

# **ACÚSTICA DE EDIFÍCIOS - VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO CÁLCULO DE TRANSMISSÕES MARGINAIS A SONS AÉREOS EM EDIFÍCIOS**

**JOÃO TOMÁS PUGA MARTINS**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES CIVIS**

---

Orientador: Professor Doutor Rui Manuel Gonçalves Calejo Rodrigues

SETEMBRO DE 2008

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

A todos aqueles, que já não podem estar comigo.

*O conhecimento é a pequena porção da ignorância que arrumamos e classificamos*

*Ambrose Bierce*



## **AGRADECIMENTOS**

Ao concluir este trabalho não posso deixar de expressar o meu reconhecido agradecimento a todas as pessoas que de uma forma directa ou indirecta contribuíram para a realização deste trabalho.

Os meus primeiros agradecimentos vão naturalmente para o Professor Doutor Rui Calejo Rodrigues, orientador deste trabalho, pelo constante acompanhamento, pela disponibilidade prestada, pelo incentivo, e pela correcção deste trabalho.

De igual modo quero expressar o meu sincero agradecimento ao Professor Doutor José Dias Rodrigues, do Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, pela paciência e disponibilidade, para a realização do ensaio experimental.

Desejo também agradecer à empresa Soares da Costa, em especial, ao autor do projecto estrutural da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pela cedência das plantas estruturais do edifício.

Um agradecimento especial à minha namorada Mafalda, pela paciência e pelo apoio nos momentos difíceis e pela ajuda no tratamento das imagens para este trabalho.

Quero agradecer por ultimo à minha família e amigos, que de uma forma geral, contribuíram para a motivação para a realização deste trabalho, e me proporcionaram os momentos de descontração necessários, para recarregar energias nas fases mais desgastantes do trabalho.

A todos o meu sincero obrigado.



## RESUMO

Hoje em dia, e cada vez mais o ruído é considerado um problema, o que motiva uma cada vez maior preocupação com os requisitos acústicos dos edifícios.

Esta crescente preocupação, fomenta o desenvolvimento de novas soluções construtivas, novas matérias e de novos métodos de previsão do comportamento acústico dos edifícios.

O som propaga-se por diversos caminhos, o que dificulta a previsão do isolamento sonoro. De uma forma geral a transmissão sonora de um compartimento para outro, é efectuada por um caminho directo e 12 caminhos marginais.

O cálculo teórico do isolamento sonoro é efectuado com base na norma EN 12354-1, a qual foi elaborada com dados da Alemanha e da Holanda.

Segundo a norma o isolamento sonoro a sons aéreos incluindo as transmissões marginais depende essencialmente do índice de redução sonora ( $R_w$ ) dos elementos construtivos, e do índice de redução de transmissão de vibrações das junções dos elementos construtivos ( $K_{ij}$ ). Uma vez que os valores do  $R_w$  são obtidos laboratorialmente, através de métodos devidamente normalizados, falta validar o método de estimação dos  $K_{ij}$ , que se baseia numa relação entre as massas superficiais dos elementos construtivos.

O objectivo deste trabalho foi comparar o valor teórico do  $K_{ij}$  com o valor obtido experimentalmente seguindo o método da norma ISO 10848-1.

Para o cálculo experimental foi necessário obter os valores dos tempos de reverberação estrutural dos elementos construtivos, e as diferenças de nível de vibração quando um elemento construtivo era excitado.

Após comparação dos resultados obtidos, conclui-se que existe alguma diferença entre o valor teórico e o valor obtido experimentalmente.

Com base nos resultados obtidos, são referidos algumas perspectivas de desenvolvimento futuro.

**PALAVRAS-CHAVE:** Acústica de Edifícios, Isolamento a sons aéreos, Transmissão marginal, EN 12354-1, Índice de redução de transmissão vibrações.



## ABSTRACT

Nowadays, the noise is becoming a growing problem which increases the concerns about the acoustic requirements of buildings.

This increasing concern foments the development of new building solutions, new substances and new methods for prediction of the acoustic behavior of buildings.

The sound spreads through different paths, becoming difficult to predict the sound isolation. The sound transmission from one room to another usually is performed by one direct path and twelve flanking paths.

The EN 12354-1 standard, developed with data from Germany and Holland, is the base of the theoretical calculation of sound isolation.

According to the standard, the airborne sound insulation between rooms, including the flanking transmission, depends mainly of the sound reduction index ( $R_w$ ) of its components, and of the vibration reduction index of the junctions of the constructive elements ( $K_{ij}$ ). Unlike the values of  $R_w$  are measured in laboratory, through methods duly normalized, there is the need to validate the method of esteem of the  $K_{ij}$ , that is based on a relation between the superficial masses of the elements.

The objective of this work was to compare the theoretical value of the  $K_{ij}$  with the value obtained in experiments, following the method of norm ISO 10848-1.

For the experimental calculation it was necessary to get the values of the structural reverberation time of the components and the differences of vibration level when one component was excited.

With the analysis of the obtained results it was possible to conclude that there are differences between the theoretical value and the ones obtained through experimental tests.

Based on the obtained results, are presented several points for future work.

**KEYWORDS:** Building Acoustics, Airborne sound insulation, Flanking transmission, EN 12354-1, vibration reduction index.



## ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS .....	I
RESUMO .....	III
RESUMO .....	III
ABSTRACT .....	V
ÍNDICE GERAL .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE QUADROS.....	XIII
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	XV
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. MOTIVAÇÃO E APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA .....	1
1.2. ESTRUTURA .....	1
<b>2. ESTADO DO CONHECIMENTO .....</b>	<b>5</b>
2.1. INTRODUÇÃO .....	5
2.2. EVOLUÇÃO DA ACÚSTICA.....	5
2.2.1. EVOLUÇÃO HISTÓRICA .....	5
2.2.2. IMPORTÂNCIA SOCIAL E ECONÓMICA.....	7
2.3. ACÚSTICA COMO MATÉRIA DE ESTUDO.....	8
2.3.1. NOÇÕES GERAIS .....	9
2.3.1.1. Pressão, Intensidade e Potência Sonora.....	10
2.3.1.2. Comprimento, Frequência de Onda.....	10
2.3.1.3. Níveis.....	12
2.3.2. ACÚSTICA DE EDIFÍCIOS .....	14
2.3.2.1. Exigências Regulamentares .....	14
<b>3. TRANSMISSÃO SONORA.....</b>	<b>19</b>
3.1. INTRODUÇÃO .....	19
3.2. TRANSMISSÃO SONORA ENTRE ESPAÇOS .....	19
3.3. TRANSMISSÃO MARGINAL .....	21
3.4. NORMA EN 12354-1 .....	22
<b>4. MÉTODO TEÓRICO DOS ÍNDICES DE REDUÇÃO DE TRANSMISSÃO DE VIBRAÇÕES .....</b>	<b>27</b>
4.1. INTRODUÇÃO .....	27

4.2. MÉTODO DE CÁLCULO TEÓRICO.....	27
<b>5. Ensaio Experimental .....</b>	<b>31</b>
5.1. INTRODUÇÃO .....	31
5.2. MÉTODO DE ENSAIO.....	31
5.2.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO ESTRUTURAL .....	32
5.2.1.1. Critérios de Medição.....	32
5.2.2. DIFERENÇA DO NÍVEL DE VELOCIDADE $D_{v,ij}$ .....	32
5.2.2.1. Critérios de Medição.....	33
5.2.3. NORMA NT ACOU 090 .....	34
5.3. CASO DE ESTUDO .....	36
5.4. PROCEDIMENTO UTILIZADO .....	38
5.4.1. EQUIPAMENTO .....	38
5.4.1.1. Equipamento de Excitação.....	38
5.4.1.2. Transdutores.....	39
5.4.1.3. Analisador.....	40
5.4.1.4. Instalação .....	41
5.4.3. AQUISIÇÃO DE DADOS.....	42
5.4.4. TRATAMENTO DE DADOS.....	43
5.5. CALCULO MODELO EXPERIMENTAL .....	46
5.5.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO ESTRUTURAL .....	46
5.5.2. DIFERENÇA DE NÍVEL DE VIBRAÇÃO $D_{v,ij}$ .....	50
5.5.3. TRANSMISSÃO CARACTERÍSTICA DA JUNÇÃO $K_{ij}$ .....	51
<b>6. ANÁLISE DE RESULTADOS .....</b>	<b>53</b>
6.1. INTRODUÇÃO .....	53
6.2. RESULTADOS DO MÉTODO EXPERIMENTAL .....	53
6.1.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO ESTRUTURAL $T_s$ .....	53
6.1.2. DIFERENÇA DE NÍVEL DE VIBRAÇÃO $D_{ij}$ .....	58
6.1.3. TRANSMISSÃO CARACTERÍSTICA DA JUNÇÃO.....	63
6.2. RESULTADOS DO MÉTODO TEÓRICO.....	63
6.3. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS.....	65
<b>7. CONCLUSÃO.....</b>	<b>69</b>
7.1. SÍNTESE GERAL.....	69
7.2. PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTO FUTURO.....	70
BIBLIOGRAFIA.....	71
<b>Anexos .....</b>	<b>73</b>
INTRODUÇÃO .....	73
A.1- PLANTAS DO EDIFÍCIO.....	73

<b>A.2 ACELERAÇÕES.....</b>	<b>73</b>
<b>A.3 TEMPOS DE REVERBERAÇÃO ESTRUTURAL.....</b>	<b>73</b>
<b>A.4 DIFERENÇAS DE NÍVEL DE VIBRAÇÃO.....</b>	<b>73</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 – Estrutura da dissertação. ....	2
Fig. 1.2 – Sequência de análise de normas. ....	3
Fig. 2.1- Compressão e Rarefacção das moléculas do ar .....	9
Fig. 2.2 - Efeito do comprimento de onda face a obstáculos .....	11
Fig. 2.3 - Relação entre a frequência e o comprimento de onda. ....	12
Fig. 2.4 – Nível de pressão sonora. ....	13
Fig. 3.1 - Transmissão sonora. ....	19
Fig. 3.2 - Caminhos de transmissão sonora. ....	20
Fig. 3.3 – Esquema exemplificativo da influência da transmissão marginal em elementos homogéneos [14]. ....	22
Fig. 3.4 - Caminhos de transmissão sonora Norma ISO 12354-1.....	23
Fig. 4.1 – Tipo de Junção X e T .....	27
Fig. 5.1 – Sala onde se realizou o ensaio. ....	36
Fig.5.2- Corte esquemático da junção em estudo.....	37
Fig. 5.3 - Mapa de Pontos.....	38
Fig.5.5 – Acelerómetro Bruel & Kjaer 4507 e 4508.....	40
Fig. 5.6 - Analisador dinâmico de sinal utilizado. ....	41
Fig. 5.7 - Esquema de montagem.....	42
Fig.5.8 - Colocação dos acelerómetros .....	42
Fig.5.9 - Representação gráfica da aceleração da parede. ....	44
Fig.5.10 – Exemplo de representação gráfica do $L_a$ na parede.....	45
Fig.5.11- Exemplo de representação de $L_a$ da parede. ....	45
Fig.5.12 - Exemplo de Representação gráfica de $L_a$ corrigidos da parede. ....	46
Fig. 5.13 – Método de extrapolação pelos máximos.....	47
Fig. 5.14 - Método de extrapolação pelos máximos.....	47
Fig. 5.15- Método de extrapolação pelos mínimos. ....	48
Fig. 5.16 - Método de extrapolação pelos mínimos. ....	48
Fig. 5.18 - Método de extrapolação pelos pontos médios.....	49
Fig. 5.19 - Representação gráfica da integração numérica. ....	50

Fig. 5.20 - Diferença de níveis de vibração.....	51
Fig. 6.1- Rectas para extrapolar os $T_{si}$ da parede.....	55
Fig. 6.2 – Distribuição dos resultados do $T_{si}$ da parede.....	55
Fig. 6.3 - Rectas para extrapolar os $T_{sj}$ da laje.....	57
Fig. 34 – Distribuição dos valores de $T_{sj}$ da laje.....	57
Fig. 6.5 – Curvas a partir das quaise se obtiveram as diferença de nível de Vibração parede-laje.....	58
Fig. 6.6 - Distribuição dos valores de $D_{ij}$ .....	59
Fig. 6.7 - Exemplo de medição da aceleração na parede quando a laje é excitada.....	60
Fig. 6.8 - Exemplo de medição na laje quando a parede é excitada.....	60
Fig. 6.9 - Distribuição dos Valores de $D_{ji}$ .....	62
Fig. 6.10 – Ábaco para o calculo do $K_{ij}$ .....	64

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Requisitos de $D_{nT,w}$ em edifícios Habitacionais e mistos [12].	16
Quadro 2.2 - Requisitos mínimos de $D_{nT,w}$ em edifícios Escolares [12].	17
Quadro 2.3 - Requisitos de mínimos $D_{nT,w}$ em edifícios Hospitalares [12].	17
Quadro 5.1 - Características dos acelerómetros.	39
Quadro 5.2 - Características do analisador dinâmico de sinal.	40
Quadro 5.3 - Configurações do analisador	41
Quadro 6.1 - Valores do $T_{si}$ da parede.	53
Quadro 6.2 - Valores de $T_{si}$ da parede por ponto da excitação.	54
Quadro 6.3 - Análise estatística $T_{si}(s)$	55
Quadro 6.4 - Valores do $T_{sj}$ da laje	56
Quadro 6.5 - Valores de $T_s$ da laje por ponto da excitação.	56
Quadro 6.6 - Análise estatística $T_{si}(s)$ .	57
Quadro 6.7 - Valores de $D_{ij}$ .	58
Quadro 6.8 - Análise de sensibilidade dos resultados	59
Quadro 6.9 - Análise estatística $D_{ij}(dB)$ .	59
Quadro 6.10 - Valores de $D_{ji}$ .	61
Quadro 6.11 - Análise de sensibilidade dos resultados	61
Quadro 6.12 - Análise estatística $D_{ji}(dB)$ .	62
Quadro 6.13 - Valores de níveis médios de aceleração.	62
Quadro 6.14 - Massas superficiais.	64
Quadro 6.15 – Análise de sensibilidade do Tempo de reverberação estrutural.	65
Quadro 6.14 - Massas superficiais (aumentado a massa da parede).	67



## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$I$  – intensidade sonora ( $\text{W}/\text{m}^2$ );

$W$ - potência sonora (W);

$p$ - pressão sonora (pa);

$\rho$ - massa volúmica ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$c$ - celeridade (m/s).

$\lambda$ - comprimento de onda (m);

$f$ - frequência (Hz)

$p_0$ - pressão sonora de referência,  $2 \times 10^{-5}$  Pa.

$L_p$  – Nível de Pressão Sonora (dB)

$L_I$  – Nível de Intensidade Sonora (dB)

$L_W$  – Nível de Potência Sonora (dB)

RGR - Regulamento Geral Sobre o Ruído

RLPS - Regime Legal sobre a Poluição Sonora

RRAE - Regulamento de Requisitos Acústicos de Edifícios

$D_n$  – índice de redução sonora para cada banda de frequência

$D_{n,w}$  - Índice de Isolamento Sonoro a ruídos de condução aérea normalizado;

$D_{2m,n,w}$  - Índice de Isolamento Sonoro a ruídos de condução aérea normalizado com o exterior

$R$  – Índice de redução sonora;

$R'_w$  - índice de redução sonora aparente;

$A_0$ - área de absorção sonora equivalente de referência (=  $10 \text{ m}^2$ )

$S$ - superfície do elemento de separação.

$K_{ij}$  - índice de redução de transmissão de vibrações/transmissão característica de junção;

$S_s$  - área do elemento de separação , em  $\text{m}^2$

$l_f$  - comprimento comum entre o elemento de separação e o marginal, em m;

$l_0$  - comprimento de referência ( $l_0=1\text{m}$ )

$D_{v,ij}$  - diferença de nível de velocidade;

$a$  - comprimento de absorção equivalente;

$T_S$  - tempo de reverberação estrutural (s)

$f$  - banda de frequência, (Hz);

$f_{ref}$  - frequência de referência,  $f_{ref} = 1000 \text{ Hz}$ ;

$c_0$  - velocidade do som no ar (m/s);

$v_i$  - velocidade normal (m/s);

$T_m$  - tempo de integração (s);

$\overline{D}_{ij}$  - diferença de nível de vibração média (dB);

$L_{v,av,i}$  nível médio de velocidade (dB);

$L_{a,av,i}$  nível médio de aceleração (dB);

$L_a$  Nível de aceleração (dB);





# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. MOTIVAÇÃO E APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Desde alguns anos para cá a Sociedade começou a consciencializar-se do problema do ruído como um mal social.

O ruído, além dos efeitos psicopáticos clássicos, é em grande parte responsável por doenças cardiovasculares, do sistema digestivo e neurológico. Por estas e outras razões é que o público em geral hoje em dia, ao adquirir uma nova habitação, além da qualidade da construção e do conforto térmico, dá também valor ao conforto acústico.

Acusticamente falando, para que um edifício seja confortável, é necessária a elaboração de um bom projecto acústico, que só pode ser executado, se estiver definido o tipo de utilização pretendido para o edifício, assim como as condições, isto é, os níveis de ruído a que irá estar sujeito.

O som propaga-se por diferentes caminhos, e quanto melhor for possível quantificar essas transmissões, melhor se poderá projectar soluções novas, proporcionando assim nos edifícios condições de conforto acústico aos seu ocupantes.

O desafio proposto para este trabalho passa por dar tradução à aplicação da norma EN 12354-1 em elementos construídos com a tecnologia corrente em Portugal. Todo o trabalho de base que suporta a Norma foi elaborado com dados da Alemanha e da Holanda e só teve validação em França. Sem ter o objectivo de se proceder à validação em Portugal, entende-se fazer um programa experimental para validar o cálculo das transmissões marginais a sons aéreos segundo a norma. Será efectuada a verificação da aplicabilidade do método, apenas a um caso concreto, situação corrente na construção portuguesa.

É dever fundamental do engenheiro contribuir para o progresso da engenharia e da sua melhor aplicação ao serviço da Humanidade (Vem referido no 1º ponto do 86º artigo, do Capítulo III, do Título II dos estatutos da Ordem dos Engenheiros), e tendo consciência desta “obrigação”, pretende-se com este trabalho dar mais um pequeno passo na acústica em Portugal.

### 1.2. ESTRUTURA

Esta dissertação encontra-se dividida em 7 capítulos, referências bibliográficas e anexos, sendo constituída por 5 partes fundamentais. A primeira parte retrata o estado do conhecimento, apresentando os conceitos básicos da acústica, culminando com uma síntese da estrutura da legislação em Portugal. A segunda parte constitui uma primeira abordagem teórica ao tema da dissertação, a

transmissão sonora, enquanto a terceira aborda a aplicação do modelo de cálculo teórico. Na quarta parte é abordado o método experimental, explicando também o processo de cálculo a ele associado. Finalmente a quinta parte da dissertação consiste na análise e discussão dos resultados obtidos.

O Capítulo 1 é uma introdução geral ao tema, onde são descritos os objectivos, a motivação e a estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 aborda o estado do conhecimento, fazendo uma breve referência histórica sobre o tema, abordando ainda a legislação em Portugal.

O Capítulo 3 diz respeito à teoria da transmissão sonora.

O Capítulo 4 aborda o método de cálculo teórico.

O Capítulo 5 explica o método experimental, incluindo o método de cálculo associado ao mesmo.

O Capítulo 6 compreende a compilação, comparação, análise e discussão dos resultados obtidos.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões gerais, focando também pontos interessantes para posterior investigação e estudo.

Para além dos 7 capítulos, este documento é composto por 4 anexos ( A1, A.2, A.3, A.4)

Seguidamente apresenta-se um diagrama resumo da estrutura da dissertação (Fig 1.1).

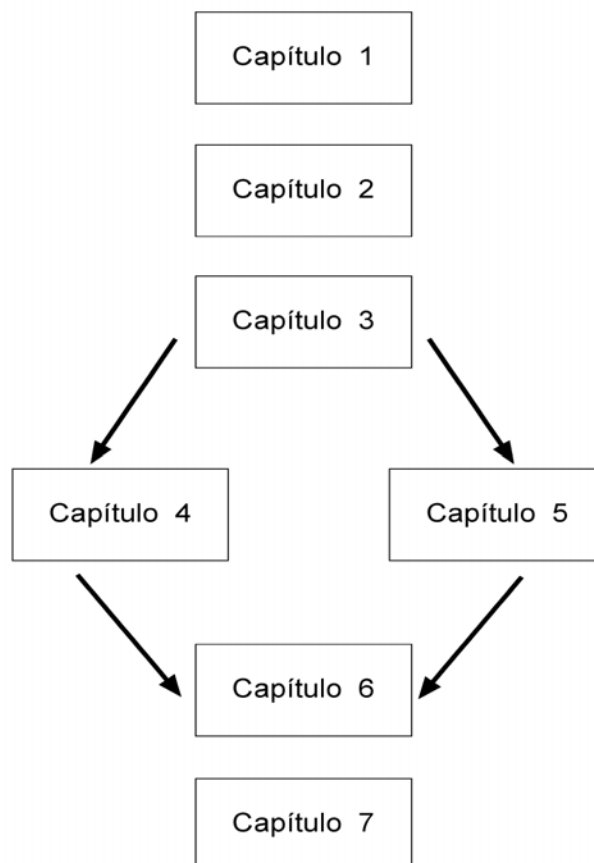


Fig. 1.1 – Estrutura da dissertação.

Por último convém referir que o desenvolvimento deste trabalho acompanhou, de certa forma, uma sequência de análise de normas relacionadas com o tema, a qual está representada na figura 1.2.

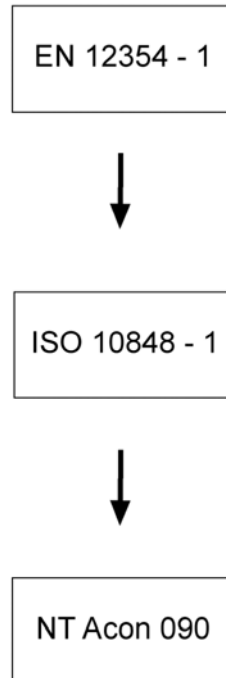


Fig. 1.2 – Sequência de análise de normas.



# 2

## ESTADO DO CONHECIMENTO

### 2.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo pretende-se fazer uma primeira abordagem ao tema desta dissertação, tendo como principal objectivo sintetizar o estado do conhecimento. Para tal será importante realizar um sumário dos acontecimentos históricos que marcaram a evolução da acústica, assim como descrever a importância deste tema para a sociedade. Para que se possa perceber melhor o conteúdo desta dissertação será ainda realizado um pequeno apanhado dos conceitos básicos da “Acústica”, com a ideia de fornecer uma base para a interpretação deste documento.

Por fim realizar-se-á ainda um enquadramento legal em Portugal, referindo as exigências relativas ao isolamento sonoro a sons de transmissão aérea.

### 2.2. EVOLUÇÃO DA ACÚSTICA

#### 2.2.1. EVOLUÇÃO HISTÓRICA

Devido à sua ligação com a música, a acústica foi um campo de investigação durante muitos séculos [1].

O filósofo grego Pitágoras (550 A.C.) foi o primeiro a realizar estudos, com o intuito de perceber a origem física dos sons. Pitágoras descobriu que quando duas cordas de um instrumento musical são “tocadas”, a corda mais curta irá emitir um som mais alto do que a corda mais longa. Estabeleceu assim uma relação entre o comprimento de cordas de vibração e o som por elas produzido, o que significou a primeira matematização do som.

O também grego Aristóteles (384-322 A.C.) foi dos primeiros a tentar explicar o som como uma movimentação do ar, produzido por uma fonte sonora.

Ainda na Grécia o filósofo Chrysippus (240 A.C.) sugeriu que o som era gerado por vibração de partes dos instrumentos musicais. Este tinha o conhecimento de que o som era transmitido por meios de vibração, assim como o ar ou outro qualquer fluido, e que o movimento das partículas causava sensação de “ouvir” quando as ondas embatiam no ouvido.

