

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE PAVIMENTOS DA CASA BURGUESA PORTUENSE

ROGÉRIO ANTÓNIO MIRANDA DA SILVA

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

Orientador: Professor Doutor Rui Manuel Gonçalves Calejo Rodrigues

Coorientador: Eng.^a Dóris Queirós

JUNHO DE 2015

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2014/2015

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ 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

🌐 <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 - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo 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 eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais, ao meu Irmão e à Juliana

Põe tudo o que és na mais pequena coisa que faças

Fernando Pessoa

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Rui Calejo Rodrigues pela sua total disponibilidade, a sua motivação, a sua orientação e toda a partilha de conhecimentos.

À Eng.^a Dóris Queirós por me ter acompanhado na realização dos ensaios acústicos nos edifícios, pelo auxílio no processamento de dados e por todo o auxílio na elaboração da dissertação.

À Porto Vivo SRU, nomeadamente ao Arq. Luís António, ao Arq. Luís Brito e à Eng.^a Iolanda, pela disponibilidade na procura de edifícios.

Ao Arq. Elias, ao Eng. Rui Marrana, ao Eng. Miguel Monteiro, ao Sr. Reinaldo, ao Eng. Jerónimo Botelho e à Joana por terem disponibilizado os edifícios para os ensaios sem os quais este trabalho não seria possível.

Ao Pedro Rocha, ao Diogo Almeida e ao Jorge Teixeira por toda a ajuda prestada no desenvolvimento deste trabalho.

À Juliana pela ajuda na revisão do documento e por toda a paciência e companhia ao longo destes anos.

À minha família por todo o apoio e amizade.

RESUMO

O crescente aumento da reabilitação em centros históricos e a inexistência de informação clara e objetiva sobre os elementos que constituem o edificado presente nestes locais torna relevante, atual e de interesse nacional o tema desenvolvido.

A reabilitação surge como meio fundamental para a sustentabilidade dos edifícios existentes e para a salvaguarda do património urbano. No entanto parte desta reabilitação opta pela substituição total de certos elementos característicos do edificado antigo para responder às exigências de conforto atuais.

Pretende-se assim através de análises *in situ* e de modelos teóricos caracterizar um elemento construtivo da típica casa burguesa portuense, nomeadamente os pavimentos, ao isolamento a sons aéreos e de percussão, para saber se estes através da aplicação de soluções tecnológicas pouco intrusivas conseguem ter um desempenho que os permitam ser adaptados para os dias hoje evitando assim a perda de parte da história da cidade.

Os valores de isolamento a sons aéreos, $D_{nT,w}$, e a sons de percussão, $L'_{nT,w}$, obtidos nas medições de edifícios com o tipo de pavimento da casa burguesa, serão comparados com os valores dos índices obtidos pelo método de Sharp e pelo método da norma EN 12354-2 por forma a verificar a adequabilidade dos modelos teóricos existentes ao comportamento real das soluções. Na medição do isolamento sonoro a sons de percussão será ainda abordada a influência dos sons aéreos produzidos pela máquina de percussão no compartimento emissor na medição dos níveis de pressão sonora no recetor.

Os resultados obtidos mostram um bom potencial dos pavimentos. Alguns dos pavimentos cumprem os limites impostos pela legislação sendo que os que não cumprem são facilmente adaptáveis aos confortos exigidos atualmente através de pequenas correções, os valores calculados pelos modelos teóricos revelam uma grande discrepância face aos valores obtidos *in situ* concluindo-se a falta de modelos de cálculo capazes de prever adequadamente o isolamento dos pavimentos de madeira.

PALAVRAS-CHAVE: Acústica, Casa burguesa, Pavimentos, Isolamento sonoro, Modelos teóricos

ABSTRACT

The increasing rehabilitation in historical centers and the absence of clear and objective information about the elements of the present built on these sites becomes relevant, current and of national interest the theme developed.

The rehabilitation emerges as a fundamental means for the sustainability of existing buildings and for the protection of the urban heritage. However, part of this rehabilitation opts for total replacement of certain characteristic elements of the old buildings to meet current comfort requirements.

The aim is to through in situ analyzes and theoretical models feature a constructive element of the typical Porto bourgeois home, wood floor, to isolation the air sounds and percussion, to see if these by applying bit intrusive technological solutions can be a performance that will allow them to be adopted today thus avoiding the loss of the city's history.

The insulation values to air sounds, $D_{nT,w}$ and percussion sounds, $L'_{nT,w}$ obtained in measurements of buildings with the type of Bourgeois house floor will be compared with the values of the indices obtained by Sharp method and the method of EN 12354-2 in order to assess the suitability of existing theoretical models to the actual behavior of the solutions. The measurement of sound insulation percussion sounds will still be addressed the influence of air sounds produced by percussion machine compartment on the transmitter in the measurement of sound pressure levels in the receiver.

The results show good potential of pavements. Some of the floors comply with the limits imposed by law and that those who do not are easily adaptable to the currently required comforts through small corrections, the values calculated by theoretical models show a large discrepancy compared to the figures in situ concluding the lack of role models calculating able to adequately predict the insulation of wooden flooring.

KEYWORDS: Acoustic, Bourgeois house, Floors, Sound insulation, Theoretical models

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 ÂMBITO E OBJETIVOS	2
1.3 CONTRIBUTO HISTÓRICO E CULTURAL.....	3
1.4 A IMPORTÂNCIA DA ACÚSTICA	4
1.5 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	7
2. EVOLUÇÃO DA ACÚSTICA.....	9
2.1 INTRODUÇÃO.....	9
2.2 HISTÓRIA DA ACÚSTICA	9
2.3 O SOM.....	11
2.3.1 ORIGEM DO SOM.....	11
2.3.2 PROPAGAÇÃO DO SOM	12
2.3.3 PROPRIEDADES DO SOM.....	13
2.3.4 CARACTERIZAÇÃO DO SOM	14
2.3.5 TEMPO DE REVERBERAÇÃO	18
2.3.6 ABSORÇÃO.....	18
2.4 EVOLUÇÃO DA LEGISLAÇÃO	21
2.4.1 EVOLUÇÃO DA LEGISLAÇÃO EM PORTUGAL.....	21
2.4.2 REGULAMENTO DOS REQUISITOS ACÚSTICOS DOS EDIFÍCIOS (RRAE).....	22
3. PARÂMETROS ACÚSTICOS QUE CARACTERIZAM OS PAVIMENTOS.....	23
3.1 INTRODUÇÃO.....	23
3.2 ISOLAMENTO A SONS AÉREOS	24
3.3 ISOLAMENTO A SONS DE PERCUSSÃO	26

3.4	MEDIÇÕES <i>IN SITU</i>	27
3.5	MODELOS TEÓRICOS	28
3.5.1	MÉTODO DE SHARP.....	28
3.5.1.1	Paredes Simples.....	28
3.5.1.2	Paredes duplas.....	30
3.5.2	MÉTODO DA NORMA EN 12354-2	31
3.6	REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA	33

4. A CASA BURGUESA DO PORTO.....39

4.1	INTRODUÇÃO	39
4.2	ENQUADRAMENTO HISTÓRICO	40
4.3	SOLUÇÃO CONSTRUTIVA	41
4.3.1	SISTEMAS CONSTRUTIVOS	41
4.3.2	ELEMENTOS DA CASA BURGUESA	43
4.4	ELEMENTO EM ESTUDO	44
4.4.1	INTRODUÇÃO	44
4.4.2	VIGAMENTO	45
4.4.3	TARUGOS	46
4.4.4	CADEIAS.....	47
4.4.5	SOALHO	48
4.4.6	TETO.....	49

5. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS.....51

5.1	INTRODUÇÃO	51
5.2	MEDIÇÕES <i>IN SITU</i>	52
5.2.1	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NAS MEDIÇÕES	52
5.2.2	EDIFÍCIO RUA DAS TAIPAS (E1).....	52
5.2.3	EDIFÍCIO RUA MOUZINHO DA SILVEIRA (E2).....	54
5.2.4	EDIFÍCIO RUA DA PICARIA (E3)	57
5.2.5	EDIFÍCIO RUA DOS CALDEIREIROS (E4).....	59
5.2.6	EDIFÍCIO RUA MOUZINHO DA SILVEIRA (E5).....	61
5.2.7	EDIFÍCIO RUA SANTO ANTÓNIO DE ARNELAS, OLIVAL (E6).....	63

