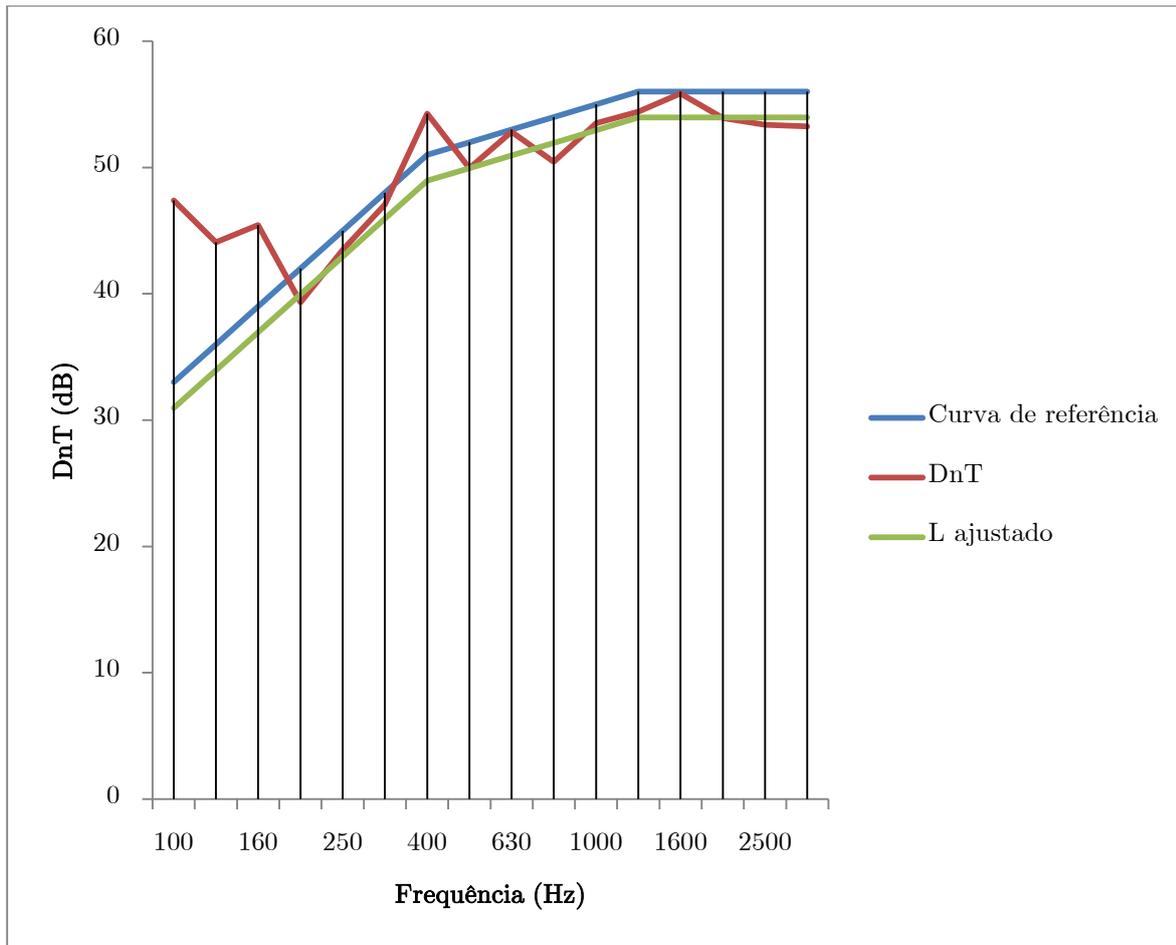


Gráfico 17 - Gráfico representativo da curva de D_{nT} e da curva de referência

5.5.3. Isolamento sonoro a sons de percussão

Na análise do edifício de estudo foram realizados dois ensaios a sons de percussão, um entre o comércio situado no rés-do-chão e a habitação do piso e o segundo ensaio foi realizado entre a habitação do piso 2 e a habitação do piso 1.

Todos os resultados obtidos foram transformados num valor único, índice, esse valor é comparado com os valores preconizados na legislação, procedendo-se à respetiva validação.

Tal como nos ensaios aos sons aéreos foram medidas a área e o volume do compartimento recetor, que em ambos os ensaios correspondem à habitação do piso 1.

5.5.2.1. Entre o comércio e a habitação do Piso 1

Neste ensaio a máquina de martelos foi posicionada no comércio existente no rés-do-chão do edifício, e o sonómetro na habitação do piso 1. Face ao exposto podemos determinar os valores do nível médio da pressão sonora no compartimento recetor (habitação do piso 1) L'_2 efetuando 10 leituras.

Tabela 13 - Valores do nível sonoro do compartimento recetor

f (Hz)	L_2 (dB)										L_2 (dB)
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a	10 ^a	Média
100	36,5	37,2	33,3	33,2	31,7	31,8	35,6	36,7	30,8	30,5	34,4
125	41,5	42,5	44,9	45,2	33,8	33,6	40,7	41,3	43,6	44,1	42,4
160	38,6	40,6	39,5	39,6	37,9	38	42,8	44,1	40,9	40,7	40,7
200	38,5	36,6	39,3	39,3	37,8	37,7	37,7	39,5	36,8	37	38,1
250	41,4	41	43,5	43,4	34,7	34,7	35,6	38,5	41,3	41,5	40,6
315	39,5	40,4	46,7	46,6	35	35,1	32,7	35,5	42,8	42,7	42,1
400	38,9	36,6	40,3	39,5	32,8	33,3	33,7	36	38,4	38,7	37,5
500	38,7	37,5	38,4	38,1	34,9	36,1	31,3	32,5	35,6	36,1	36,5
630	37,3	37,5	36,3	36,4	35,4	35,6	29,6	30,7	33,6	33,7	35,2
800	33,4	33,7	34,9	35,2	31,4	31,6	29	30,6	32	32	32,8
1000	32,5	32,4	32	32	29,3	31,7	27,4	30	29	29	30,8
1250	31,5	30,3	30,5	30,1	27,1	30	26	29,1	26,7	26,5	29,2
1600	33,1	29,4	28	27,8	24,9	30	27,1	28	25,9	25,7	28,7
2000	31,1	28,8	25,5	25,3	23,3	31	27,5	28,1	23,2	22,8	27,6
2500	28,9	32,5	24,5	23,9	22,4	33,4	24,4	26,1	22	21,6	28,1
3150	28	30,9	24,2	23,4	24,2	35,9	25,6	26	22,8	22,3	28,8

O nível sonoro do compartimento recetor (habitação do piso 1) é designado por L'_2 e tal como nos sons aéreos é dado pela seguinte expressão:

$$L_2 = 10 \times \log \left[\frac{1}{10} \times \left(10^{\left(\frac{L_{2,1}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{L_{2,2}}{10}\right)} + \dots + 10^{\left(\frac{L_{2,10}}{10}\right)} \right) \right] \text{ (dB)} \quad (114)$$

Para a determinação do tempo de reverberação do compartimento recetor efetuou-se seis leituras, para tal todos os equipamentos, ou seja, a fonte sonora e o sonómetro se encontravam dentro da habitação 1.

Tabela 14 - Valores obtidos para o tempo de reverberação do compartimento recetor

f (Hz)	T ₂ (s)						T ₂ (s)
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	Média
100	0,6	0,58	0,77	0,74	0,86	1,28	0,81
125	0,9	0,96	1,19	1,21	1,19	1,22	1,11
160	0,9	1,01	1,06	0,97	1,06	1,25	1,05
200	1,3	1,47	1,53	1,41	1,59	1,47	1,47
250	2,2	2,04	1,67	1,83	1,71	2,29	1,96
315	1,5	1,68	1,68	1,87	2,15	2,05	1,83
400	1,5	1,41	1,89	2,09	1,85	2,2	1,83
500	1,0	1,13	1,32	1,53	1,35	1,41	1,30
630	1,1	1,1	1,49	1,45	1,4	1,51	1,34
800	1,8	1,66	1,87	1,96	1,93	2,02	1,87
1000	2,1	2,17	2,26	2,24	2,24	2,19	2,20
1250	2,1	2,21	2,36	2,35	2,23	2,36	2,26
1600	2,0	2,06	2,26	2,23	2,29	2,31	2,19
2000	1,9	1,97	2,12	2,12	2,11	2,04	2,04
2500	1,6	1,62	1,78	1,79	1,74	1,73	1,71
3150	1,5	1,63	1,73	1,72	1,71	1,76	1,68

O valor médio do tempo de reverberação é calculado com recurso à seguinte expressão:

$$T_2 = \frac{T_{2,1} + T_{2,2} + \dots + T_{2,6}}{6} \text{ (s)} \quad (115)$$

Para finalizar o ensaio entre o comércio e a habitação do piso 1 efetuamos 6 leituras para a obtenção do ruído de fundo. Nesta fase do ensaio só o sonómetro se encontra dentro da habitação.

Tabela 15 - Valores do ruído de fundo

f (Hz)	B ₂ - ruído de fundo (dB)						B ₂ (dB)
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	Média
100	19,8	27,8	19,5	17	18,8	20,2	22,3
125	23	24,8	27,1	21,2	20,2	21	23,6
160	24,9	28,3	26,9	21,5	21,5	22,8	25,1
200	19,1	31,5	27,3	19,3	19,8	19,1	25,8
250	20,7	25,6	30,8	20	18,8	19,9	25,1
315	21,4	29,9	30,5	20,4	18,7	20,3	26,2
400	19,1	20,9	27,8	17,8	20,2	16,5	22,3
500	17	20	27,5	16,2	16,3	18	21,6
630	16,2	17,3	26,1	15,6	15,3	14,9	20,0
800	17,4	17,1	26,3	16,1	15,4	16,5	20,4
1000	19,7	18,6	26,3	18,2	15,9	17,3	21,0
1250	20	18,9	26,9	18,9	17,2	17,4	21,5
1600	20,3	19,6	27,1	19,2	17,6	17,8	21,8
2000	20,4	19,8	25	19,4	18,5	18	20,9
2500	20,6	20	24	19,7	18,5	18,2	20,6
3150	23,2	22,7	25,5	22,1	21	20,5	22,8

Com recurso a ca um dos valores da banda de frequência considerada, chegamos ao valor médio do ruído de fundo para cada frequência através da seguinte expressão:

$$B_2 = 10 \times \log \left[\frac{1}{6} \times \left(10^{\frac{B_{2,1}}{10}} + 10^{\frac{B_{2,2}}{10}} + \dots + 10^{\frac{B_{2,6}}{10}} \right) \right] \text{ (dB)} \quad (116)$$

O nível sonoro do compartimento recetor engloba o ruído de fundo, assim para termos o nível sonoro sem a sua influência temos de calcular o nível sonoro da seguinte forma:

$$L'_2 = 10 \times \log \left(10^{\frac{L'_2}{10}} - 10^{\frac{B_2}{10}} \right) \text{ (dB)} \quad (117)$$

O isolamento a sons de percussão entre o comércio entre e a habitação do piso 1 será dado pela seguinte expressão:

$$L'_{nT} = L_2 - 10 \times \log \left(\frac{T_2}{T_0} \right) \text{ (dB)} \quad (118)$$

O tempo de reverberação de referência no compartimento recetor, T_0 corresponde a 0,5 segundos.

No esquema seguinte, ilustra-se o ensaio realizado entre o comércio e a habitação do piso 1.

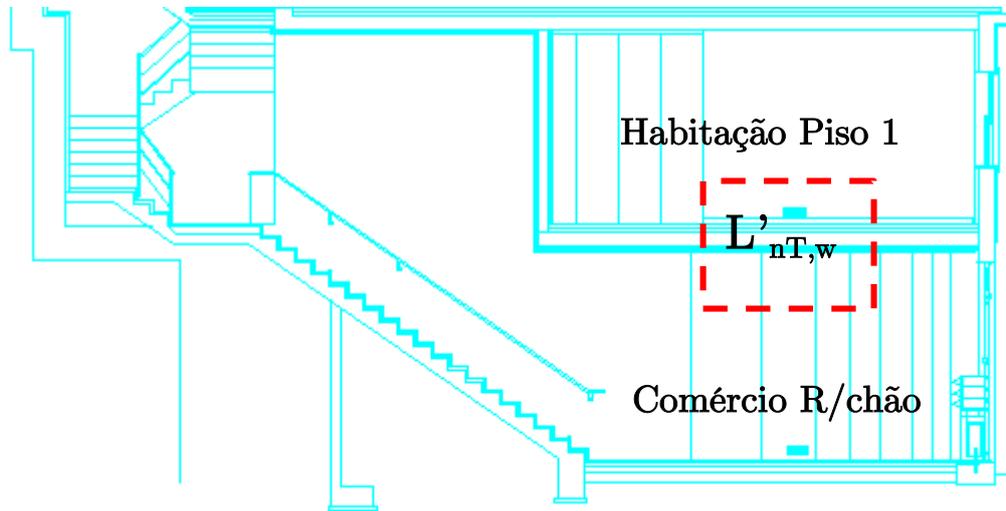


Figura 5.28 - Esquema de medição

De acordo com a norma ISO 717-2 o índice de isolamento sonoro a sons de percussão, $L'_{nT,w}$ é determinado pelo ajuste da curva de referência à curva real dos valores de L'_{nT} .

Para proceder ao ajuste da curva de referência fixamos o valor de L'_{nT} referente à frequência de 500 Hz e determinamos os restantes valores segundo a variação dada pela curva de referência.

As variações dadas pela curva de referência apresenta-se no seguinte quadro:

Quadro 44 – Valores da curva de referência e respetiva variação

f (Hz)	Δ	L (dB)
100	+ 0	62
125	+ 0	62
160	+ 0	62
200	+ 0	62
250	+ 0	62
315	+ 1	61
400	+ 1	61

500	Valor fixo	60
630	- 1	59
800	- 1	58
1000	-1	57
1250	- 3	54
1600	- 3	51
2000	- 3	48
2500	- 3	45
3150	- 3	42

No cálculo do $L'_{nT,w}$ fixou-se o valor em 32 dB, o qual corresponde à frequência dos 500 Hz e ajustou-se a curva de referência a este valor. Para obter os desvios favoráveis fez-se a diferença entre os valores da curva real ($L'nT$) e os valores depois do ajuste ($L_{ajustado}$) para cada frequência. Os desvios desfavoráveis corresponde ao somatório dos valores de Δ que correspondem à parte da curva que se encontram acima da curva de referência ajustada, ou seja, correspondem aos valores positivos de Δ .