Além de Chrysippus, também o arquitecto e engenheiro romano Marcus Vitruvis Pollio (25 A.C.) , e o filósofo romeno Boethius, constataram, através da observação da propagação das ondas em meio aquático, que o som tinha um comportamento semelhante, isto é, o som resulta do fenómeno de onda [3].

Só passados muitos anos é que a acústica sofreu novos desenvolvimentos, surgindo assim novas teorias para explicar o som.

Em 1638 Galileo Galilei (1564-1642), que dedicou parte da sua vida a estudar o movimento oscilatório, publicou um documento sobre vibração das cordas, no qual ele desenvolveu relações quantitativas entre a frequência de vibração das cordas e o comprimento das mesmas [1].

O conceito de que o som era um fenómeno de onda não era unânime nesta altura. Por exemplo, o filósofo francês Gassendi (1592-1655) defendia que o som se propagava por emissão de pequenas partículas invisíveis, átomos, a partir de uma superfície vibratória. Segundo a sua teoria a velocidade do som era a velocidade dos átomos e a frequência correspondia ao número de partículas por unidade de tempo, justificando assim que o som se enquadrava melhor na teoria do raio[3].

O jesuíta Athanasius Kircher (1602-1680) e Otto von Guericke (1602-1686) após algumas experiências para avaliar a propagação do som no vácuo, chegaram ambos à conclusão de que o ar não seria necessário para a propagação do som [4].

No entanto em 1660 o cientista inglês Robert Boyle (1627-1691) repetiu as mesmas experiências de Athanasius Kircher e Otto von Guericke chegando à conclusão contrária dos seus antecessores, isto é, segundo Boyle o ar era não só um meio necessário para a produção do som, mas também para a sua transmissão, mas não o único [1].

Definida a teoria do som, isto é, que o som se trata de um fenómeno de onda a questão que se seguiu foi a velocidade de propagação do mesmo.

O filósofo francês Marin Mersenne (1588-1648) também apelidado como o “pai da acústica” determinou a velocidade do som através do tempo de retorno de um eco [3].

A teoria matemática da propagação do som, começou com Isaac Newton (1642-1727), que em 1686 na sua publicação *Principia*, incluiu uma interpretação mecânica do som, como sendo “pulsos de pressão” transmitidos pelos fluidos circundantes [3].

Em 1713 o matemático inglês Brook Taylor (que também inventou as séries de Taylor), desenvolveu o primeiro modelo matemático que descrevia a forma da vibração das cordas [1].

Depois deste, grandes nomes da matemática, assim como Joseph Louis Lagrange (1736-1813), Daniel Bernoulli (1700-1782), Leonard Euler (1707-1783) e Jean d’Alambert( 1717-1783), possuíram um importante papel no desenvolvimento da solução dinâmica para a corda vibrante [3].

A análise das ondas sonoras e a sua representação só foi possível com o aparecimento do teorema de Fourier, no início do século XIX, por parte de Joseph Fourier (1768-1830).

Foi durante o século XIX que Jean Baptiste Biot (1774-1862) realizou as primeiras experiências para determinar a velocidade de propagação do som num sólido. Por outro lado August Kundt (1839-1899) mediu a velocidade do som no ar, e noutros gases, a partir da formação da onda estacionária no tubo de Kundt.

Por esta altura começaram a surgir os primeiros instrumentos de acústica, assim como o estetoscópio, microfone, sirene, telefone, e altifalantes.

Foi também neste século que surgiu um marco importante na história da acústica. Em 1877 John William Rayleigh (1842-1919) publicou a obra *The Theory of Sound*, que relatava uma vasta área de pesquisas, abordando temas como a vibração, ressonância e propagação de ondas sonoras em materiais [1].

Já no século XX Wallace Clement Sabine (1868-1919) publicou uma série de estudos sobre o tempo de reverberação em salas, dando assim origem à acústica arquitectónica. Sabine também foi consultor e autor de diversos projectos acústicos, incluindo da Bóston Symphony Hall, que ainda hoje é considerada uma das melhores salas de concertos do mundo[1].

A partir de 1930 os princípios de controlo do ruído começaram a ser aplicados na concepção de edifícios, automóveis, aviões e barcos.

Devido à sua importância, complexidade, e interesse para o quotidiano, muitos foram aqueles que dedicaram o seu tempo e os seus conhecimentos, em estudos na área da acústica, contribuindo assim para o grande desenvolvimento que esta temática sofreu nos últimos tempos. Nomes como Cyrill M. Harris, Michael Barron, Leo Beranek e Cremer estarão para sempre ligados à acústica, quer no que diz respeito a estudos, quer pela participação na construção de diversos auditórios.

### 2.2.2. IMPORTÂNCIA SOCIAL E ECONÓMICA

As primeiras preocupações em termos de conforto acústico prendiam-se com os auditórios e salas de espectáculos, em que os principais problemas residiam na percepção do espectador. Quer fosse um concerto, ou uma palestra, pretendia-se que a mensagem chegasse ao receptor de uma forma perceptível, sem que fosse necessário ao emissor um esforço adicional para se tornar perceptível, nem ao ouvinte um acréscimo de atenção, isto em qualquer lugar do auditório.

O avanço tecnológico não se revelou unicamente benéfico para a sociedade. Com ele veio anexado, de entre problemas, o ruído. O ruído vem associado à evolução dos transportes, da indústria, dos aparelhos domésticos, e hoje em dia às redes eléctricas de alta tensão, que começam a incomodar os que residem próximos destas.

A crescente mecanização industrial, e o crescimento dos ritmos de produção, conduziram a um aumento dos níveis de ruído nas indústrias. Assim o ruído já não é, só uma questão de conforto acústico, mas também, uma questão de saúde pública.

A perda de capacidade auditiva, que facilmente associamos ao excesso de ruído no local de trabalho, é uma das doenças profissionais mais comuns na Europa, significando neste momento aproximadamente um terço das doenças profissionais. Mas a exposição ao ruído, não afecta apenas a perda de audição, está provado que interfere com o sistema cardiovascular, que resulta numa libertação de adrenalina associada ao stress, assim como o aumento da pressão arterial. Simplesmente por dificultar a comunicação entre o pessoal no local de trabalho, o ruído poderá estar indirectamente relacionado com acidentes.

A questão de conforto acústico já vem de longe, mas ainda hoje se revela um problema para a nossa sociedade, como se pode comprovar pela seguinte notícia recentemente publicada:

***“Excesso de barulho provocado por vizinhos lidera lista de queixas apresentadas à PSP e GNR***

*O excesso de barulho provocado por vizinhos tem sido a situação que motiva mais queixas na PSP e GNR no âmbito da Lei do Ruído, segundo dados fornecidos à Lusa pelas duas entidades.*

*No total, a PSP registou 4332 ocorrências em 2007 devido ao excesso de ruído de vizinhança, sendo que 1836 dessas reclamações obrigaram à elaboração de auto de notícia. Também no ano passado, a GNR levantou 79 contra-ordenações relativas a questões de vizinhança e locais de diversão. No total das queixas apresentadas, a Polícia de Segurança Pública registou o ano passado 7608 relacionadas*

com excesso de ruído oriundo de viaturas, obras, espectáculos e vizinhança. Neste período, a PSP elaborou 1500 autos de notícia devido ao ruído proveniente do funcionamento de alarmes de veículos e 12 autos relativos ao ruído originado pelo funcionamento de veículos. Ao todo, a Guarda Nacional Republicana registou no ano passado 155 queixas, entre autos por excesso de ruído causado por viaturas (75) e contra-ordenações relativas a questões de vizinhança e locais de diversão (79). Há ainda um crime em julgamento, na sequência de uma situação apresentada à GNR. A disparidade de números entre estas duas forças de segurança é explicada por uma fonte da GNR com as diferentes áreas de actuação, uma vez que a PSP age sobretudo em áreas urbanas de maior dimensão, e com métodos de actuação diferentes. Os dados disponibilizados à Lusa pela PSP referem que das 7608 situações em 2007, mais de metade (4.572) justificaram a elaboração de auto de notícia. Depois do excesso de barulho provocado por vizinhos, os sistemas de alarme foram a segunda razão para as queixas em 2007, seguidos do barulho em obras e em espectáculos de diversão, feiras, mercados ou manifestações desportivas. Os dados da PSP mostram que em 2007 houve um aumento de situações face a 2006, ano em que foram registadas 5.940 queixas, tendo 2.688 motivado a elaboração de auto de notícia. Contrariamente, os números da GNR denunciam uma quebra em 2007 face a 2006, quando foram anotadas 341 contra ordenações, 141 das quais relativa a contaminação acústica. Já este ano foram apresentadas à GNR 18 queixas relativas a ruído ambiente. Na categoria contaminação acústica, a GNR junta os números sobre ruído de vizinhança e ruído permanente (proveniente de bares, discotecas e afins), sem no entanto os discriminar.

De acordo com um estudo produzido pela Federação Europeia para os Transportes e Ambiente (T&E) pelo menos 50 mil pessoas morrem anualmente na União Europeia (UE) devido a ataques cardíacos causados pelo excesso de ruído rodoviário e ferroviário. As estimativas da organização indicam que os custos financeiros da poluição sonora, nomeadamente para os serviços de saúde, atingirão pelo menos 40 biliões de euros por ano na UE. De acordo com a Organização Mundial de saúde (OMS), o limite de ruído ambiental a partir do qual começa a ter efeitos negativos para os humanos é de 55 decibéis, valor que se situa entre o provocado por um aguaceiro (50 decibéis) e uma conversa entre duas pessoas (60).”

Fonte: jornal Público 12-03-2008

Como disse Tehudi Menuhim, um conceituado violinista: “ O silêncio é uma das principais necessidades do Homem, assim como o recolhimento, porque não podemos criar nada de válido quando estamos constantemente cercados de ruídos de toda a espécie.”

Como se pode concluir, o conforto acústico e o ruído, como uma questão de saúde são problemas actuais que estão ainda longe de ser totalmente solucionados.

### **2.3. ACÚSTICA COMO MATÉRIA DE ESTUDO**

A música motivou os primeiros estudos acústicos, mas em dezanove séculos, não se pode dizer que a acústica sofreu grandes desenvolvimentos, pois o som não foi uma temática fácil de se perceber, mas passados os primeiros obstáculos (a definição do som como um fenómeno de onda e posteriormente a matematização da forma desta) começou a notar-se um cada vez maior desenvolvimento desta área.

Neste ultimo século a acústica sofreu grandes desenvolvimentos, de tal forma que hoje se divide em inúmeras áreas de estudo, como a bioacustica, a acústica ambiental, musical, física, fisiológica e psicológica, de edifícios, subaquática, ultra sons, psico-acústica, etc.[6].

Os constantes avanços e progressos destas matérias referidas anteriormente, motivam a realização de encontros nacionais e internacionais periódicos, para que possa haver troca de informações, discussões sobre determinadas questões e sobretudo para apresentar os estudos realizados. Um exemplo destes encontros é o ICA, International Congress on Acoustics, que já vai na sua 19ª edição, assim como o Internoise, Euronoise, ISCV, entre outros. Como estes encontros ocorrem de longe a longe, existem várias revistas que publicam as mais recentes descobertas e avanços na área da acústica, como por exemplo o Journal of Acoustical Society of América, Journal of Sound and Vibration, entre outras.

No âmbito do curso de Engenharia Civil os dois temas da acústica abordados são a acústica Ambiental e a acústica de Edifícios, sendo que é neste último que o objectivo desta dissertação se insere.

### 2.3.1. NOÇÕES GERAIS

Antes de apresentar os conceitos base convém explicar o fenómeno físico de propagação da onda sonora.

Para o som se propagar é necessário um meio material e elástico, razão pela qual o som não se propaga no vácuo. O som propaga-se através de diferentes meios elásticos, sejam eles gasosos, sólidos ou líquidos, e o factor que os distingue é a velocidade com que o som se propaga em cada um deles.

O meio que mais rapidamente associamos à propagação do som é o ar, um meio gasoso, mas ao contrário do que se possa pensar não é o meio mais eficaz de propagação da onda sonora. Tanto os meios sólidos como os líquidos apresentam por norma velocidades de propagação superiores às dos meios gasosos.

A propagação da onda sonora deve-se ao movimento oscilatório das moléculas. As moléculas (por exemplo do ar) excitadas por uma superfície vibrante oscilam em torno da sua posição de repouso, e esse movimento vai transmitir energia às moléculas vizinhas, provocando nestas, movimento oscilatório e assim sucessivamente. [5] Este movimento das moléculas resulta em zonas de compressão, onde a pressão do ar é superior à pressão atmosférica, e zonas de rarefacção, em que a pressão do ar é inferior comparativamente à pressão atmosférica. (Fig.2.1)

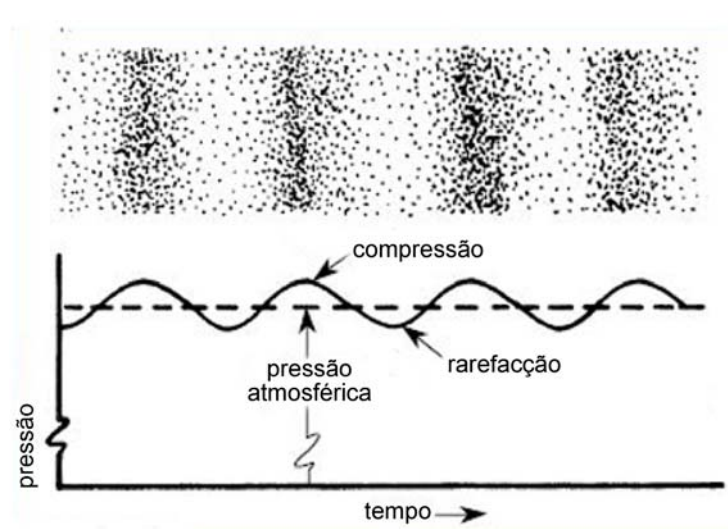


Fig. 2.1- Compressão e Rarefacção das moléculas do ar.

Nos pontos seguintes serão apresentados conceitos teóricos básicos.

### 2.3.1.1. Pressão, Intensidade e Potência Sonora

Como já foi referido anteriormente, a propagação da onda sonora ocorre devido à oscilação das partículas do meio em que o som se propaga. Este movimento ondulatório provoca variações de pressão no meio, e é devido a essas variações de pressão percebidas pelo ouvido, que o ser humano consegue ouvir. Por esta razão, é de todo importante medir a variação de pressão causado pela onda sonora, tendo como valor de referência a pressão atmosférica que em termos numéricos equivale a aproximadamente  $10^5$  Pa.

A Intensidade Sonora, é por definição, a quantidade média de energia, que numa dada direcção, atravessa por segundo uma área de  $1 \text{ m}^2$ , normal a essa direcção, e exprime-se em  $\text{W/m}^2$ .

Para além destas, existe ainda mais uma grandeza importante para a análise da propagação das ondas, que é a Potência sonora. Esta é uma característica da fonte, e por definição, representa a energia total que atravessa uma esfera fictícia de raio qualquer centrada na fonte num segundo. A Potência Sonora quantifica-se em W.

Estas três grandezas que caracterizam a propagação sonora, estão relacionadas entre si sob a seguinte forma:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho \cdot c} \quad (2.1)$$

Onde,

$I$  – intensidade sonora ( $\text{W/m}^2$ );

$W$ - potência sonora (W);

$r$ - distância (m);

$p$ - pressão sonora (Pa);

$\rho$ - massa volúmica ( $\text{kg/m}^3$ );

$c$ - celeridade (m/s).

### 2.3.1.2. Comprimento, Frequência de Onda

O comprimento de onda ( $\lambda$ ), é por definição a distância que a onda percorre durante o tempo que ela leva a completar um ciclo de compressão e rarefacção. Por se tratar de uma distância exprime-se em (m)

O conhecimento do comprimento de onda, assume capital importância quando se pretende estudar o comportamento das ondas face a obstáculos. Resumidamente pode-se afirmar que para um obstáculo mais pequeno comparativamente com o comprimento de onda, o obstáculo é considerado “inexistente”(Fig. 2.2 A). Para obstáculos cujas dimensões são bastante superiores à do comprimento de onda, criar-se-á uma zona de sombra por detrás do obstáculo (Fig. 2.2 B).

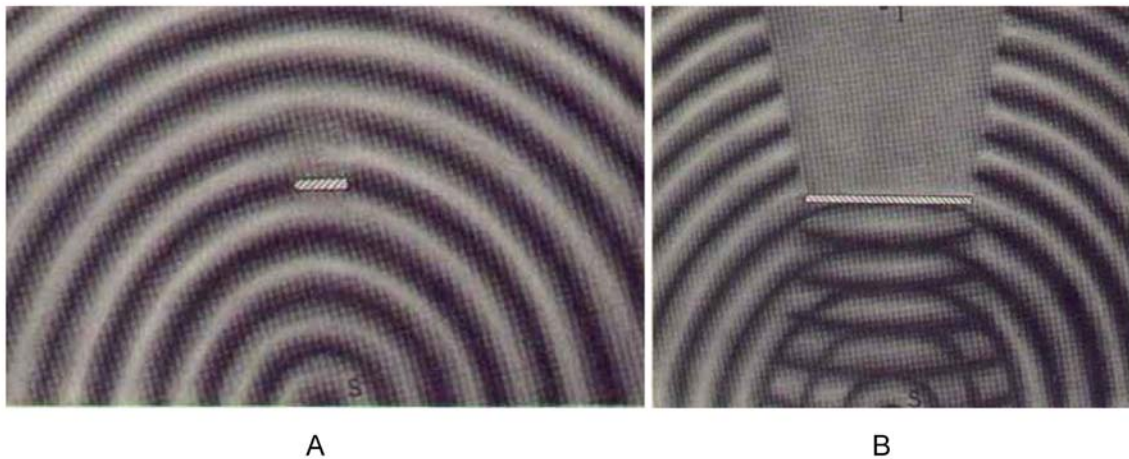


Fig. 2.2 - Efeito do comprimento de onda face a obstáculos

A frequência ( $f$ ) corresponde ao número de ciclos que ocorrem num segundo. Em honra do físico alemão Heinrich Hertz a frequência exprime-se em hertz (Hz).

Praticamente todos os sons possuem diferentes frequências, sendo assim possível diferenciar fontes sonoras pelas frequências que elas emitem.

Em Acústica de Edifícios é normal dividir a gama de frequência em três grupos: para as frequências entre 20 a 355 Hz são denominados sons graves; os sons intermédios possuem frequências entre 355 e 1.410 Hz; por fim temos os sons agudos quem contêm altas frequências, desde 1.410 até 20.000 Hz.

A gama de frequências pode ainda ser dividida em agrupamentos mais pequenos, que se denominam por “bandas”. Neste ramo da acústica utilizam-se unicamente as bandas de oitava, e de um terço de oitava.

Tendo em conta o comprimento de onda e a frequência, podemos estabelecer uma relação como demonstra a Fig 2.3, que se traduz matematicamente na forma:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.2)$$

Onde,

$\lambda$ - comprimento de onda (m);

$c$ - celeridade (velocidade de propagação) (m/s)

$f$ - frequência (Hz)

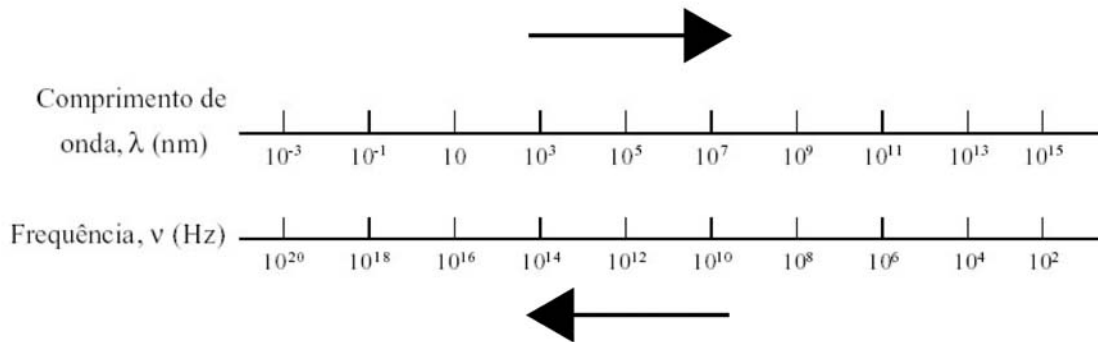


Fig. 2.3 - Relação entre a frequência e o comprimento de onda.

### 2.3.1.3. Níveis

O sistema auditivo humano consegue suportar variações de pressão desde  $10^{-5}$  Pa, que é conhecido como o limiar da audição, até 100 Pa, que é denominado por limiar da dor. Devido à grandeza desta gama ( $10^7$ ), porque o ouvido não se comporta de uma forma linear aos estímulos, mas de modo quase logarítmico, utiliza-se uma escala logarítmica. Esta grandeza tem como unidade o decibel (dB).

Assim utiliza-se a seguinte fórmula para conversão de pressões ( $p$ ) para níveis de pressão sonora ( $L_p$ ):

$$L_p = 10 \log_{10} \left( \frac{p^2}{p_0^2} \right) \quad (2.3)$$

Em que,

$p$ - pressão (Pa);

$p_0$ - pressão sonora de referência,  $2 \times 10^{-5}$  Pa.

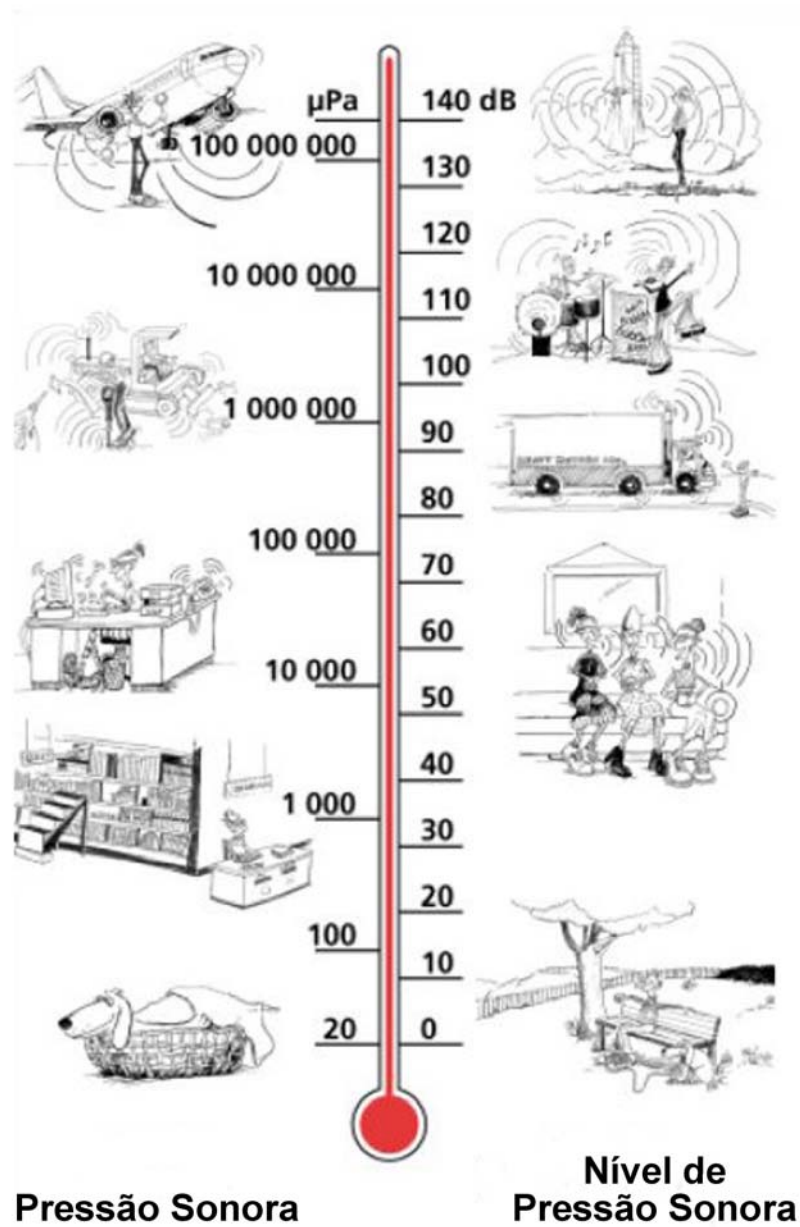


Fig. 2.4 – Nível de pressão sonora.