6. ANÁLISE EXPERIMENTAL E TEÓRICA.....67

6.1	INTRODUÇÃO	67
6.2	ANÁLISE DAS MEDIÇÕES <i>IN SITU</i> EDIFÍCIO DA RUA DOS CALDEIREIROS	67
6.2.1	TRATAMENTO DOS RESULTADOS PARA OBTENÇÃO DO ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A SONS AÉREOS $D_{NT,W}$	67
6.2.1.1	Cálculo do nível médio de pressão sonora, L , no compartimento emissor e recetor	68
6.2.1.2	Correção do ruído de fundo.....	69
6.2.1.3	Cálculo do Tempo de reverberação	70
6.2.1.4	Determinação do índice único de avaliação, $D_{nT,w}$	70
6.2.2	TRATAMENTO DOS RESULTADOS PARA OBTENÇÃO DO ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A SONS DE PERCUSSÃO $L'_{nT,w}$	72
6.2.2.1	Cálculo do nível médio de pressão sonora no recetor, L_i	73
6.2.2.2	Correção do ruído de fundo.....	73
6.2.2.3	Cálculo do tempo de reverberação	73
6.2.2.4	Determinação do índice único, $L'_{nT,w}$	74
6.2.3	MEDIÇÃO DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA NO EMISSOR PROVOCADO PELA MÁQUINA DE PERCUSSÃO 75	
6.2.4	SÍNTESE DOS RESULTADOS	76
6.3	ANÁLISE TEÓRICA PARA O CÁLCULO DO ISOLAMENTO A SONS AÉREOS E DE PERCUSSÃO	79
6.3.1	MÉTODO DE SHARP PARA PAREDES DUPLAS.....	80
6.3.2	MÉTODO SIMPLIFICADO DA NORMA EN 12354 – 2	82
6.3.3	SÍNTESE DOS RESULTADOS	84
6.3.4	SÍNTESE DE RESULTADOS.....	86
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
7.1	INTRODUÇÃO	89
7.2	VERIFICAÇÃO DO CUMPRIMENTO DA LEGISLAÇÃO.....	89
7.3	RESULTADOS MEDIDOS <i>IN SITU</i> VS MODELOS TEÓRICOS.....	92
7.4	SONS AÉREOS DE PERCUSSÃO	94
7.5	RECOMENDAÇÕES	95
7.6	CONCLUSÕES.....	97
7.7	PERSPETIVAS DE DESENVOLVIMENTO FUTURO	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Edifícios típicos do Porto [5]	2
Figura 1.2 – Número de análises RD por vertente reclamada do ano de 2013 [13]	5
Figura 1.3 – Número de processos RD na região Norte no ano de 2013 [13]	5
Figura 1.4 – População que vive em agregados familiares que refere a existência de ruído vindo dos vizinhos ou da rua, dados EUROSTAT 2013 [14].....	6
Figura 1.5 – População que vive em habitações e se importa com o ruído em 2011, dados EUROSTAT 2013 [14].....	6
Figura 2.1 – Túmulo de Nakht [15].....	9
Figura 2.2 – Série harmónica [16].....	10
Figura 2.3 – Propagação do som [19].....	11
Figura 2.4 – Representação de uma onda onde se apresenta a definição de comprimento de onda e amplitude.....	14
Figura 2.5 – Pressão sonora e níveis de pressão sonora	15
Figura 2.6 – Sonómetros digitais [20]	16
Figura 2.7 – Curvas de ponderação [21].....	16
Figura 2.8 – Som direto e som refletido	18
Figura 2.9 – Mecanismo de absorção sonora	19
Figura 2.10 – Tubo de ondas estacionárias cedido por NI&DEA	20
Figura 2.11 – Câmara reverberante cedido por NI&DEA	20
Figura 3.1 – Transmissão sonora de sons aéreos (esquerda) e de sons de percussão (direita)	23
Figura 3.2 – Transmissões marginais (<i>in situ</i>)	24
Figura 3.3 – Emissor e recetor (em laboratório)	25
Figura 3.4 – Esquema da medição a sons aéreos.....	27
Figura 3.5 – Esquema da medição dos sons de percussão	28
Figura 3.6 – Método gráfico para a determinação dos valores de R em função da frequência das paredes simples [27]	29
Figura 3.7 – Método gráfico para a determinação dos valores de R em função da frequência das paredes duplas [27].....	30
Figura 3.8 – Gráfico para o cálculo de ΔL_w [36].....	33
Figura 3.9 – Tabela 1 do livro <i>Amelioration Acoustique des logements</i> [29].....	34
Figura 3.10 – Tabela do artigo da revista <i>Construção Magazine</i> de Diogo Mateus [30].....	35
Figura 3.11 – Gráfico do nível da vibração para os dois modelos propostos na direção da propagação [33].....	37

Figura 4.1 – O Porto em 1789, gravura de Teodoro Maldonado [35]	39
Figura 4.2 – Fases de desenvolvimento da cidade do Porto [39]	40
Figura 4.3 – Representação da casa burguesa portuense [42]	41
Figura 4.4 – Parede de fachada em alvenaria de pedra	42
Figura 4.5 – Parede de meação em alvenaria de pedra (esquerda) e parede de tabique (direita)	42
Figura 4.6 – Estrutura de um pavimento tradicional de madeira (esquerda) e estrutura típica de um telhado de madeira (direita).....	43
Figura 4.7 – Esquema legendado da Casa Burguesa adaptado de [42]	44
Figura 4.8 – Vigamento (esquerda) e vigamento esquadriado (direita).....	45
Figura 4.9 – Tarugamento simples.....	46
Figura 4.10 – Tarugamento de cruzeta [43]	47
Figura 4.11 – Tarugamento entalonado [43]	47
Figura 4.12 – Vista de patamar das escadas onde se observa a cadeia a servir de apoio a uma das pernas da escada [40]	48
Figura 4.13 – Estrutura do pavimento com soalho visível.....	48
Figura 4.14 – Teto em tabuado de madeira (esquerda) e teto em estuque (direita)	49
Figura 5.1 – Localização dos edifícios para realização das medições <i>in situ</i>	51
Figura 5.2 – Edifício Rua das Taipas	52
Figura 5.3 - Esquema representativo do pavimento e dos compartimentos em análise da Rua das Taipas	52
Figura 5.4 – Estrutura do pavimento do edifício da Rua das Taipas	52
Figura 5.5 – Compartimento recetor (esquerda) e compartimento emissor (direita)	53
Figura 5.6 – Fonte sonora (direita) e máquina de percussão (esquerda)	54
Figura 5.7 – Edifício Rua Mouzinho da Silveira	54
Figura 5.8 – Esquema representativo do pavimento e dos compartimentos em análise na Rua Mouzinho da Silveira	54
Figura 5.9 – Estrutura do pavimento da Rua Mouzinho da Silveira	55
Figura 5.10 – Compartimento emissor	55
Figura 5.11 – Compartimento recetor 1 (esquerda) e compartimento recetor 2 (direita)	56
Figura 5.12 – Emissão (fonte sonora e sonómetro)	56
Figura 5.13 – Máquina de percussão no compartimento emissor (esquerda) e sonómetro na sala recetora 2 (direita)	57
Figura 5.14 – Edifício Rua da Picaria	57
Figura 5.15 – Esquema representativo do pavimento e dos compartimentos em análise da Rua da Picaria	57

Figura 5.16 – Compartimento emissor 1, sala, (esquerda) e compartimento recetor 1 (direita)	58
Figura 5.17 – Compartimento emissor 2, quarto, (esquerda) e compartimento recetor 2 (direita)	58
Figura 5.18 – Fonte sonora no compartimento 1 (esquerda) e compartimento emissor 2 (direita)	59
Figura 5.19 – Edifício Rua dos Caldeireiros.....	59
Figura 5.20 – Esquema representativo do pavimento e dos compartimentos da Rua dos Caldeireiros	59
Figura 5.21 – Exemplo da estrutura do pavimento da Rua dos Caldeireiros (não corresponde ao pavimento analisado)	60
Figura 5.22 – Compartimento emissor (esquerda) e compartimento recetor (direita).....	61
Figura 5.23 – Edifício Rua Mouzinho da Silveira 2	61
Figura 5.24 – Esquema representativo do pavimento e dos compartimentos em análise da Rua Mouzinho da Silveira	61
Figura 5.25 – Estrutura do pavimento do edifício da Rua Mouzinho da Silveira 2	62
Figura 5.26 – Compartimento emissor (esquerda) e compartimento recetor (direita).....	63
Figura 5.27 – Edifício Rua Santo António de Arnelas.....	63
Figura 5.28 - Esquema representativo do pavimento e dos compartimentos em análise da Rua Santo António de Arnelas	63
Figura 5.29 – Compartimento emissor (esquerda) e compartimento recetor (direita).....	64
Figura 5.30 – Fonte sonora (esquerda) e máquina de percussão (direita)	65
Figura 6.1 – Esquema de medição do isolamento a sons aéreos na Rua dos Caldeireiros	67
Figura 6.2 – Representação gráfica do ajuste da curva real, D_{nT} , à curva de referência	72
Figura 6.3 – Esquema de medição do isolamento a sons de percussão na Rua dos Caldeireiros	72
Figura 6.4 - Representação gráfica do ajuste da curva real, L'_{nT} , à curva de referência	75
Figura 6.5 – Corte do pavimento da Rua dos Caldeireiros.....	80
Figura 6.6 – Método gráfico de Sharp para cálculo dos valores de R do pavimento da Rua dos Caldeireiros	81
Figura 6.7 – Valor de R pelo método de Sharp.....	82
Figura 6.8 – Representação dos valores de $D_{nT,w}$ medidos <i>in situ</i> e calculados pelos métodos teóricos	87
Figura 6.9 - Representação dos valores de $L'_{nT,w}$ medidos <i>in situ</i> e calculados pelos métodos teóricos	87
Figura 7.1 – Representação dos pavimentos em análise em função de $L'_{nT,w}$ e $D_{nT,w}$ (tabela A1 dos anexos).....	91
Figura 7.2 – Comparação dos resultados dos pavimentos E1 e E4 (esquerda) e E3.1, E3.2 e E2 (direita)	92