O somatório dos desvios desfavoráveis nunca pode ser superior a 32 dB ($\leq 32\text{dB}$), para tal temos de proceder a iterações. Na primeira iteração a soma dos desvios desfavoráveis deu um valor muito próximo dos 32 dB, no entanto procedeu-se a mais uma iteração em que o somatório dos desvios já deu um resultado superior aos 32 dB. Assim pode-se concluir que o índice de isolamento sonoro a sons de percussão é de 32 dB. Este ponto corresponde à interseção da curva dos valores de L'_{nT} e a curva de referência ajustada.

Quadro 45 - Determinação do valor de L'_{nT}

f (hz)	L ₂ (dB)	B ₂ (dB)	L ₂ (dB)	T ₂ (s)	A ₂ (m ²)	L' nT (dB)	1ª tentativa			2ª tentativa			3ª tentativa				
							Lajustado	Δ	Desvios Desfavoráv.	Lajustado	Δ	Desvios Desfavoráv.	Lajustado	Δ	Desvios Desfavoráv.		
100	34,4	22,3	34,1	0,81	17,06	32	34	-2	0	33	-1	0					
125	42,4	23,6	42,4	1,11	12,36	39	34	5	5	33	6	6					
160	40,7	25,1	40,6	1,05	13,15	37	34	3	3	33	4	4					
200	38,1	25,8	37,9	1,47	9,37	33	34	-1	0	33	0	0					
250	40,6	25,1	40,5	1,96	7,01	35	34	1	1	33	2	2					
315	42,1	26,2	42,0	1,83	7,53	36	34	2	2	33	3	3					
400	37,5	22,3	37,4	1,83	7,53	32	33	-1	0	32	0	0					
500	36,5	21,6	36,3	1,30	10,63	32	32	0	0	31	1	0					
630	35,2	20,0	35,1	1,34	10,26	31	31	0	0	30	1	0					
800	32,8	20,4	32,5	1,87	7,35	27	30	-3	0	29	-2	0					
1000	30,8	21,0	30,4	2,20	6,26	24	27	-3	0	26	-2	0					
1250	29,2	21,5	28,4	2,26	6,08	22	24	-2	0	23	-1	0					
1600	28,7	21,8	27,7	2,19	6,30	21	21	0	0	20	1	0					
2000	27,6	20,9	26,6	2,04	6,74	21	18	3	3	17	4	4					
2500	28,1	20,6	27,2	1,71	8,05	22	15	7	7	14	8	8					
3150	28,8	22,8	27,6	1,68	8,19	22	12	10	10	11	11	11					
							SOMA= 31			SOMA= 38			SOMA= 0				

O ajuste da curva de referência à curva real será elucidada no gráfico a seguir exposto.

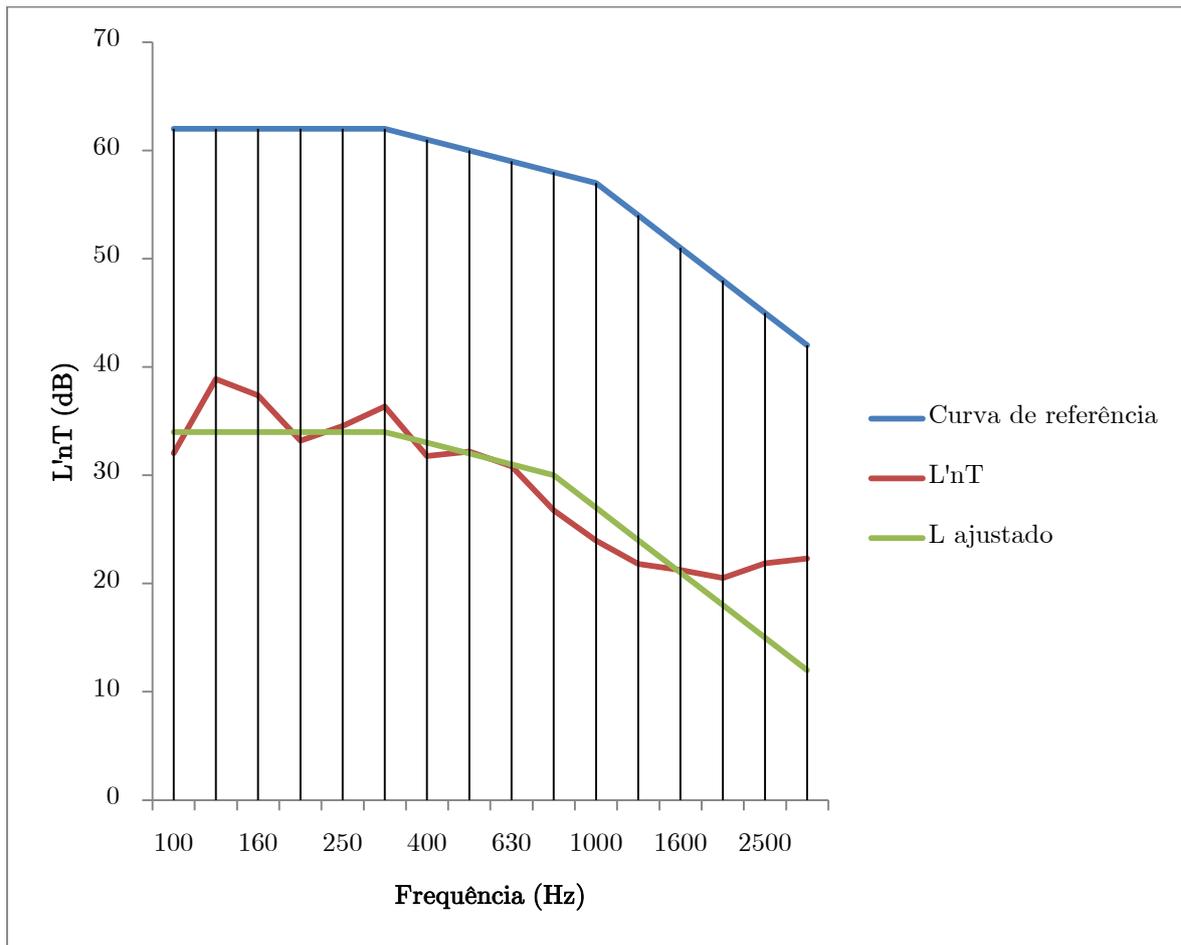


Gráfico 18 - Gráfico representativo da curva de L'_{nT} e da curva de referência

5.5.2.2. Entre habitação do piso 2 e do piso 1

Antes de se iniciar o ensaio a máquina de martelos foi posicionada na habitação do piso 2, enquanto o sonómetro foi posicionado na habitação do piso 1.

Para determinar os valores do nível médio da pressão sonora no compartimento recetor (habitação do piso 1) L'_2 efetuando 10 leituras.

Tabela 16 - Valores do nível sonoro do compartimento recetor

f (hz)	L ₂ (dB)										L ₂ (dB)
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	7 ^a	8 ^a	9 ^a	10 ^a	Média
100	48,8	48,8	48,4	48,2	49,5	44,5	44,4	41,3	41,5	43,7	47
125	49,5	49,7	50,3	50,2	50,6	55,6	55,9	56,8	56,8	55,9	54
160	48,5	48,2	48,9	49,0	51,1	52,5	52,5	56,4	56,2	55,1	53
200	46,7	47,2	46,5	46,7	48,7	52,3	52,3	53,8	53,9	53,5	51
250	46,5	46,4	46,3	46,8	48,5	49,1	49,6	49,1	49,0	49,6	48
315	44,5	44,5	43,5	43,8	46,4	48,1	48,2	48,9	48,9	48,7	47
400	38,8	39,1	38,6	38,7	37,2	46,5	46,5	46,2	46,4	45,4	44
500	41,2	41,2	39,7	40,0	42,4	40,5	40,9	39,7	39,5	39,4	41
630	34,8	34,6	33,4	33,6	35,5	35,6	35,7	34,0	34,3	34,3	35
800	37,8	37,4	38,4	38,4	38,4	32,3	33,1	33,0	32,9	33,4	36
1000	36,6	36,7	37,2	37,1	37,0	33,8	34,6	34,6	34,2	35,2	36
1250	32,9	33,0	32,7	32,8	32,9	30,3	30,5	30,3	30,2	30,0	32
1600	28,6	28,4	28,4	28,6	29,5	26,5	27,1	26,3	26,6	26,1	28
2000	24,8	24,9	25,5	25,6	25,9	25,1	25,8	25,0	25,2	24,8	25
2500	23,6	22,5	22,9	23,1	23,3	21,9	22,7	21,7	21,9	21,7	23
3150	20,9	19,2	19,6	19,6	19,8	21,3	22,0	20,7	21,2	21,2	21

O nível sonoro do compartimento recetor (habitação do piso 1) é designado por L₂ e tal como nos sons aéreos é dado pela seguinte expressão:

$$L_2 = 10 \times \log \left[\frac{1}{10} \times \left(10^{\left(\frac{L_{2,1}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{L_{2,2}}{10}\right)} + \dots + 10^{\left(\frac{L_{2,10}}{10}\right)} \right) \right] \text{ (dB)} \quad (119)$$

Para a determinação do tempo de reverberação do compartimento recetor efetuou-se seis leituras, para tal todos os equipamentos, ou seja, a fonte sonora e o sonómetro se encontravam dentro da habitação 1.

Tabela 17 - Valores obtidos para o tempo de reverberação do compartimento recetor

f (Hz)	T ₂ (s)						T ₂ (s) Média
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	
100	0,75	0,82	0,68	0,64	0,95	0,89	0,79
125	1,21	1,19	0,99	0,69	1,19	0,98	1,04
160	1,20	1,11	1,12	1,15	1,14	1,03	1,13
200	1,46	1,44	1,49	1,43	1,17	1,54	1,42
250	1,86	1,69	2,32	1,62	2,10	1,89	1,91
315	1,96	2,10	1,50	1,49	1,95	1,61	1,77
400	2,33	2,22	1,55	1,43	1,63	1,58	1,79
500	1,23	1,33	1,17	1,25	1,45	1,19	1,27
630	1,22	1,36	1,24	1,12	1,25	1,19	1,23
800	2,04	2,09	1,78	1,71	1,85	1,81	1,88
1000	2,27	2,37	2,13	2,07	2,29	2,04	2,20
1250	2,37	2,43	2,25	2,21	2,33	2,18	2,30
1600	2,28	2,31	2,13	2,16	2,15	2,21	2,21
2000	2,10	2,07	2,03	1,99	2,02	2,00	2,04
2500	1,75	1,74	1,67	1,73	1,70	1,67	1,71
3150	1,74	1,74	1,69	1,71	1,70	1,72	1,72

O valor médio do tempo de reverberação é calculado com recurso à seguinte expressão:

$$T_2 = \frac{T_{2,1} + T_{2,2} + \dots + T_{2,6}}{6} \text{ (s)} \quad (120)$$

Para finalizar o ensaio entre o comércio e a habitação do piso 1 efetuamos 6 leituras para a obtenção do ruído de fundo. Nesta fase do ensaio só o sonómetro se encontra dentro da habitação.

Tabela 18 – Valores obtidos do Ruído de Fundo

f (Hz)	B ₂ - ruído de fundo (dB)						B ₂ (dB)
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a	Média
100	21,7	16,3	13,7	13,3	15,9	17,7	17
125	21,0	16,7	15,1	14,8	14,8	18,0	17
160	24,1	18,5	17,9	17,5	15,9	17,9	20
200	23,4	21,5	17,7	17,2	19,9	20,2	21
250	23,1	18,5	14,9	15,1	17,0	18,4	19
315	30,5	30,6	24,1	24,9	26,9	27,5	28
400	27,2	20,5	15,8	14,9	16,5	17,3	21
500	29,7	15,3	12,9	13,4	13,6	14,0	22
630	26,0	12,9	12,7	12,0	15,4	17,1	20
800	21,1	17,0	13,1	12,8	20,1	21,3	19
1000	17,2	12,2	12,3	12,4	13,7	13,8	14
1250	16,5	13,7	12,6	13,7	13,1	12,4	14
1600	17,5	14,1	12,3	14,4	15,7	14,2	15
2000	15,6	11,2	11,1	13,2	13,4	11,9	13
2500	15,7	10,6	10,3	12,5	13,1	11,5	13
3150	16,1	12,3	12,2	14,1	13,6	12,8	14

Com recurso a ca um dos valores da banda de frequência considerada, chegamos ao valor médio do ruído de fundo para cada frequência através da seguinte expressão:

$$B_2 = 10 \times \log \left[\frac{1}{6} \times \left(10^{\frac{B_{2,1}}{10}} + 10^{\frac{B_{2,2}}{10}} + \dots + 10^{\frac{B_{2,6}}{10}} \right) \right] \text{ (dB)} \quad (121)$$

O nível sonoro do compartimento recetor engloba o ruído de fundo, assim para termos o nível sonoro sem a sua influência temos de calcular o nível sonoro da seguinte forma:

$$L'_2 = 10 \times \log \left(10^{\frac{L_2}{10}} - 10^{\frac{B_2}{10}} \right) \text{ (dB)} \quad (122)$$

O isolamento a sons de percussão entre o comércio entre e a habitação do piso 1 será dado pela seguinte expressão:

$$L'_{nT} = L_2 - 10 \times \log \left(\frac{T_2}{T_0} \right) \text{ (dB)} \quad (123)$$

O tempo de reverberação de referência no compartimento recetor, T₀ corresponde a 0,5 segundos.

No esquema seguinte, ilustra-se o ensaio realizado entre o comércio e a habitação do piso 1.



Figura 5.29 – Esquema de medição

De acordo com a norma ISO 717-2 o índice de isolamento sonoro a sons de percussão, $L'_{nT,w}$ é determinado pelo ajuste da curva de referência à curva real dos valores de L'_{nT} .

Para proceder ao ajuste da curva de referência fixamos o valor de L'_{nT} referente à frequência de 500 Hz e determinamos os restantes valores segundo a variação dada pela curva de referência.

No cálculo do $L'_{nT,w}$ fixou-se o valor em 36 dB, o qual corresponde à frequência dos 500 Hz e ajustou-se a curva de referência a este valor. Para obter os desvios favoráveis fez-se a diferença entre os valores da curva real (L'_{nT}) e os valores depois do ajuste ($L_{ajustado}$) para cada frequência. Os desvios desfavoráveis correspondem ao somatório dos valores de Δ que correspondem à parte da curva que se encontram acima da curva de referência ajustada, ou seja, correspondem aos valores positivos de Δ .