Existem ainda outras grandezas medidas em dB que caracterizam o fenómeno sonoro. São elas a intensidade sonora ( $I$ ) e a potência sonora ( $W$ ).

Temos então o nível de intensidade sonora ( $L_I$ ):

$$L_I = 10 \log_{10} \left( \frac{I}{I_0} \right) \quad (2.4)$$

Onde,

$I_0$ - valor de referência,  $10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>

Por fim o nível de potência sonora ( $L_w$ ):

$$L_w = 10 \log_{10} \left( \frac{W}{W_0} \right) \quad (2.5)$$

Onde,

$W_0$ - Valor de referência,  $10^{-12}$  W

### 2.3.2. ACÚSTICA DE EDIFÍCIOS

A Acústica de Edifícios é, como o próprio nome indica, o ramo da acústica que se dedica ao conforto acústico dos edifícios. O conforto acústico pode ser atingido por dois caminhos distintos: por correcção acústica, ou por isolamento sonoro.

Se se pretende corrigir um compartimento para o som aí emitido, isto é, para que o som seja perceptível em todo o compartimento e sem qualquer distorção, está-se a falar de correcção acústica. Esta necessidade normalmente verifica-se em salas de aula, auditórios, salas de espectáculos, etc.

Se o que se pretende é tratar um compartimento para a transmissão de sons para locais contíguos e vice-versa, está-se a falar de isolamento sonoro. Esta questão coloca-se normalmente em situações, como por exemplo, ruído entre fogos contíguos, sons das discotecas que incomodam os vizinhos, etc.

É nesta temática da acústica, a transmissão sonora entre espaços, que este trabalho se insere. No cap. 3 será feita a introdução teórica desta matéria.

#### 2.3.2.1. Exigências Regulamentares

O ruído pode ser qualquer som que incomoda, irrita, perturba aquele que o recebe. Esta definição de ruído foi e continua a ser a causa de muitos problemas, pois trata-se de uma definição bastante subjectiva, que pode muito bem depender do nosso gosto musical, estado de espírito, stress, etc.. Por exemplo que para uns é ruído, para outros pode ser música.

No dia-a-dia a sociedade está constantemente sujeita a sons que ultrapassam o limite de comodidade, seja pelos vizinhos que discutem alto, festas na porta ao lado de casa, cães a ladrar, a generalidade dos transportes.

Por estas razões houve necessidade de desenvolver legislação que permitisse:

- Definir limites sonoros, para que existisse imparcialidade na classificação do som como ruído;
- Garantir uma qualidade mínima das construções, em termos acústicos, de modo a satisfazer as necessidades dos ocupantes dos edifícios, sejam habitações, escolas, hospitais, bibliotecas, etc..

Como se sabe nem sempre existiu legislação sobre a acústica. A primeira referência sobre o conforto acústico surge na Constituição da República Portuguesa, no artigo 66º, que pertence ao capítulo sobre direitos e deveres Sociais, relacionados com o Ambiente e qualidade de vida:

*“1. Todos têm direito a um ambiente de vida humano, sadio e ecologicamente equilibrado e o dever de o defender.*

*2. Para assegurar o direito ao ambiente, no quadro de um desenvolvimento sustentável, incumbe ao Estado, por meio de organismos próprios e com o envolvimento e a participação dos cidadãos:*

*(...)*

*e) Promover, em colaboração com as autarquias locais, a qualidade ambiental das povoações e da vida urbana, designadamente no plano arquitectónico e da protecção das zonas históricas;*

*(...)”*

A primeira abordagem concreta sobre o ruído surge, a 7 de Abril de 1987 no documento intitulado “Lei de Bases do Ambiente” [8], mais especificamente no artigo 22º:

*“1- A luta contra o ruído visa a salvaguarda da saúde e bem-estar das populações e faz-se através, designadamente:*

*a) Da normalização dos métodos de medida do ruído;*

*b) Do estabelecimento de níveis sonoros máximos, tendo em conta os avanços científicos e tecnológicos nesta matéria;*

*c) Da redução do nível sonoro na origem, através da fixação de normas de emissão aplicáveis às diferentes fontes;*

*d) Dos incentivos à utilização de equipamentos cuja produção de ruídos esteja contida dentro dos níveis máximos admitidos para cada caso;*

*e) Da obrigação dos fabricantes de máquinas e electrodomésticos apresentarem informações detalhadas, homologadas, sobre o nível sonoro dos mesmos nas instruções de uso e facilitarem a execução das inspecções oficiais;*

*f) Da introdução nas autorizações de construção de edifícios, utilização de equipamento ou exercício de actividades da obrigatoriedade de adoptar medidas preventivas para eliminação da propagação do ruído exterior e interior, bem como das trepidações;*

*g) Da sensibilização da opinião pública para os problemas do ruído;*

*h) Da localização adequada no território das actividades causadoras de ruído.”*

Pouco tempo depois, a 24 de Junho de 1987, baseado nos princípios da Lei de Bases do Ambiente, é publicado no Diário da República (D.L. 251/87), o primeiro documento Legal exclusivamente sobre o ruído denominado “Regulamento Geral Sobre o Ruído”, RGR.

A 2 de Setembro de 1989 é publicado o D.L. 292/89, que não passa de uma revisão e actualização dos pressupostos do RGR.

Só cerca de doze anos mais tarde, é que surgiu nova revisão, D.L. 292/00 de 14 de Novembro [9], tardia mas incontornável. Como vem referido no mesmo documento, o RGR em vigor na altura mostrava-se “claramente insuficiente para a salvaguarda da saúde e do bem-estar das pessoas, sendo certo que a poluição sonora constitui um dos principais factores de degradação da qualidade de vida das populações”. Importa referir que com esta publicação o RGR passou também a designar-se por Regime Legal sobre a Poluição Sonora, RLPS.

O D.L. 146/06 de 31 de Julho [10] “*transpõe para a ordem jurídica interna a directiva nº 2002/49/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 25 de Junho, relativa a avaliação e gestão do ruído ambiente*” Com a publicação deste documento tornou-se “*premente proceder a ajustamentos ao Regime Legal sobre a Poluição Sonora*” e é face a esta situação que surge o D.L. 9/2007, de 17 de Janeiro, que aprova o novo Regulamento Geral do Ruído [11] abandonando assim a designação de RLPS. Esta é a legislação em vigor nos dias de hoje em Portugal.

O RGR remete para outros regulamentos complementares, mais específicos, por ex.: Ruído nos Aeroportos, Avaliação e Gestão do Ruído, Requisitos Acústicos dos Edifícios.

Enquadrado com o tema do presente trabalho está o Regulamento de Requisitos Acústicos de Edifícios, RRAE, que foi aprovado pelo D.L. nº. 129/02 de 1 de Maio. Este documento enuncia os requisitos para todo o tipo de edifícios, e acaba de ser actualizado com a aprovação do D.L. nº. 96/2008 de 9 de Junho [12].

De seguida será apresentada nos quadros 2.1, 2.2 e 2.3, uma síntese dos requisitos para o isolamento sonoro a ruídos aéreos para elementos interiores incluindo o efeito das transmissões marginais ( $D_{nT,w}$ ) existentes no RRAE.

Quadro 2.1 - Requisitos de  $D_{nT,w}$  em edifícios Habitacionais e mistos [12].

Situação	Mínimo Regulamentar (dB)
Entre quartos e/ou zonas de estar de fogos diferentes.	50
Entre zonas de circulação e quartos ou zonas de estar.	48 40 (com ascensores) 50 (com garagem)
Entre fogos e locais destinados a indústria, comércio ou serviços.	58

Quadro 2.2 - Requisitos mínimos de  $D_{nT,w}$  em edifícios Escolares [12].

<b>Recepção</b> <b>Emissão</b>	<b>Salas de aula, de música, de professores, administrativas</b>	<b>Bibliotecas e gabinetes médicos</b>	<b>Salas polivalentes</b>
<b>Salas de aula, de música, de professores, administrativas.</b>	45 (dB)	45 (dB)	45 (dB)
<b>Salas de aula musical, salas polivalentes, refeitórios, ginásios e oficinas.</b>	55 (dB)	58 (dB)	50 (dB)
<b>Berçários</b>	53 (dB)	55 (dB)	48 (dB)
<b>Corredores de grande dimensão.</b>	30 (dB) 45 *(dB)	35 (dB) 50* (dB)	30 (dB) 45* (dB)

\*se não houver porta

Quadro 2.3 - Requisitos de mínimos  $D_{nT,w}$  em edifícios Hospitalares [12].

<b>Recepção</b> <b>Emissão</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
<b>A- Blocos operatórios, gabinetes médicos, salas de trabalho, salas de consulta ou exame.</b>	48 (dB)	40 (dB)
<b>B- Enfermarias, salas de tratamento</b>	55 (dB)	45 (dB)
<b>Salas administrativas e de convívio</b>	55 (dB)	48 (dB)
<b>Circulações internas</b>	35 (dB) 30 * (dB)	30 (dB) 45* (dB)
<b>Refeitórios e cozinhas</b>	52 (dB)	45 (dB)
<b>Oficinas</b>	55 (dB)	48 (dB)

\*se não houver porta



# 3

## TRANSMISSÃO SONORA

### 3.1. INTRODUÇÃO

O objectivo deste capítulo será uma primeira abordagem à teoria do tema da transmissão sonora.

### 3.2. TRANSMISSÃO SONORA ENTRE ESPAÇOS

Denomina-se por transmissão sonora entre espaços edificados, o som que atravessa de um compartimento de um edifício para outro, isto é, se se considerar uma fonte sonora no interior de um compartimento, parte do som produzido pela fonte é reflectida para o interior do mesmo compartimento, outra parte é absorvida pela envolvente, e outra é transmitida a outros compartimentos, adjacentes ou não (Fig.3.1).

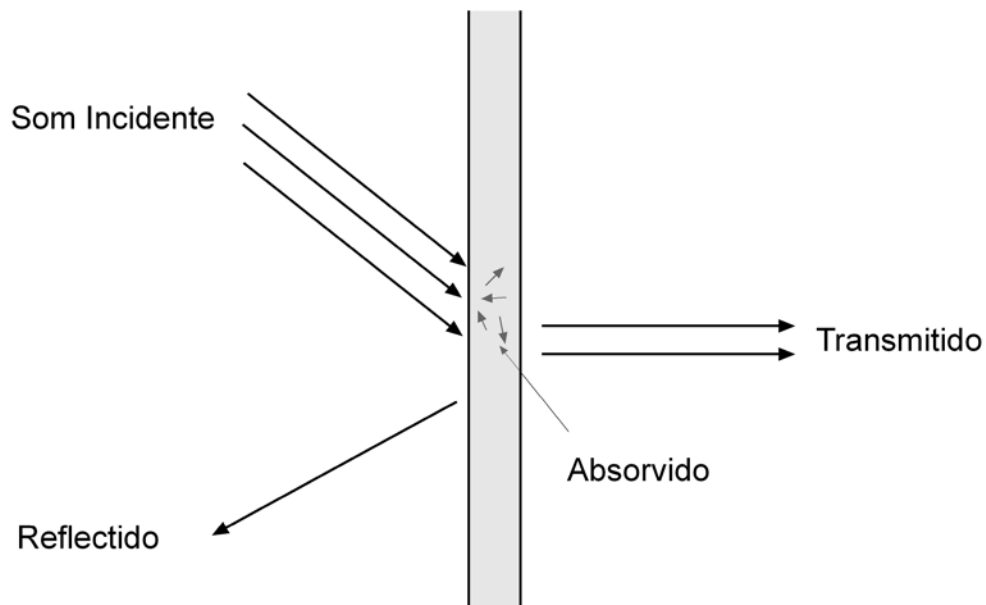


Fig. 3.1 - Transmissão sonora.

No âmbito desta dissertação pretende-se estudar a transmissão sonora no interior dos edifícios. Existem dois tipos de ruídos, os ruídos de percussão, quando existe solicitação mecânica directa da fonte sobre os elementos construtivos (por ex. quando se fura uma parede com um berbequim e se

ouve no prédio todo), e os ruídos de condução aérea quando o som se propaga unicamente por vibração do ar (por ex. a música alta dos vizinhos).

Quando a questão é diminuir a transmissão sonora está-se a falar de aumentar isolamento acústico. Assim como existe transmissão de ruídos de condução aérea e transmissão de ruídos de percussão, existem também dois tipos de isolamento, a sons aéreos e a sons de percussão. A interpretação das duas formas de transmissão é diferente, o que não implica que as duas ocorram, em separado, pelo contrário, normalmente ocorrem em simultâneo.

A transmissão sonora, seja ela de sons aéreos ou de sons de percussão, ocorre sempre por dois tipos de caminhos, o caminho directo, que ocorre unicamente através do elemento de separação dos dois compartimentos, e os caminhos marginais, quando a propagação de energia sonora ocorre pelos elementos envolventes dos compartimentos. Para melhor compreensão os dois tipos de caminhos encontram-se ilustrados na Fig. 3.2.

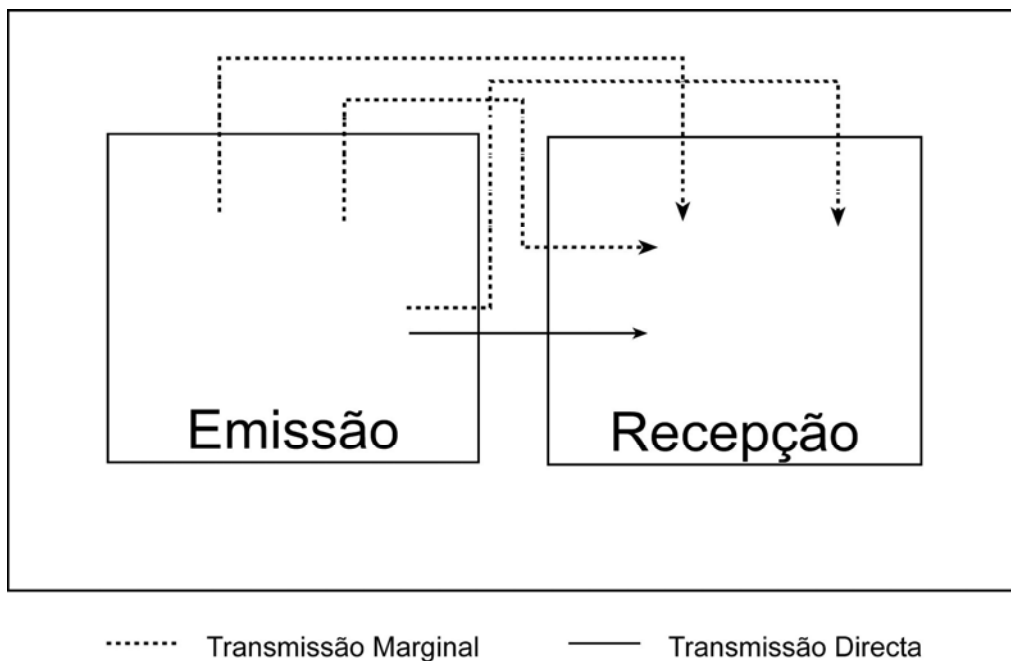


Fig. 3.2 - Caminhos de transmissão sonora.

Nos dias de hoje a caracterização do isolamento sonoro dos elementos/componentes de separação dos edifícios é feita através do índice de redução sonora (R). Este índice é obtido através de ensaios efectuados em laboratório, e não incluem a contribuição da transmissão marginal. A transmissão marginal só é quantificada, quer para sons aéreos, quer para sons de percussão, nos ensaios *in situ*. Tendo em conta que os índices de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea ( $D_{n,Tw}$ ) e ( $D_{2m,nTw}$ ) para que estão estipulados no RRAE contemplam as transmissões marginais, é de todo importante possuir métodos de cálculo que contabilizem estas transmissões na fase de projecto, para que se possa prever, com o mínimo de erro possível, o comportamento do edifício, em termos de isolamento sonoro.

O parâmetro  $D_{nT}$  representa o valor do isolamento a sons de condução aérea padronizado em cada banda de frequência, medido *in situ*, e o termo n significa que é um valor normalizado para a área de absorção sonora equivalente de 10 m<sup>2</sup>.

No parâmetro  $D_{n,Tw}$  o termo  $w$  significa que este é um valor único, um índice, que quantifica o isolamento sonoro a sons aéreos dos elementos de compartimentação, pavimentos e paredes. Tendo os vários valores de  $D_{nT}$  (um para cada banda de frequência) e ajustando estes de acordo com a curva de referência normalizada da NP EN ISO 717-1 [13] obtêm-se o  $D_{n,Tw}$ .

O parâmetro  $D_{2m,n,Tw}$  representa o mesmo que o  $D_{n,Tw}$ , mas para elementos em contacto com o exterior, por ex.: fachadas, coberturas, etc. O termo  $2m$  deste parâmetro significa que no processo de medição o microfone é colocado a 2 metros da superfície da fachada.

### 3.3. TRANSMISSÃO MARGINAL

Os edifícios nos dias de hoje encontram-se constantemente sujeitos a ruídos de vários tipos e proveniências, que incomodam os seus moradores ou utilizadores, dependendo da funcionalidade do edifício.

No que diz respeito aos sons aéreos, “a transmissão marginal tem sido considerada até recentemente de uma forma algo grosseira” [14].

Um dos métodos utilizados até hoje baseava-se no conhecimento da relação entre as características de isolamento sonoro do elemento de separação principal e as da envolvente dos compartimentos, tendo sido estabelecido classes de contribuição da transmissão marginal, e de correcção dos valores dos resultados obtidos quer em ensaios laboratoriais, quer por métodos de cálculo. Assim considerava-se as seguintes classes:

- Para valores de índice de isolamento a sons aéreos  $R_w \leq 35$  dB, a contribuição da transmissão marginal é considerada desprezável, ou seja,  $R_w = R'_w$ ;
- Para valores de índice de isolamento sonoro a sons aéreos compreendidos entre 35 e 45 dB, a contribuição da transmissão marginal, entende-se como uma redução do  $R_w$  em 3 dB, ou seja,  $R'_w = R_w - 3$ ;
- Para valores de  $R_w$  superiores a 45 dB a contribuição da transmissão marginal poderá ser considerável, não sendo fácil a previsão de  $R'_w$ .

Outro critério utilizado baseava-se na relação entre as espessuras de elementos de compartimentação homogêneos concorrentes num ponto. Para elementos de compartimentação homogêneos e do mesmo tipo, a variação de massa superficial ocorre proporcionalmente com a variação de espessura do elemento e, dado que a massa superficial se relaciona mais ou menos proporcionalmente com o isolamento sonoro proporcionado pelo elemento, a fundamentação do critério é constante.

Na figura seguinte estão representadas as três situações contempladas por este método.

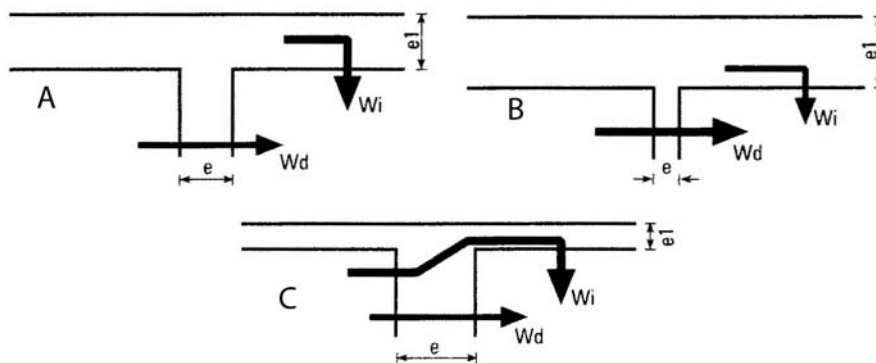


Fig. 3.3 – Esquema exemplificativo da influência da transmissão marginal em elementos homogêneos [14].

Analisando a figura 3.3, temos que:

- Para situações idênticas à do esquema **A**, em que a massa superficial do elemento de separação principal é idêntica à do elemento adjacente, a transmissão marginal é considerada igual à transmissão directa, o que implica uma redução de 3 dB no valor de  $R_w$ , isto é,  $R'_w = R_w - 3$ .
- Em situações em que a massa superficial do elemento de separação principal é muito menor, que a do elemento adjacente, **B**, a transmissão ocorre fundamentalmente pelo elemento de separação, desprezando-se assim a contribuição da transmissão marginal, o que implica  $R'_w = R_w$ ;
- Para situações como a representada em **C**, na qual a massa superficial do elemento de separação é bastante superior à do elemento adjacente, o que implica que a transmissão se irá efectuar quase na sua totalidade pelo elemento mais leve, logo a contribuição da transmissão marginal será significativa o que implica uma redução do  $R_w$ .

Resumidamente, pode-se afirmar que estes métodos não satisfaziam a necessidade de prever concretamente a contribuição da transmissão marginal, sempre que consideravam esta transmissão significativa, não tinham forma de a quantificar. Basicamente limitava-se a reduzir em 3 dB o índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea de um elemento, obtido em laboratório.

### 3.4. NORMA EN 12354-1

Na actualidade a estimativa do índice de redução sonora a ruídos de condução aérea ( $D_{n,Tw}$ ) é efectuada segundo o estipulado na Norma EN 12354-1 “Building Acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 1 : Airborne sound insulation between rooms”. A norma contempla vários caminhos para a transmissão sonora entre dois compartimentos: o caminho directo, através do elemento de separação; os caminhos indirectos, como por exemplo aberturas de ventilação, janelas e portas; e os caminhos marginais, que estão relacionados com os elementos da envolvente dos compartimentos. Pode-se então dizer que o som transmitido de um compartimento para outro corresponde à soma do som que se propaga pelos diferentes caminhos.

A figura (3.4) esquematiza o caminho directo, e os três caminhos marginais de cada elemento da envolvente dos compartimentos. Na figura a letra F (flanking) representa o elemento da envolvente no compartimento emissor e D (direct) o elemento de separação principal no mesmo compartimento. As letras em minúsculas referem-se aos mesmos elementos mas no compartimento receptor. Ou seja o

caminho Dd representa o caminho directo, e Ff, Df e Fd representam os três caminhos marginais de cada elemento da envolvente.

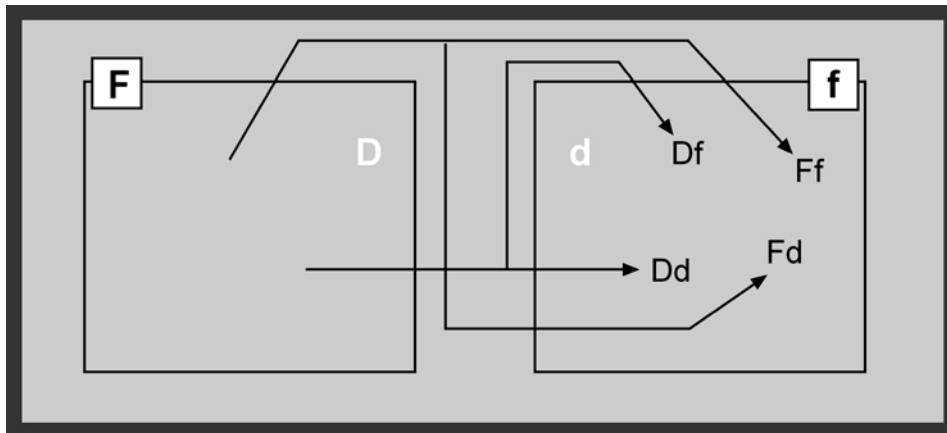


Fig. 3.4 - Caminhos de transmissão sonora Norma ISO 12354-1.