Figura 7.3 – Comparação gráfica dos valores obtidos pelos resultados medidos <i>in situ</i> com os valores obtidos pelos métodos teóricos (tabela A2 dos anexos).....	94
Figura 7.4 – Esquema de um pavimento tipo tradicional	96
Figura 7.5 – Esquema de pavimento tradicional reforçado com material resiliente e material absorvente sonoro	96
Figura 7.6 – Esquema de pavimento tradicional com material resiliente e material absorvente sonoro	97
Figura 7.7 – Esquema de um pavimento tradicional com colocação de um teto falso, material absorvente sonoro e material resiliente	97

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1.1 – Efeitos do ruído	4
Quadro 2.1 – Parâmetros caracterizadores de uma onda sonora.....	13
Quadro 2.2 – Valores numéricos da curva de ponderação A	17
Quadro 2.3 – Quadro síntese do RRAE [11].....	22
Quadro 3.1 – Correção K para as transmissões marginais em dB [28].....	32
Quadro 3.2 – Tabela com valores do isolamento a sons de percussão e aéreos [32].....	36
Quadro 4.1 – Divisão em estrutura principal e secundária da Casa Burguesa Portuense [37].....	41
Quadro 4.2 – Elementos base dos pavimentos estruturais de madeira	44
Quadro 6.1 – Níveis de pressão sonora obtidos no compartimento emissor em bandas de 1/3 de oitava	68
Quadro 6.2 – Níveis de pressão sonora obtidos no compartimento recetor em bandas de 1/3 de oitava	68
Quadro 6.3 – Nível do ruído de fundo (RF).....	69
Quadro 6.4 – Níveis de pressão sonora no local recetor corrigidos por banda de 1/3 de oitava	70
Quadro 6.5 – Tempo de reverberação no compartimento recetor.....	70
Quadro 6.6 – Valores do isolamento sonoro padronizado D_{nT} por bandas de 1/3 de oitava	71
Quadro 6.7 – Ajuste da curva real D_{nT} à curva de referência	71
Quadro 6.8 – Níveis de pressão sonora obtidos no compartimento recetor em bandas de 1/3 de oitava	73
Quadro 6.9 - Valores do isolamento sonoro padronizado L'_{nT} por bandas de 1/3 de oitava	74
Quadro 6.10 – Ajuste da curva real L'_{nT} à curva de referência.....	74
Quadro 6.11 - Níveis de pressão sonora obtidos no compartimento emissor em bandas de 1/3 de oitava	76
Quadro 6.12 – Verificação da influência dos sons aéreos produzidos pela máquina de percussão na medição de $L'_{nT,w}$	76
Quadro 6.13 – Valores de L_1 , L_2 e L_i do edificado ensaiado.....	77
Quadro 6.14 – Ruído de fundo das medições realizadas	77
Quadro 6.15 – Tempo de reverberação dos compartimentos recetores	78
Quadro 6.16 – Nível sonoro produzido pela máquina de percussão no compartimento emissor e verificação segundo a expressão 6.5.....	78
Quadro 6.17 – Índices únicos, $D_{nT,w}$ e $L'_{nT,w}$, dos pavimentos em análise	79
Quadro 6.18 – Parâmetros e valores de cálculo.....	80
Quadro 6.19 – Pontos notáveis para representação no método gráfico de Sharp.....	81

Quadro 6.20 - Ajuste da curva real R à curva de referência	81
Quadro 6.21 – Parâmetros para o cálculo pelo método simplificado da norma EN 12354-2	82
Quadro 6.22 – Resultado do cálculo de $L'_{nT,w}$ segundo a norma EN 12354-2.....	83
Quadro 6.23 – Valores de R (dB) por bandas de 1/3 de frequência do edificado em análise.....	84
Quadro 6.24 – Valor de R_w dos pavimentos em análise, obtidos pelo método de Sharp	84
Quadro 6.25 – Cálculo do valor de $D_{nT,w}$ teórico.....	85
Quadro 6.26 – Parâmetros para o cálculo de $L'_{nT,w}$ segundo o modelo simplificado da EN 12354-2 ..	85
Quadro 6.27 – Valores de $L_{n,w,eq}$, $L'_{n,w}$ e $L'_{nT,w}$ para todos os edifícios	86
Quadro 6.28 – Valores medidos <i>in situ</i> e calculados pelos modelos teóricos	86
Quadro 7.1 – Comparação dos valores dos índices $D_{nT,w}$ e $L'_{nT,w}$ com os índices expressos no RRAE	90
Quadro 7.2 – Valores medidos <i>in situ</i> e calculados pelos modelos teóricos	93
Quadro 7.3 – Nível sonoro produzido pela máquina de percussão no compartimento emissor e verificação segundo a expressão 6.5	95

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

A – Absorção sonora equivalente (m^2)

ARU-CHP – Área de reabilitação urbana do centro histórico do Porto

c – celeridade (m/s)

c_L – velocidade de propagação das ondas longitudinais dos materiais (m/s)

CRUARB – Comissariado para a renovação urbana da área de Ribeira/Barredo

d – espessura da caixa de ar (m)

D – Isolamento sonoro bruto (dB)

D_{nT} – Isolamento sonoro a sons de condução aérea, normalizado (dB)

$D_{nT,w}$ – Isolamento sonoro a sons de condução aérea, padronizado (dB)

E – Módulo de elasticidade (GPa)

$E_{\text{absorvida}}$ – Energia absorvida

$E_{\text{incidente}}$ – Energia incidente

EUROCONSTRUCT – Grupo europeu que analisa o setor da construção

EUROSTAT – Direção geral de estatísticas da educação e ciência

f – Frequência (Hz)

f_c – Frequência crítica (Hz)

FDZHP – Fundação para o desenvolvimento do centro histórico do Porto

Hz - Hertz

I – Intensidade sonora (W/m^2)

$I_{\text{incidente}}$ – Energia incidente

$I_{\text{transmitida}}$ – Energia transmitida

I_0 - Intensidade sonora de referência (W/m^2)

K – Correção para a transmissão de ruídos de percussão

L_b – Nível sonoro do ruído de fundo (dB)

L_p – Nível de pressão sonora (dB)

L_i – Nível de pressão sonora (dB)

L_I – Nível de intensidade sonora (dB)

L_{eq} – Nível de pressão sonora contínuo equivalente (dB)

L_{sb} – Nível sonoro do sinal e do ruído de fundo combinados (dB)

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

$L'_{nT,w}$ – Nível sonoro de percussão normalizado (dB)

- $L_{n,w,eq}$ – Nível de pressão sonora equivalente a sons de percussão (dB)
- L_w – Nível de potência sonora (dB)
- L_{1i} – Nível sonoro produzido pela máquina de percussão no compartimento emissor (dB)
- L_{2i} – Nível sonoro produzido pela máquina de percussão no compartimento recetor (dB)
- ΔL_w – Eficácia do revestimento (dB)
- m' – Massa por unidade do elemento (kg/m^2)
- m_i – Massa superficial (kg)
- m'_0 – massa de referência por unidade de área (kg/m^2)
- NRC – Noise reduction coefficient
- p – Pressão sonora (Pa)
- p_0 – Pressão sonora de referência (Pa)
- r – distância (m)
- R – Redução sonora (dB)
- RD – Reclamações/Denúncias
- RRAE – Regulamento dos requisitos acústicos dos edifícios
- S – Superfície do elemento de separação (m^2)
- T – Temperatura (K)
- T – Período (s)
- T – Tempo de reverberação (s)
- UNESCU – Organização das nações unidas para a educação, a ciência e a cultura
- V – Volume (m^3)
- W – Potência sonora (W)
- W_0 – Potência sonora de referência (W)
- α – Coeficiente de absorção sonora
- ρ – Densidade (kg/m^3)
- λ – Comprimento de onda (m)
- τ – Coeficiente de transmissão
- η - Fator de perdas internas
- ∇^2 – Operador de Laplace

1

INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

“Os indicadores hoje são muito positivos. 2014 foi o melhor ano de reabilitação urbana no Porto e em particular no centro histórico (...)” disse o presidente do Conselho de Administração da Porto Vivo aquando da revelação da subida de 70%, em área, na reabilitação urbana na cidade do porto em 2014 face ao ano anterior. Como se observa existe uma crescente preocupação com a reabilitação dos edifícios em geral, algo que não sucedia há alguns anos atrás em que a reabilitação em Portugal no ano de 2002 representava cerca de 6% segundo dados do EUROCONSTRUCT face à média europeia de 40% da indústria da construção [1].

Em Portugal usava-se cada vez menos e destruía-se sistematicamente o parque habitacional antigo [1] o que levou a uma degradação e abandono da maioria dos centros urbanos. São algumas as justificações para o abandono da maioria dos centros urbanos a ideia de que é necessário um gasto económico maior para as ações de reabilitação do que para a construção nova, o facto de os edifícios tradicionais deixarem de cumprir as exigências necessárias de conforto e o facto de que o processo de reabilitação é um processo intrusivo. A reabilitação surge como um meio fundamental para a sustentabilidade dos edifícios existentes e para salvaguarda do património urbano.