O somatório dos desvios desfavoráveis nunca pode ser superior a 32 dB ($\leq 32\text{dB}$), para tal temos de proceder a iterações. Na primeira iteração a soma dos desvios desfavoráveis deu um valor muito inferior a 32 dB, no entanto procedeu-se a uma nova iteração em que o somatório dos desvios já deu um resultado muito próximo a 32 dB. Por fim fez-se uma última iteração em que o somatório dos desvios já excedia o limite. Assim pode-se concluir que o índice de isolamento sonoro a sons de percussão é de 42 dB.

Quadro 46 - Determinação do valor de L'_{nT}

f (hz)	L'_2 (dB)	B_2 (dB)	L_2 (dB)	T_2 (s)	A_2 (m^2)	L'_{nT} (dB)	1ª tentativa			2ª tentativa			3ª tentativa		
							Lajustado	Δ	Desvíos Desfavoráv.	Lajustado	Δ	Desvíos Desfavoráv.	Lajustado	Δ	Desvíos Desfavoráv.
100	46,8	17,4	46,8	0,79	17,45	45	38	6	0	44	1	0	45	0	0
125	54,1	17,4	54,1	1,04	13,21	51	38	13	13	44	7	7	45	6	6
160	52,9	19,6	52,9	1,13	12,23	49	38	11	11	44	5	5	45	4	4
200	51,2	20,5	51,2	1,42	9,68	47	38	8	0	44	3	0	45	2	0
250	48,3	18,8	48,3	1,91	7,19	42	38	4	4	44	-2	-2	45	-3	-3
315	47,0	28,1	47,0	1,77	7,78	41	38	3	3	44	-3	-3	45	-4	-4
400	43,9	21,3	43,9	1,79	7,69	38	37	1	0	43	-5	0	44	-6	0
500	40,5	22,4	40,5	1,27	10,83	36	36	0	0	42	-6	0	43	-7	0
630	34,6	19,5	34,5	1,23	11,19	31	35	-5	0	41	-10	0	42	-11	0
800	36,2	18,8	36,2	1,88	7,32	30	34	-4	0	40	-10	0	41	-11	0
1000	35,9	14,0	35,9	2,20	6,27	29	31	-2	0	37	-8	0	38	-9	0
1250	31,7	13,9	31,7	2,30	6,00	25	28	-3	0	34	-9	0	35	-10	0
1600	27,8	15,0	27,5	2,21	6,24	21	25	-4	0	31	-10	0	32	-11	0
2000	25,3	13,0	25,0	2,04	6,76	19	22	-4	-4	28	-9	-9	29	-10	-10
2500	22,6	12,7	22,1	1,71	8,05	17	19	-3	-3	25	-8	-8	26	-9	-9
3150	20,6	13,7	19,7	1,72	8,02	14	16	-2	-2	22	-8	-8	23	-9	-9
							SOMA= 8			SOMA= 29			SOMA= 34		

O ajuste da curva de referência à curva real será elucidada no gráfico a seguir exposto.

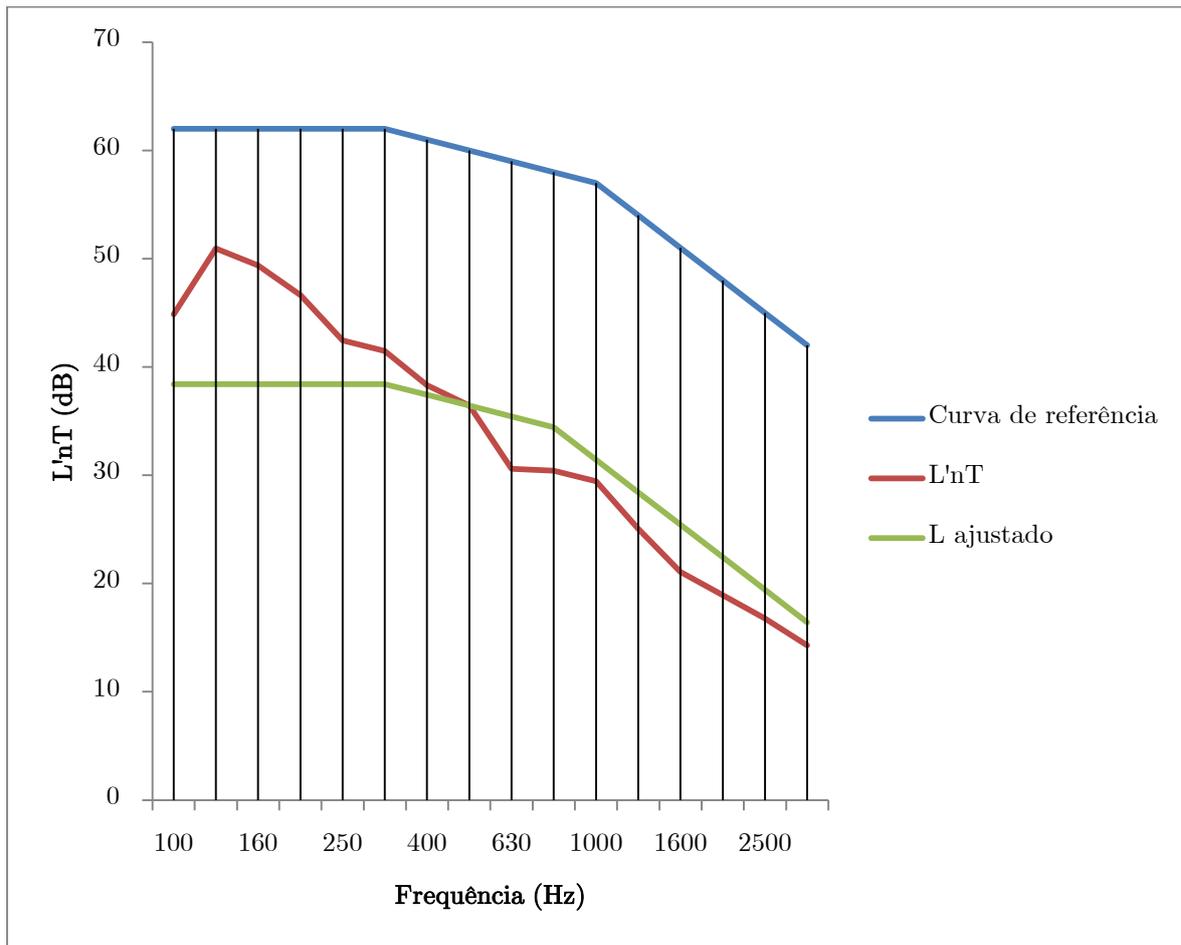


Gráfico 19 - Gráfico representativo da curva de L'_{nT} e da curva de referência

5.5.4. Tempo de reverberação

O ensaio do tempo de reverberação foi efetuado para a caixa de escadas através de 6 leituras para a gama de frequências entre os 100-3150 Hz. O valor médio do tempo de reverberação de cada de frequência é dada pela seguinte expressão:

$$T_2 = \frac{T_{2,1} + T_{2,2} + \dots + T_{2,6}}{6} \text{ (s)} \quad (124)$$

Tabela 19 - Tempo de reverberação da caixa de escadas

f (Hz)	T ₀₁ (s)	T ₀₂ (s)	T ₀₃ (s)	T ₀₄ (s)	T ₀₅ (s)	T ₀₆ (s)	MÉDIA (s)
100	N/A	1,46	1,96	1,12	1,42	1,85	1,56
125	2,7	2,09	2,16	1,97	2,35	2,53	2,31
160	2,3	2,08	2,16	2,29	2,06	2,06	2,15
200	2,8	2,28	2,61	2,67	2,4	2,47	2,55
250	2,4	2,17	2,45	2,3	2,4	2,56	2,38
315	2,5	2,44	2,44	2,32	2,29	2,46	2,41
400	2,8	2,68	2,37	2,39	2,43	2,4	2,52
500	2,7	2,72	2,52	2,51	2,72	2,59	2,63
630	2,7	2,59	2,57	2,59	2,58	2,59	2,6
800	2,5	2,55	2,44	2,53	2,44	2,44	2,49
1000	2,4	2,45	2,58	2,5	2,57	2,61	2,52
1250	2,4	2,32	2,61	2,45	2,38	2,35	2,42
1600	2,3	2,16	2,27	2,32	2,26	2,29	2,26
2000	1,9	1,91	2,04	2,11	2,04	1,96	2
2500	1,7	1,68	1,85	1,89	1,83	1,82	1,79
3150	1,6	1,6	1,69	1,69	1,68	1,65	1,66

No gráfico abaixo representado encontra-se esquematizado os vários tempos de reverberação correspondente a cada frequência por cada medição efetuado.

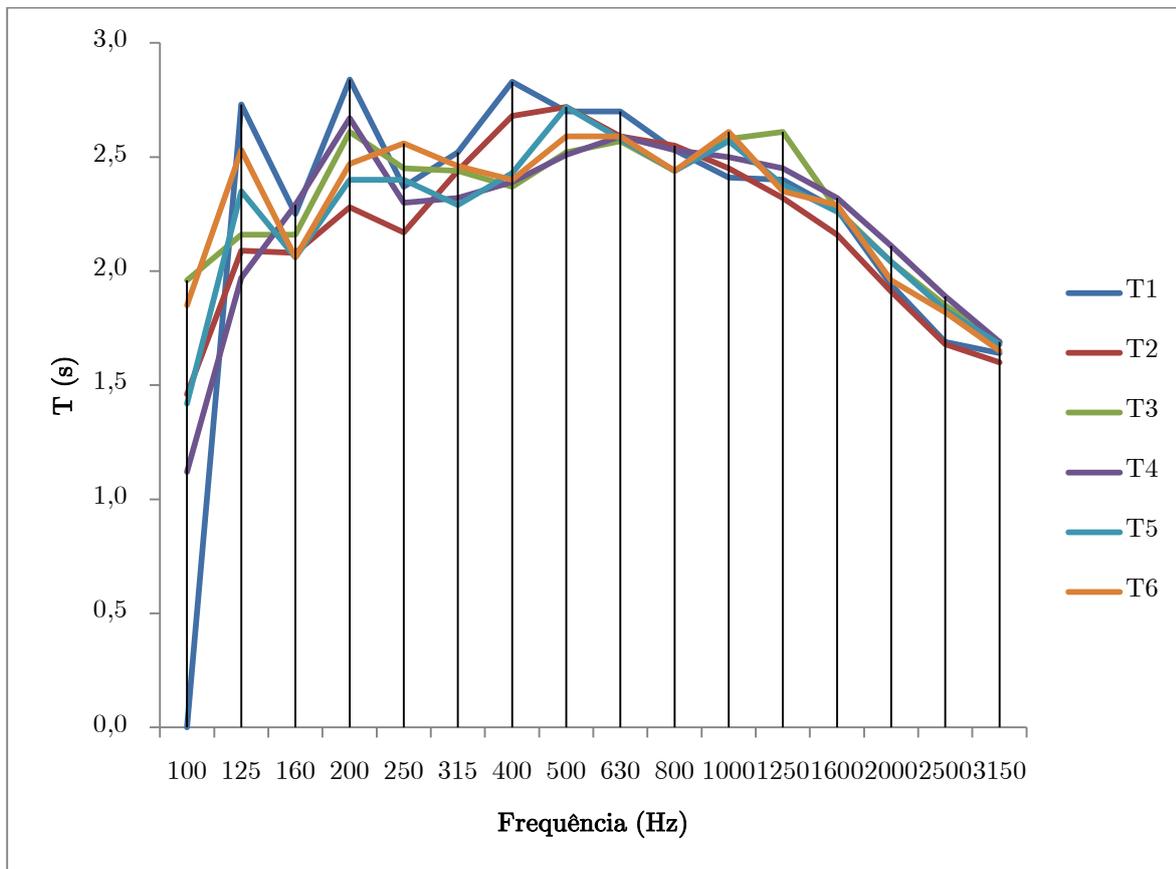


Gráfico 20 - Resultados do ensaio do tempo de reverberação da caixa de escadas

Tabela 20 - Tempo de reverberação global da caixa de escadas

Frequência (Hz)	Tempo de reverberação (s)	Média (s)
500	2,63	2,38
1000	2,52	
2000	2,00	

Para acharmos um valor único médio do tempo de reverberação, temos de fazer a média aritmética do somatório dos valores correspondentes à frequência de 500,1000 e 2000 Hz.

$$T = \frac{T_{500\text{ Hz}} + T_{1000\text{ Hz}} + T_{2000\text{ Hz}}}{3} \quad (125)$$

Em Portugal não existe limites regulamentares especificados para o tempo de reverberação em habitações, no entanto normalmente para os restantes casos especificados na legislação o tempo de reverberação tem de verificar a seguinte condição:

$$T_{500-2000\text{ Hz}} \leq 0,15 \times V^{\frac{1}{3}} \quad (126)$$

Considerando a média aritmética do tempo de reverberação para as frequências de 500, 1000 e 2000 Hz verificamos que o valor a que chegamos é alto, uma das indicações que pode influenciar este fator é podermos considerar que no projeto não foram utilizados materiais absorventes nas zonas de circulação do respetivo edifício de estudo.

5.6. Análise comparativa

Neste caso de estudo foram determinados os valores de isolamento sonoro a sons de condução aérea e a sons de percussão através de métodos de estimativa mediante as soluções adotadas no projeto de execução do edifício e por métodos experimentais (ensaios), todos os resultados estão no quadro abaixo referenciado:

Quadro 47 – Comparação entre os valores calculados e os resultados dos ensaios

Sons aéreos			
Elemento de estudo	Valor de Cálculo (dB)	Valor do Ensaio (dB)	Verificação regulamentar (dB)
Fachada exterior	43		≥ 28
Edifício Adjacente	50		≥ 50
Caixa de Escadas e habitação	40	27	≥ 48
Pavimento intermédio (Piso2-Piso1)	50	50	≥ 50
Pavimento comércio/habitação	61		≥ 58
Sons de Percussão			
Piso intermédio (Piso2-Piso1)	47	32	≤ 60
	45		
Pavimento comércio/habitação	52	38	≤ 60
	34		

Após a análise dos resultados a que chegamos, podemos concluir que o único ensaio que não verifica o limite regulamentar é o ensaio entre a caixa de escadas e a habitação do Piso 1 tal facto deve-se às perturbações climáticas que se faziam sentir nesse dia (chuva torrencial) e a porta ter uma folga razoável entre o fim da porta e o pavimento causando perturbações no respetivo ensaio.