O cálculo das transmissões marginais é efectuado recorrendo a valores do índice  $R_w$ , dado que só existem índices caracterizadores do isolamento sonoro dos elementos de construção obtidos em laboratório. Assim sendo, vamos ter uma projecção de valores obtidos em laboratório para aplicação em obra [14]. Para se obter o  $D_{nT,w}$  (eq.3.1), será necessário afectar o valor  $R'_w$  (índice de redução sonora aparente) da influência da absorção sonora do elemento receptor.

$$D_{nT,w} = R'_w + 10 \times \log \left( \frac{T}{T_0} \right) \quad (\text{dB}) \quad (3.1)$$

Em que:

$T$  - tempo de reverberação do compartimento receptor, em segundos;

$T_0$  - tempo de reverberação de referência,  $T_0=0,5$  s.

NOTA: para compartimentos em que haja tempo de reverberação atribuível em projecto, o valor de referência a considerar será o do respectivo tempo de dimensionamento.

A norma define dois métodos para calcular o isolamento sonoro a sons de condução aérea, um mais detalhado, e um simplificado.

Segundo o método simplificado, o índice  $R'_w$  (em dB) é calculado através da equação (3.2). Esta equação traduz o somatório de todos os caminhos possíveis entre dois compartimentos adjacentes. No caso mais genérico temos ao todo 13 caminhos, o caminho directo, e três caminhos marginais para cada elemento da envolvente (duas paredes, a laje de tecto e laje de piso).

$$R'_w = -10 \times \log \left[ 10^{\frac{-R_{Dd,w}}{10}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{\frac{-R_{Ff,w}}{10}} + \sum_{f=1}^n 10^{\frac{-R_{Df,w}}{10}} + \sum_{F=1}^n 10^{\frac{-R_{Fd,w}}{10}} \right] \quad (3.2)$$

Para os três caminhos marginais os índices  $R_{ij}$  calculam-se com base nas seguintes expressões:

$$R_{Ff,w} = \frac{R_{F,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Ff,w} + K_{Ff} + 10 \times \log \left( \frac{S_s}{l_0 l_f} \right) \quad (3.3)$$

$$R_{Fd,w} = \frac{R_{F,w} + R_{s,w}}{2} + \Delta R_{Fd,w} + K_{Fd} + 10 \times \log \left( \frac{S_s}{l_0 l_f} \right) \quad (3.4)$$

$$R_{Df,w} = \frac{R_{s,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Df,w} + K_{Df} + 10 \times \log \left( \frac{S_s}{l_0 l_f} \right) \quad (3.5)$$

Em que:

$R_{s,w}$  índice de redução sonora do elemento de separação principal, em dB;

$R_{F,w}$  índice de redução sonora do elemento marginal F, no compartimento emissor, em dB;

$R_{f,w}$  índice de redução sonora do elemento marginal f, no compartimento receptor, em dB;

$\Delta R_{Ff,w}$  acréscimo de isolamento sonoro, por adição de um revestimento, colocado nos elementos marginais do espaço emissor e/ou receptor, em dB;

$\Delta R_{Fd,w}$  acréscimo de isolamento sonoro, por adição de um revestimento, colocado no elemento marginal do espaço emissor e/ou no elemento de separação, no lado do espaço receptor, em dB;

$\Delta R_{Df,w}$  acréscimo de isolamento sonoro, por adição de um revestimento, colocado no elemento de separação do lado do emissor e/ou no elemento marginal do espaço receptor, em dB;

$K_{Ff}$  índice de redução de transmissão de vibrações, no caminho Ff, em dB;

$K_{Fd}$  índice de redução de transmissão de vibrações, no caminho Fd, em dB;

$K_{Df}$  índice de redução de transmissão de vibrações, no caminho Df, em dB;

$S_s$  área do elemento de separação, em  $m^2$

$l_f$  comprimento comum entre o elemento de separação e o marginal, em m;

$l_0$  comprimento de referência ( $l_0=1m$ )

Relativamente às equações (3.3, 3.4, 3.5), como já foi dito anteriormente os índices de isolamento sonoro dos elementos construtivos (R), são valores obtidos em laboratório através de ensaios devidamente normalizados.

No caso de existir acréscimo de isolamento ( $\Delta R$ ) nos dois compartimentos, isto é, no elemento do espaço emissor e simultaneamente no espaço receptor, o valor de  $\Delta R$  a colocar na fórmula será igual à soma do  $\Delta R$  com maior valor, a metade do  $\Delta R$  de menor valor.

Relativamente ao cálculo dos  $R_{Ff,w}$ ,  $R_{Fd,w}$ ,  $R_{Df,w}$  falta ainda referir, que estas resistências, dependem do parâmetro  $K_{ij}$ , que é um valor característico de cada solução construtiva. Por exemplo, na construção em Portugal, são utilizados diversos tipos de lajes, desde lajes aligeiradas de moldes recuperáveis, lajes aligeiradas de moldes não recuperáveis, lajes maciças, etc. A união destes elementos aos diversos tipos de soluções construtivas para paredes divisórias, paredes de envolvente, vai resultar em valores de  $K_{ij}$  diferente para cada solução construtiva.

Ou seja o  $K_{ij}$  representa uma resistência que a união de elementos construtivos oferece à transmissão sonora.

Uma vez que o modelo teórico de cálculo do  $K_{ij}$ , da norma EN 12354-1 se baseou em valores obtidos em estudos realizados na Alemanha e na Holanda, e sabendo que estes países possuem tecnologias construtivas diferentes das de Portugal, o objectivo deste trabalho será, verificar a aplicabilidade do método da norma a um caso concreto, de uma solução construtiva corrente na construção portuguesa.



# 4

## MÉTODO TEÓRICO DOS INDICES DE REDUÇÃO DE TRANSMISSÃO DE VIBRAÇÕES

### 4.1. INTRODUÇÃO

O modelo de cálculo teórico do  $K_{ij}$  vem referido na norma EN 12354-1. A norma desenvolve um método não testado em Portugal, baseado em dados obtidos em estudos realizados na Alemanha e na Holanda.

Seguidamente será explicado o modelo de cálculo teórico que mais adiante servirá para comparar com os valores obtidos experimentalmente.

### 4.2. MÉTODO DE CÁLCULO TEÓRICO

O índice de redução de transmissão de vibrações entre dois elementos ( $K_{ij}$ ), a aplicar nas equações (3.3, 3.4, 3.5), segundo a norma EN 12354-1, corresponde a um valor que resulta de uma relação logarítmica das massas superficiais (massa por unidade de área) dos elementos em questão, para tipos de junções comuns. Dado que na grande maioria os edifícios correntes possuem uma malha estrutural regular [14], apenas são consideradas junções tipo X e T conforme ilustra a figura 4.1 .

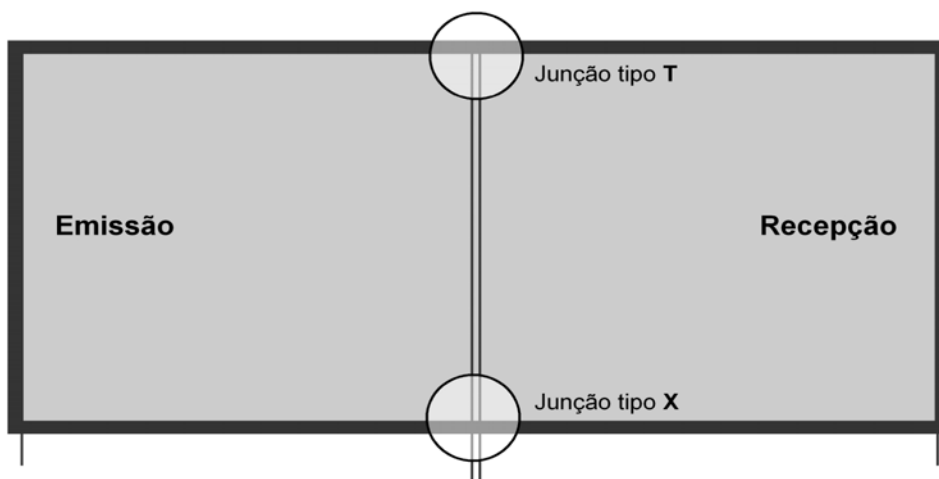


Fig. 4.1 – Tipo de Junção X e T

A supracitada norma fornece, no anexo E da mesma, gráficos e fórmulas de cálculo para quantificar o valor do  $K_{ij}$  para os tipos de junções mais comuns. Estes valores só são válidos, quando o elemento nos dois lados da junção e no mesmo plano possuem a mesma massa superficial.

A relação das massas para o cálculo do  $K_{ij}$  é dada pela seguinte equação:

$$M = \log\left(\frac{m_2}{m_1}\right) \quad (4.1)$$

Em que,

$m_1$  massa do elemento marginal ;

$m_2$  massa do elemento de separação principal.

Tendo calculado este valor, mediante a junção em questão, é só consultar os gráficos e as equações fornecidas pela norma, e obtém-se o valor do  $K_{ij}$  dessa junção.

Em termos teóricos, este índice é definido pela equação (4.2),

$$K_{ij} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} + 10 \log\left(\frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i a_j}}\right) \quad (\text{dB}) \quad (4.2)$$

Em que,

$D_{v,ij}$  diferença de nível de velocidade entre o elemento i e j, quando o elemento i é excitado (dB);

$D_{v,ji}$  diferença de nível de velocidade entre o elemento j e i, quando o elemento j é excitado (dB);

$l_{ij}$  comprimento comum da junção entre os elementos i e j (m);

$a_i$  comprimento de absorção equivalente do elemento i (m);

$a_j$  comprimento de absorção equivalente do elemento j (m).

O comprimento de absorção equivalente pode ser calculado através da equação (4.3),

$$a = \frac{2,2\pi^2 S}{c_0 T_s} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}} \quad (\text{m}) \quad (4.3)$$

Em que,

$T_s$  tempo de reverberação estrutural do elemento i ou j, (s);

- $S$  área do elemento  $i$  ou  $j$ , ( $m^2$ );  
 $f$  banda de frequência, (Hz);  
 $f_{ref}$  frequência de referência,  $f_{ref} = 1000$  Hz;  
 $c_0$  velocidade do som no ar, (m/s).

Analisando as duas equações anteriores rapidamente concluímos que o  $K_{ij}$  depende da diferença do nível de velocidade da junção nos dois sentidos,  $D_{v,ij}$  e  $D_{v,ji}$ , e do tempo de reverberação estrutural dos dois elementos envolvidos.

A norma ISO 10848-1 "Laboratory measurement of flanking transmission of airborne and impact sound between adjoining rooms" explicita o método standartizado de medição do valor de  $K_{ij}$  de uma junção. Vem explícito na norma EN 12354-1 que o método especificado na norma ISO 10848-1 apesar de ser para aplicar em laboratório, será provavelmente viável de se aplicar a medições in situ para calcular o  $K_{ij}$  para caracterizar junções.



# 5

## ENSAIO EXPERIMENTAL

### 5.1. INTRODUÇÃO

Como foi referido anteriormente existem ensaios normalizados para a determinação experimental do  $K_{ij}$  de uma junção.

Ao longo deste capítulo numa primeira instância será abordada a metodologia do ensaio, assim como o processo de cálculo para a determinação do  $K_{ij}$ , utilizando os valores obtidos do ensaio experimental.

Seguidamente será explicado todo o procedimento de ensaio utilizado, desde a escolha do caso de estudo, equipamento utilizado, e tratamento dos dados recolhidos.

Ao longo do cálculo dos parâmetros necessários, foram tomadas algumas considerações, que serão devidamente explicadas ao longo deste capítulo.

Para uma melhor explicação dos processos de cálculo utilizados, e tratamento dos dados, serão apresentados ao longo do capítulo gráficos, que foram escolhidos de modo aleatório. Todo o espólio das medições efectuadas pode ser consultado nos anexos A.2, A.3 e A.4.

### 5.2. MÉTODO DE ENSAIO

A norma ISO 10848 é composta por 4 partes sendo:

- Parte 1: documento enquadrador;
- Parte 2: aplicação em elementos leves quando a junção tem pouca influência;
- Parte 3: aplicação em elementos leves quando a junção tem uma influência substancial;
- Parte 4: Aplicação para todas as outras situações.

Está expresso na norma que, para junções entre elementos pesados, deve ser utilizada a parte 4 da supracitada norma.

Segundo informações fornecidas pelo secretariado do ISO/TC 43/SC2 esta parte da norma encontra-se numa fase muito embrionária não sendo possível fornecer quaisquer informações a respeito do desenvolvimento de estudo da parte 4. Está também de momento, a ser objecto de estudo por parte do ISO/TC 43/SC 2/ WG 2 “ Medição de transmissões marginais em laboratório e in situ”.

Não sendo possível consultar a parte 4 da ISO 10848, o ensaio experimental que se irá realizar, será efectuado com base nos fundamentos da parte 1 da referida norma.

Como já foi dito anteriormente o  $K_{ij}$  depende dos valores da diferença dos níveis de velocidade que ocorrem na junção, nos dois sentidos, e dos tempos de reverberação estrutural dos dois elementos. De acordo com a norma que descreve o método experimental, seguidamente serão explicados os métodos de medição dos parâmetros necessários para o cálculo do  $K_{ij}$ .

Vem explícito na norma ISO 10848-1, que pode ser utilizado como suplemento às especificações da mesma, a norma NT ACOU 090.

#### 5.2.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO ESTRUTURAL

O tempo de reverberação estrutural,  $T_s$ , corresponde ao tempo necessário para que o nível de velocidade de uma estrutura diminua 60 dB após a excitação estrutural ser interrompida. Esta definição é também aplicável ao nível de aceleração, isto é, o  $T_s$  também pode ser o tempo que o nível de aceleração demora a diminuir 60 dB.

No caso de não se conseguir obter o referido decaimento de 60 dB, pode ser aplicada uma extrapolação linear ao decaimento obtido.

##### 5.2.1.1. Critérios de Medição

Como vem especificado em [10848-1] o  $T_s$  é determinado através de excitações e medições de velocidade ou aceleração, em diferentes posições dos transdutores.

Para aplicação deste método existem dois tipos de excitação, a excitação através de um vibrador, ou excitação através de um martelo de impacto.

Serão necessários pelo menos três pontos de excitação, e para cada um destes deverá ser efectuada a leitura em três posições diferentes. A escolha dos pontos de excitação assim como os pontos de medição devem ser escolhidos de uma forma aleatória, devendo estar de acordo com as seguintes condições:

- 0,5m entre a posição dos transdutores e os limites do elemento testado;
- 1m entre o ponto de excitação e o transdutor associado;
- 0,5m entre os transdutores.

Pretende-se obter das medições um gráfico que represente a evolução do nível de velocidade ou aceleração em ordem ao tempo.

O gráfico gerado terá de ser contínuo, e o nível de velocidade ou de aceleração equivalente obtido com a excitação tem de ser superior 10 dB em relação ao nível de velocidade ou aceleração equivalente do ruído de fundo.

O tempo de reverberação estrutural de cada elemento será igual à média aritmética dos valores obtidos em todas as medições.

#### 5.2.2. DIFERENÇA DO NÍVEL DE VELOCIDADE $D_{v,ij}$

A diferença do nível de velocidade é, tal como o próprio nome indica, a diferença de níveis de velocidade dos dois elementos construtivos quando um deles é excitado.

### 5.2.2.1. Critérios de Medição

A excitação dos elementos construtivos pode ser efectuada de duas formas, excitação estacionária ou excitação transiente. No caso de optar por uma excitação estacionária, esta pode ser obtida utilizando uma máquina de percussão, para superfícies horizontais, e uma máquina de percussão modificada para elementos verticais. Em vez da máquina de percussão pode ser utilizado um excitador electrodinâmico (vibrador) para se obter uma excitação estacionária.

Se se optar por excitação transiente, esta é conseguida com um martelo de impacto, ou através da queda de uma massa.

A diferença do nível de velocidade obtém-se medindo o nível de velocidade dos dois elementos para cada ponto de excitação. Isto é pretende-se obter os gráficos do nível de velocidade dos elementos i e j para a mesma excitação. Com estes gráficos consegue-se calcular o nível de velocidade equivalente para um dado tempo de medição.

Para efectuar as medições devem ser utilizados no mínimo três pontos de excitação em cada elemento construtivo e no mínimo nove posições de transdutores. Para cada ponto de excitação devem ser utilizados três diferentes pares de posições dos transdutores. Os transdutores devem ser distribuídos aleatoriamente sobre a superfície do elemento construtivo.

As posições dos transdutores assim como os pontos de excitação devem respeitar as seguintes condições:

- 0,5m entre os pontos de excitação e os limites do elemento em teste;
- 1,0m entre os pontos de excitação e a junção que estamos a testar;
- 1,0 m entre os pontos de excitação e os transdutores associados;
- 0,25m entre os transdutores e os limites do elemento testado;
- 0,5 Entre os transdutores;
- A distância máxima entre transdutores e a junta deve ser 3,5m.

Para cada banda de frequência o nível de velocidade medido deve ser superior 10 dB ao do ruído de fundo. Se não for possível, podemos aplicar uma correcção ate 1,3 dB segundo a norma ISO 140-3.

Para cada par de transdutores a medição do  $D_{v,ij}$  calcula-se com base na seguinte equação:

$$(D_{v,ij})_{mn} = 10 \log \frac{\int_0^{T_m} v_i^2(t) dt}{\int_0^{T_m} v_j^2(t) dt} \quad (\text{dB}) \quad (5.1)$$

Em que,

$(D_{v,ij})_{mn}$  diferença de nível de velocidade para um ponto de excitação e para um par de transdutores;

$v_i$  velocidade normal no elemento i, em que i é o elemento excitado (m/s);

$v_j$  velocidade normal no elemento j (m/s);

$T_m$  tempo de integração (s).

Após a obtenção de todos os valores dos  $(D_{v,ij})_{mn}$  o valor final do  $D_{v,ij}$  a utilizar na equação ( 4.2) resulta da média aritmética dos valores obtidos experimentalmente aplicando a seguinte equação:

$$D_{v,ij} = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (D_{v,ij})_{mn} \quad (\text{dB}) \quad (5.2)$$

Em que,

$M$  número de pontos de excitação do elemento  $i$ ;

$N$  número de posições de transdutores em cada elemento para cada ponto de excitação.

O tempo de integração  $T_m$  a utilizar na equação (5.1) não deverá ser inferior ao maior tempo de reverberação estrutural  $T_s$  dos dois elementos. Outra condição para o  $T_m$ , é que não deverá ser inferior ao tempo que o sinal da excitação demore a decair 10 dB.

### 5.2.3. NORMA NT ACOU 090

Com o equipamento que se irá executar o ensaio experimental, serão obtidas acelerações e não velocidades, o que impossibilitaria o cálculo do  $K_{ij}$ , segundo a norma ISO 10848-1. Recorreu-se então à norma NT ACOU 090 segundo a qual o parâmetro  $K_{ij}$  é calculado com base na seguinte equação:

$$K_{ij} = \bar{D}_{ij} + 10 \log \left( \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i a_j}} \right) \quad (\text{dB}) \quad (5.3)$$

Em que,

$\bar{D}_{ij}$  é a diferença de nível de vibração média (dB);

$l_{ij}$  comprimento comum da junção entre os elementos  $i$  e  $j$  (m);

$a_i$  comprimento de absorção equivalente do elemento  $i$  (m);

$a_j$  comprimento de absorção equivalente do elemento  $j$  (m).

O parâmetro  $\bar{D}_{ij}$ , que corresponde à média das diferenças dos níveis de vibração nos dois sentidos obtém-se a partir da seguinte equação:

$$\bar{D}_{ij} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} \quad (5.4)$$

Em que,

$D_{v,ij}$  e  $D_{v,ji}$  são as diferenças de nível de vibração para cada um dos sentidos.

Os parâmetros  $D_{v,ij}$  e  $D_{v,ji}$  podem ser calculados de duas formas diferentes, isto é, tanto pode ser calculado pela velocidade, como pela aceleração. Esta é a maior diferença entre a norma NT ACOU 090 e as normas EN 12354-1 e ISO 10848-1, em que o valor de  $D_{v,ij}$  só pode ser obtido através das velocidades medidas. Sendo assim, o  $D_{v,ji}$  pode ser calculado através das seguintes equações:

$$D_{v,ij} = L_{v,av,i} - L_{v,av,j} \quad (\text{dB}) \quad (5.5)$$

ou

$$D_{v,ij} = L_{a,av,i} - L_{a,av,j} \quad (\text{dB}) \quad (5.6)$$

Em que,

$L_{v,av,i}$  nível médio de velocidade do elemento i (dB);

$L_{v,av,j}$  nível médio de velocidade do elemento j (dB);

$L_{a,av,i}$  nível médio de aceleração do elemento i (dB);

$L_{a,av,j}$  nível médio de aceleração do elemento j (dB).

O nível médio de aceleração  $L_{a,av,i}$  do elemento i pode ser calculado através da seguinte equação:

$$L_{a,av} = 10 \log \left[ \frac{10^{0.1L_{a,eq,1}} + 10^{0.1L_{a,eq,2}} + \dots + 10^{0.1L_{a,eq,n}}}{n} \right] \quad (\text{dB}) \quad (5.7)$$

Em que,

$L_{a,eq,n}$  nível de aceleração equivalente na posição n;

$n$  numero de medições efectuadas.

O nível de aceleração equivalente  $L_{a,eq}$ , obtém-se utilizando a seguinte equação:

$$L_{a,eq} = 10 \log \left[ \frac{1}{T_m} \int_0^{T_m} \frac{a^2(t)}{a_0^2} dt \right] \quad (\text{dB}) \quad (5.8)$$

Em que,

$a$  aceleração ( $\text{m/s}^2$ );

$a_0$  aceleração de referência,  $a_0=10^{-6}$  (m/s<sup>2</sup>);

$T_m$  tempo de integração, (s).

### 5.3. CASO DE ESTUDO

Das duas situações mais correntes na construção portuguesa, que são as junções tipo X e tipo T, optou-se por ensaiar uma junção do tipo X.

A junção que se irá ensaiar, situa-se na sala 336 do edifício B da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto Fig 5.1.



Fig. 5.1 – Sala onde se realizou o ensaio.

A referida sala possui as dimensões de 7m por 7m (49 m<sup>2</sup>) com uma altura útil de 2,75m. A junção que se pretende ensaiar resulta da intersecção entre o pavimento e a parede do fundo da sala cujo corte esquemático está representado na Fig. 5.2. De acordo com uma sobreposição da planta estrutural à planta de arquitectura, à partida a parede divisória encontra-se numa zona maciça da laje. Como se vê na mesma figura, trata-se de uma junção tipo X cujo desenvolvimento da parede divisória é interrompido pela laje de pavimento.

A parede divisória é uma parede constituída por blocos de cimento de 15cm de largura e 1,5 cm de reboco de ambos os lados. A laje é uma laje fungiforme aligeirada com moldes recuperáveis com 37cm de espessura.

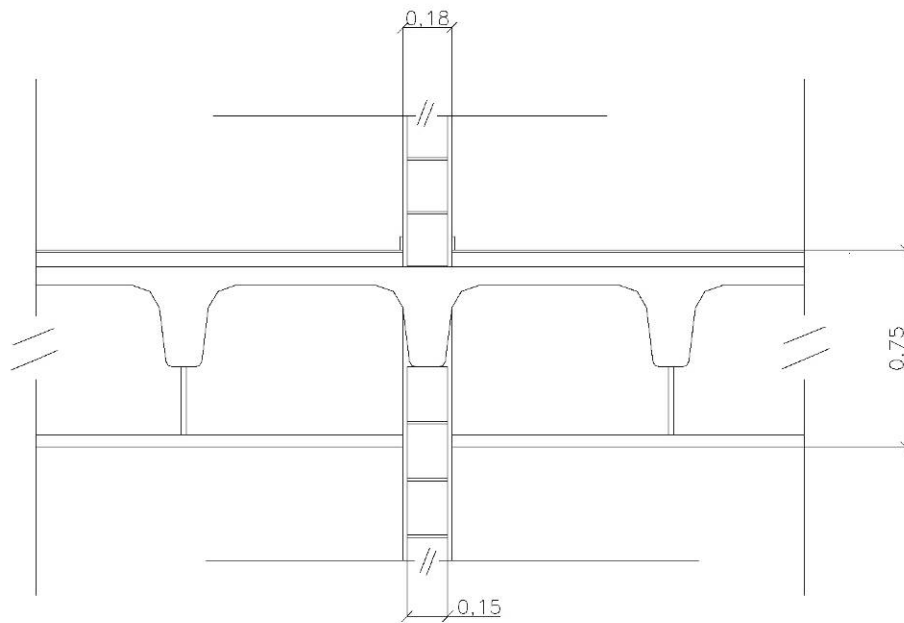


Fig.5.2- Corte esquemático da junção em estudo

Depois de seleccionado o local para realizar o ensaio, foi necessário escolher as posições para os pontos de excitação assim como os locais para colocar os transdutores.