Segundo a Câmara Municipal de Lisboa “A reabilitação é a intervenção destinada a conferir adequadas características de desempenho e de segurança funcional, estrutural e construtiva a um ou a vários edifícios, às construções funcionalmente adjacentes incorporadas no seu logradouro, bem como às frações eventualmente integradas nesse edifício, ou a conceder-lhes novas aptidões funcionais, determinadas em função das opções de reabilitação urbana prosseguidas, com vista a permitir novos usos ou o mesmo uso com padrões de desempenho mais elevados, podendo compreender uma ou mais operações urbanísticas” [2]. Só é possível reabilitar se houver respeito total pelo edifício e pelo passado.

Segundo uma publicação da Porto Vivo SRU “ em 2008, cerca de 32% dos imóveis integrantes da ARU-CHP encontrava-se em mau estado de conservação e apenas 25% do edificado era classificado como estando em bom estado. Em 2013 a ARU-CHP apresenta 32% do edificado em bom estado e 21% em mau estado.”[3]. Verifica-se que existe um aumento das preocupações com a reabilitação dos edifícios que está vigente no aumento da percentagem de imóveis reabilitados entre 2008 e 2013.

Como referido, a reabilitação deve adaptar o edifício para exigências atuais que definem a qualidade do uso. Uma das exigências fundamentais é a acústica de edifícios que constitui uma melhoria na qualidade de vida dos ocupantes. O presente trabalho recai sobre a caracterização acústica de um elemento construtivo de um edifício tradicional do Porto, a casa burguesa.

1.2 ÂMBITO E OBJETIVOS

É cada vez maior a preocupação com o conforto acústico, fato que se averigua pelo aumento de regulamentação referente à acústica em Portugal.

O desenvolvimento deste trabalho incide sobre o estudo de um elemento construtivo de uma habitação tradicional do Porto, o pavimento. Entende-se por edifícios tradicionais todos aqueles que foram construídos antes da generalização do betão armado [4]. Como são cada vez maiores as exigências aplicadas aos vários tipos de edificações, incluindo os edifícios reabilitados, e como é difícil para estes responder às exigências mantendo as suas características históricas é necessário procurar novas soluções tecnológicas que se adaptem ao edifício sendo o mínimo intrusivas possíveis para que sejam mantidas as características originais mas com um desempenho adequado aos dias de hoje.



Figura 1.1 – Edifícios típicos do Porto [5]

Surge assim o objetivo de caracterizar o comportamento acústico de pavimentos de edifícios tradicionais e estudar o seu desempenho face às exigências acústicas que se encontram em vigor na legislação portuguesa atual.

Esta investigação pretende determinar o comportamento acústico de pavimentos típicos da casa burguesa portuense relativamente ao isolamento a ruídos de percussão, através da determinação do parâmetro do isolamento sonoro a sons de percussão ($L'_{nT,w}$), e ao isolamento a sons aéreos, através do parâmetro do isolamento sonoro a sons aéreos ($D_{nT,w}$), avaliando também a eficácia de soluções que se podem adotar para melhoramento do comportamento acústico. Neste sentido vai-se proceder a medições *in situ* de pavimentos da casa burguesa que apresentam as soluções construtivas originais da construção. Estes dados irão ser comparados com os obtidos por métodos de cálculo teóricos existentes para estes tipos de pavimentos, podendo assim verificar se estes modelos estão próximos dos valores reais o que permitirá saber a veracidade destes métodos.

Esta investigação pretende responder às questões “É possível garantir o conforto acústico mantendo as soluções tradicionais?”, “É necessário fazer novo em vez de reabilitar e conservar o património que temos para garantir este conforto?”, “É competitiva a reabilitação face a construção nova?”. Pretende-se analisar se o uso das soluções tradicionais, sendo estas menos intrusivas, respondem bem às exigências atuais e se se revelam competitivas.

1.3 CONTRIBUTO HISTÓRICO E CULTURAL

“Não devemos também esquecer que ao reabilitar esse património edificado estamos a contribuir para a preservação de uma herança cultural, que não pode nem deve ser negligenciada, bem como contribuir para um futuro mais sustentável, pela otimização da mobilidade e das infraestruturas já existentes” Vasco Freitas em Manual de apoio ao projeto de manutenção e reabilitação de edifícios [6].

Como podemos observar é de grande importância a reabilitação para a preservação de toda herança cultural do património edificado, algo que ganha mais importância ainda na cidade do Porto depois do seu centro histórico ter sido classificado pela UNESCO como Património Mundial desde 1996 [7].

O centro urbano da cidade do Porto sofreu uma desertificação devido à revolução industrial em que viu a sua população a se transferir para a periferia devido aos baixos custos de habitação e ao surgimento de linhas de comunicação que facilitavam os movimentos pendulares desta população que trabalhava no centro. Isto conduziu a que a população do centro da cidade para além de ser reduzida fosse cada vez mais envelhecida e também levou ao abandono da maioria das habitações no centro de cidade.

Para que a população na atualidade volte a habitar estas casas do centro do Porto é necessário reabilitá-las dotando-as de condições que garantam o conforto dos utentes.

Durante o século XIX houve um conjunto de transformações no edificado que levou à sobreocupação humana, à desintegração social e degradação física das habitações que se manteve até 1970. Entre 1950 e 1960 optava-se por uma total demolição das áreas degradadas em vez da reabilitação. Em 1960 sob a orientação do arquiteto Fernando Távora constituiu-se um grupo de trabalho que publicou um relatório em 1969 com possíveis propostas que visavam a renovação urbana do Barredo. No entanto com a revolução de 25 de Abril de 1974 o centro histórico do Porto que passou a ser encarado como um valor patrimonial global com valores históricos, arquitetónicos e como uma realidade social e cultural. Em consequência deste novo enquadramento foi criado nesse ano o CRUARB que sobre a dependência do poder central iniciou, quase imediatamente, os trabalhos de reabilitação. O CRUARB ficou sob a tutela do município do Porto em 1982 sendo renomeado em 1985 como Direção do Projeto Municipal de Renovação Urbana do Porto. No início de 1990 constituiu-se a FDZHP, fundação para o desenvolvimento do centro histórico do Porto, instituição de utilidade pública apoiada financeiramente pelo município e pelo governo, que juntamente com o CRUARB promove a recuperação urbana. Em 1993 o CRUARB dirige os trabalhos para o Bairro da Sé, onde se acentua a degradação física e social, criando um “projeto-piloto Urbano do Bairro da Sé” que tinha como um dos objetivos a conservação do património e dos bens culturais. Em 2003 o CRUARB acabou por se dissolver e a FDZHP acabou por se extinguir em 2007 devido a questões levantadas sobre o retorno do investimento. A recuperação física do centro histórico passou a ser assumida pela Porto Vivo – Sociedade de reabilitação urbana da Baixa do Porto (SRU), baseando-se num modelo de incentivo privado criada em 2004 [8].

Esta atuação na reabilitação tem contribuído para a preservação do património, para uma migração das pessoas para o centro da cidade e para um aumento do turismo. *“A recuperação dos edifícios da cidade é outro dos pontos que mais tem contribuído para a afirmação do Porto enquanto destino de turistas e, também, de investimento. Melchior Moreira defende mesmo que a aposta na recuperação e revitalização urbana tornou “a cidade mais viva, colorida e atrativa”, contribuindo para que o Porto se transformasse numa “das mais apetecíveis cidades europeias”* [9].

1.4 A IMPORTÂNCIA DA ACÚSTICA

O conforto acústico é muito importante para garantir a qualidade de vida das pessoas. Este conforto é conseguido quando existe ausência de ruído, qualidade e níveis adequados de sons desejáveis. No entanto a definição do que é ruído é muito subjetiva, o que para uma pessoa pode ser ruído para outra pode já não o ser. Apesar desta avaliação subjetiva há a necessidade de salvaguardar o conforto mínimo que é desejável para o ser humano.

Segundo o Jornal de Notícias de 27/04/2011 *“As pessoas, quando estão expostas a determinado nível de ruído que se torna incomodativo e que é agressivo, sentem-se irritadas e isso vai perturbar a sua dinâmica funcional”, salientou à agência Lusa Jorge Patrício.*”

“Além do aumento da irritabilidade e da perda de audição, as consequências para a saúde passam também por perturbações do sono e, "eventualmente", questões de natureza cardíaca, segundo o especialista.”

“De um ponto de vista médio, podemos dizer que cerca de 40 por cento da população está exposta a níveis de ruído ambiente não considerados adequados para a saúde, durante o período diurno. Durante o período noturno, será da ordem dos 30 a 35 por cento”, especificou.”

Jornal de notícias 27/04/2011 [10].