5.7. Aplicação da metodologia do LNEC ao edifício de estudo

O edifício de estudo é um edifício reabilitado pelo que a metodologia do LNEC pode ser aplicada.

Assim, para a avaliação do nível físico vizinhança, relativamente às disposições gerais e uma vez que a Câmara Municipal do Porto disponibiliza o mapa de ruído, bem como o zonamento acústico em que o edifício se insere, como tal estes dois subelementos possuem a valoração correspondente a afirmação positiva.

No entanto, relativamente à aproximação de zonas potencialmente ruidosas e visto que junto à fachada existe uma via de tráfego e contrariando a negação terá a pontuação devida a uma afirmação negativa.

Uma vez que não se conhece os valores relativo ao nível sonoro do ruído ambiente exterior medido (L_{den}, L_n) a classificação atribuída neste elemento foi nula.

A atribuição da pontuação neste nível faz-se pelo somatório do número total de pontos atribuídos, dividindo pelo número de elementos considerados para a avaliação, sendo a classificação deste nível de 2,5 correspondendo a nível de classificação acústica Tipo A (permite assegurar padrões de conforto acústico de alto nível exigencial, qualidade muito boa).

No nível físico Edifício e pensando que foram tomadas todas soluções construtivas para que se cumpram as todas as disposições gerais de condicionamento acústico de espaços e acessos comuns, todos as perguntas neste elemento de avaliação tiveram a cotação correspondente a uma afirmação verdadeira.

Relativamente à avaliação das disposições específicas de arquitetura disposição relativa interior na afirmação em que diz que não existe sobreposição vertical de compartimentos com vocação de utilização diferencial, uma vez que entre os diversos compartimentos todos têm quartos e sala no mesmo espaço a afirmação seria negativa. No entanto no rés-do-chão

existe comércio pelo que é de uso diferencial da habitação existente no primeiro piso. Assim torna a afirmação negativa, pelo que lhe é atribuída a cotação correspondente à falsidade da afirmação.

Dado que as cozinhas estão no mesmo espaço que o utilizado para quartos, não havendo qualquer separação física entre estes locais, a afirmação em que diz que não existe adjacência na horizontal de compartimentos principais com vocação de utilização diferencial foi tomada como negativa tendo a sua valoração correspondente.

Os quartos fazem fronteira com o exterior e por isso estão em contato com as vias de tráfego, assim foi atribuída valoração correspondente à negação, pois a afirmação diz que estes mesmos não se encontram virados para zonas potencialmente ruidosas, tais como as vias de tráfego.

No rés-do-chão do edifício de estudo existe um espaço destinado a comércio, assim sendo a valoração a atribuir nesta questão será a correspondente a uma afirmação falsa, pois esta diz que não existe no edifício espaços comerciais, de serviços ou diversão noturna.

Para a avaliação global deste nível procedeu-se ao somatório de todos os pontos atribuídos, dividindo-os pelo número de itens considerados que neste caso foram 9.

Como tal o nível de avaliação acústica deste nível é de 1.78 que corresponde ao tipo B em que este cumpre o patamar exigencial de conforto acústico, superior ao preconizado pela regulamentação aplicável (qualidade recomendável).

No que diz respeito ao nível físico habitação no primeiro elemento de avaliação, em que é analisado o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, padronizado, $D_{2m,nT,w}$, entre o exterior do edifício e quartos e zonas de estar dos fogos e uma vez que o edifício se insere numa zona sensível e como o valor calculado deu 37 dB chegamos a uma pontuação de 3 Pontos e a uma ponderação correspondente de 4.

Na análise do índice de isolamento a sons de condução aérea, padronizado, entre compartimentos de um fogo e quartos ou zonas de estar de outro fogo com $D_{nT,w'}=50$ dB chegamos a uma pontuação de 1 e uma valoração de 6.

No elemento de avaliação do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, padronizado, entre locais de circulação comum do edifício e quartos ou zonas de estar de outros fogos, o $D_{nT,w'}=40$ dB o qual corresponde a uma pontuação de 0 (comunicações comuns sem ascensores) e fator de ponderação de 2.

Para a avaliação do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, padronizado, entre locais do edifício destinados a comércio, indústria, serviços ou diversão noturna (neste caso de comércio) e quartos ou zonas de estar de outro fogo o $D_{nT,w'}=61$ dB a pontuação corresponde a 2 pontos e a uma ponderação de 8.

No estudo do índice de isolamento sonoro a sons de percussão, padronizado, no interior dos quartos ou zonas de estar dos fogos, proveniente de uma percussão normalizada exercida sobre pavimentos de outros fogos ou locais de circulação comum (emissão) é $L'_{nT,w'}=47$ dB, o que corresponde a um pontuação de 3 pontos e uma ponderação de 8.

O índice de isolamento sonoro a sons de percussão, padronizado, no interior dos quartos ou zonas de estar dos fogos, proveniente de uma percussão normalizada exercida sobre pavimentos de locais do edifício destinados a comércio, indústria, serviços ou diversão (no caso em estudo é de comércio) o $L'_{nT,w'}=52$ dB, o que dá uma pontuação de 0 pontos e uma ponderação de 6.

Uma vez que no edifício em estudo não existe qualquer sistema coletivo de ar condicionado, sistemas de aquecimento coletivo, ascensores, grupos hidropressores, portas de garagem automáticas, postos de transformação de águas no interior dos quartos e zonas de estar dos fogos, o nível de avaliação do ruído particular de equipamentos coletivos do edifício $L_{Ar,nT}$ não foi considerado para avaliação.

Como as zonas estar e de dormir de cada fogo não tem qualquer separação, o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, padronizado, entre compartimentos de estar e de dormir do mesmo fogo (D_{nTw}) não foi considerado para avaliar este respetivo nível

Para obter a avaliação global deste nível físico faz-se o somatório de todas as pontuações por as respetivas ponderações dividindo por o somatório das ponderações, dos item de avaliação considerados do qual se excetua os últimos dois.

Assim chegamos a classificação de 1.7 que corresponde a um nível de avaliação acústica do tipo B, a qual cumpre o patamar exigencial de conforto acústico, superior ao preconizado à regulamentação aplicável (qualidade recomendável).

Com recurso à seguinte expressão (86) e à pontuação final atribuída a cada nível, a qual se apresenta no quadro abaixo indicado, chegamos à classificação do nível de avaliação de acústica (NAA) do edifício de estudo.

Quadro 48 – Classificação do edifício de estudo segundo a metodologia do LNEC

Rua da Bainharia nº 52				
Nível Físico	Requisito	Resposta	Pontuação	Classificação
Vizinhança	1 a)	v	2	2,5
	1 b)	f	0	
	1 c)	v	3	
	2	-	-	
Edifício	1 a)	v	2	1,78
	1 b)	v	5	
	1 c)	v	3	
	1 d)	v	3	
	1 e)	v	2	
	2 a)	f	0	
	2 b)	f	0	
	2 c)	f	1	
	2 d)	f	0	
	Habituação	1	37	
2		50	1	
3		40	0	
4		61	2	
5		49	3	
6		54	0	
7		-	-	
8		-	-	
Classificação Global				1,90

Assim após a aplicação da metodologia do LNEC ao edifício de estudo, chegamos a uma classificação Global do tipo B, cumprindo este o patamar exigencial de conforto acústico superior ao preconizado pela regulamentação recomendável (qualidade recomendável).

6. Conclusões

6.1. Considerações finais

Após análise dos ensaios efetuados, chegou-se à conclusão que todos os ensaios verificam os limites regulamentares, com exceção do realizado entre a caixa de escadas e a habitação do piso 1.

Este facto poderá resultar do facto de a porta do patamar apresentar uma folga visível, o que possibilita a interferência dos sons das zonas comuns na habitação propriamente dita.

Os ensaios foram realizados num dia de chuva o que também poderá justificar alguns dos resultados obtidos, dado não ser aconselhado a realização de ensaios acústicos em dia de intempéries. No entanto, não foi possível efetuar nova deslocação ao edifício, para realizar de novos os ensaios acústicos.

Quanto aos resultados obtidos através da estimativa pelos métodos de cálculo preconizados na legislação e nas normas em vigor, verifica-se que o resultado para o isolamento a sons aéreos entre a caixa de escadas e habitação não cumpre os limites regulamentares. Assim, seria de ponderar na fase de projeto a utilização de um outro tipo de porta de acesso às habitações, com um valor de R_w substancialmente superior.

Analisando os valores obtidos para os ensaios de percussão efetuados, verifica-se que tanto para o isolamento sonoro a sons de percussão entre o comércio e a habitação do primeiro piso, bem como entre a habitação do segundo piso e a do primeiro piso, o método de estimativa que mais se aproxima dos resultados obtido “in situ” é o método do Invariante.

De acordo com o prescrito na Metodologia do LNEC, o edifício de estudo é classificado como tipo B, cumprindo assim o patamar exigencial de conforto acústico, sendo considerado de

qualidade recomendável, apesar de como referido já o isolamento sonoro a sons aéreos entre a caixa de escadas e habitação.

6.2. Desenvolvimentos futuros

Tal como se verificou no dia dos ensaios, e considerando que todas as soluções propostas para a reabilitação do edifício foram efetivamente implementadas em obra, embora na maioria dos casos os valores dos limites regulamentares tenham sido cumpridos, tal fato não impediu que no interior das habitações se ouvissem alguns ruídos.

Assim sendo, pensa-se que no futuro deve-se não só pensar em respeitar os limites regulamentares exigidos pela regulamentação, mas ir de encontro aos objetivos funcionais do dono de obra, ou seja, estipular objetivos de isolamento. Como tal uma boa prática seria estipular uma classificação que fosse de encontro às exigências de quem irá usufruir, neste caso das habitações.

Hoje em dia já é possível elaborar uma escala de conforto acústico, existindo já propostas para a definição da respetiva classe de acordo com o patamar de isolamento a exigir.

7. Bibliografia

Almeida, M.; Silvar, S. (2007). *Acústica*. Folhas de apoio à disciplina de Climatização e Instalações das Construções II. Universidade do Minho. Departamento de Engenharia Civil. Disponível em: <http://www.civil.uminho.pt/>

BRUEL&KJAER- Measurements in Building Acoustics, Denmark, January 1988

Carvalho, A. P. O. d. Texto de Apoio à Disciplina de Acústica Ambiental e de Edifícios. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2007.

Carvalho, A. P. Oliveira, *Acústica Ambiental e de Edifícios*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 7.3ª Edição, Porto 2010.

CREMER, L.; HECKL, M.- Structure-borne sound: structural vibrations and sound radiation at áudio frequencies. Berlim, Springer-Verlag, 1973.

IST. *Compatibilização dos projetos de arquitetura e acústica em edifícios*. PowerPoint de apoio à disciplina de Edificações II. Departamento de engenharia civil e arquitetura

Martins da Silva, P. A componente acústica na reabilitação de edifícios de Habitação (2001). Ed., LNEC

Neto, Teresa. Apontamentos de Física das Construções. Licenciatura em Engenharia Civil, ISEP, 2011.

PATRÍCIO, J.V. – Isolamento sonoro a sons aéreos e de percussão. Metodologias de caracterização. Lisboa, LNEC, 1999, Informação Técnica de Edifícios ITE 45.

Patrício, J. *Acústica nos edifícios (2003). 2ª Edição*. Jorge Patrício Ed., Lisboa.

PORTUGAL. Leis, decretos-lei, etc. – Regime Legal da Poluição Sonora (RLPS). Decreto-Lei n°292/2000 de 14 de Novembro.

PORTUGAL. Leis, decretos-lei, etc. – Regulamento Geral sobre o Ruído (RGR). Decreto-Lei n°251/1987 de 24 de Junho.

PORTUGAL. Leis, decretos-lei, etc. – Regulamento Geral sobre o Ruído (RGR). Decreto-Lei n°9/2007 de 17 de Janeiro.

PORTUGAL. Leis, decretos-lei, etc. – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE). Decreto-Lei n°96/2008, de 9 de Junho.

EN ISO 354: Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room;

Comité Européu de Normalização, Bruxelas, Bélgica, 2003;

EN ISO 12354 - 1: *"Building acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 1: Airborne sound insulation between rooms"*. – Comité Europeu de Normalização, Bélgica, 2000.

EN ISO 12354 – 2: “Building acoustics – Estimation of acoustic performance of building from the performance of elements – Part 1: Impact sound insulation between rooms”, Comité Europeu de Normalização, Bruxelas, Bélgica, 2000.

EN ISO 12354 – 3: “Building acoustics – Estimation of acoustic performance in buildings from the performance of elements. Airborne sound insulation against outdoor sound”, Comité Europeu de Normalização, Bruxelas, Bélgica, 2000.

ISO 3382-2: Measurement of room acoustic parameters – Part 2: Reverberation time in ordinary rooms [ISO 3382-2].

NP EN ISO 140-4. 2000. *Medição do Isolamento Sonoro de Edifícios e de Elementos de Construção*. IPQ.

NP EN ISO 140-5. 2000. *Medição do Isolamento Sonoro de Edifícios e de Elementos de Construção* IPQ.

NP EN ISO 140-7. 2008. *Medição do Isolamento Sonoro de Edifícios e de Elementos de Construção*. IPQ.

NP EN ISO 717-1. 2009. *Determinação do Isolamento Sonoro em Edifícios e de Elementos de Construção*. IPQ.

NP EN ISO 717-2. 2009. *Determinação do Isolamento Sonoro em Edifícios e de Elementos de Construção*. IPQ.

Martins, J.T. (2008). *Acústica de Edifícios – Validação experimental do cálculo de transmissões marginais a sons aéreos em edifícios*. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Marques, M.E. (2010). *Acústica de edifícios – Estudo de Caso*. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.

Anastácio, S.M. (2012). *Estágio CERTIFER – Medições Acústicas e Tratamento de Dados*. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.

Queirós, D.M. (2010). *Caracterização do Comportamento Acústico de Edifícios Reabilitados*. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Quintã, A.C. (2012). *Acreditação de um Laboratório de Ensaios*. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.

Definição de ruído. Disponível em <http://www.prof2000.pt/users/eta/ruído.htm> (Consultado a 30 de Maio de 2014).