Assim como vem especificado na norma ISO 10848-1, pretendia-se utilizar três pontos de excitação em cada um dos elementos construtivos, e efectuar a medição em nove pares de transdutores para cada ponto de excitação.

De acordo com as condições discriminadas no 5.2.1.1 e 5.2.2.1 definiu-se o mapa de pontos que está representado na Fig. 5.3

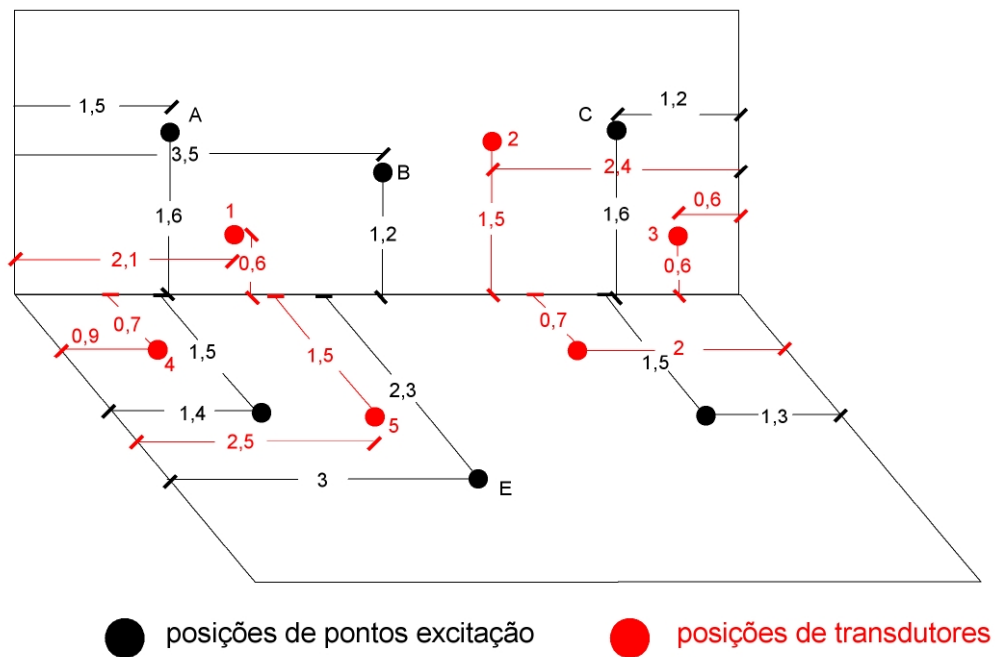


Fig. 5.3 - Mapa de Pontos.

Para melhor organização do ensaio optou-se por atribuir números às posições dos transdutores, e letras às posições dos pontos de excitação.

Os pontos de excitação considerados correspondem às letras ( A, B, C, D, E, F), e os pares de transdutores (14, 15, 16, 24, 25, 26, 34, 35, 36).

## 5.4. PROCEDIMENTO UTILIZADO

O principal objectivo deste ensaio experimental, é comprovar os valores teóricos do  $K_{ij}$  calculados de acordo com a norma EN 12354-1 para um tipo de junção corrente na construção portuguesa através de um ensaio experimental normalizado pela ISO 10848-1.

### 5.4.1. EQUIPAMENTO

#### 5.4.1.1. Equipamento de Excitação

Para excitar os elementos construtivos, utilizou-se uma marreta de massa igual a 3,7 Kg. (Fig.5.4)



Fig.5.4 – Marreta utilizada.

#### 5.4.1.2. Transdutores

Para a realização deste ensaio experimental foi necessário obter leituras nos dois elementos construtivos, logo, utilizaram-se dois acelerómetros, um para cada elemento construtivo, cujas características se encontram no quadro 5.1.

Para a fixação dos acelerómetros aos elementos construtivos utilizou-se cera de abelha, o que permitiu uma fácil fixação e remoção dos acelerómetros sempre que era necessário alterar a posição dos mesmos

Quadro 5.1 - Características dos acelerómetros.

	<b>Acelerómetros piezoelétricos ICP</b>	
<b>Marca</b>	Bruel & Kjaer	Bruel & Kjaer
<b>Referência</b>	4507	4508
<b>Sensibilidade</b>	9,76 mV/ms <sup>-2</sup>	10,0 mV/ms <sup>-2</sup>
<b>Gama de frequência</b>	1 Hz – 6 kHz	1 Hz – 8 kHz
<b>Frequência de ressonância</b>	18 kHz	25 kHz
<b>Massa</b>	4,8 g	4,8g



Fig.5.5 – Acelerómetro Bruel & Kjaer 4507 e 4508

#### 5.4.1.3. Analisador

O registo da informação adquirida pelos acelerómetros efectuou-se através de um analisador dinâmico de sinal. Este equipamento serviu para efectuar o registo das acelerações em função do tempo.

No quadro 5.2 apresentam-se as características do equipamento que se utilizou.

Quadro 5.2 - Características do analisador dinâmico de sinal.

	<b>Analisador dinâmico de sinal</b>
<b>Marca</b>	HP
<b>Referência</b>	35665A
<b>N.º de canais</b>	2
<b>Gama de frequência</b>	0 kHz – 25 kHz

Para a utilização deste equipamento foi necessário definir uma série de parâmetros de aquisição e tratamento de sinal.

Numa primeira abordagem configurou-se o aparelho para uma gama de frequência de aquisição de 0-200 Hz e um tempo de aquisição de 4 s. Após observação dos resultados obtidos num primeiro teste ao equipamento optou-se por alargar a gama de frequência para 0 – 400Hz diminuindo assim o tempo de aquisição que passou agora a ser de 2 s. Como o n.º de pontos foi o mesmo nas duas situações, obtiveram-se pontos com intervalos de tempo menores, o que resultou num espectro em que a excitação dos elementos construtivos era mais perceptível.

No quadro 5.3 especificam-se os parâmetros de aquisição e tratamento de sinal das duas configurações utilizadas.

Quadro 5.3 - Configurações do analisador

Parâmetro	Configuração 1	Configuração 2
N.º de pontos	2048	2048
Tempo de aquisição	4 s	2 s
$\Delta t$	1,95 ms	977 $\mu$ s
Gama de frequência	0 – 200 Hz	0 – 400 Hz
Tipo de janela	Exponencial	Exponencial
N.º de médias	3	3



Fig. 5.6 - Analisador dinâmico de sinal utilizado.

#### 5.4.1.4. Instalação

Os equipamentos referidos anteriormente, foram utilizados de acordo com a representação esquemática da Fig.5.7 como demonstra a fotografia Fig.5.8.

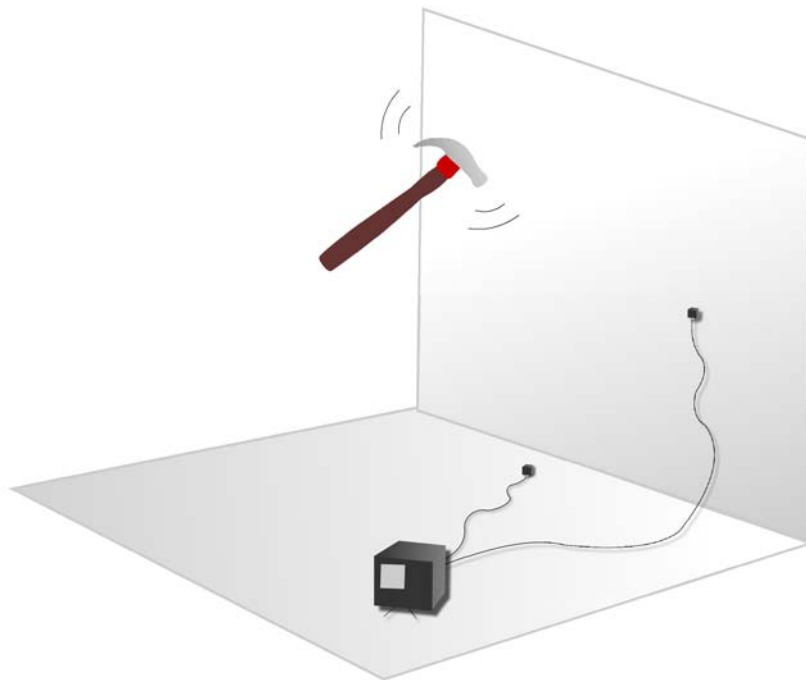


Fig. 5.7 - Esquema de montagem



Fig.5.8 - Colocação dos acelerómetros

#### 5.4.3. AQUISIÇÃO DE DADOS

De acordo com a norma ISO 10848-1, para o cálculo experimental do  $D_{v,ij}$  deviam-se efectuar medições em nove pares de transdutores para cada um dos três pontos de excitação, em cada um dos elementos construtivos. Como o analisador dinâmico de sinal apenas possui 2 canais de aquisição, foi

necessário excitar cada par de acelerómetros em que se estavam a efectuar as medições. Na realização do ensaio seriam então necessárias 27 excitações (3 pontos de excitação X 9 pares de transdutores) para cada elemento construtivo, o que resultou num total de 54 excitações, 27 no pavimento e 27 na parede.

Tendo em conta que o analisador dinâmico de sinal que se utilizou, registava a leitura de cada acelerómetro num ficheiro, foi necessário encontrar uma forma de identificar os ficheiros de modo a que se soubesse a que ponto de excitação correspondia, em que posições se encontravam os acelerómetros, e a qual dos acelerómetros correspondia a leitura. Ou seja para cada excitação teria-se 2 ficheiros, o que resultou num total de 108 ficheiros na realização de todo o ensaio.

Decidiu-se então utilizar a seguinte nomenclatura para os ficheiros: os dois primeiros algarismos seriam a posição dos acelerómetros, seguidos da letra a que correspondia o ponto de excitação (local da “pancada”), seguido do número do acelerómetro a que correspondia a leitura.

Por exemplo as leituras da “pancada” na posição A, com os acelerómetros colocados nas posições 1 e 4, ficaram registadas nos ficheiros (14A1 e 14A4).

Devido a todas estas condicionantes o melhor procedimento de ensaio que se encontrou foi, colocar os acelerómetros nas suas posições, por exemplo, na posição 1 e 4 e excitar nos 6 pontos de excitação. De seguida alterou-se a posição de um dos acelerómetros (o que estava na posição 4 passou para a posição 5) e efectuaram-se novamente as 6 excitações para o novo par de acelerómetros. Este procedimento repetiu-se, percorrendo os nove pares de acelerómetros.

Tanto para o cálculo do  $D_{v,ij}$  como para o cálculo do  $T_s$  o procedimento de ensaio é o mesmo, com a diferença de que para o cálculo do tempo de reverberação estrutural apenas eram necessários 3 pontos de excitação medindo a aceleração em três posições diferentes, para cada elemento construtivo. Ou seja, para o cálculo do  $T_s$  apenas interessa a leitura do acelerómetro que estava fixado no elemento onde se dava a pancada, sendo então possível aproveitar as mesmas medições para o cálculo dos dois parâmetros,  $D_{v,ij}$  e  $T_s$ .

#### 5.4.4. TRATAMENTO DE DADOS

Para cada uma das leituras efectuadas em cada acelerómetro, registou-se a evolução da aceleração resultante da excitação do elemento construtivo em função do tempo. Obtiveram-se então gráficos do género da Fig.5.9

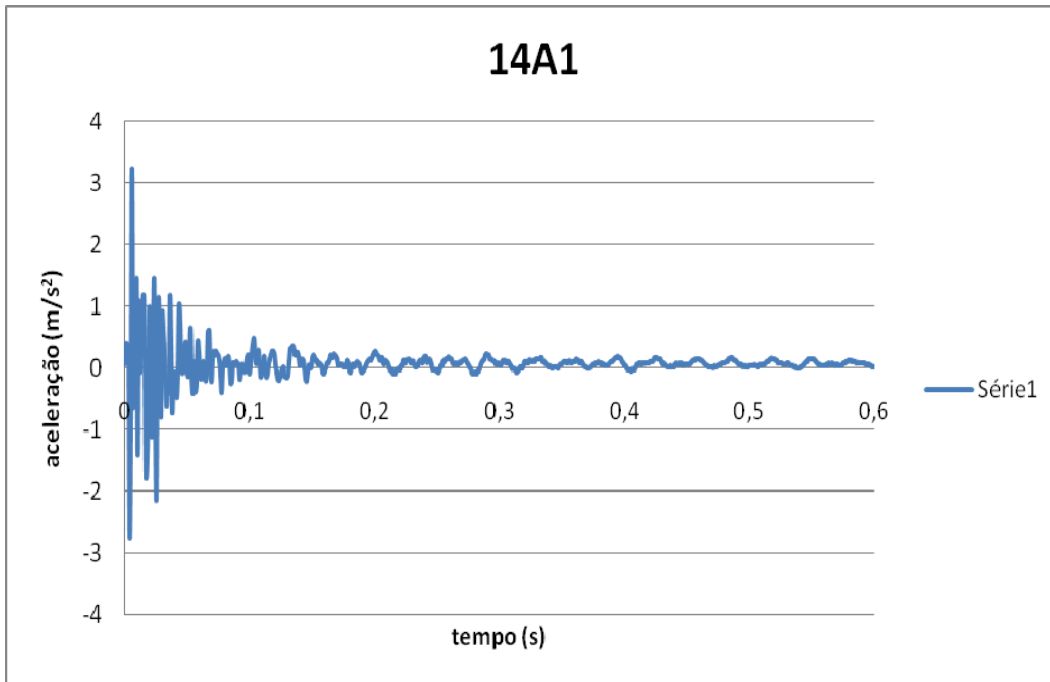


Fig.5.9 - Representação gráfica da aceleração da parede.

Para o cálculo do  $D_{v,ij}$  e  $T_s$  pretendia-se passar os valores obtidos da aceleração ( $m/s^2$ ) para valores de nível de aceleração (dB).

Essa transformação dos valores obtidos realizou-se aplicando a seguinte equação (5.9):

$$L_a = 10 \log \left( \frac{a^2}{a_0^2} \right) \quad (\text{dB}) \quad (5.9)$$

Em que,

$L_a$  Nível de aceleração (dB);

$a$  Aceleração ( $m^2/s$ );

$a_0$  Aceleração de referência, ( $a_0=1 \times 10^{-6} m^2/s$ ).

Após a aplicação da equação anterior aos valores obtidos os gráficos obtidos passaram a retratar a evolução do nível de aceleração em relação ao tempo, como exemplifica o gráfico da fig. 5.10

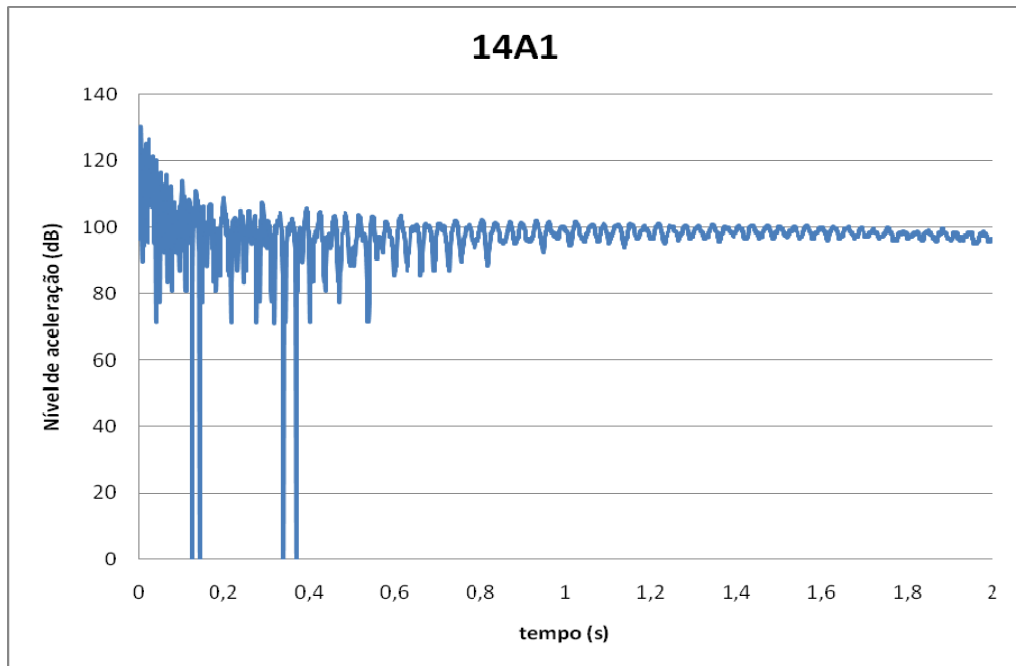


Fig.5.10 – Exemplo de representação gráfica do  $L_a$  da parede.

Se se analisar a Fig.5.10 facilmente se percebe que em quatro pontos o valor do  $L_a$  é zero, e esta situação deve-se ao facto de que quando a aceleração é zero, o nível de aceleração nesse ponto não existe, isto porque o logaritmo de zero não existe.

Foi então necessário solucionar este problema, para tentar minimizar influência que esta situação pudesse vir a ter nos cálculos finais, pois houve situações em que esta situação ocorria em abundância como por exemplo na Fig.5.11.

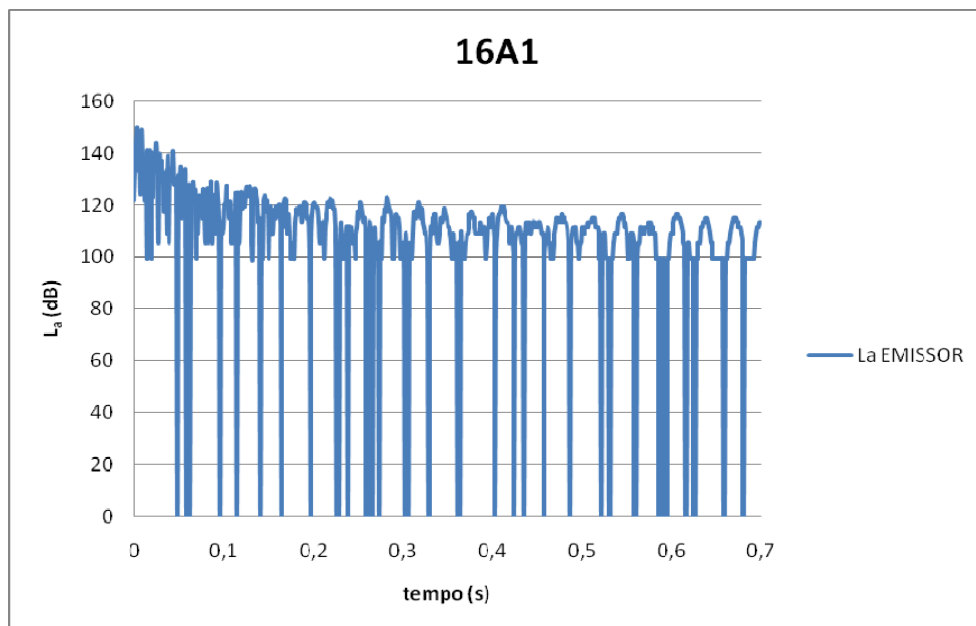


Fig.5.11- Exemplo de representação de  $L_a$  da parede.

A solução encontrada passou então por substituir os valores de  $L_a$  que não existiam, pelo valor intermédio entre o ponto imediatamente anterior e o seguinte. Para se ter uma noção do resultado da alteração apresenta-se na Fig.5.12 exactamente a mesma leitura com a correcção aplicada.

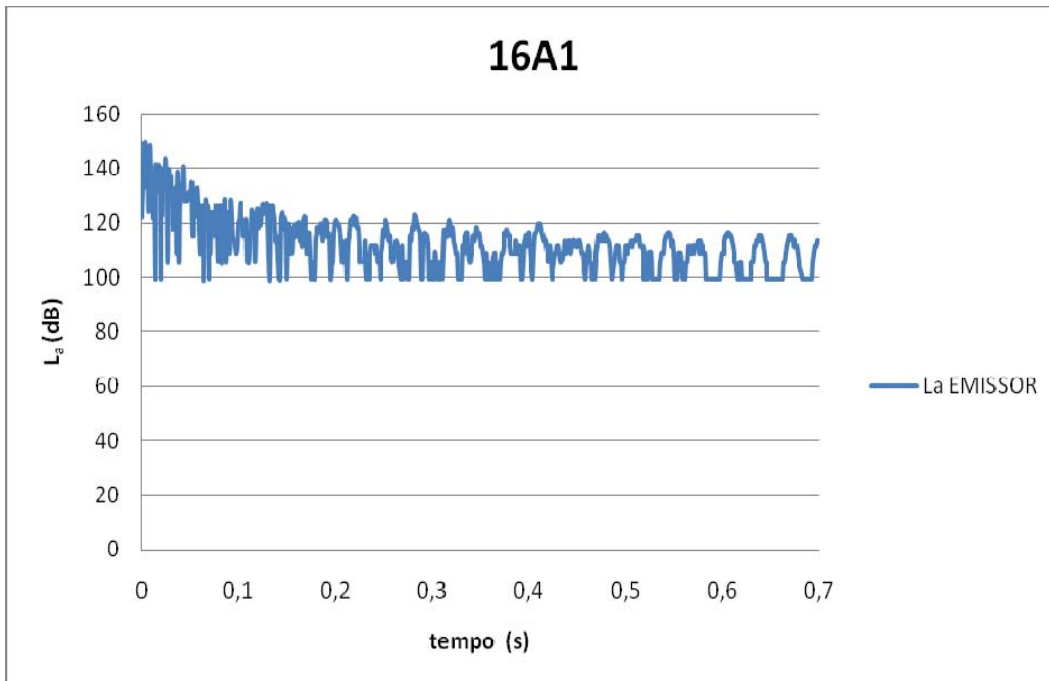


Fig.5.12 - Exemplo de Representação gráfica de  $L_a$  corrigidos da parede.

Todas as medições efectuadas durante o ensaio experimental encontram-se representadas graficamente no anexo A.2.

## 5.5. CALCULO MODELO EXPERIMENTAL

### 5.5.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO ESTRUTURAL

O primeiro parâmetro a ser calculado tem de ser o tempo de reverberação estrutural dos elementos construtivos, pois como foi referido anteriormente o tempo de integração a considerar para a equação (5.8) nunca poderá ser inferior ao maior dos  $T_s$  dos elementos construtivos em análise.

Para se atingir o decaimento dos 60 dB, foi sempre necessário recorrer a uma extrapolação linear, pois o decaimento conseguido no ensaio experimental rondou os 20 dB praticamente em todas as leituras, quer para a laje como para a parede. O facto de se ter conseguido o decaimento a rondar os 20 dB validou o nosso ensaio experimental, pois segundo a norma era apenas necessário ter um decaimento de 10 dB.

Para determinar como seria avaliado o decaimento para extrapolar para os 60 dB consideraram-se três métodos. O primeiro método que se testou consistiu em ajustar uma recta aos máximos sucessivos. Neste primeiro método considerou-se o ponto com o nível de aceleração máximo, como sendo o primeiro ponto da recta de decaimento. De seguida apresenta-se duas leituras diferentes, figuras (5.13 e 5.14), com o intuito de demonstrar a aplicação do método desta primeira hipótese, constando na figura a equação da recta para se poder extrapolar para os 60 dB de decaimento, assim como o

coeficiente de regressão linear da mesma. A aplicação da linha de tendência linear aos pontos seleccionados, foi executada com auxílio do programa informático Microsoft EXCEL 2007.