Podemos notar por esta notícia que a acústica pode trazer muitos problemas ao quotidiano das pessoas que não passam só pela incomodidade desse ruído. A constante e elevada exposição a níveis de ruído não recomendado leva a um dos principais problemas, a perda de audição. No entanto existem muitos outros efeitos, físicos e psicológicos, que surgem como reação do corpo humano a esse elevado ruído alguns dos quais estão presentes no quadro 1.1 . Estes efeitos surgem normalmente quando o ruído ultrapassa os 70 ou 75 dB [11].

Quadro 1.1 – Efeitos do ruído

Nível físico	Nível psicológico
Zumbido nos ouvidos	Irritação
Perturbação da circulação sanguínea	Stress
Aumento do ritmo cardíaco	Incomodidade
Fadiga	Ansiedade
Aumento da produção de adrenalina e corticotrofina	Menor concentração

São várias as notícias que podemos ver publicadas que mostram os problemas que podem surgir devido ao excesso de ruído. Uma notícia do Jornal de notícias de 25/01/2009 [12] revela que uma “Vizinhaça barulhenta gera 25 queixas por mês”.

“A Câmara de Matosinhos recebe, todos os anos, centenas de reclamações de moradores devido ao ruído de vizinhos, estabelecimentos noturnos e de restauração, obras de construção ou festividades. Em 2008 houve 294 queixas.”

“O número varia de ano para ano - em 2006 foram 275 e em 2007 chegaram aos 307. No ano passado, a maioria dos processos (190) teve origem no ruído provocado por restaurantes e bares.”

Pela figura 1.3 observamos que na região Norte o distrito do Porto assim como o de Vila Nova de Gaia, Santa Maria da Feira e Braga apresentam o maior número de processos submetidos seguidos de Matosinhos, Gondomar e Vila Nova de Famalicão.

Segundo dados do EUROSTAT 2013 Portugal é um dos países onde a população mais se incomodou com o ruído. O número de cidadãos expostos ao ruído face à média dos países da União Europeia é maior verificando-se um ligeiro decréscimo, ao longo dos anos, da população afetada.

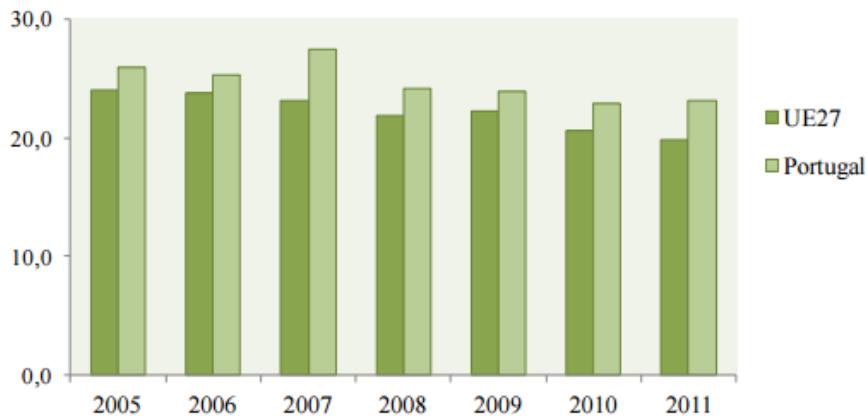


Figura 1.4 – População que vive em agregados familiares que refere a existência de ruído vindo dos vizinhos ou da rua, dados EUROSTAT 2013 [14]

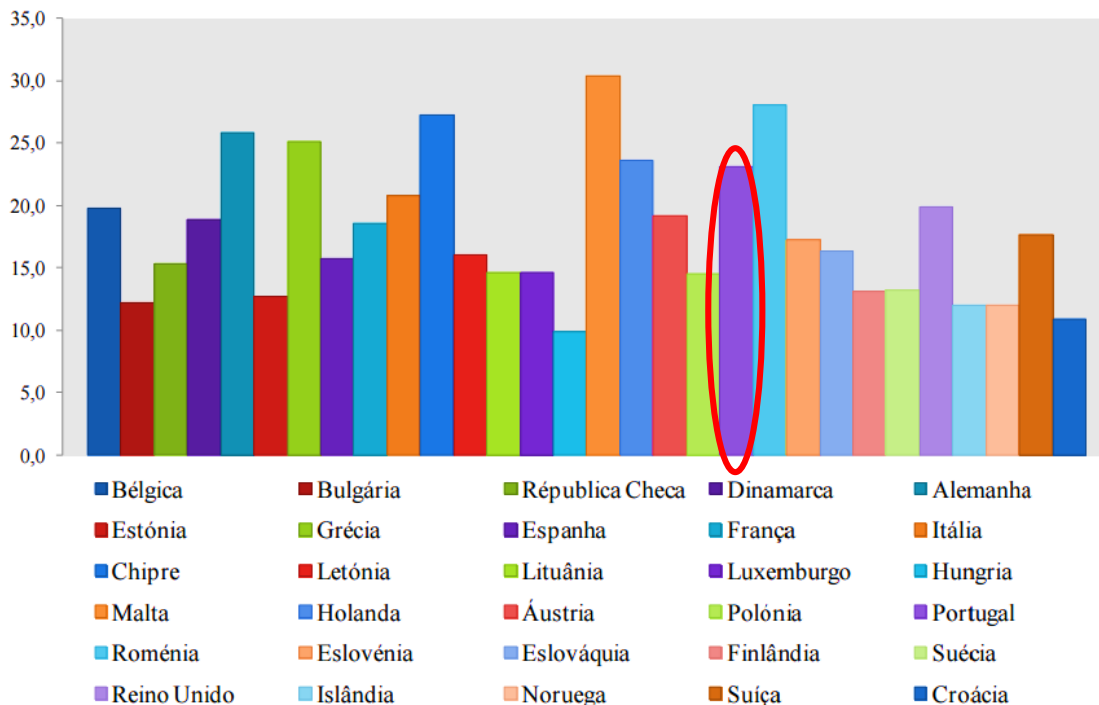


Figura 1.5 – População que vive em habitações e se importa com o ruído em 2011, dados EUROSTAT 2013 [14]

Urge assim a necessidade de implementar medidas que possam melhorar o conforto acústico como a criação de legislação mais eficaz.

1.5 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Para concretizar os objetivos propostos para a elaboração desta dissertação, a caracterização acústica a sons aéreos e de percussão dos pavimentos da casa burguesa portuense, organizou-se o trabalho em 7 capítulos, divididos em subcapítulos, bibliografia e anexos. Estes capítulos são organizados sequencialmente de forma a responder à problemática abordada.

No *Capítulo 1* faz-se uma pequena introdução ao tema a desenvolver dando a conhecer a motivação da escolha deste, descreve-se o âmbito e os objetivos a atingir por parte desta investigação e o contexto histórico e cultural em que se insere.

No *Capítulo 2* faz-se referência à evolução do estado da arte fazendo um enquadramento sobre a evolução da acústica no Mundo e em Portugal fazendo-se referência à evolução dos regulamentos apresentando as suas imposições atuais. Fala-se também sobre o som caracterizando-o e falando sobre as primeiras origens da acústica.

No *Capítulo 3* faz-se referência aos parâmetros acústicos mais importantes numa caracterização acústica dando ênfase ao parâmetro de medição do isolamento sonoro a sons de percussão ($L'_{nT,w}$) e ao parâmetro do isolamento sonoro a sons aéreos ($D_{nT,w}$). Fala-se sobre os métodos teóricos existentes para a estimação destes parâmetros em pavimentos de madeira e sobre estudos que se têm vindo a desenvolver nesta área.

No *Capítulo 4* faz-se uma descrição do edifício da baixa do Porto, a casa burguesa, fazendo a descrição da topologia construtiva, refere-se materiais utilizados, os diferentes elementos constituintes e uma descrição mais detalhada do elemento em estudo, pavimento.

No *Capítulo 5* faz-se as descrições relativas à análise experimental *in situ* e aos modelos teóricos do objeto em estudo fazendo a descrição dos ensaios e dos parâmetros envolvidos e faz uma descrição dos locais de ensaio.

No *Capítulo 6* apresenta-se os resultados dos ensaios assim como os métodos de cálculo utilizados decorrentes dos ensaios *in situ* e dos modelos teóricos de cálculo do pavimento a estudar e de soluções acústicas que podem ser adotadas.

No *Capítulo 7* apresenta-se a conclusão onde se faz referência às conclusões obtidas discutindo-se os resultados obtidos e propondo possíveis aplicações e possibilidades de desenvolvimento futuro a usar nos edifícios a reabilitar no Porto.

2

EVOLUÇÃO DA ACÚSTICA

2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo pretende dar a conhecer a origem da acústica através de um enquadramento histórico referindo os nomes que mais contribuíram para o seu desenvolvimento e a evolução da legislação em Portugal referindo a maior importância dada a esta ciência.

2.2 HISTÓRIA DA ACÚSTICA

A palavra *Acústica* tal como a conhecemos surgiu em latim no ano de 1623 pelo Sir Francis Bacon sendo traduzida para Inglês em 1640 por G.Watts. Só mais tarde em 1784 surge a palavra em Português. Apesar do nome em si ter surgido nesta altura já há muito tempo se falava do conceito.