Equipamento Bruel&Kjaer. Disponível em http://www.testequipmentconnection.com/40808/Bruel_And_Kjaer (Consultado a 24 de Setembro de 2014).

Ilustração do Ruído. Disponível em <http://queconceito.com.br/ruído> (Consultado a 30 de Maio de 2014).

Manual Tecsound – *Sistemas de isolamento acústico para obra nova e reabilitação*. Disponível em <http://www.texsa.com/pt/docs/Tecsound%20-%20Manual%20acustica.pdf> (Consultado em 7 de agosto de 2014).

Movimento Ondulatório. Disponível em <http://www.prof2000.pt/users/mrsd/8ano/Producao.htm> (Consultado em 22 de Setembro de 2014).

Níveis de pressão sonora. Disponível em <http://www.bksv.com/> (Consultado em 22 de Setembro de 2014).

Planta de condicionantes. Disponível em <http://sigweb.cm-porto.pt/mipwebportal/> (Consultado em 29 de Maio de 2014).

Anexo I – Relatórios dos ensaios Acústicos

- Relatório do ensaio a sons de condução aérea entre a caixa de escadas e habitação do piso 1;
- Relatório do ensaio a sons de condução aérea entre a habitação do piso 2 e a habitação do piso 1;
- Relatório do ensaio a sons de percussão entre o comércio a habitação do piso 1;
- Relatório do ensaio a sons de percussão aérea entre a habitação do piso 2 e a habitação do piso 1.

RELATÓRIO DE ENSAIO

•

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A SONS DE
CONDUÇÃO AÉREA – $D_{nT,w}$

ISEP, (19-05-2014)

RELATÓRIO (n.º1)

Índice

1. Descrição do ensaio.....	3
2. Equipamentos utilizados.....	3
3. Definições	4
4. Metodologia.....	5
4.1. Normalização e legislação.....	5
4.2. Procedimento.....	5
5. Resultados Obtidos.....	6
6. Conclusão	8

1. Descrição do ensaio

O presente ensaio realizou-se num edifício de habitação e comércio situado na rua da Bainharia n.º50/52 entre a caixa de escadas e a fração habitacional do 1.º piso.

Este ensaio permitirá determinar o nível de isolamento sonoro a sons aéreos entre a caixa de escadas e a habitação e comparar com os limites impostos pela legislação.

O ensaio foi realizado no dia 18 de maio de 2014.

2. Equipamentos utilizados

De acordo com o especificado nas normas portuguesas os equipamentos utilizados foram os seguintes:

- Um sonómetro integrador (classe 1) da marca Bruel & Kjaer, modelo 2260, como o número de série 2290673 com um microfone, modelo 4189, como número de série 2281988;



Figura 1 - Sonómetro

- Um calibrador sonoro (classe 1), da marca Bruel & Kjaer, modelo 4231, com o número de série 229226;
- Um tripé de fixação portátil, da marca Bruel & Kjaer, modelo UA0801;
- Software Qualifier Explorer™ 7815 da Bruel & Kjaer, como número de série 2297831;
- Uma fonte sonora omnidirecional, modelo 4296X e com o número de série 20711474 e um amplificador modelo 2716 com número de série 2253660;

Todos os equipamentos utilizados na realização dos ensaios pertencem ao Laboratório de Física das Construções do Departamento de Engenharia Civil, do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

3. Definições

O isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado D_{nT} , define-se como a diferença entre o nível médio de pressão sonora medido no compartimento emissor (L_1) produzido por uma ou mais fontes sonoras, e o nível médio de pressão sonora medido no local de receção (L_2), corrigido da influência das condições de reverberação do compartimento recetor.

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \times \log\left(\frac{T_2}{T_0}\right) \text{ (dB)}$$

O L_1 corresponde ao nível médio de pressão sonora medido no compartimento emissor, o L_2 é o nível médio de pressão sonora medida no compartimento recetor, T_2 é o tempo de reverberação no compartimento recetor e corresponde ao intervalo de tempo para a energia volúmica do campo sonoro de um recinto fechado se reduza a um milionésimo do

seu valor inicial e é expresso em s, o $D_{nT,w}$ corresponde ao índice de isolamento sonoro de condução aérea, padronizado (dB).



Figura 2 – Fonte Sonora



Figura 3 - Amplificador

4. Metodologia

4.1. Normalização e legislação

Este ensaio foi realizado segundo o especificado na norma NP ISO 717-1, a qual corresponde à avaliação do isolamento sonoro em edifícios e elementos de construção e na norma ISO 140-4 a qual descreve os procedimentos para a medição do nível sonoro em edifícios e elementos de construção.

4.2. Procedimento

Antes de iniciarmos ensaio, medimos a área e o volume do compartimento recetor, neste caso da habitação do primeiro piso. Em seguida, efetuaram-se na caixa de escadas 10 leituras do nível sonoro aí existente para obtermos o valor médio do nível sonoro no compartimento emissor e que se designa por L1. Assim, a fonte sonora e o sonómetro foram colocados na caixa de escadas.

Para a determinação do nível sonoro do compartimento recetor (L_2) foram feitas dez medições do nível sonoro com a fonte sonora situada na caixa de escadas. Por fim, para determinar o ruído de fundo calculou-se a média logarítmica das 6 medições efetuadas no interior da habitação com a fonte sonora desligada.

O tempo de reverberação do compartimento recetor (T_2) foi determinado com apenas 6 medições e todos os equipamentos se encontravam dentro deste.

5. Resultados Obtidos

Começou-se por se fixar o valor de D_{nT} da curva da norma no valor real obtido para a frequência dos 500Hz, ou seja, 27 dB. Os restantes valores são obtidos seguindo os declives definidos na norma. Para o cálculo dos desvios favoráveis temos de determinar a diferença (Δ) entre os valores reais de D_{nT} e os da curva ajustada, para cada frequência.

Os desvios desfavoráveis correspondem aos valores de Δ que são negativos, ou seja, quando os valores reais se encontram abaixo da curva de referência ajustada.

O somatório dos desvios desfavoráveis deve ser o maior possível sem exceder o máximo de 32 dB, pelo que procedeu-se a uma nova tentativa para aproximar ainda mais dos 32 dB. Como tal aumentamos o valor de D_{nT} para 28 dB e verificou-se que o somatório dos desvios foi superior a 32 dB, assim conclui-se que o índice de isolamento sonoro a sons aéreos padronizado é de 27 dB.

Tabela 1 – Valores de D_{nT} de cada frequência

f (hz)	L1 (dB)	L'2 (dB)	B2 (dB)	L2 (dB)	T2 (s)	D_{nT} (dB)
100	67,0	47,6	19,7	47,6	0,74	21
125	78,7	59,9	21,4	59,9	1,15	22
160	81,0	63,4	22,7	63,4	1,10	21
200	80,6	65,4	19,9	65,4	1,34	19
250	86,8	68,4	20,3	68,4	1,79	24
315	87,5	67,3	21,9	67,3	1,83	26
400	87,8	64,6	18,1	64,6	1,68	28
500	85,7	62,3	18,3	62,3	1,23	27
630	83,3	58,9	16,7	58,9	1,22	28
800	83,2	60,7	16,2	60,7	1,88	28
1000	82,4	62,0	16,3	62,0	2,15	27
1250	80,6	60,3	15,0	60,3	2,22	27
1600	81,7	61,9	14,5	61,9	2,17	26
2000	81,9	62,5	13,3	62,5	1,98	25
2500	81,1	59,6	13,3	59,6	1,70	27
3150	79,0	58,1	12,6	58,1	1,67	26

No gráfico abaixo indicado está representado o ajuste da curva de referência em relação aos valores de D_{nT} .

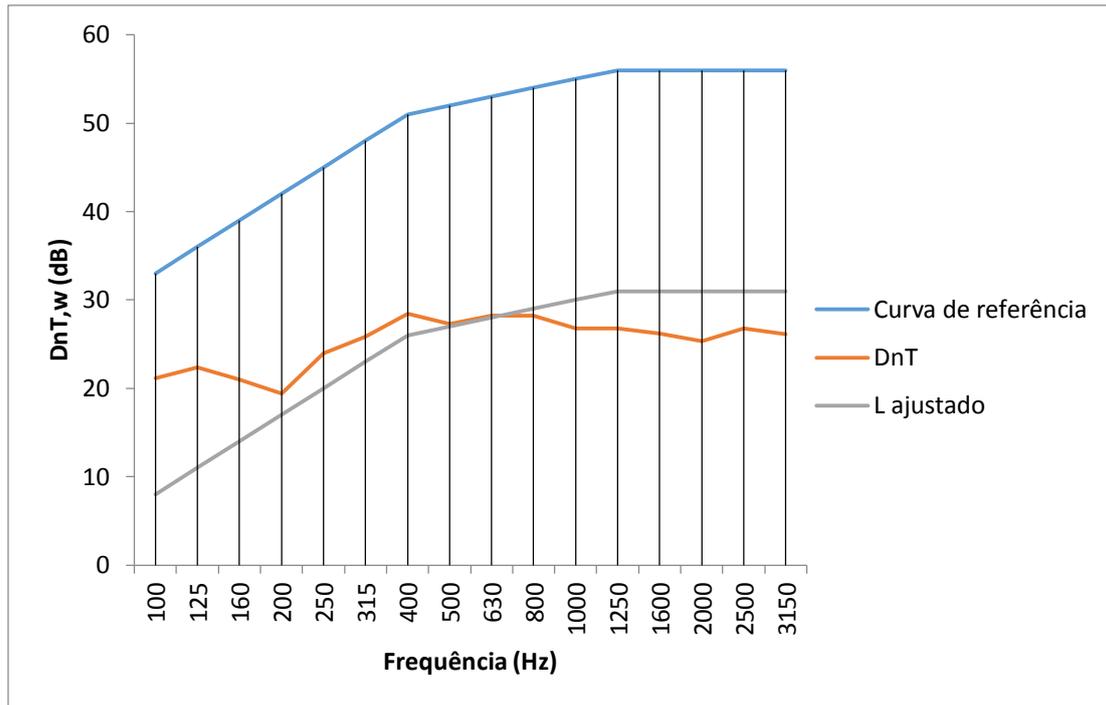


Gráfico 1 - Gráfico representativo da curva de D_{nT} e da curva de referência

6. Conclusão

Apresenta-se em seguida o quadro com o valor obtido no ensaio e respetiva comparação com o limite definido no regulamento dos requisitos acústicos dos edifícios.

Resultado do ensaio $D_{nT,w}$	Valor corrigido do fator de incerteza I $D_{nT,w} + I$	Limite regulamentar	Observações
27 dB	$27 + 3 = 30$ dB	$D_{nT,w} \geq 48$ dB	Não cumpre

Como se pode verificar o isolamento a sons aéreos entre a caixa de escadas e a habitação não cumpre o limite regulamentar para o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea.

Porto e ISEP, 19 de Maio de 2014

(Sónia Abreu)

RELATÓRIO DE ENSAIO

•

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A SONS DE
CONDUÇÃO AÉREA – $D_{nT,w}$

ISEP, (19-05-2014)

RELATÓRIO (n.º)

Índice

1. Descrição do ensaio.....	3
2. Equipamentos utilizados.....	3
3. Definições	4
4. Metodologia.....	5
4.1. Normalização e legislação.....	5
4.2. Procedimento	5
5. Resultados Obtidos.....	6
6. Conclusão	8

1. Descrição do ensaio

O presente ensaio realizou-se num edifício de habitação e comércio situado na rua da Bainharia no n.º50/52 entre a habitação do 2.º piso e a habitação do 1.º piso.

Este ensaio permitirá determinar o nível de isolamento sonoro a sons aéreos entre as habitações do piso 1 e 2 e comparar com os limites regulamentares impostos pela legislação.

O ensaio foi realizado no dia 18 de maio de 2014.

2. Equipamentos utilizados

De acordo com o especificado nas normas portuguesas os equipamentos utilizados foram os seguintes:

- Um sonómetro integrador (classe 1) da marca Bruel & Kjaer, modelo 2260, como o número de série 2290673 com um microfone, modelo 4189, como número de série 2281988;



Figura 1 - Sonómetro

- Um calibrador sonoro (classe 1), da marca Bruel & Kjaer, modelo 4231, com o número de série 229226;
- Um tripé de fixação portátil, da marca Bruel & Kjaer, modelo UA0801;
- Software Qualifier Explorer™ 7815 da Bruel & Kjaer, como número de série 2297831;
- Uma fonte sonora omnidirecional, modelo 4296X e com o número de série 20711474 e um amplificador modelo 2716 com número de série 2253660;

Todos os equipamentos utilizados na realização dos ensaios pertencem ao Laboratório de Física das Construções do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

3. Definições

O isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado D_{nT} , define-se como a diferença entre o nível médio de pressão sonora medido no compartimento emissor (L_1) produzido por uma ou mais fontes sonoras, e o nível médio de pressão sonora medido no local de receção (L_2), corrigido da influência das condições de reverberação do compartimento recetor.

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \times \log\left(\frac{T_2}{T_0}\right) \text{ (dB)}$$

O L_1 corresponde ao nível médio de pressão sonora medido no compartimento emissor, o L_2 é o nível médio de pressão sonora medida no compartimento recetor, T_2 é o tempo de reverberação no compartimento recetor e corresponde ao intervalo de tempo para a energia volúmica do campo sonoro de um recinto fechado se reduza a um milionésimo do

seu valor inicial e é expresso em s, o $D_{nT,w}$ corresponde ao índice de isolamento sonoro de condução aérea, padronizado (dB).



Figura 2 – Fonte Sonora



Figura 3 - Amplificador

4. Metodologia

4.1. Normalização e legislação

Este ensaio foi realizado segundo o especificado na norma NP ISO 717-1, a qual corresponde à avaliação do isolamento sonoro em edifícios e elementos de construção e na norma ISO 140-4 a qual descreve os procedimentos para a medição do nível sonoro em edifícios e elementos de construção.

4.2. Procedimento

Antes de iniciarmos ensaio, medimos a área e o volume do compartimento recetor, neste caso da habitação do primeiro piso. Em seguida efetuaram-se na habitação do piso 2 dez leituras do nível sonoro aí existente para obtermos o valor médio do nível sonoro no

compartimento emissor e que se designa por L1. Assim a fonte sonora e o sonómetro foram colocados na habitação 2.