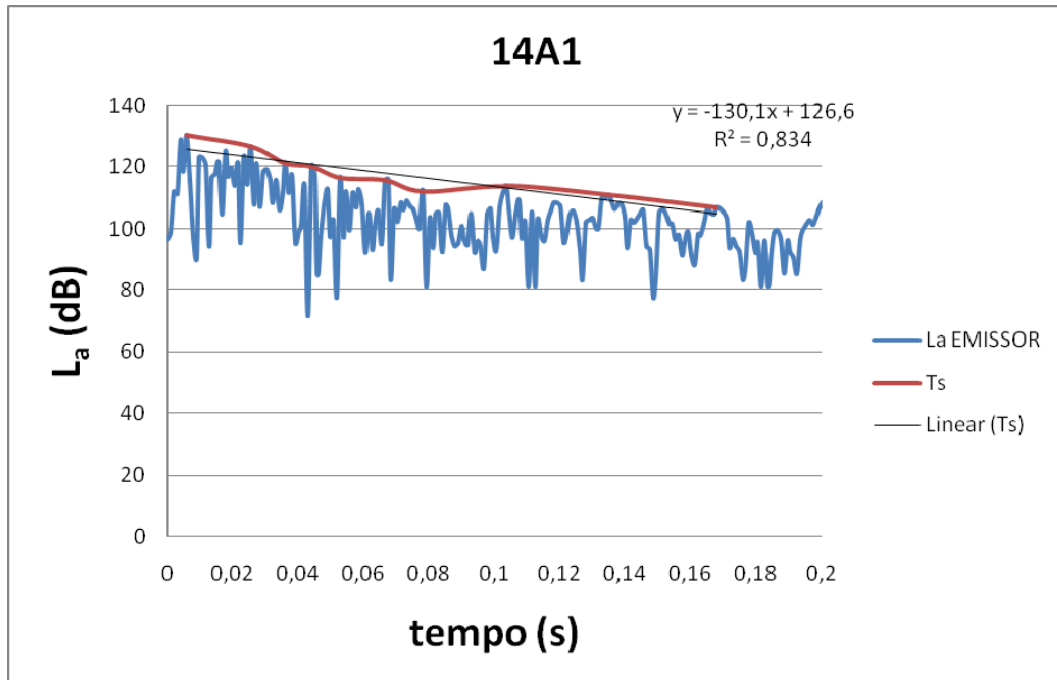


Fig. 5.13 – Método de extrapolação pelos máximos.

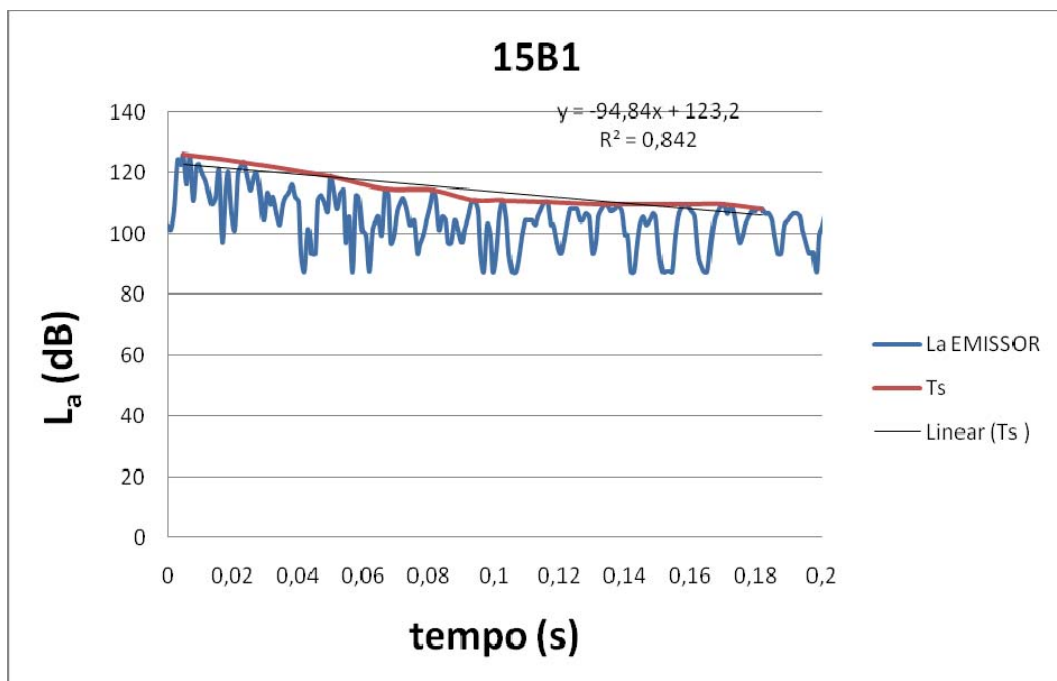


Fig. 5.14 - Método de extrapolação pelos máximos.

O segundo método que se considerou, passou por ajustar uma recta, desta vez, aos mínimos sucessivos, sendo o primeiro ponto, o mínimo imediatamente a seguir ao ponto com  $L_a$  máximo. Seguidamente apresenta-se os gráficos com a aplicação deste segundo método (Fig.5.15 e 5.16). Para que se perceba a diferença entre os dois métodos aplicou-se este método nas mesmas leituras que o método anterior. Nas referidas figuras constam também as equações da aproximação linear aos pontos seleccionados, assim como o coeficiente de regressão linear da recta.

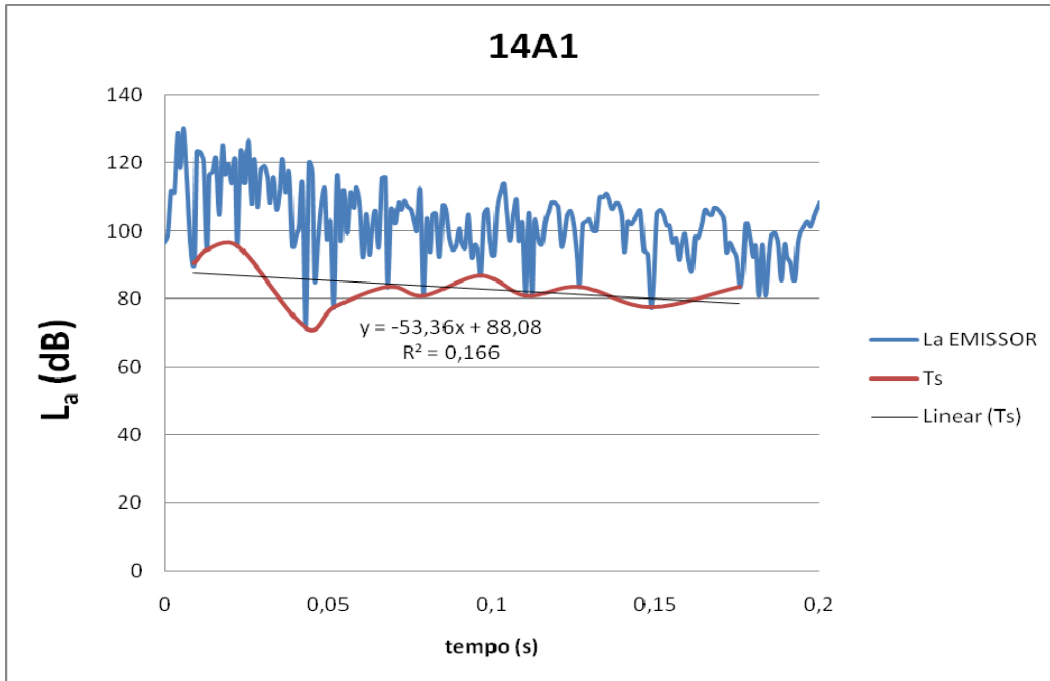


Fig. 5.15- Método de extrapolação pelos mínimos.

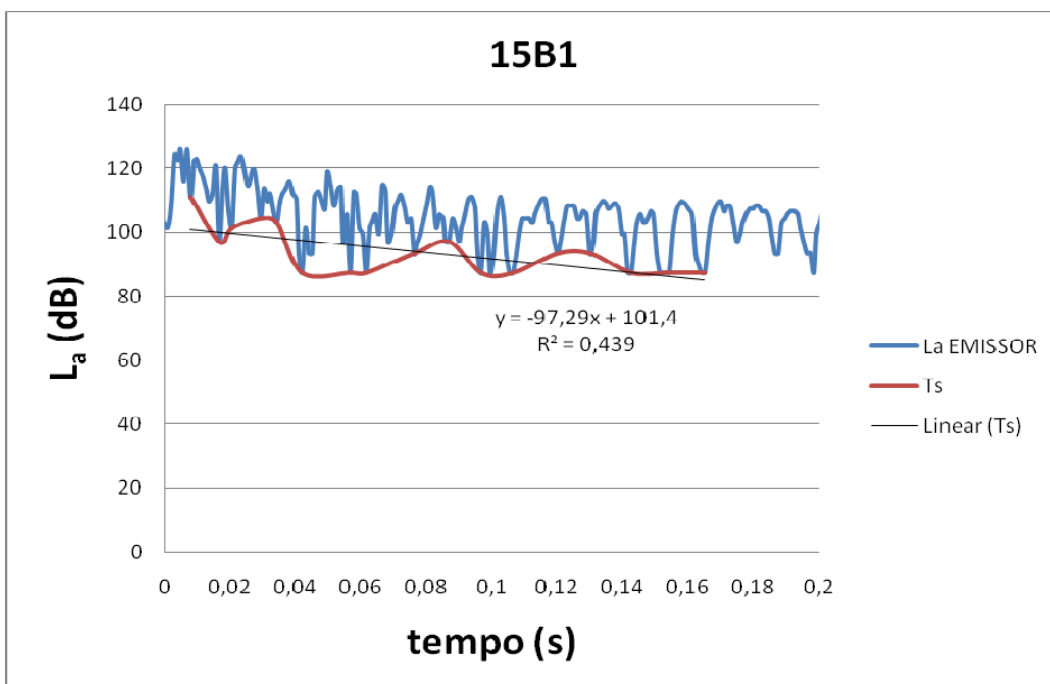


Fig. 5.16 - Método de extrapolação pelos mínimos.

Finalmente o terceiro método, consistiu em seleccionar os pontos médios, dos valores máximos e mínimos de  $L_a$ . As figuras que se seguem (fig. 5.17 e 5.18) demonstram a aplicação deste terceiro método, utilizando as mesmas leituras. Nas mesmas figuras, surgem as equações das rectas da aproximação linear aos pontos seleccionados, assim como os respectivos coeficientes de regressão linear.

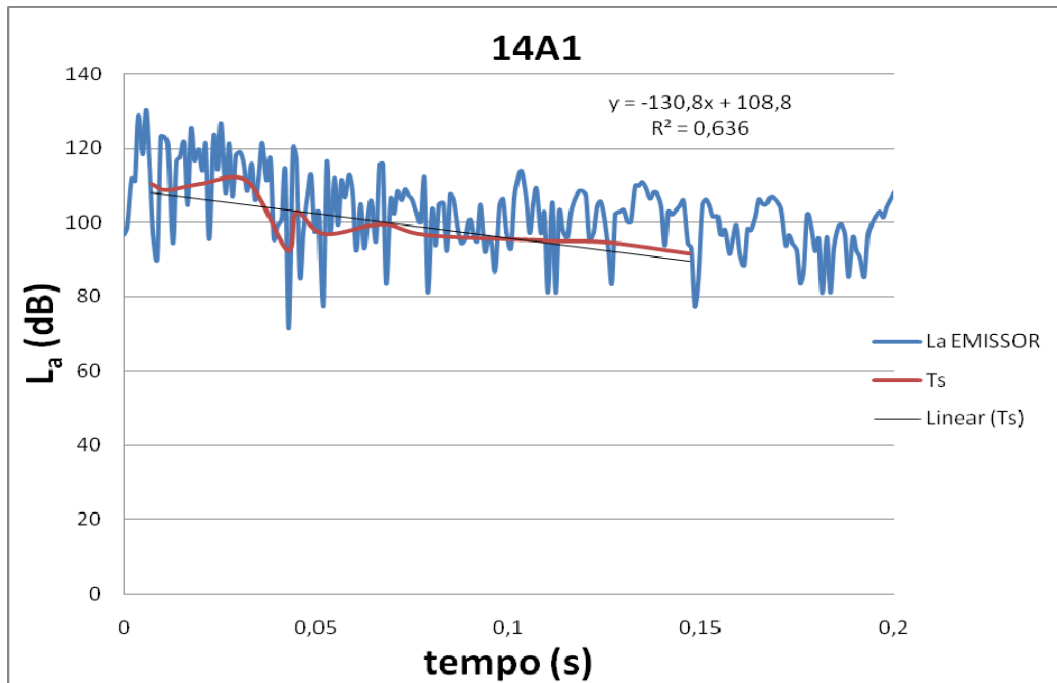


Fig. 5.17 - Método de extrapolação pelos pontos médios.

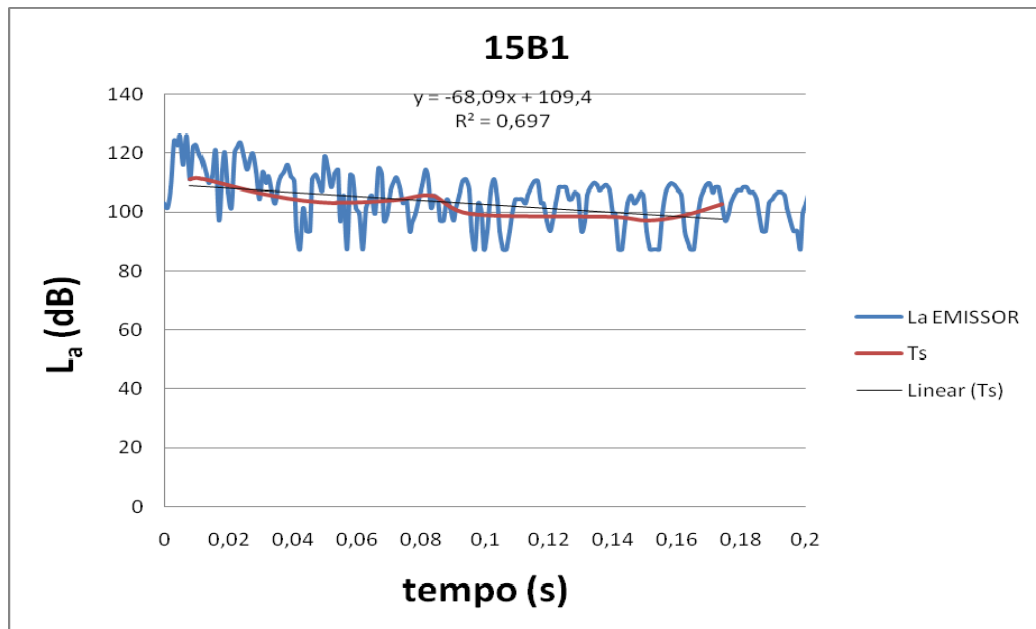


Fig. 5.18 - Método de extrapolação pelos pontos médios.

Após uma análise aos resultados obtidos pelos três métodos optou-se por aplicar o primeiro método. A principal razão para se ter aplicado este método deve-se ao facto de se ter conseguido melhores aproximações aos pontos seleccionados como comprovam os coeficientes de regressão linear. Outra razão que condicionou a escolha do método a utilizar foi o tratamento que os dados foram sujeitos, com a substituição dos zeros por valores intermédios, como foi explicado em 5.4.4 Esta alteração dos dados, confere alguma incerteza aos mínimos que resultaram da mesma, o que por inerência vem conferir alguma incerteza aos dois métodos acima propostos para obtenção das rectas de decaimento.

Por estas razões apresentadas, o método escolhido para encontrar as rectas que serviram para extrapolar os decaimentos para os 60 dB, é o primeiro, no qual se utilizam os pontos correspondentes aos picos superiores para encontrar a recta de tendência do decaimento.

Todos os gráficos utilizados para o cálculo dos tempos de reverberação estrutural encontram-se no anexo A.3.

### 5.5.2. DIFERENÇA DE NÍVEL DE VIBRAÇÃO $D_{v,i}$

Devido ao facto de se terem recolhido valores de aceleração no ensaio experimental, e não velocidades, o calculo dos  $D_{v,ji}$  será efectuado de acordo com a norma NT ACOU 090, que permite que o calculo do  $D_{v,ji}$  seja efectuado utilizando  $L_a$ .

Tendo os valores já em níveis de aceleração, recorreu-se à equação (5.8) ( $L_{a,eq}$ ). Para aplicação da mesma foi necessário integrar a área resultante do conjunto de pontos, para um determinado tempo de integração que não deverá ser inferior ao maior  $T_s$  dos dois elementos construtivos. Como não disponhamos da função que caracteriza-se a variação os valores de  $L_a$  em função do tempo, existiam duas hipóteses para integrar o gráfico resultante dos conjuntos de pontos de cada leitura. A primeira hipótese consistia em tentar encontrar uma função que se aproximasse aos resultados obtidos, o que foi impossível dadas as variações do nível de aceleração. A outra hipótese que se colocou, foi recorrer a uma integração numérica, aplicando a regra dos rectângulos. Basicamente este método consiste no somatório de rectângulos, cuja área se obtém, com uma largura do intervalo de tempo entre dois pontos sucessivos, e uma altura de valor igual ao nível de aceleração nesse ponto. Apresenta-se na Fig. 5.19 a interpretação gráfica, da aplicação da integração numérica.

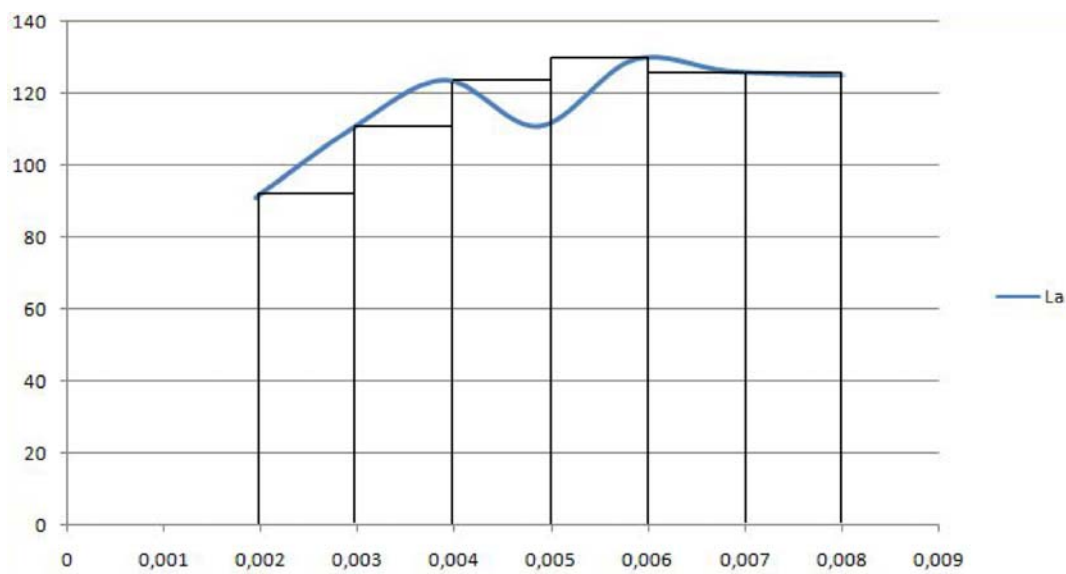


Fig. 5.19 - Representação gráfica da integração numérica.

Após ter sido calculado o  $L_{a,eq}$  de cada medição, calcula-se o  $L_{a,av,i}$  de cada elemento construtivo através da equação, que não é mais que uma média dos resultados obtidos das várias medições.

Tendo calculado estes valores, e considerando que  $i$  representa a parede e  $j$  a laje, calcula-se a (aplicando a equação 5.6) as diferenças de níveis de vibração nos dois sentidos, isto é,  $D_{v,ij}$  quando a parede é o elemento excitado e  $D_{v,ji}$  quando a se excita a laje. Em termos gráficos vai corresponder à diferença das áreas integradas, como se pode verificar na fig 5.20.

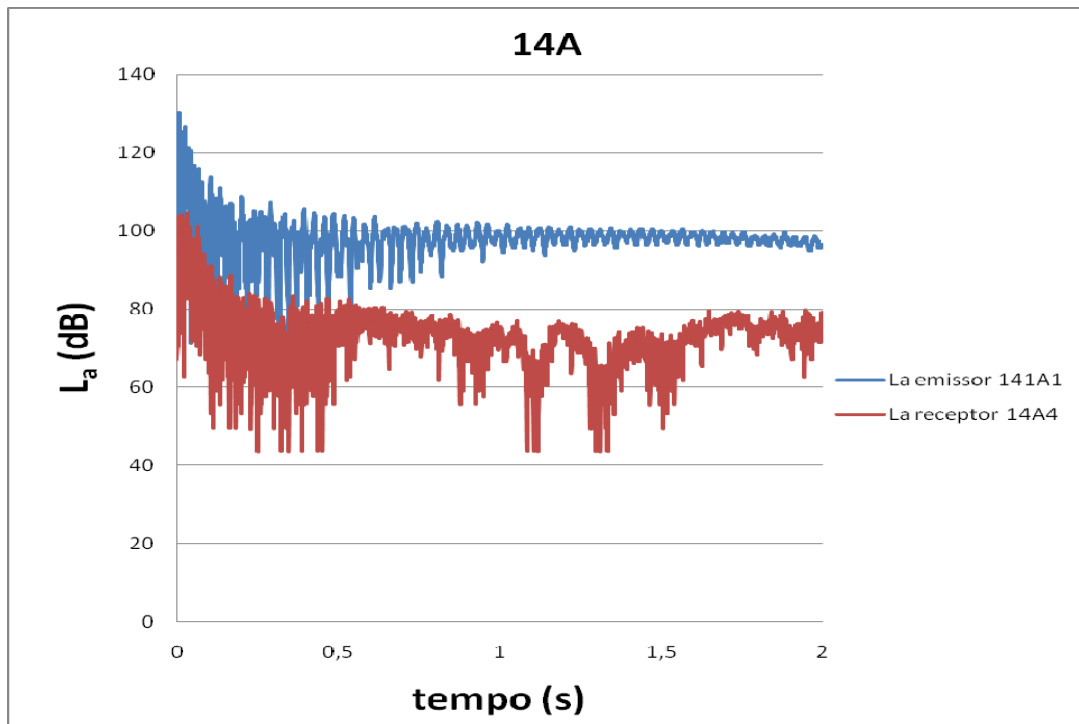


Fig. 5.20 - Diferença de níveis de vibração.

Com estes valores calculados é então possível calcular o  $\overline{D}_{ij}$ , a diferença de nível de vibração média, que representa a média das diferenças nos dois sentidos, e calcula-se pela equação 5.4.

Todos os gráficos das diferenças de nível de vibração encontram-se no anexo A.4.

### 5.5.3. TRANSMISSÃO CARACTERÍSTICA DA JUNÇÃO $K_{ij}$ .

Para se poder calcular o  $K_{ij}$  é ainda necessário calcular os comprimentos de absorção equivalentes de cada elemento construtivo, o  $a_i$  e  $a_j$ . Este parâmetro deveria ser calculado em função da frequência de excitação. Como se utilizou uma marreta e não um martelo instrumentado, considerou-se que se utilizou a frequência de referência, e assim fez-se a seguinte consideração:

$$\sqrt{\frac{f}{f_{ref}}} = 1$$

Substituindo na equação 4.3 o calculo será efectuado utilizando a seguinte equação:

$$a_j = \frac{2,2\pi^2 S_j}{T_{sj}c_0} \quad (\text{m}) \quad (5.10)$$

Seguindo o procedimento de calculo até agora explicado pode-se então calcular o valor do  $K_{ij}$  que se pretende comparar com o valor obtido pelo método teórico da norma 12354-1, que se fará no Cap. 6..

## 6

## ANÁLISE DE RESULTADOS

## 6.1. INTRODUÇÃO

Ao longo deste capítulo será feita a apresentação e análise dos resultados obtidos através do cálculo teórico do  $K_{ij}$  e os resultados obtidos pelo método experimental.