Os mais antigos registos acústicos relacionam-se com instrumentos musicais ou origens filosóficas da origem e propagação do som [11]. Pode ser observado em algumas pinturas da civilização egípcia já o uso de instrumentos musicais. Um exemplo é a pintura do túmulo de Nacht, da necrópole de Tebas, 1350 a.C. que mostra os músicos da época a tocar instrumentos.

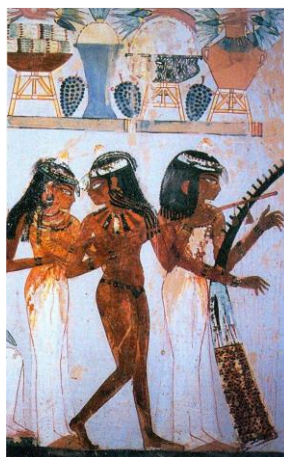


Figura 2.1 – Túmulo de Nakht [15]

No século VI a.C. Pitágoras, filósofo e matemático grego, queria saber o porquê de algumas combinações de sons musicais serem mais agradáveis do que outras. As pesquisas, que consistiam na

vibração de cordas esticadas, levadas a cabo por ele levaram ao surgimento das primeiras séries harmônicas, representação do som numa escala. No entanto Aristóximo, 360-300 a.C., filósofo grego, filho de Spintaro que tinha sido discípulo de Sócrates, distancia-se da teoria de Pitágoras ao afirmar que as notas não deviam ser avaliadas por modelos matemáticos mas sim pelo ouvido [15].

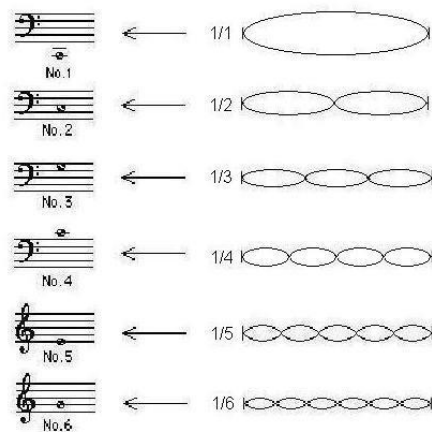


Figura 2.2 – Série harmônica [16]

A passagem do estudo da acústica para os edifícios dá-se por volta de 20 a.C. com o engenheiro e arquiteto Romano Vitruvius surgindo as preocupações com a acústica arquitetônica. No 5º livro da sua obra *De architectura* é analisado a descrição do som comparando as ondas sonoras com as ondas produzidas em meio aquático. Faz também uma descrição de medidas que podem ser adotadas nos teatros romanos para melhorar a sua acústica como as disposições das bancadas de forma ascendente por forma a evitar a deterioração do som e a colocação de vasos de bronze, vasos acústicos, que teriam um funcionamento semelhante aos ressoadores atuais. Pressupõe-se através disto que Vitruvius já teria algum conhecimento sobre reverberação [17]. Apesar deste conhecimento a palavra reverberação com sentido acústico só viria a surgir em 1388 em *Os Contos de Canterbury* de Chouser [11].

Só mais tarde em 1636 é que surgem novos desenvolvimentos nesta área. Galileu disse que “*As ondas são produzidas pela vibração de um corpo sonoro, que se espalham no ar, levando ao tímpano no ouvido um estímulo que o cérebro interpreta como um som*” o que levou ao aparecimento da psicoacústica. Marin Mersenne, denominado como o pai da acústica, foi um matemático, teórico musical, padre mínimo, teólogo e filósofo francês [18], que tinha um grande interesse pela música, motivo pelo qual dedicou muito do seu tempo a pesquisas relacionadas com a acústica e à determinação da velocidade de propagação do som no ar. Mersenne foi responsável pela explicação de fenómenos como o eco e a ressonância. Em 1687 Newton determina teoricamente o valor da velocidade do som no ar [15].

No século XVIII desenvolvem-se estudos com base mais teórica devido às novas tecnologias de cálculo. No século seguinte, XIX, surgem como nomes mais sonantes, Helmholtz (1821-1894), importante no desenvolvimento de frequência de ressonância de cavidades inventando o *ressoador de Helmholtz* e Lord Rayleigh que publicou em 1871 *The theory of sounds* uma obra de grande importância para o domínio da acústica onde, entre outras coisas, refere o conceito de impedância acústica, organiza a teoria de vibrações e generaliza a lei de reciprocidade formulada por Helmholtz [15].

No início do século XX nasce a acústica de edifícios com o físico americano Wallace Clement Sabine. Ele contribuiu para a determinação experimental da relação entre a qualidade acústica, o tamanho e a quantidade de superfície de absorção presentes numa sala. Desta relação surgiu a definição de tempo de reverberação, um dos parâmetros mais importantes para avaliar a qualidade acústica de uma sala, que é possível determinar através da fórmula de Sabine (2.1).

$$T(s) = \frac{0.16V}{A} \quad (2.1)$$

Neste século ocorreram grandes avanços na acústica, principalmente a nível tecnológico. A instrumentação da acústica começa em 1905 com a invenção do díodo e do tríodo, George W. Pierce inventa em 1908 o primeiro sonómetro, instrumento que mede níveis de pressão sonora, segue-se o microfone atual em 1917 seguido dos auscultadores em 1920. Em 1980 surgem os primeiros programas de acústica. Entre 1960 e 1970 surge a acústica arquitetónica de grandes salas de concertos e já na última década deste século surgem as primeiras aplicações antirruído [11].

Atualmente a acústica subdivide-se em várias áreas [11]:

- Bioacústica;
- Psicoacústica;
- Acústica musical;
- Acústica de edifícios;
- Acústica subaquática;

2.3 O SOM

2.3.1 ORIGEM DO SOM

A acústica é o ramo da Física que analisa e estuda as ondas sonoras. Estas ondas sonoras surgem quando fazemos vibrar um objeto que faz oscilar as partículas do ar que o rodeiam, que se comprimem e dilatam, dando origem ao som que ouvimos. O som é uma sensação provocada no cérebro devido às variações de pressão que se propagam no ar e são captadas pelo ouvido. Sendo assim só existe som se existir no local um ser vivo com sistema auditivo, se não teremos só alterações de pressões do meio circundante [11].

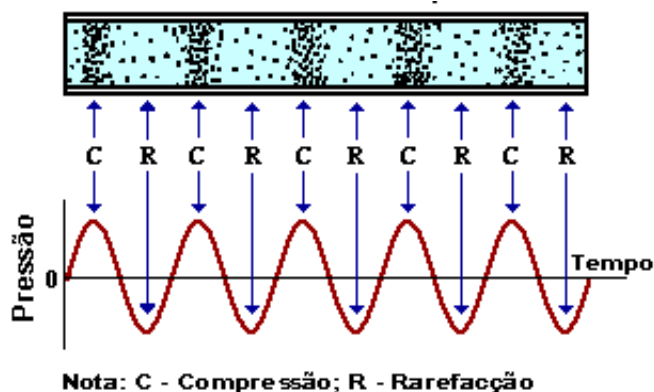


Figura 2.3 – Propagação do som [19]

No entanto nem todo o Som é um “som” dependendo do significado que este tem para o ouvinte. Trata-se de um som quando é agradável ou com significado para o ouvinte. Quando tal não se sucede, ou seja, é desagradável ou sem significado denomina-se de Ruído [11]. É a geração de ruído que nos interessa estudar e limitar para ser possível ter um melhor conforto acústico.

O próprio som pode distinguir-se em dois tipos, som puro ou simples e som complexo ou composto. Os primeiros sons são aqueles associados a uma única frequência enquanto os segundos são o resultado da sobreposição de dois ou mais sons puros. São estes últimos que são mais correntes.

2.3.2 PROPAGAÇÃO DO SOM

Como já referido o som propaga-se no ar e tem origem num ponto onde é alterada a pressão transmitindo esse estímulo às partículas adjacentes. Essas partículas colidem umas com as outras mas não se deslocam permanentemente, têm um comportamento idêntico a uma boia de pesca num lago que é excitado num ponto fazendo com que esta boia só se desloque na vertical.

A lei de propagação das ondas sonoras pode ser deduzida matematicamente para um meio ilimitado, homogêneo e não dissipativo usando os princípios fundamentais da mecânica. São três os princípios utilizados:

- Lei das transformações adiabáticas;
- Segundo princípio fundamental da mecânica (“a resultante das forças aplicadas a um corpo é igual à variação da quantidade de movimento por unidade de tempo” [11]);
- Princípio da continuidade (a massa de um volume deformável deve permanecer constante).

Com a sua conjugação temos a lei geral de propagação das ondas de pressão sonora (2.2).

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.2)$$

∇^2 – Operador de Laplace

c – celeridade ou velocidade de propagação das ondas no meio

T – temperatura (K)

$$c = 20,045 \sqrt{T} \quad (2.3)$$

Existem outros fatores que são analogamente importantes na propagação do som como a intensidade (I) e a potência sonora (W).