Para a determinação do nível sonoro do compartimento recetor (L_2) foram feitas dez medições, com todos os equipamentos dentro da habitação do piso 1 exceto a fonte sonora que continuou na habitação do piso 2. Por fim para determinar o ruído de fundo calculou-se a média logarítmica das 6 medições efetuadas no interior da habitação do piso 1.

O tempo de reverberação do compartimento recetor (T_2) foi determinado com apenas 6 medições e todos os equipamentos se encontravam dentro deste.

5. Resultados Obtidos

Começou-se por se fixar o valor de D_{nT} da curva da norma no valor real obtido para a frequência dos 500Hz, ou seja, 50 dB. Os restantes valores são obtidos seguindo o declive definido na norma. Para o cálculo dos desvios favoráveis temos de determinar a diferença (Δ) entre os valores reais de D_{nT} e os da curva ajustada para cada frequência.

Os desvios desfavoráveis correspondem aos valores de Δ que são negativos, ou seja, quando os valores reais se encontram abaixo da curva de referência ajustada.

O somatório dos desvios desfavoráveis deve ser o maior possível sem exceder o máximo de 32 dB, pelo que procedeu-se a uma nova tentativa para aproximar ainda mais dos 32 dB. Como tal aumentamos o valor de D_{nT} para 53 dB e verificou-se que o somatório dos desvios foi superior a 32 dB, assim conclui-se que o índice de isolamento sonoro a sons aéreos padronizado é de 52 dB.

Tabela 1 – Valores de D_{nT} de cada frequência

f (Hz)	L₁ (dB)	L'₂ (dB)	B₂ (dB)	L₂ (dB)	T₂ (s)	D'_{nT} (dB)
100	75,8	35,0	16,7	34,9	2,23	47
125	77,4	36,6	14,9	36,5	1,05	44
160	84,3	41,8	18,1	41,8	0,98	45
200	84,4	49,5	15,5	49,5	1,37	39
250	85,9	47,7	15,0	47,7	1,68	43
315	88,0	45,5	16,2	45,5	1,44	47
400	89,1	39,7	11,7	39,7	1,54	54
500	85,6	39,7	10,2	39,7	1,26	50
630	82,9	34,1	9,0	34,1	1,27	53
800	83,7	38,8	11,3	38,8	1,78	50
1000	85,6	38,4	11,2	38,4	2,16	54
1250	83,0	35,1	11,4	35,1	2,23	54
1600	85,6	36,3	11,6	36,3	2,23	56
2000	84,5	36,8	11,3	36,8	2,07	54
2500	83,0	34,9	10,7	34,9	1,70	53
3150	81,6	33,8	10,4	33,8	1,77	53

No gráfico abaixo indicado está representado o ajuste da curva de referência em relação aos valores de D_{nT} .

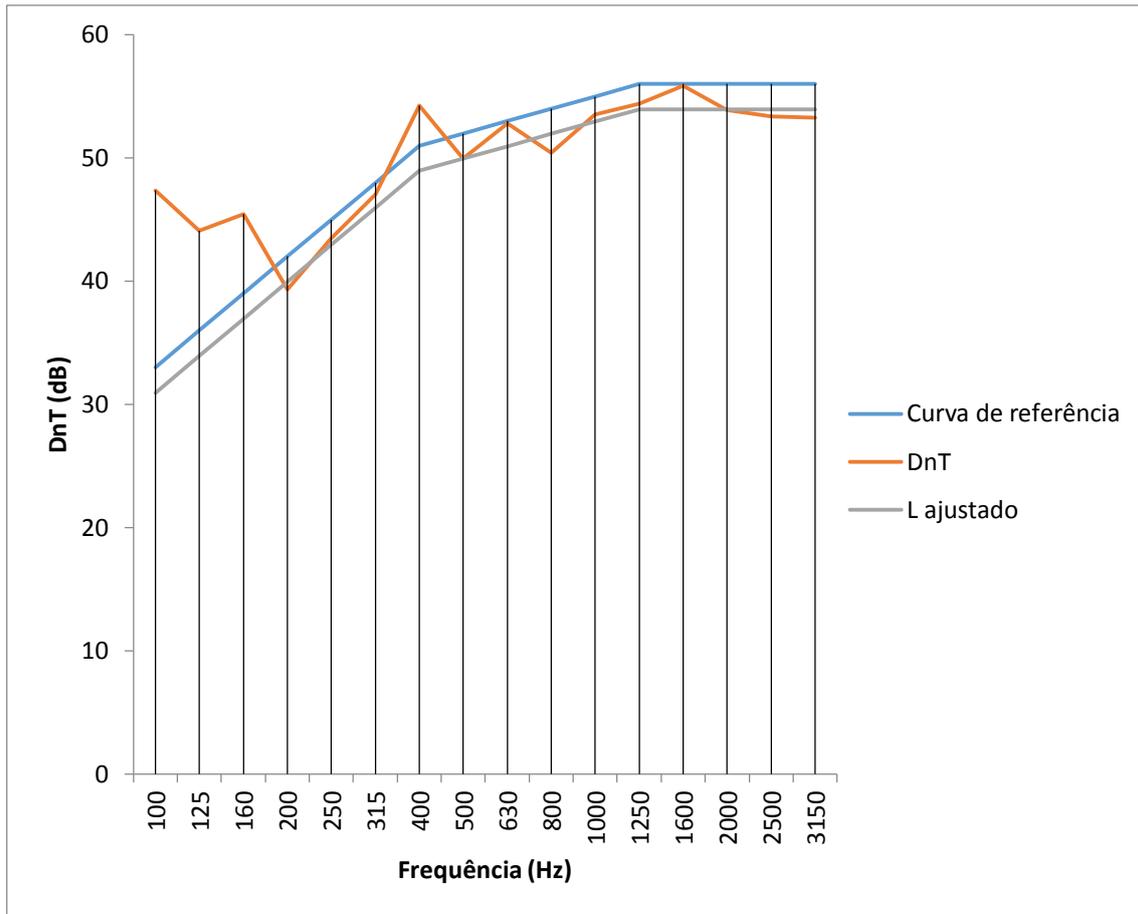


Gráfico 1 - Gráfico representativo da curva de D_{nT} e da curva de referência

6. Conclusão

Apresentam-se em seguida os quadros resumo, com os valores obtidos no ensaio e respetiva verificação com o regulamento dos requisitos acústicos dos edifícios.

Resultado do ensaio $D_{nT,w}$	Valor corrigido do fator de incerteza I $D_{nT,w} + I$	Limite regulamentar	Observações
52 dB	$52 + 3 = 55$ dB	$D_{nT,w} \geq 48$ dB	Cumpre

Como se pode verificar o isolamento a sons aéreos entre a habitação 2 e a habitação 1 cumpre o limite regulamentar para o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea.

Porto e ISEP, 19 de Maio de 2014

(Sónia Abreu)

RELATÓRIO DE ENSAIO

•

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A SONS DE

PERCUSSÃO – $L'_{nT,w}$

ISEP, (19-05-2014)

RELATÓRIO (nº3)

Índice

1. Descrição do ensaio.....	3
2. Equipamentos utilizados.....	3
3. Definições	4
4. Metodologia.....	5
4.1. Normalização e legislação.....	5
4.2. Procedimentos.....	5
5. Resultados Obtidos.....	6
6. Conclusão	8

1. Descrição do ensaio

O presente ensaio realizou-se num edifício de habitação e comércio situado na rua da Bainharia n.º50/52, entre o estabelecimento comercial do rés-do-chão e a habitação do 1.º piso.

Este ensaio permitirá determinar o nível de isolamento sonoro a sons de percussão entre o comércio e a habitação e comparar com os limites impostos pela legislação nacional.

O ensaio foi realizado no dia 18 de maio de 2014.

2. Equipamentos utilizados

De acordo com o especificado nas normas portuguesas, os equipamentos utilizados foram os seguintes:

- Um sonómetro integrador (classe 1) da marca Bruel & Kjaer, modelo 2260, como o número de série 2290673 com um microfone, modelo 4189, como número de série 2281988;



Figura 1 - Sonómetro

- Um calibrador sonoro (classe 1), da marca Bruel & Kjaer, modelo 4231, com o número de série 229226;
 - Um tripé de fixação portátil, da marca Bruel & Kjaer, modelo UA0801;
-

- Software Qualifier Explorer™ 7815 da Bruel & Kjaer, como número de série 2297831;
- Uma fonte sonora omnidirecional, modelo 4296X e com o número de série 20711474 e um amplificador modelo 2716 com número de série 2253660;
- Máquina de percussão da Bruel&Kjaer, modelo 3207



Figura 2 – Máquina de Percussão

Todos os equipamentos utilizados na realização dos ensaios pertencem ao Laboratório de Física das Construções do Departamento de Engenharia Civil, do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

3. Definições

O isolamento sonoro a sons de percussão, L'_{nT} define-se como sendo o nível médio medido no local de receção (L_2) proveniente de uma excitação de percussão normalizada sobre o pavimento, corrigido do tempo de reverberação do compartimento recetor.

$$L'_{nT} = L_2 - 10 \times \log\left(\frac{T_2}{T_0}\right)$$

L'_{nT} , corresponde ao isolamento sonoro a sons de percussão padronizado e é expresso em dB, o L_2 diz respeito ao nível médio de pressão sonora medido no compartimento recetor em dB, já o T_2 corresponde ao tempo de reverberação no compartimento recetor e

corresponde ao intervalo de tempo necessário para que a energia volúmica do campo sonoro de um recinto fechado se reduza a um milionésimo do seu valor inicial, o T_0 é o tempo de reverberação padrão (0,5s).

4. Metodologia

4.1. Normalização e legislação

Este ensaio foi realizado segundo o especificado na norma NP ISO 717-2, a qual corresponde à avaliação do isolamento sonoro em edifícios e elementos de construção e na norma ISO 140-7 a qual descreve os procedimentos para a medição do nível sonoro em edifícios e elementos de construção.

4.2. Procedimentos

Antes de iniciarmos ensaio, medimos a área e o volume do compartimento recetor, neste caso da habitação do primeiro piso. Em seguida, colocou-se a máquina de percussão no estabelecimento comercial e efetuaram-se na habitação dez leituras do nível sonoro aí existente para obtermos o valor médio e que se designa por L_2 . Assim, nesta altura apenas o sonómetro estava no interior da habitação.

Para determinar o ruído de fundo calculou-se a média logarítmica das 6 medições efetuadas no interior da habitação com todos os equipamentos desligados.

O tempo de reverberação do compartimento recetor (T_2) foi determinado com apenas 6 medições e todos os equipamentos se encontravam dentro deste.

5. Resultados Obtidos

Para efetuar o ajuste da curva da norma, começou-se por se fixar o valor de L'_{nT} igual ao valor real obtido para a frequência dos 500Hz, ou seja, 32 dB. Os restantes valores são obtidos seguindo os declives definidos na norma. Para o cálculo dos desvios favoráveis temos de determinar a diferença (Δ) entre os valores reais de L'_{nT} e os da curva ajustada, para cada frequência.

Os desvios desfavoráveis correspondem aos valores positivos de Δ , ou seja nas situações em que os valores reais são superiores aos curva de referência ajustada.

Logo na primeira tentativa de ajuste, o somatório dos desvios desfavoráveis deu muito próximo do máximo admissível de 32 dB, pelo que procedeu-se a uma nova tentativa.

Para tal aumentamos o valor de L'_{nT} para 33 dB e verificou-se que o somatório dos desvios foi superior a 32 dB, assim conclui-se que o índice de isolamento sonoro a sons aéreos padronizado é de 32 dB.

Tabela 1 – Valores de L'_{nT} de cada frequência

f (Hz)	L'₂ (dB)	B₂ (dB)	L₂ (dB)	T₂ (s)	L'_{nT} (dB)
100	34,1	22,3	34,4	0,81	32
125	42,3	23,6	42,4	1,11	39
160	40,6	25,1	40,7	1,05	37
200	37,8	25,8	38,1	1,47	33
250	40,5	25,2	40,6	1,96	35
315	42,0	26,3	42,1	1,83	36
400	37,4	22,3	37,5	1,83	32
500	36,4	21,6	36,5	1,3	32
630	35,2	20	35,3	1,34	31
800	32,4	20,4	32,7	1,87	27
1000	29,9	21	30,4	2,2	24
1250	27,3	21,5	28,3	2,26	22
1600	26,4	21,8	27,7	2,19	21
2000	25,2	20,9	26,6	2,04	20
2500	26,1	20,6	27,2	1,71	22
3150	25,7	22,8	27,5	1,68	22

No gráfico abaixo indicado está representado o ajuste da curva de referência em relação aos valores de L'_{nT} .

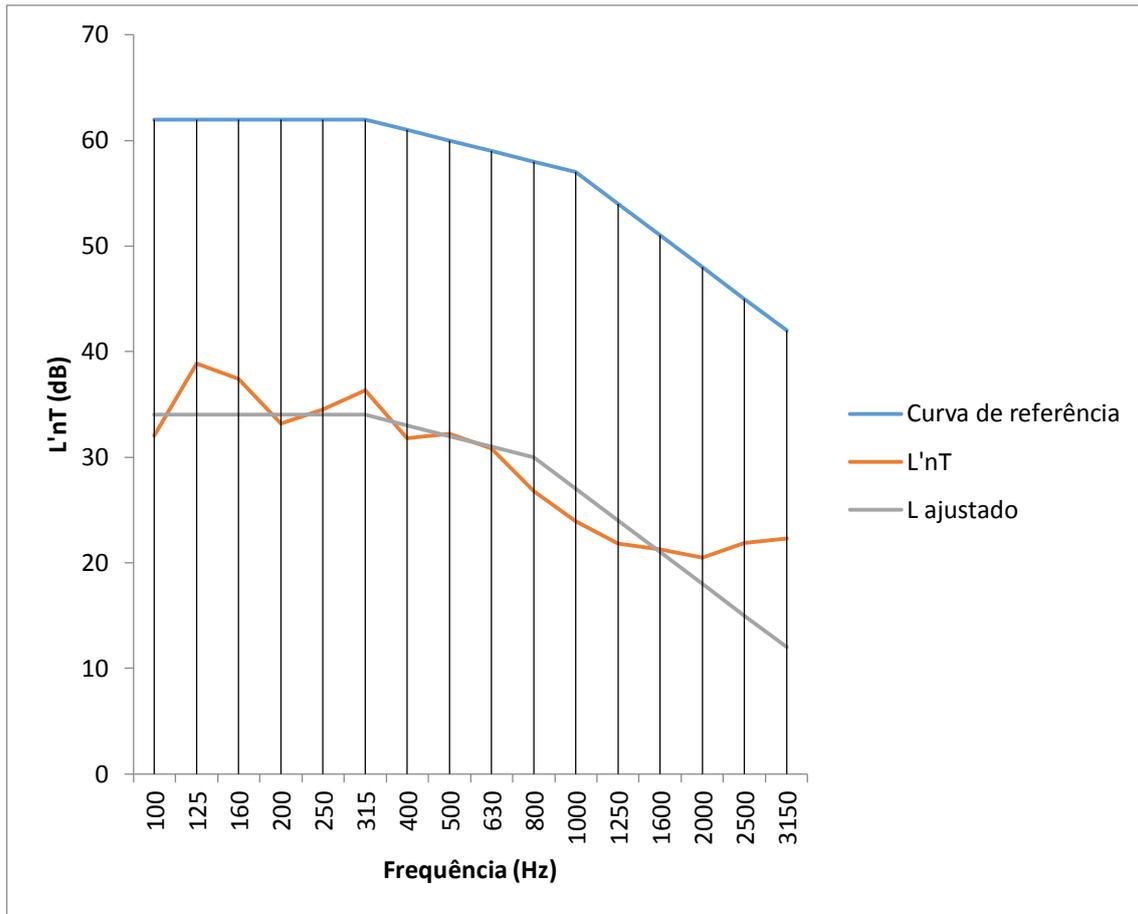


Gráfico 1 - Gráfico representativo da curva de D_{nT} e da curva de referência

6. Conclusão

Apresenta-se em seguida o quadro resumo com o valor obtido no ensaio e respetiva comparação com o limite definido no regulamento dos requisitos acústicos dos edifícios.