De seguida será efectuada a comparação entre os valores obtidos ,

## 6.2. RESULTADOS DO MÉTODO EXPERIMENTAL

6.1.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO ESTRUTURAL  $T_s$ 

Aplicando o procedimento de cálculo descrito no capítulo anterior obtiveram-se os seguintes valores para o tempo de reverberação estrutural da parede. Para o cálculo dos tempos de reverberação estrutural da parede, consideraram-se as medições dos acelerómetros colocados nas posições 1, 2 e 3 com excitações nos pontos A, B e C (consultar Fig. 5.3 ).

Quadro 6.1 - Valores do  $T_{si}$  da parede

$T_s$	0,424	0,327	0,403	0,325	0,370	0,409	0,324
	0,373	0,481	0,494	0,367	0,378	0,423	0,351
(s)	0,375	0,478	0,399	0,425	0,335	0,418	0,395
	0,360	0,404	0,410	0,329	0,399	0,425	

Como se pode observar o  $T_{si}$  da parede, varia entre 0,324 s e 0,494 s. Na tentativa de perceber o comportamento da parede, analisaram-se os valores obtidos por ponto de excitação e por posição do acelerómetro. Pretendeu-se avaliar se, o facto de o acelerómetro se encontrar numa zona mais central da parede, ou mais perto das paredes laterais, tinham alguma influência nos valores obtidos. Desta forma pretende-se encontrar uma relação entre a posição na parede do ponto de excitação com os valores observados. Seguidamente apresenta-se um quadro com os valores obtidos por cada posição dos acelerómetros.

Quadro 6.2 - Valores de  $T_{si}$  da parede por ponto da excitação.

Posição do acelerómetro	Ponto da Excitação		
	A	B	C
1	0,424	0,327	0,403
1	0,325	0,370	0,409
1	0,324	0,373	0,481
2	0,494	0,367	0,378
2	0,423	0,351	0,375
2	0,478	0,399	0,425
3	0,335	0,418	0,395
3	0,360	0,404	0,410
3	0,329	0,399	0,425
$\Delta$ (Max-min)	0,17	0,091	0,106
$T_s$ médio	0,388	0,379	0,411

Analisando o Quadro 6.2, não se consegue estabelecer uma relação entre o ponto de excitação e os valores de  $T_{si}$  obtidos da parede. Mesmo as pancadas mais próximas dos acelerómetros (valores com sombreado), não apresentam valores semelhantes. A análise dos valores por posição do acelerómetro também, não permitiu estabelecer qualquer relação.

No cálculo dos  $T_s$ , ao fazer-se a selecção dos pontos, aos quais se aproxima uma linha de tendência linear, verificou-se que a escolha de mais um ou menos um pico, influenciava a inclinação da recta, o que por conseguinte influenciou o valor dos tempos de reverberação estrutural. Esta poderá ser uma das razões para se ter obtido valores tão diferentes, mas não foi possível ao autor determinar com exactidão o último ponto do decaimento do nível de aceleração a considerar nos vários gráficos analisados, para aproximar a linha de tendência.

Na figura que se segue, apresentam-se todas as rectas de decaimento obtidas, rectas essas que se utilizaram para o cálculo dos  $T_{si}$ .

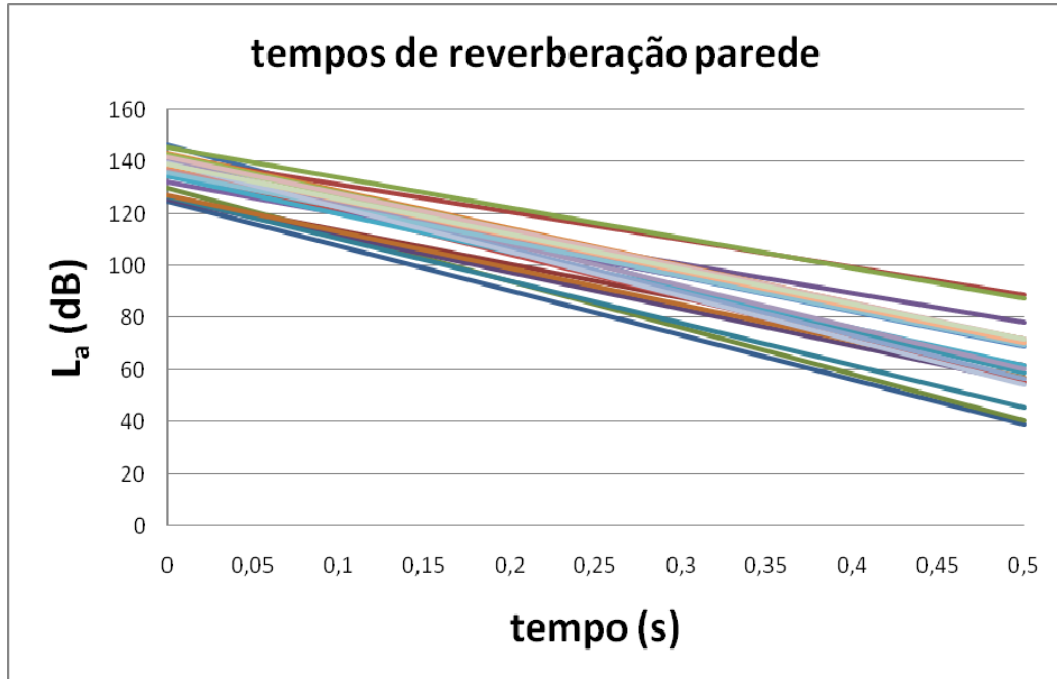


Fig. 6.1- Rectas para extrapolar os  $T_{si}$  da parede.

Como se pode verificar obtiveram-se rectas com inclinações diferentes, o que resultou em tempos de reverberação estrutural variados.

Segundo o que está estipulado na norma, o valor do  $T_{si}$  a considerar, resulta da média aritmética dos valores obtidos. Procedeu-se então a uma análise estatística dos valores obtidos.

Quadro 6.3 - Análise estatística  $T_{si}$ (s)

<b>Média</b>	0,394
<b>Mediana</b>	0,399
<b>Desvio Padrão</b>	0,046

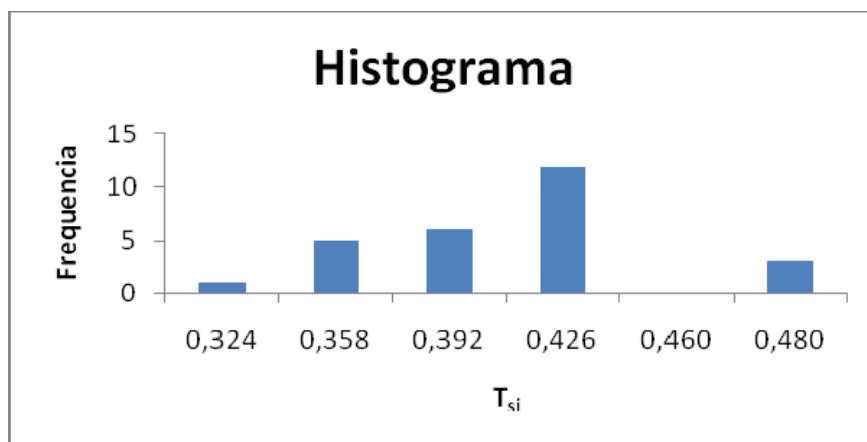


Fig. 6.2 – Distribuição dos resultados do  $T_{si}$  da parede.

De seguida calcularam-se os valores do  $T_{sj}$  da laje, valores que são apresentados no quadro 6.4. Para o cálculo dos tempos de reverberação estrutural da laje, consideraram-se as medições dos acelerómetros colocados nas posições 4, 5 e 6 com excitações nos pontos D, E e F (consultar Fig. 5.3).

Quadro 6.4 - Valores do  $T_{sj}$  da laje

$T_{si}$ (s)	0,051	0,087	0,140	0,122	0,137	0,180	0,219
	0,123	0,115	0,145	0,162	0,081	0,182	0,119
	0,187	0,165	0,137	0,095	0,136	0,135	0,100
	0,201	0,137	0,118	0,234	0,167		

Mais uma vez obtiveram-se valores de vária ordem. O maior tempo de reverberação obtido, 0,234 s é quatro vezes maior que o mínimo, 0,051 s. Da mesma forma que se fez para a parede, procedeu-se a uma análise dos valores por ponto de excitação, e por ponto de medição (quadro 6.5).

Quadro 6.5 - Valores de  $T_s$  da laje por ponto da excitação.

Posição do acelerómetro	Ponto da Excitação		
	D	E	F
4	0,051	0,087	0,14
4	0,122	0,137	0,18
4		0,219	0,123
5	0,115	0,145	0,162
5	0,081	0,182	0,119
5	0,187	0,165	0,137
6	0,095	0,136	0,135
6	0,100	0,201	0,137
6	0,118	0,234	0,167
$\Delta$ (Max-min)	0,136	0,147	0,061
$T_s$ médio	0,106	0,167	0,144

À semelhança do que se verificou na parede não se consegue encontrar uma justificação para se ter obtido valores tão variados.

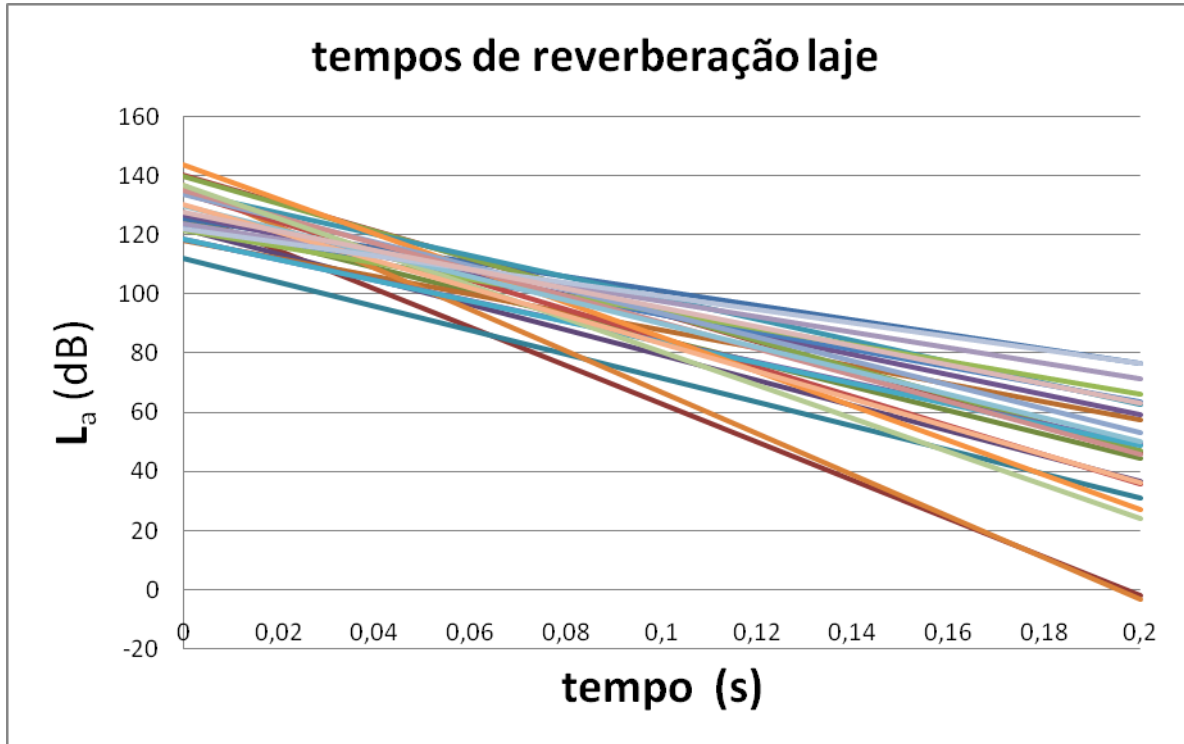


Fig. 6.3 - Rectas para extrapolar os  $T_{sj}$  da laje.

A análise estatística dos valores obtidos para a laje apresenta-se no seguinte quadro 6.6.

Quadro 6.6 - Análise estatística  $T_{si}$ (s).

<b>Média</b>	0,141
<b>Mediana</b>	0,137
<b>Desvio Padrão</b>	0,043

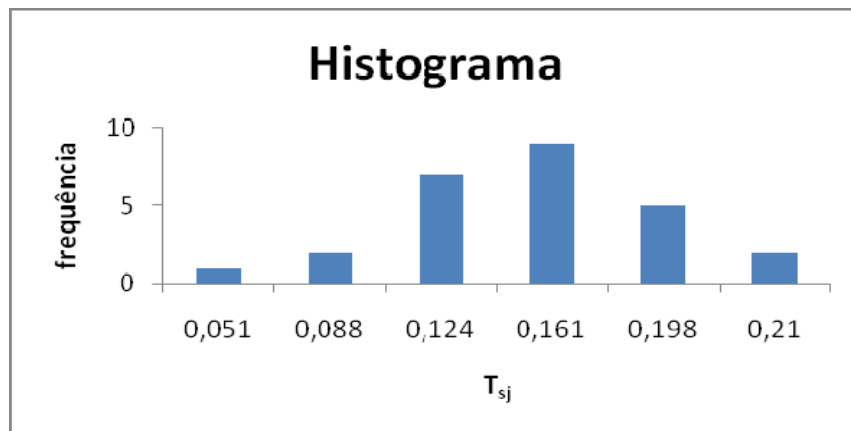


Fig. 34 – Distribuição dos valores de  $T_{sj}$  da laje.

6.1.2. DIFERENÇA DE NÍVEL DE VIBRAÇÃO  $D_{ij}$

Para o cálculo da diferença de nível de vibração, inicialmente considerou-se os sentidos de transmissão separadamente. Ou seja, primeiro estudou-se a transmissão com o sentido parede-laje, caminho ij.

Face aos tempos de reverberação estrutural obtidos, o tempo de integração a utilizar nos cálculos foi igual ao  $T_{si}$  da laje, ou seja, 0,394 s.

Numa primeira análise calculou-se  $D_{ij}$  de cada excitação isoladamente, tendo se obtido 27 valores de  $D_{ij}$ . Neste sentido de transmissão, a representação gráfica da diferença de vibração apresentou consensualmente a forma que está representada na Fig. 6.5.

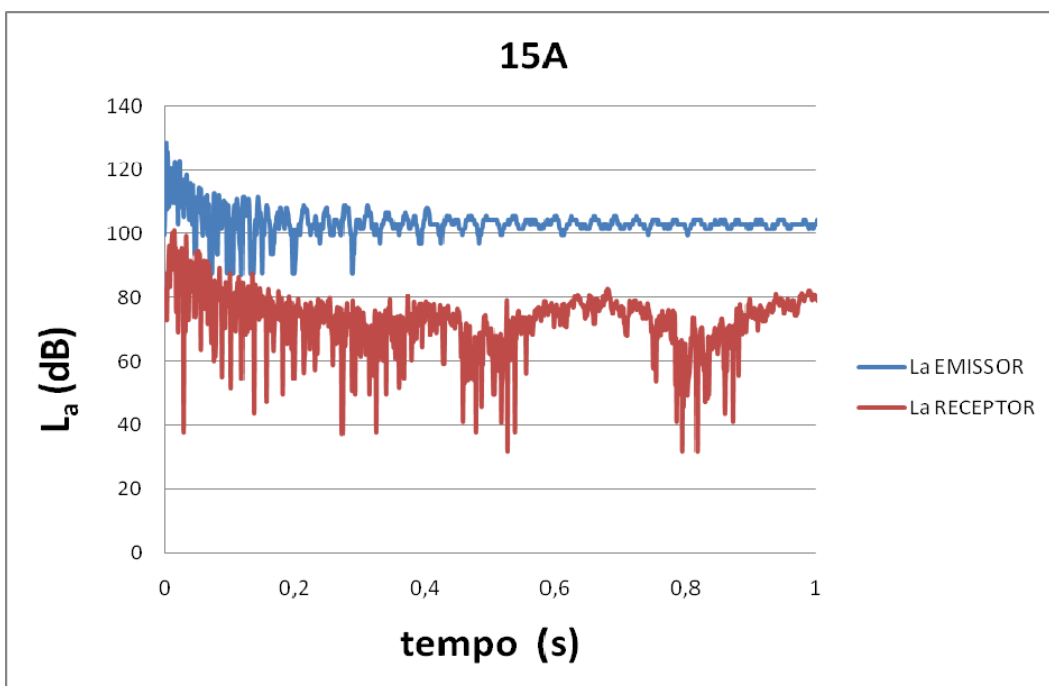


Fig. 6.5 – Curvas a partir das quais se obtiveram as diferenças de nível de Vibração parede-laje

Seguidamente apresenta-se os valores obtidos para os  $D_{ij}$

Quadro 6.7 - Valores de  $D_{ij}$ .

$D_{ij}$	20,729	20,969	20,372	25,280	27,876	24,671	20,976
	25,141	15,829	20,480	19,568	24,253	26,071	23,184
(dB)	27,431	22,630	25,061	21,603	22,929	23,945	26,852
	26,859	27,269	30,957	23,707	27,188	21,571	

À semelhança do que se verificou nos tempos de reverberação estrutural, a diferença entre o valor máximo (30,957 dB) e o mínimo (15,829 dB), é considerável. De seguida procedeu-se a uma análise relacionando o valor do  $D_{ij}$  com o ponto de excitação utilizado, e o par de acelerómetros onde se efectuou a medição.

Quadro 6.8 - Análise de sensibilidade dos resultados

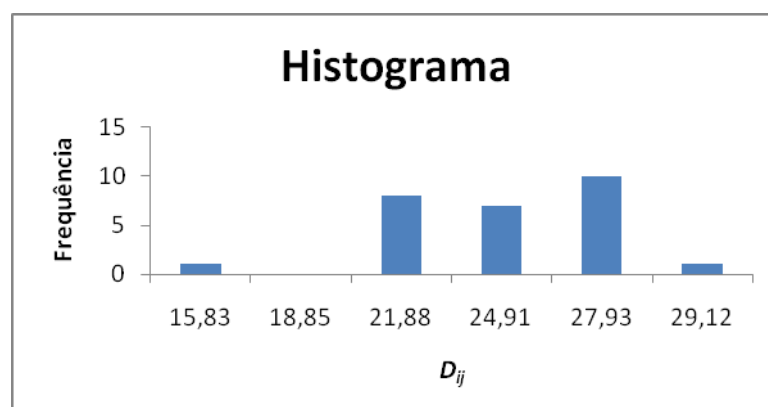
Par de acelerómetros	Ponto da Excitação			$\Delta$ (Max-min)	$D_{ij}$ médio
	A	B	C		
1-4	20,73	20,97	20,37	0,6	20,69
1-5	25,28	27,88	24,67	3,21	25,94
1-6	20,98	25,14	15,83	9,31	20,65
2-4	20,48	19,56	24,25	4,69	21,43
2-5	26,07	23,18	27,43	4,25	25,56
2-6	22,63	25,06	21,60	3,46	23,10
3-4	22,93	23,95	26,85	3,92	24,58
3-5	26,86	27,27	30,95	4,09	28,36
3-6	23,70	27,19	21,57	5,62	24,15
$\Delta$ (Max-min)	6,38	8,32	15,12		
$D_{ij}$ médio	23,30	24,47	23,70		

Após uma análise aos resultados obtidos, mais uma vez não é possível estabelecer uma relação entre o ponto de excitação e o local da medição.

Analisou-se então a amostra de valores em termos estatísticos.

Quadro 6.9 - Análise estatística  $D_{ij}$  (dB).

<b>Média</b>	23,83
<b>Mediana</b>	23,95
<b>Desvio Padrão</b>	3,26

Fig. 6.6 - Distribuição dos valores de  $D_{ij}$ .

Antes de se calcular o  $D_{ji}$ , ou seja a diferença de nível de vibração no sentido laje-parede, convém referir, que as medições da parede, da aceleração em ordem ao tempo, não corresponderam ao esperado, como demonstra a figura 6.7, quando as acelerações deveriam ter sido semelhantes às da fig. 6.8.

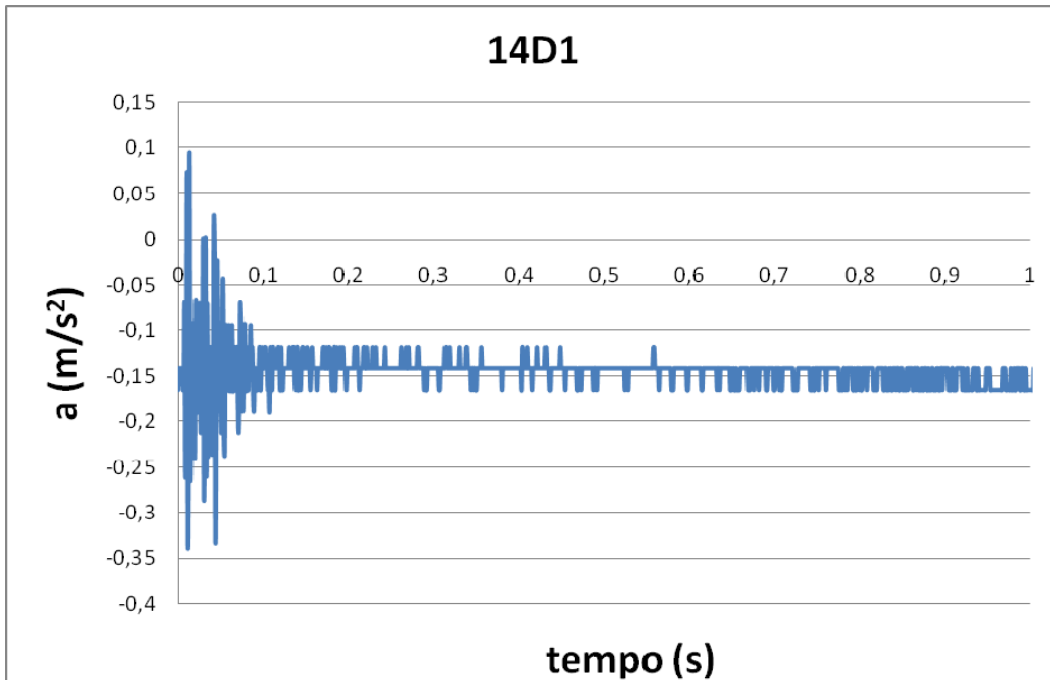


Fig. 6.7 - Exemplo de medição da aceleração na parede quando a laje é excitada.

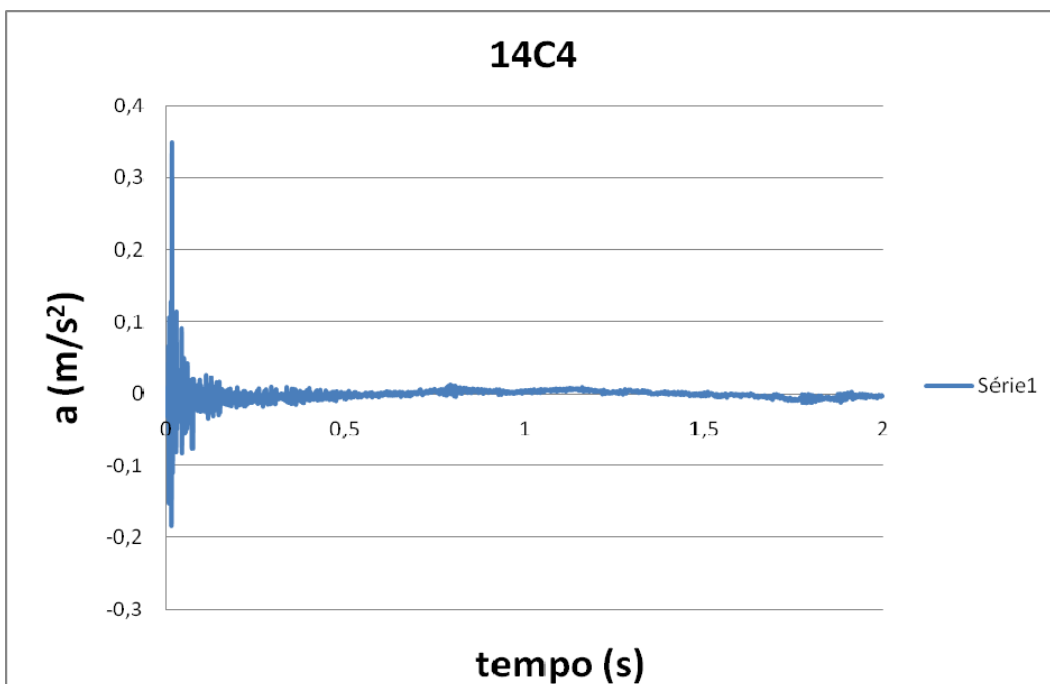


Fig. 6.8 - Exemplo de medição na laje quando a parede é excitada.