A intensidade sonora é a quantidade de energia que atravessa por segundo uma área de 1 m² normal à direção de propagação. Já a potência sonora (W) é a energia total que num segundo atravessa uma esfera fictícia de raio qualquer centrada na fonte [11]. É possível encontrar uma relação entre estas grandezas e a pressão sonora.

$$I = \frac{W}{4 \times \Pi \times r^2} = \frac{p^2}{\rho \times c} \quad (2.4)$$

I – intensidade sonora (W/m²)

W – potência sonora (W)

r – distância (m)

p – pressão sonora (Pa)

ρ – massa volúmica (Kg/m³)

c – celeridade (m/s)

O denominador $\rho \times c$ é denominado por impedância e tem como unidade o *rayl*. Usualmente toma o valor de 400 rayl (N.s/m³).

2.3.3 PROPRIEDADES DO SOM

O som pode ser estudado como fenómeno ondulatório, como já foi referido. Existem parâmetros que caracterizam a onda sonora tais como a amplitude, frequência, comprimento de onda e período.

O quadro seguinte faz referência a estes aspetos onde se definem os parâmetros de medida, as suas equações matemáticas e as unidades.

Quadro 2.1 – Parâmetros caracterizadores de uma onda sonora

Parâmetro	Símbolo	Equação	Unidade	Descrição
Amplitude	A	-	Pascal (Pa)	Diferença entre o valor máximo e médio de pressão ao longo do tempo num ponto do espaço.
Frequência	f	(2.5)	Hertz (HZ)	Número de ciclos da variação da pressão por segundo.
Comprimento de onda	λ	(2.5)	metros (m)	Distância percorrida pela onda de pressão sonora
Período	T	(2.6)	segundos (s)	Tempo necessário para que o ciclo da onda se repita

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (2.5)$$

f – frequência (Hz)

c – velocidade do som (m/s)

λ – Comprimento de onda (m)

$$T = \frac{1}{f} \quad (2.6)$$

T – período

Como podemos ver pela equação (2.5) existe uma relação entre a frequência e o comprimento de onda. Já na equação (2.6) existe uma relação entre o período e a frequência.

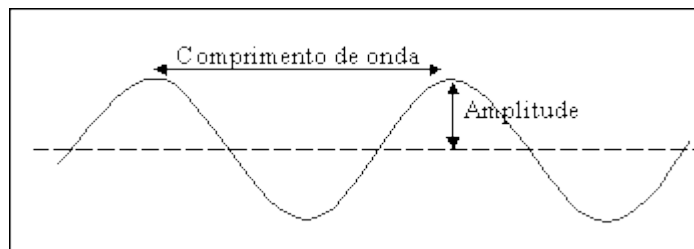


Figura 2.4 – Representação de uma onda onde se apresenta a definição de comprimento de onda e amplitude

2.3.4 CARACTERIZAÇÃO DO SOM

O ser humano é capaz de ouvir na gama de frequências dos 20 Hz aos 20000 Hz perdendo com o tempo a sensibilidade para as altas frequências. Considerando um ser humano jovem este é capaz de distinguir variações de pressão num mínimo de 10^{-5} Pa, limiar da audição, e num máximo de 100 Pa, limiar da dor. O uso de uma escala linear em Pascal para medir pressões levava a valores muito diferentes e de uso não muito prático já para não salientar que a resposta do ouvido humano a estímulos não é linear mas sim de modo quase logarítmico. Por estes motivos usa-se uma escala logarítmica em decibéis, 1/10 do bel, que mede o nível de pressão sonora [11].

$$Lp = 20 \times \log \left(\frac{p}{p_0} \right) = 10 \times \log \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) \quad (2.7)$$

Lp – nível de pressão sonora (dB)

p – pressão sonora (Pa)

p_0 – pressão sonora de referência, 2×10^{-5} (Pa)

Assim como é possível determinar o nível de pressão sonora também é possível calcular outros níveis que se podem tornar úteis caso se tenha outros dados que não sejam as pressões. Temos então o nível de intensidade sonora (L_I) e o nível de potência sonora (L_W). Enquanto o primeiro nível depende do local em que fazemos as medições, podendo variar com a distância à fonte, o segundo já não. Este depende unicamente da fonte emissora.

$$L_I = 10 \times \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (2.8)$$

L_I – nível de intensidade sonora (dB)

I_0 – intensidade sonora de referência, 10^{-12} (W/m²)

$$L_W = 10 \times \log \left(\frac{W}{W_0} \right) \quad (2.9)$$

L_W - nível de potência sonora (dB)

W_0 – potência sonora de referência, 10^{-12} (W)

A fórmula apresentada em (2.7) permite transformar as pressões sonoras em níveis de pressão sonora. Isto leva a que a adição de níveis se faça de forma não algébrica segundo a expressão (2.10).

$$L_{soma} = 10 \times \log_{10} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \quad (2.10)$$

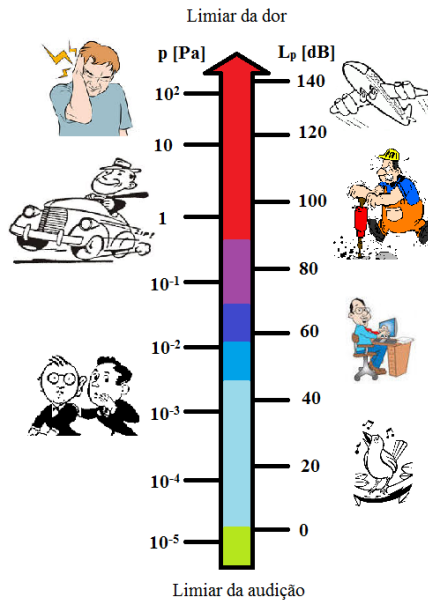


Figura 2.5 – Pressão sonora e níveis de pressão sonora

O ouvido humano não corresponde de forma linear às variações de frequências, desta forma, surgiu assim a representação das frequências na forma de oitavas. Nas bandas de oitavas as frequências são aproximadamente o dobro da que a antecede sendo cada banda associada à sua frequência central (f_0). Existe ainda a representação em bandas de 1/3 de oitava que apresentam uma menor largura de banda

do que as bandas de oitava. Para medir as pressões sonoras por frequências utilizam-se aparelhos designados sonómetros.



Figura 2.6 – Sonómetros digitais [20]

No entanto os aparelhos de medida não levavam em consideração a sensibilidade do ouvido humano para as baixas frequências. Adota-se então uma correção que vem combater esta lacuna. Foi adotada uma curva designada *Curva de ponderação A*. Apesar de existirem outras esta é a mais usada atualmente e vem corrigir a sensibilidade dos equipamentos tornando os resultados mais próximos da realidade. Com esta correção obtemos o nível sonoro. Estes valores podem ser representados em dB ou em dB(A) caso o nível sonoro seja representado respetivamente por L_A ou L.

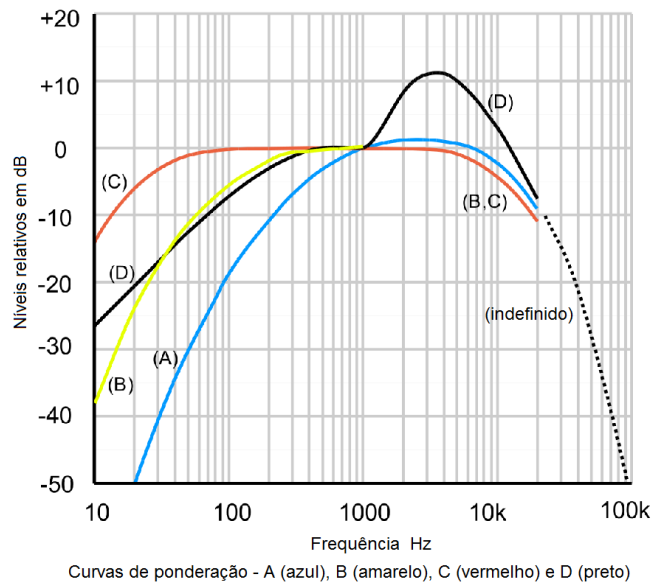


Figura 2.7 – Curvas de ponderação [21]

Quadro 2.2 – Valores numéricos da curva de ponderação A

Banda de frequência 1/1 oitava (Hz)	Filtro A para 1/1 oitava	Banda de frequência 1/3 oitava (Hz)	Filtro A para 1/3 oitava	Banda de frequência 1/1 oitava (Hz)	Filtro A para 1/1 oitava	Banda de frequência 1/3 oitava (Hz)	Filtro A para 1/3 oitava
31	-40	25	-44.7	1000	0	800	-0.8
		31	-39.4			1000	0
		40	-34.6			1250	0.6
63	-26	50	-30.2	2000	+1	1600	1
		63	-26.2			2000	1.2
		80	-22.5			2500	1.3
125	-15.5	100	-19.1	4000	+1	3150	1.2
		125	-16.1			4000	1
		160	-13.1			5000	0.5
250	-8.5	200	-10.9	8000	-1	6300	-0.1
		250	-8.6			8000	-1.1
		315	-6.6			10000	-2.5
500	-3	400	-4.8	16000	-7	12500	-4.3
		500	-3.2			16000	-6.6
		630	-1.9			20000	-9.3

O ruído é um fenómeno que se pode prolongar no tempo, por isso para representar um fenómeno sonoro no tempo é necessário ter um descritor que entre com este parâmetro. O *nível de pressão sonora contínuo equivalente* permite entrar com este fator. Define-se como o nível que se atuasse num dado intervalo de tempo, produziria a mesma quantidade de energia que o som que se pretende avaliar e obtém-se pela expressão (2.11)

$$L_{eq} = 10 \times \log \left[\frac{1}{T} \sum_{i=1}^N t_i \times 10^{\frac{L_i}{10}} \right] \quad (2.11)$$

L_{eq} – nível de pressão sonora continua equivalente

T – tempo total (minutos)

t_i – período de funcionamento (minutos)

L_i – nível de pressão sonora (dB)

2.3.5 TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Apesar de medirmos níveis de pressão sonora estes parâmetros não são por si só suficientes para a caracterização do isolamento sonoro. Este encontra-se dependente também das características do elemento recetor nomeadamente o tempo de reverberação (TR) e a absorção (A).