Resultado do ensaio $D_{nT,w}$	Valor corrigido do fator de incerteza I $D_{nT,w} - I$	Limite regulamentar	Observações
32 dB	$32 - 3 = 29$ dB	$L'_{nT,w} \leq 60$ dB	Cumpre

Como se pode verificar o isolamento a sons de percussão entre o comércio e a habitação cumpre o limite regulamentar para o índice de isolamento sonoro a sons de percussão.

Porto e ISEP, 19 de Maio de 2014

(Sónia Abreu)

RELATÓRIO DE ENSAIO

•

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A SONS DE

PERCUSSÃO – $L'_{nT,w}$

ISEP, (19-05-2014)

RELATÓRIO (n^o4)

Índice

1. Descrição do ensaio.....	3
2. Equipamentos utilizados.....	3
3. Definições	4
4. Metodologia.....	5
4.1. Normalização e legislação.....	5
4.2. Procedimento.....	5
5. Resultados Obtidos.....	6
6. Conclusão	8

1. Descrição do ensaio

O presente ensaio realizou-se num edifício de habitação e comércio situado na rua da Bainharia no n.º50/52 entre a habitação do 2.º piso e a habitação do 1.º piso.

Este ensaio permitirá determinar o nível de isolamento sonoro a sons de percussão entre as habitações do 1.º e 2.º piso e comparar com os limites impostos pela legislação nacional.

O ensaio foi realizado no dia 18 de maio de 2014.

2. Equipamentos utilizados

De acordo com o especificado nas normas portuguesas os equipamentos utilizados foram os seguintes:

- Um sonómetro integrador (classe 1) da marca Bruel & Kjaer, modelo 2260, como o número de série 2290673 com um microfone, modelo 4189, como número de série 2281988;



Figura 1 - Sonómetro

- Um calibrador sonoro (classe 1), da marca Bruel & Kjaer, modelo 4231, com o número de série 229226;
 - Um tripé de fixação portátil, da marca Bruel & Kjaer, modelo UA0801;
-

- Software Qualifier Explorer™ 7815 da Bruel & Kjaer, como número de série 2297831;
- Uma fonte sonora omnidirecional, modelo 4296X e com o número de série 20711474 e um amplificador modelo 2716 com número de série 2253660;
- Máquina de percussão da Bruel&Kjaer, modelo 3207



Figura 2 – Máquina de Percussão

Todos os equipamentos utilizados na realização dos ensaios pertencem ao Laboratório de Física das Construções do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

3. Definições

O isolamento sonoro a sons de percussão, L'_{nT} define-se como sendo o nível médio medido no local de receção (L_2) proveniente de uma excitação de percussão normalizada sobre o pavimento, corrigido do tempo de reverberação do compartimento recetor.

$$L'_{nT} = L_2 - 10 \times \log \left(\frac{T_2}{T_0} \right)$$

L'_{nT} corresponde ao de isolamento sonoro a sons de percussão padronizado e é expresso em dB, o L_2 diz respeito ao nível médio de pressão sonora medido no compartimento recetor em dB, já o T_2 corresponde ao tempo de reverberação no compartimento recetor

e corresponde ao intervalo de tempo necessário para que a energia volúmica do campo sonoro de um recinto fechado se reduza a um milionésimo do seu valor inicial, o T_0 é o tempo de reverberação padrão (0,5s).

4. Metodologia

4.1. Normalização e legislação

Este ensaio foi realizado segundo o especificado na norma NP ISO 717-2, a qual corresponde à avaliação do isolamento sonoro em edifícios e elementos de construção e na norma ISO 140-7 a qual descreve os procedimentos para a medição do nível sonoro em edifícios e elementos de construção.

4.2. Procedimento

Antes de iniciarmos ensaio, medimos a área e o volume do compartimento recetor, neste caso da habitação do primeiro piso. Em seguida colocou-se a máquina de percussão na habitação do segundo piso e efetuaram-se de leituras do nível sonoro aí existente para obtermos o valor médio e que se designa por L_2 . Assim, nesta altura apenas o sonómetro estava no interior da habitação do piso 1.

Para a determinação do ruído de fundo calculou-se a média logarítmica das 6 medições efetuadas no interior da habitação do primeiro piso com todos os equipamentos desligados.

O tempo de reverberação do compartimento recetor (T_2) foi determinado com apenas 6 medições e todos os equipamentos se encontravam dentro deste.

5. Resultados Obtidos

Para efetuar o ajuste da curva da norma, começou-se por se fixar o valor de L'_{nT} igual ao valor real obtido para a frequência dos 500Hz, ou seja, 36 dB. Os restantes valores são obtidos seguindo o declive definido na norma. Para o cálculo dos desvios favoráveis temos de determinar a diferença (Δ) entre os valores reais de L'_{nT} e os da curva ajustada correspondente a cada frequência.

Os desvios desfavoráveis correspondem aos valores positivos de Δ , ou seja, nas situações em que os valores reais são superiores aos da curva de referência ajustada.

Logo na primeira tentativa de ajuste, o somatório dos desvios desfavoráveis ainda se encontrava abaixo dos 32 dB, procedeu-se a uma nova tentativa para aproximar ainda mais dos 32 dB. Para tal aumentamos o valor de L'_{nT} para 42 dB e verificou-se que o somatório dos desvios ainda era inferior a 32 dB, procedeu-se a uma terceira iteração e verificou-se que excedia os 32 dB, assim conclui-se que o índice de isolamento sonoro a sons aéreos padronizado é de 42 dB.

Tabela 1 – Valores de L'_{nT} de cada frequência

f (Hz)	L'_2 (dB)	B_2 (dB)	L_2 (dB)	T_2 (s)	L'_{nT} (dB)
100	46,9	17,4	46,9	0,8	45
125	54,1	17,4	54,1	1,0	51
160	52,9	19,6	52,9	1,1	49
200	51,2	20,5	51,2	1,4	47
250	48,3	18,8	48,3	1,9	42
315	46,9	28,1	47,0	1,8	42
400	43,9	21,3	43,9	1,8	38
500	40,4	22,4	40,5	1,3	36
630	34,6	19,5	34,7	1,2	31
800	36,1	18,8	36,2	1,9	30
1000	35,9	14,0	35,9	2,2	29
1250	31,6	13,9	31,7	2,3	25
1600	27,6	15,0	27,8	2,2	21
2000	25,0	13,0	25,3	2,0	19
2500	21,6	12,7	22,1	1,7	17
3150	18,4	13,7	19,7	1,7	14

No gráfico abaixo indicado está representado o ajuste da curva de referência em relação aos valores de L'_{nT} .

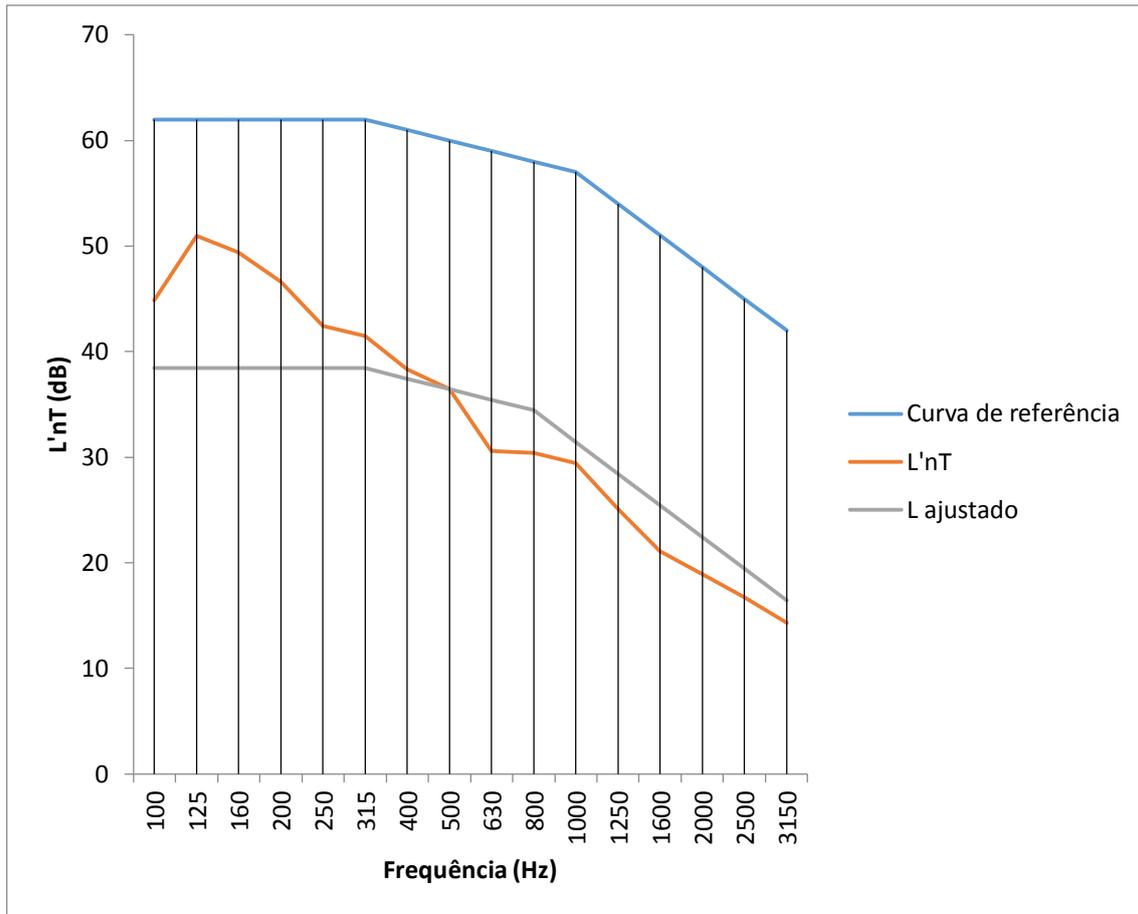


Gráfico 1 - Gráfico representativo da curva de $L'_{nT,w}$ e da curva de referência

6. Conclusão

Apresentam-se em seguida os quadros resumo, com os valores obtidos no ensaio e respetiva verificação com o regulamento dos requisitos acústicos dos edifícios.

Resultado do ensaio $L'_{nT,w}$	Valor corrigido do fator de incerteza I $L'_{nT,w} - I$	Limite regulamentar	Observações
42 dB	$42 - 3 = 39$ dB	$L'_{nT,w} \leq 60$ dB	Cumpre

Como se pode verificar o isolamento a sons de percussão entre a habitação 2 e a habitação 1 cumpre o limite regulamentar para o índice de isolamento sonoro a sons de percussão.

Porto e ISEP, 19 de Maio de 2014

(Sónia Abreu)

Anexo II – Catalogo da Saint-Gobain para os envidraçados

Tabela 3.11 – Soluções construtivas relativas aos elementos janelas.

Material	Empresa	Tipo	Designação	Solução	Descrição ⁽ⁱ⁾ (mm)	Espessura (mm)	Massa (kg/m ²)	R _w (dB)	R _{w, norma} (dB) [N.13]
Vidros	SAINT GOBAIN	Vidro simples		JA.1		3		29	28
				JA.2		4		30	29
				JA.3		5		30	30
				JA.4		6		31	31
				JA.5		8		33	32
				JA.6		10		33	33
				JA.7		12		34	34
		Vidros laminados		JA.8	33.1 ou 33.2	6		33	-
				JA.9	44.1 ou 44.2	8		34	-
				JA.10	55.1 ou 55.2	10		35	-
				JA.11	66.1 ou 66.2	12		35	-
			filme PVB de 0,38 mm ou de 0,76 mm	JA.12	33.1 ou 33.2	6	15.5	36	32
				JA.13	44.1 ou 44.2	8	20.5	37	33
				JA.14	55.1 ou 55.2	10	25.5	38	34
				JA.15	66.1 ou 66.2	12	31	39	-
		Vidro duplos		JA.16	4 (12) 33.1	22	25.5	34	-
			JA.17	6 (12) 33.1	24	30.5	37	33	
			JA.18	8 (6) 33.1	20	35.5	38	-	
			JA.19	10 (9) 33.1	25	40.5	39	-	
			JA.20	6 (12) 44.1	26	35.5	38	-	
			JA.21	8 (12) 44.1	28	40.5	40	-	
			JA.22	10 (12) 44.1	30	45.5	41	-	
			JA.23	8 (12) 44.2	29	41	40	-	
			JA.24	10 (12) 44.2	31	46	42	-	
			JA.25	10 (16) 88.2	43	66	45	-	
			vidro laminado em pano interior e vidro simples em pano exterior	JA.26	33.1 (9) 55.1	26	41	41	-
				JA.27	44.1 (12) 64.2	31	46.5	43	-
				JA.28	44.2 (20) 64.2	40	47	47	-
			vidro simples em pano interior e exterior	JA.29	4 (12) 6	22		33	32
				JA.30	4 (12) 8	24		34	33
				JA.31	4 (12) 10	26		35	35
				JA.32	6 (12) 8	26		35	35
		JA.33		6 (12) 10	28		37	35	
	JA.34	8 (12) 10		30		37	-		
PRONORMA	Vidro duplo		JA.35	vidro duplo			35 a 45	-	

(i) Um vidro laminado 33.1, por exemplo, corresponde a dois vidros simples de 3 mm separados por uma lâmina de PVB de 1mm.