Na Fig.6.7 está representada uma medição da parede quando a laje foi excitada, na Fig. 6.8 está representada uma medição da laje quando a parede foi excitada. A fig.6.8 está de acordo com o esperado, pois a laje apresentou uma excitação proveniente da parede, e depois de dissipada a energia a aceleração estabilizou em valores próximos de zero. Já na Figura 6.7, mais uma vez é perceptível a excitação transmitida neste caso pela laje à parede, mas depois de dissipada a energia, as acelerações estabilizam em valores negativos, facto que não se pode verificar, pelo menos a partir do momento que a energia transmitida pela laje se dissipa. Uma das possíveis razões para esta situação se tenha verificado, pode ser por ter ocorrido uma saturação da escala do analisador.

Uma vez que esta situação, se verificou em todas as medições da parede, quando o elemento construtivo excitado era a laje, seria de todo importante repetir todas estas medições para se tentar encontrar a razão que motivou esta situação

Apesar de não ter sido possível repetir os ensaios, optou-se por prosseguir os cálculos, mesmo sabendo que estes possam não estar a conduzir aos resultados mais precisos.

Sendo assim, prosseguiu-se então com os cálculos do  $D_{ji}$ , apresentando-se no quadro 6.10 os valores obtidos.

Quadro 6.10 - Valores de  $D_{ji}$ .

$D_{ji}$ (dB)	10,79	-0,40	-1,28	1,9	-9,88	-4,69	-4,45
	6,15	9,68	1,14	2,82	4,62	-2,45	2,07
	-4,26	-9,96	-1,98	11,75	1,37	2,20	4,70
	-0,90	-0,40	-1,69	-1,86	-2,38		

Quadro 6.11 - Análise de sensibilidade dos resultados

Par de acelerómetros	Ponto da Excitação			$\Delta$ (Max-min)	$D_{ij}$ médio
	D	E	F		
1-4	10,79	-0,40	-1,28	12,07	3,04
1-5	1,90	-9,88	-4,69	11,78	-4,22
1-6		-4,4	6,15	10,55	0,88
2-4	9,68	1,14	2,82	8,54	4,55
2-5	4,62	-2,45	2,07	7,07	1,41
2-6	-4,26	-9,96	-1,98	7,98	-5,40
3-4	11,76	1,37	2,20	10,39	5,11
3-5	4,70	-0,90	-0,40	5,60	1,13
3-6	-1,69	-1,86	-2,38	0,69	-1,98
$\Delta$ (Max-min)	16,02	11,10	10,84		
$D_{ij}$ médio	4,69	-3,04	0,28		

Aqui a disparidade dos valores ainda é mais evidente. De acordo com o procedimento de análise até aqui verificado procedeu-se à análise estatística dos valores obtidos (Quadro 6.12).

Quadro 6.12 - Análise estatística  $D_{ji}$  (dB).

<b>Média</b>	0,49
<b>Mediana</b>	-0,405
<b>Desvio Padrão</b>	5,40

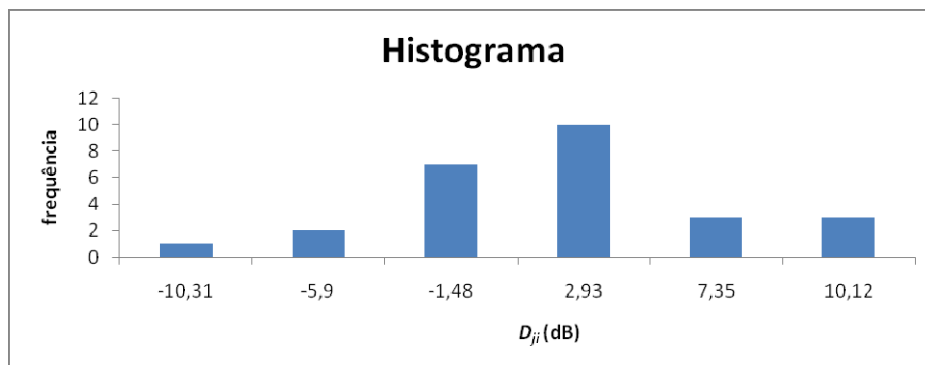


Fig. 6.9 - Distribuição dos Valores de  $D_{ji}$ .

Após o estudo dos resultados obtidos individualmente, isto é, dos  $D_{ij}$  e  $D_{ji}$  verificados para cada excitação, efectuou-se o cálculo dos  $D_{ij}$  e  $D_{ji}$  da junção, englobando todos os valores.

Primeiro utilizando a equação 5.7 calcularam-se os níveis médios de aceleração, chegando-se aos seguintes valores:

Quadro 6.13 - Valores de níveis médios de aceleração.

<b>Elemento excitado</b>	$L_{a,av,i}$ (dB)	$L_{a,av,j}$ (dB)
<b>Parede (i)</b>	122,97	102,76
<b>Laje (j)</b>	109,85	113,94

Tendo obtido estes valores ficou-se em condições de calcular os valores de  $D_{v,ij}$  e  $D_{v,ji}$ , recorrendo à equação (5.6)

$$D_{v,ij} = 122,97 - 102,76 \Leftrightarrow D_{v,ij} = 20,22 \text{ dB}$$

$$D_{v,ji} = 113,94 - 109,85 \Leftrightarrow D_{v,ji} = 4,08 \text{ dB}$$

Por fim falta calculou-se a média das diferenças dos níveis de vibração (equação 5.4),

$$\bar{D}_{ij} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} \Leftrightarrow \bar{D}_{ij} = \frac{20,22 + 4,08}{2} \Leftrightarrow \bar{D}_{ij} = 12,15 \text{ dB}$$

Como já era de esperar a resistência à transmissão sonora é maior no caminho parede- laje, do que no caminho laje-parede, sendo a primeira quatro vezes à segunda. Esta situação, muito provavelmente, tem a ver com os módulos de elasticidade dos elementos construtivos. Como a parede vibra mais facilmente que a laje, é necessária mais energia de excitação na parede para se conseguir excitar a laje, do que no inverso, isto é, com a mesma energia de excitação a parede como elemento receptor sente mais as vibrações do que a laje como receptor. Daí a resistência ser maior no sentido parede-laje do que no sentido contrário

### 6.1.3. TRANSMISSÃO CARACTERÍSTICA DA JUNÇÃO

Para se poder calcular o valor da transmissão característica da junção, ou também denominado índice de redução de vibração da junção analisada, falta calcular os comprimentos de absorção equivalente de cada elemento construtivo.

Utilizando a equação 5.10 obteve-se,

$$a_{parede} = \frac{2,2 \times \pi^2 \times 19,25}{340 \times 0,394} = 3,15 \text{ m}$$

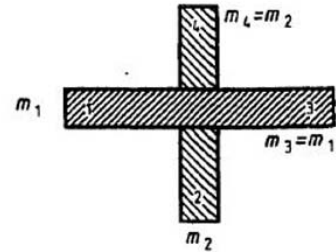
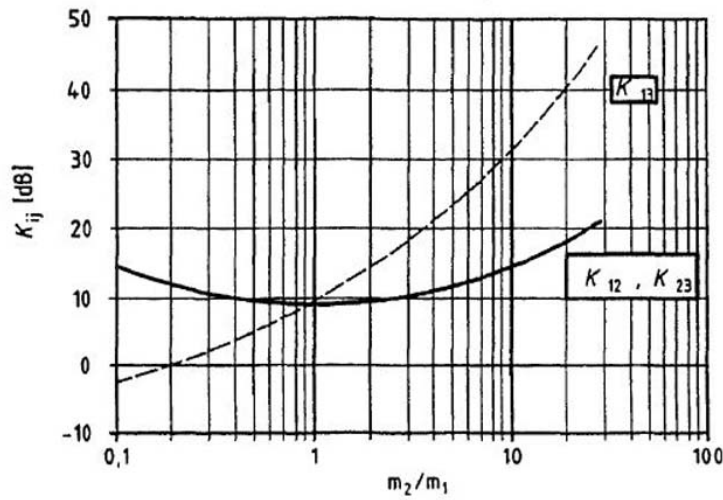
$$a_{laje} = \frac{2,2 \times \pi^2 \times 49}{340 \times 0,141} = 22,35 \text{ m}$$

Recorrendo, finalmente à equação 5.3, está-se em condições de calcular o valor do  $K_{ij}$  obtido experimentalmente, da junção tipo X analisada.

$$K_{ij} = \bar{D}_{ij} + 10 \log \left( \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i a_j}} \right) \Leftrightarrow K_{ij} = 12,15 + 10 \log \left( \frac{7}{\sqrt{3,15 \times 22,35}} \right) \Leftrightarrow K_{ij} = 11,36 \text{ dB}$$

## 6.2. RESULTADOS DO MÉTODO TEÓRICO

Para o cálculo do  $K_{ij}$  teórico da junção em análise, foi necessário consultar o anexo E da norma EN 12354-1, no qual, se pode encontrar, para o tipo de junção em estudo, o seguinte gráfico para calcular o  $K_{ij}$  para junções tipo X.



$$K_{13} = 8,7 + 17,1M + 5,7 M^2 \text{ dB ; } 0 \text{ dB / octave}$$

$$K_{12} = 8,7 + 5,7 M^2 (= K_{23}) \text{ dB ; } 0 \text{ dB / octave}$$

(E.3)

Fig. 6.10 – Ábaco para o cálculo do  $K_{ij}$ .

Como já foi referido no ponto 4.2,  $M$  é igual a uma relação logarítmica das massas superficiais dos elementos construtivos que pertencem à junção.

Para o cálculo de  $M$  consideraram-se os seguintes valores de massas superficiais.

Quadro 6.14 - Massas superficiais.

Elemento construtivo	Massa superficial (kg/m <sup>2</sup> )
Laje fungiforme	611,82
Parede simples bloco de betão de 15 com 1,5cm de reboco	230,00

$$M = \log\left(\frac{m_2}{m_1}\right) \Leftrightarrow M = \log\left(\frac{230}{611,82}\right) = -0,425$$

Consultando o ábaco da Fig.6.10, conclui-se que se pretende calcular o  $K_{12}$ , logo substituindo o valor de  $M$  na equação do ábaco obtém-se,

$$K_{12} = 8,7 + 5,7 \times (-0,425)^2 \Leftrightarrow K_{12} = 9,73 \text{ dB}$$

### 6.3. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Os primeiros resultados a comparar, são os tempos de reverberação estrutural dos elementos. Como era previsível a parede obteve um  $T_s$  superior ao da laje, isto porque a rigidez da laje é muito superior à da parede, tendo-se comprovado assim os valores obtidos, não em termos numéricos, mas sim em termos de grandeza.

Comparando então os valores do  $K_{ij}$  da junção, calculado quer pelo método experimental, quer pelo método teórico, pode-se afirmar que a diferença entre os valores obtidos terá significado. Uma vez que o cálculo do  $D_{ji}$ , isto é, da diferença de nível de vibração no caminho laje parede, não foi tão preciso, como já foi explicado em 6.2.1, será previsível que o valor do  $K_{ij}$  da junção obtido experimentalmente seja ainda maior. Analisando o resultado obtido pela aplicação da equação (5.3), conclui-se que a parcela do  $\overline{D}_{ij}$  possui um peso bastante superior relativamente à outra parcela da equação.

Se se analisar o cálculo do  $K_{ij}$  pelo método experimental, verifica-se que a segunda parcela da equação, equivale a um decréscimo de 0,787 ao valor do  $\overline{D}_{ij}$  obtido. Sendo previsível que o valor do  $\overline{D}_{ij}$  seja superior ao obtido, dado que se o  $D_{ji}$  for superior, o  $\overline{D}_{ij}$  da junção será também superior, o que irá resultar num maior afastamento entre o valor de  $K_{ij}$  obtido pelo método experimental, e o valor de  $K_{ij}$  obtido pelo método teórico.

Uma vez que o calculo dos tempos de reverberação estrutural possui alguma incerteza, pelos factos explicados em 6.1.1, realizou-se uma pequena análise de sensibilidade, para se avaliar a influência que o tempo de reverberação estrutural possui no resultado final do  $K_{ij}$ .

No quadro que se segue apresentam-se os valores que resultam da variação do tempo de reverberação estrutural.

Quadro 6.15 – Análise de sensibilidade do Tempo de reverberação estrutural.

	a parede	a laje	$D_{v,ij}$ (parede laje)	$D_{v,ij}$ (laje parede)	$\overline{D}_{ij}$	$K_{ij}$
$T_{si}$ - 20%	3.914	22.351	20,143	4,916	12,53	11,271
$T_{si}$ - 10%	3.473	22.351	20,182	4,478	12,33	11,331
$T_{si}$ =0.394	3.152	22.351	20,220	4,08	12,15	11,36
$T_{si}$ +10%	2.846	22.351	20,257	3,684	11,971	11,404
$T_{si}$ +20%	2.609	22.351	20,154	3,405	11,78	11,402

Como se pode verificar, apenas se variou o tempo de reverberação estrutural da parede,  $T_{si}$ , pois é este que condiciona o tempo de integração no calculo dos  $L_{a,eq}$  que por sua vez, irá influenciar os  $D_{v,ij}$  e  $D_{v,ji}$ .

Em termos de  $K_{ij}$  a variação de resultado é muito reduzida, apesar de o  $\overline{D}_{ij}$  variar perto de 1 dB, os comprimentos de absorção equivalentes vão compensar e reduzir essa variação.

Dado que o  $K_{ij}$  do ensaio experimental resulta de valores com uma dispersão significativa, optou-se por afectar os  $D_{ij}$  dos respectivos desvios padrão e analisar a influência no valor do  $K_{ij}$  experimental . Assim tem-se os seguintes valores:

$$D_{v,ij} = 20,22 + 3,26 \Leftrightarrow D_{v,ij} = 23,48 \text{ dB}$$

$$D_{v,ij} = 20,22 - 3,26 \Leftrightarrow D_{v,ij} = 16,96 \text{ dB}$$

$$D_{v,ji} = 4,08 + 5,4 \Leftrightarrow D_{v,ji} = 9,48 \text{ dB}$$

$$D_{v,ji} = 4,08 - 5,40 \Leftrightarrow D_{v,ji} = -1,32 \text{ dB}$$

Calculando os  $K_{ij}$  obteve-se,

$$K_{ij} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} + 10 \log \left( \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i a_j}} \right) \Leftrightarrow K_{ij} = \frac{23,48 + 9,48}{2} + 10 \log \left( \frac{7}{\sqrt{3,15 \times 22,35}} \right) \Leftrightarrow K_{ij} = 15,36 \text{ dB}$$

$$K_{ij} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} + 10 \log \left( \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i a_j}} \right) \Leftrightarrow K_{ij} = \frac{16,96 - 1,32}{2} + 10 \log \left( \frac{7}{\sqrt{3,15 \times 22,35}} \right) \Leftrightarrow K_{ij} = 8,35 \text{ dB}$$

Como se pode verificar, o valor de  $K_{ij}$  pode variar significativamente, podem o valor ser inferior ao calculado teoricamente.

Mesmo o valor teórico do  $K_{ij}$ , não está a salvo de alguma incerteza, visto que o valor da massa superficial da parede pode sempre variar, pois por exemplo o peso dos blocos de betão pode variar entre os 16,5 Kg e os 20 Kg.

Analizou-se então que valor se obteria para o  $K_{ij}$  se se considerasse uma massa superficial da parede superior. Efectuou-se o seguinte processo de cálculo.

Quadro 6.14 - Massas superficiais (aumentado a massa da parede).

Elemento construtivo	Massa superficial (kg/m <sup>2</sup> )
Laje fungiforme	611,82
Parede simples bloco de betão de 15 com 1,5cm de reboco	280,00

$$M = \log\left(\frac{m_2}{m_1}\right) \Leftrightarrow M = \log\left(\frac{280}{611,82}\right) = -0,339$$

$$K_{12} = 8,7 + 5,7 \times (-0,339)^2 \Leftrightarrow K_{12} = 9,36 \text{ dB}$$

Após este simples cálculo percebe-se que quanto mais próximas forem as massas superficiais dos elementos construtivos, menor é a resistência à transmissão sonora da junção.



# 7

## CONCLUSÃO

### 7.1. SÍNTESE GERAL

Após a realização deste trabalho de investigação, que tinha como principal objectivo comparar os resultados obtidos, pelo modelo teórico de cálculo das transmissões marginais, para uma solução construtiva em Portugal, pode concluir-se que de uma forma geral os objectivos foram cumpridos.

Analisando os resultados obtidos experimentalmente conclui-se que seria importante repetir parte dos ensaios, pois não se conseguiu obter o comportamento real da parede, quando a laje era excitada. Seria importante ter utilizado um martelo instrumentado, para se conseguir obter um auto-espectro do impacto, para avaliar se se utilizou a energia de excitação necessária nos dois elementos construtivos. De qualquer forma consegue-se perceber que a redução de vibração que ocorre no sentido de transmissão parede-laje e laje-parede é diferente, pelo que considerar o valor médio para as diferenças de níveis de vibração, como definido na norma, não será o mais adequado

Dos resultados obtidos experimentalmente, percebe-se que a heterogeneidade dos elementos construtivos, terá influência nos resultados obtidos, pois a dispersão dos resultados obtidos é significativa, quer para o cálculo dos  $T_s$ , quer para os  $D_{ij}$  da junção.

Conclui-se também que deveria haver um método mais exacto para o cálculo dos tempos de reverberação estrutural dos elementos construtivos, pois os resultados que se obtêm dependem do critério de quem efectua os cálculos. Seria então importante normalizar um método de determinação mais exacto para os tempos de reverberação estrutural, embora como se viu este não é determinante no resultado final.

Apesar de parte dos resultados do ensaio experimental, não serem totalmente reais, pode concluir-se, para este caso estudado, que o valor experimental obtido difere do valor calculado pelo método teórico da norma EN 12354-1.

Com a obtenção destes resultados, não se pode de forma alguma afirmar que o método normalizado do cálculo dos  $K_{ij}$  não seja aplicável às soluções construtivas em Portugal, para isso seria necessário realizar muitos mais ensaios experimentais, para se poder sustentar essa afirmação. Pode-se sim dizer, que face aos resultados obtidos, a aplicabilidade do método à construção portuguesa será no mínimo contestável.

## **7.2. PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTO FUTURO**

Após a realização deste trabalho, ficou patente a necessidade de realizar mais ensaios para confirmar a aplicabilidade do método da norma EN 12354-1 para o cálculo dos  $K_{ij}$ .

Para tal sugere-se a análise dos diferentes tipos de junções, assim como, as diferentes soluções construtivas para o mesmo tipo de junção.

Seria de todo interessante efectuar ensaios obtendo velocidades, e não acelerações resultantes das excitações dos elementos construtivos, para que se possa calcular o  $K_{ij}$  pelo método da norma ISO 10848-1. De forma a avaliar os dois processos de cálculo, seria interessante efectuar medições de velocidades e acelerações, e comparar os resultados obtidos.

Durante a realização do ensaio, não foi possível a abstracção do estar a danificar as instalações da Faculdade, sugere-se a realização dos ensaios em locais, que a estrutura se possa danificar sem problemas, podendo assim efectuar excitações com uma energia maior, pois quanto maior a energia que se utilizava melhor eram os resultados obtidos.

Seria também importante estudar, a influência que o revestimento teve nos resultados obtidos. Para tal, seria necessário repetir o ensaio realizado excitando directamente a laje, isto é, devia-se recortar o linóleo do pavimento de modo a que seja possível excitar directamente o betão, e comparar os resultados com os obtidos na realização deste estudo.

Outra situação que seria interessante analisar, era analisar a transmissão nos elementos construtivos, ou seja, utilizar um número maior de acelerómetros, para que se possa obter medições em vários pontos dos elementos construtivos para a mesma excitação. Assim, será possível analisar a propagação da energia nos elementos construtivos.

Na última análise comprovou-se que pelo método teórico, que quanto mais próximas forem as massas superficiais dos elementos construtivos que compõem a junção menor será a resistência à transmissão sonora na junção. Seria interessante analisar se esta situação se comprova na realidade.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Barron, F. Randall, *Industrial Noise Control and Acoustics*, Technical University of Louisiana, 2003.
- [2] "acoustics" - <http://www.britannica.com/eb/article-9109556>. - Encyclopædia Britannica Online, 2007.
- [3] Pierce, Allan D., *Acoustics: An Introduction o Its Physical Principles and Applications*, Acoustical Society of America, 1989;
- [4] "technical info" - <http://www.insul.co.nz/technicalinfo.html#1>. - Marshal Day acoustics, 2007.
- [5] Everest, F. Alton - *The Master Handbook of Acoustics*, TAB Books, 4ª edição, 2001;
- [6] Carvalho, A. P. Oliveira, *Acoustica Ambiental e de Edifícios*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 6ª Edição, Porto 2007;
- [7] Finn Jacobsen, Torben Poulsen, Jens Olger Rindel - *Lecture note on Fundamentals of Acoustics and Noise Control*. Technical University of Denmark, 2007.
- [8] *Lei de Bases do Ambiente*, nº 11/87 de 7 de Abril. - 1987.
- [9] *Regulamento Geral sobre o Ruído, Decreto-Lei n.º 292/2000 de 14 de Novembro*. - Diário da República – 1ª Série-A Nº263. 2000.
- [10] Decreto-Lei nº 146/2006 de 31 de Julho. - Diário da República – 1ª Série Nº 146. 2006.
- [11] *Decreto-Lei nº 9/2007 de 17 de Janeiro*. - Diário da República – 1ª Série Nº 12. 2007.
- [12] *Decreto-Lei nº 96/2008 de 9 de Junho*. - Diário da República – 1ª Série Nº 110. 2008.
  
- [13] *EN ISO 717-1 "Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of building elements - Part 1: Airborne sound insulation"*. - Comité Europeu de Normalização, 1997.
- [14] Patricio, Jorge – *A Acústica nos Edifícios Guia para a Quantificação da Transmissão Marginal*, LNEC, Lisboa, 2007.
  
- [15] *EN ISO 12354 "Building acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 1: Airborne sound insulation between rooms"*. - Comité Europeu de Normalização, 2000.
- [16] ISO 10848-1 "Acoustics – Laboratory measurement of the flanking transmission of airborne an impact sound between adjoining rooms" - Comité Europeu de Normalização, 2006.
- [17] NT ACOU 090, *Building Structures, junctions: Transmission of Vibrations –Field Measurement, Nordest, Finlandia 1994*



## **ANEXOS**

### **INTRODUÇÃO**

Todos os anexos deste trabalho encontram-se em formato digital no CD que segue em anexo a este documento.

### **A.1- PLANTAS DO EDIFÍCIO**

As plantas do edifício onde foi realizado o ensaio experimental encontram-se nos seguintes ficheiros:

- “planta estrutural.pdf”;
- “planta de arquitectura.pdf”;
- “cortes.pdf”.

### **A.2 ACELERAÇÕES**

Os resultados obtidos das medições dos acelerómetros encontram-se no ficheiro “acelerações.pdf”.

### **A.3 TEMPOS DE REVERBERAÇÃO ESTRUTURAL**

Os gráficos através dos quais foram obtidas as rectas para determinação dos tempos de reverberação estrutural dos elementos construtivos encontram-se nos seguintes ficheiros:

- “ts parede.pdf”;
- “ts laje.pdf”.

### **A.4 DIFERENÇAS DE NÍVEL DE VIBRAÇÃO**

Os gráficos que representam as diferenças dos níveis de vibração medidos para cada par de acelerómetros, encontram-se no ficheiro “diferenças de nível de vibração.pdf”