Um vidro duplo 4 (12) 33.1 corresponde a um vidro simples de 4 mm de espessura, com uma caixa de ar de 12 mm e um vidro laminado 33.1.

3. Informações técnicas

3.1.6 O vidro e o isolamento acústico

O vidro e o isolamento acústico

Generalidades

Ruído

O ruído é uma percepção auditiva, provocada por vibrações ou ondas que se propagam no ar, num líquido ou numa matéria sólida (por ex.: uma parede). Na realidade, não passam de pequenas variações da pressão do ar que são registadas pelo nosso tímpano. Em comparação com a pressão atmosférica que ronda 100000 Pa, estas variações de pressão de ar "audíveis" são da ordem de 0,00002 Pa a 20 Pa.

Frequência

O ruído é composto por diferentes níveis de tom (frequências).
A frequência exprime-se em Hertz (Hz = número de vibrações por segundo).
Quanto mais elevado for o tom, maior será o número de vibrações por segundo.
A orelha humana é sensível aos sons cujas frequências estejam situadas entre 16 Hz e 20000 Hz. A acústica dum edifício apenas considera o intervalo entre 50 Hz e 5000 Hz repartido em escalas de oitava (cada frequência é o dobro da anterior) ou de 1/3 de oitava.

Nível sonoro

O nível sonoro classifica-se apenas e facilmente em: forte e fraco. A orelha regista diferenças de pressão numa gama entre 0,00002 Pa e 20 Pa. Para nos apercebermos da vastidão deste intervalo recorremos a uma escala logarítmica. Nesta escala, o nível sonoro é expresso em decibel (dB).

O dB é nível de ruído limite de audição abaixo do qual o ouvido humano já não consegue detectar. O nível sonoro de 140 dB é considerado o nível de ruído que já provoca dor.

Cálculos com decibel

Quando fazemos contas com decibéis, 1 + 1 deixa de ser igual a 2 ! Duas fontes sonoras de 50 dB resultam num total de 53 dB. A duplicação dum ruído resulta num aumento do nível sonoro de 3 dB. Para aumentar o nível sonoro em 10 dB, é necessário aumentar 10 vezes as fontes sonoras. O ouvido humano também não reage linearmente ao nível sonoro. Um aumento de 10 dB do nível sonoro (uma ampliação da ordem de 10 dum ruído elementar) é apenas percebida pelo nosso ouvido com uma duplicação.

Em concreto, isto significa que uma diminuição de:

1 dB praticamente não é perceptível;

3 dB já é perceptível;

10 dB reduz o ruído a metade.

Valores ponderados

A sensibilidade do ouvido humano é diferente conforme o nível de frequência: é menos sensível nas baixas frequências. Tomando em conta este aspecto, ponderam-se os níveis (físicos) segundo uma curva, designada « curva A ». Os níveis, expressos em dB(A) reflectem melhor o incómodo provocado pelos ruídos. Os sonómetros permitem medir directamente os níveis de dB ou de dB(A).

Índice de atenuação acústica

Este índice mede-se em laboratório, segundo a norma EN ISO 140 e representa as características de um dado elemento (janela, divisória...) para cada faixa de 1/3 de oitava numa gama de frequências entre 100 e 3150 Hz (16 valores). Outras medições podem ser feitas a título facultativo para frequências de 50 a 100 Hz e de 3150 a 5000 Hz.

A partir destes 16 níveis de atenuação acústica em função da frequência, podem realizar-se cálculos que permitem exprimir de forma diferenciada as qualidades acústicas de um determinado elemento. Os valores normalmente utilizados são valores globais definidos segundo a norma EN ISO 717-1 para uma curva de referência e adaptados a dois espectros de ruído padronizados:

- o ruído rosa que contém a mesma energia acústica em cada intervalo de frequência de medição;
- o ruído de tráfego rodoviário que caracteriza um ruído exterior de tráfego urbano.

Utilização do índice único

O isolamento acústico obtido por via duma construção é definido por um índice que representa a diferença entre o ruído interior e o exterior, e que é diferente do índice de atenuação R. Os responsáveis pela construção seleccionam os índices de atenuação de cada elemento da construção de forma a que o isolamento acústico exigido seja obtido quando calculado através, por exemplo, do método definido na norma EN 12354-3.

Índice de atenuação ponderado R_w

O índice de atenuação ponderado R_w é calculado com base na comparação entre os valores R medidos (16 valores para 16 intervalos de 1/3 oitava, de 100 Hz a 3150 Hz) e uma curva de referência. Esta posiciona-se de forma, a que a média do desvio por defeito da curva medida seja inferior a 2 dB. O valor pontual medido sobre esta curva, nesta posição, relativo à frequência de 500 Hz designa-se R_w (dB).

! Atenção

O R_w é um índice global: um mesmo índice pode corresponder a diferentes curvas de isolamento acústico.

Termos de adaptação a um espectro C e Ctr

Numa construção, o melhor resultado obtém-se quando esta oferece um bom isolamento acústico em todas as frequências em que a fonte de ruído é mais forte.

Até há pouco tempo, uma construção era avaliada com base num único índice, sem ter em conta as características da fonte de ruído, o que conduzia a erros de investimento e grandes decepções.

Para evitar este tipo de situações, foi criado um índice comum a todos, R_w (C; Ctr). O índice "tr" provém de "tráfego".

C (dB) introduz a correcção necessária para as fontes de ruído com poucas baixas frequências, por exemplo: tráfego rodoviário rápido, tráfego ferroviário rápido, proximidade de aviões, actividades do dia a dia, conversas, brincadeiras de crianças.

Ctr (dB) introduz a correcção necessária para as fontes de ruído com bastantes baixas frequências, por exemplo: tráfego urbano, música de discoteca, tráfego rodoviário lento, aviões a grande distância.

Os termos de correcção calculam-se com base em espectros sonoros ponderados A:

- C: ruído rosa;
- Ctr: ruído de tráfego rodoviário urbano.

Estas duas correcções assumem geralmente um valor negativo; sendo utilizadas, um valor de isolamento acústico muito exagerado será corrigido para menos. As duas correcções são indicadas pelos laboratórios de medida ao lado do valor R_w .

Exemplo:

Segundo a norma EN 717-1 uma construção obtém:

$R_w (C; C_{tr}) = 37(-1;-3)$.

Isto significa que, neste exemplo, o índice ponderado de atenuação R_w é igual a 37 dB e que, para tráfego urbano, reduz-se em 3 dB:

$R_w = 37$ dB

$R_w + C = 37 - 1 = 36$ dB

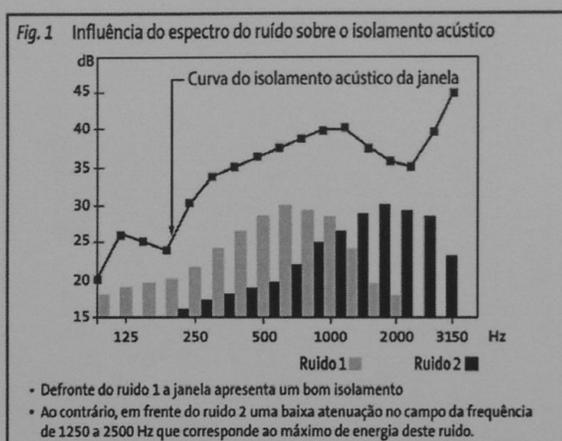
$R_w + C_{tr} = 37 - 3 = 34$ dB

Nalguns países, pode-se indicar directamente o resultado:

$RA = 36$ dB, ou seja = 37-1

$RA_{tr} = 34$ dB, ou seja = 37-3

Esta operação permite projectar construções apropriadas para aplicações bem precisas. Obtém-se uma melhor informação comparando os valores do índice de atenuação R para terços de oitava do que, por exemplo, com uma janela e o espectro de ruído (ver fig.1).



Comportamento do vidro

Qualquer placa de um qualquer material tem uma frequência crítica em que lhe é mais fácil começar a vibrar.

Nesta frequência, a transmissão do ruído faz-se mais facilmente. Uma lâmina de vidro regista uma perda de performance de 10 a 15 dB ao nível do isolamento acústico. Para um vidro com 4 mm de espessura, esta frequência crítica situa-se nos 3000 Hz, enquanto que para uma placa de gesso de 13 se situa em 3200 Hz.

Ao aumentar a espessura do vidro, a perda de performance devida à frequência crítica, desloca-se para a área das baixas frequências (ver fig. 2).

É preciso chegar-se a uma espessura de vidro de 12 cm, para que a « fraqueza » devida à frequência crítica seja inferior a 100 Hz, e possa ser negligenciada.

O tratamento acústico de fachadas submetidas a muitos ruídos de forte intensidade na gama das baixas frequências (ruídos rodoviários) não é fácil. Até há pouco tempo, o incremento da performance acústica dos vidros duplos foi conseguida sobretudo pelo aumento das espessuras e jogando com a assimetria dos vidros. Os vidros laminados de

segurança comportam-se um pouco melhor que um vidros monolítico da mesma espessura (ver fig. 3 e 4).

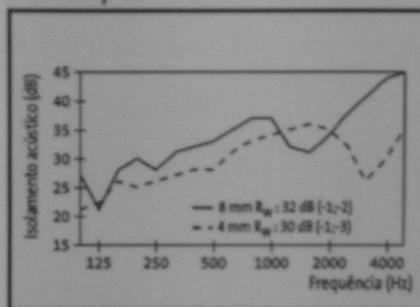
Hoje em dia, com o desenvolvimento do laminado acústico SGG STADIP SILENCE, o efeito da frequência crítica foi suprimido (ver fig. 4).

Em média, é possível ganhar 1 à 3 dB com composições em vidro similares e sobretudo assegurar homogeneidade de performance em qualquer frequência.

Comparação das performances acústicas

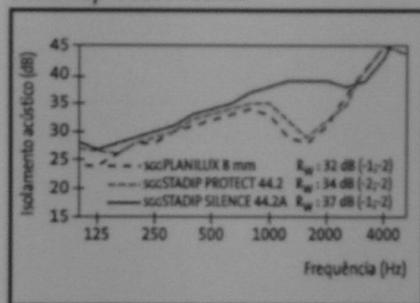
- Vidro simples

Vidro simples



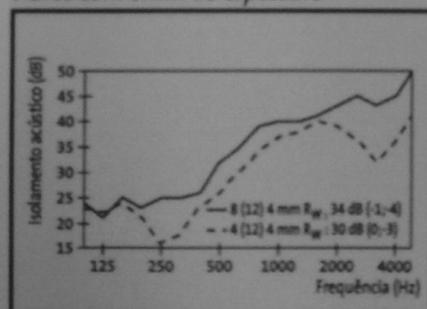
- Vidro duplo assimétrico

Vidro duplo assimétrico



- Vidros com 8 mm de espessura

Vidros com 8mm de espessura



Índice R

O vidro não está isolado numa construção e existe incorporado num caixilho. O vidro e o caixilho, juntos, constituem o elemento que irá determinar o isolamento acústico de toda a janela e, nalguns casos, de toda a fachada.

Não é possível extrapolar as características da janela apenas a partir das performances do vidro. O índice de atenuação da janela só pode ser fornecido depois de medido sobre a janela concluída. Pelo contrário, recomenda-se a harmonização entre o tipo de vidro, o caixilho e o tipo de juntas. Os vidros da gama alta devem ser montados sobre caixilhos com uma boa performance.

A performance acústica não é influenciada pelo sentido de colocação do vidro. A tabela seguinte indica, para diferentes tipos de vidro correntes no mercado, o valor R_w (C; C_{tr}) com os dois termos de adaptação (em dB).

Nas duas primeiras colunas, são indicados directamente os valores de isolamento acústico R_A e $R_{A,tr}$ (em dB).

Composição dos vidros		Valores segundo a EN 717-1 ⁽¹⁾			R_A	$R_{A,tr}$
		R_w	C	C_{tr}		
Vidro monolítico	6 mm	31	-1	-2	30	29
	8 mm	32	-1	-2	31	30
	10 mm	33	-1	-2	32	31
Vidro duplo SGG CLIMALIT ou SGG CLIMAPLUS	4(12)4	30	0	-3	30	27
	4(16)4	30	0	-3	30	27
	8(16)8	33	-1	-4	33	30
Vidro duplo acústico SGG CLIMALIT ACOUSTIC ou SGG CLIMAPLUS ACOUSTIC	4(12)6	33	-1	-4	32	29
	4(16)8	35	-1	-5	34	30
	10(12)4	35	0	-3	35	32
Vidro duplo de segurança reforçada SGG CLIMALIT PROTECT ou SGG CLIMAPLUS PROTECT	8(20)44.2	38	-1	-5	37	33
	8(20)44.4	40	-1	-4	39	36
	8(20)SP 514	41	-1	-5	40	36
Vidro duplo acústico e de segurança SGG CLIMALIT SILENCE ou SGG CLIMAPLUS SILENCE	8 (12) 44.1A	40	-2	-5	38	35
	10 812) 44.1A	41	0	-4	41	37
	8 (20) 44.2A	40	-1	-5	39	35
	64.2A (20) 44.2A	47	-2	-7	45	40

(1) As medidas foram realizadas no laboratório do Centro de Desenvolvimento Industrial da Saint-Gobain Glass. Em comparação com os outros fabricantes tendo efectuado a mesma montagem e as mesmas medidas nos diversos laboratórios podemos obter diferenças de 1 a 3 dB para os valores indicados neste quadro.

Anexo III – Plantas do Edifício

- Planta;
- Corte;
- Alçado Principal



ALÇADO PRINCIPAL

COTAS A EIXO DAS PAREDES E A CONFIRMAR EM OBRA

PORTO VIVO, SRU - Sociedade de Reabilitação Urbana da Baixa Portuense

RUA DA BANHARIA Nº 50/52

ALÇADOS PROPOSTA COTADA

PROJECTO EXECUÇÃO

12/2011

ESCALA 1:50

1.3.3