Quando se emite um som num determinado compartimento chegam ao recetor ondas diretas ou refletidas. As ondas diretas vão diretamente da fonte para o recetor, as ondas refletidas, como o próprio nome indica, só atingem o recetor depois de múltiplas reflexões nas superfícies do compartimento, chegando mais atrasadas e mais fracas do que as diretas devido às reflexões e à absorção do ar. Define-se então *tempo de reverberação* como o tempo que o nível de pressão sonora demora a decair 60 dB desde que a fonte sonora para de emitir [11].

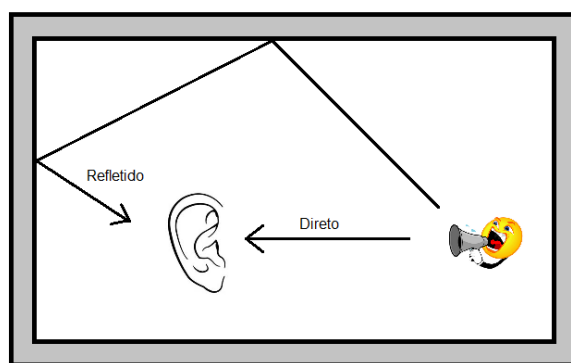


Figura 2.8 – Som direto e som refletido

O tempo de reverberação tem um duplo e contrário efeito numa sala, por um lado aumenta o nível sonoro devido ao acréscimo do som refletido ao som direto e por outro mascara os sons diretos devido à sobreposição do som refletido sobre o som direto.

Como já referido anteriormente, W.C. Sabine relacionou em 1898 o tempo de reverberação com o volume da sala e a absorção sonora. Esta fórmula ficou conhecida por *fórmula de Sabine* (2.1).

2.3.6 ABSORÇÃO

O tempo de reverberação está relacionado segundo a *fórmula de Sabine* com a absorção. Podemos definir absorção sonora como “ *a propriedade de certos materiais de poderem transformar parte da energia sonora que sobre eles incide em outra qualquer modalidade de energia, geralmente térmica*” [11]. Ao quociente entre a energia absorvida por um determinado material e a totalidade da energia incidente dá-se o nome de *coeficiente de absorção sonora* (α) [11].

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorvida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (2.12)$$

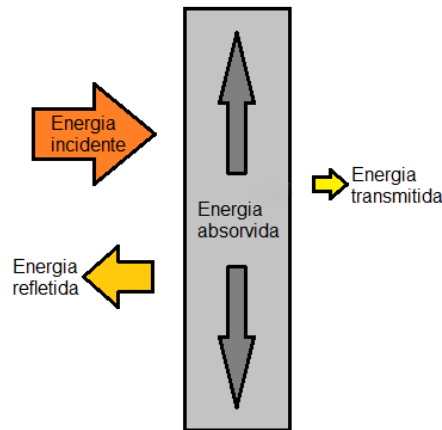


Figura 2.9 – Mecanismo de absorção sonora

Este coeficiente pode variar entre os valores 0, inexistência de absorção, e 1, absorção total. Quando o coeficiente toma valores superiores a 0.5 já se considera o material em causa um material absorvente. Este valor varia para um dado material em função do ângulo de incidência e com a frequência do som incidente [11].

Existem também outros parâmetros representativos da absorção de um material, o NRC, coeficiente de redução sonora (*Noise Reduction Coefficient*), e um parâmetro médio α_w . O NRC faz uma média aritmética dos valores do coeficiente de absorção nas frequências de 250 aos 2000 Hz. O α_w é obtido pelo ajuste ponderado de uma curva de referência usando as bandas dos 250 aos 4000 Hz, traça-se a curva dos valores do coeficiente de absorção do material fazendo de seguida a soma dos desvios positivos entre uma curva de referência móvel e os valores reais de modo que esta não ultrapasse 0.10 e o valor de α_w é lido para a frequência de 500 Hz na curva ajustada [11].

$$NRC = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}}{4} \quad (2.13)$$

Para determinar o coeficiente de absorção sonora de um material podemos fazê-lo segundo duas opções: O tubo de ondas estacionárias (ou tubo de *Kundt*) e o método da câmara reverberante.

O tubo de ondas estacionárias, figura 2.10 consiste num tubo metálico onde numa extremidade é colocada uma amostra do material a ensaiar, com 5 cm de raio, e na outra existe um altifalante perfurado no centro por onde passa um microfone preso a uma vareta que desliza sobre rodas. A onda emitida pelo altifalante interceta a onda que é refletida pelo material levando à criação de ondas estacionárias [11].



Figura 2.10 – Tubo de ondas estacionárias cedido por NI&DEA

Este método apresenta um pequeno defeito pois o coeficiente de absorção obtido corresponde unicamente a uma direção de incidência perpendicular ao material.

O método da câmara reverberante, figura 2.11, consiste numa sala com todas as superfícies refletoras sendo colocado no chão uma amostra do material a ser testado com dimensões entre os 11 e os 12 m². Comparando os tempos de reverberação da sala vazia e da sala com o material a estudar obtém-se pela fórmula de Sabine o coeficiente de absorção do material em análise.



Figura 2.11 – Câmara reverberante cedido por NI&DEA

Este método é mais eficaz do que o tubo de ondas estacionárias pois na câmara reverberante temos um campo sonoro difuso, o que leva a uma incidência sobre o material segundo vários ângulos.

2.4 EVOLUÇÃO DA LEGISLAÇÃO

2.4.1 EVOLUÇÃO DA LEGISLAÇÃO EM PORTUGAL

Desde o ano de 1987 que existe em Portugal um quadro legal relacionado com a proteção contra o ruído. Há 28 anos que existem preocupações sobre o ruído.

Em 1988 entrou em vigor a primeira legislação sobre o ruído, Decreto-Lei nº 251/87 de 24 de junho, Regulamento Geral sobre o Ruído, que abordava aspetos relacionados com a acústica de edifícios e o exercício de atividades comerciais. Esta legislação estabelecia limites a serem cumpridos nos novos edifícios relativamente a sons aéreos e de percussão. Era abordado também, mais superficialmente, requisitos acústicos para edifícios de escritórios. A caracterização para zonas urbanas era definida segundo 3 zonas: pouco ruidosa, ruidosa e muito ruidosa [22].

No ano de 2000 a regulamentação acústica divide-se em dois ramos, um relacionado com a acústica ambiental e outro com a acústica de edifícios. O primeiro ramo originou o Ruído Legal da Poluição Sonora, Decreto-lei n.º 292/2000 de 14 de novembro, já o segundo originou o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, decreto-lei n.º 129/2002 de 11 de maio [22].

A transposição para o direito interno da Diretiva Europeia sobre Gestão e Avaliação do Ruído Ambiente levou a que em 2006 existisse um processo de adaptação ao novo enquadramento legal imposto pela diretiva. Surgiu assim o Decreto-lei n.º 146/2006 de 31 de julho que tem por objetivo quantificar a redução do número de cidadãos expostos ao ruído na Europa [22].

Esta transposição para a diretiva levou a que tivessem de ser introduzidos novos indicadores de ruído ambiente, L_{den} e L_n , que levaram a uma atualização do Regulamento de Ruído Ambiente surgindo assim o Decreto-lei n.º 9 de 17 de janeiro denominado de Regulamento Geral do Ruído (RGR). Consecutivamente teve de se adaptar o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) através do Decreto-lei n.º 96/2008 de 9 de junho.

Apesar da evolução da legislação é facto que existem falhas quer nas matérias que aborda quer na sua aplicação. A 11 de Fevereiro de 2014 a TSF publicou uma notícia que dava conta de uma queixa da Quercus a Bruxelas sobre incumprimento da lei do ruído [23].

“A Quercus defende que está em causa a saúde pública e apresentou à Comissão Europeia uma queixa relacionada com o incumprimento da legislação sobre ruído em Portugal.”

“Os ambientalistas falam em risco de exposição a níveis elevados de ruído, prejuízos para a saúde e qualidade de vida, sobretudo nas grandes cidades. Em declarações à TSF, Mafalda Sousa explica que as pessoas podem não perceber, mas está em causa a saúde pública.”

“O ruído tem sido um problema ambiental sistematicamente esquecido pelas autoridades competentes e ignorado pelas populações, sobretudo nas cidades. As pessoas não reconhecem o ruído como um fator importante para a sua qualidade de vida e para a sua saúde”, explica.

“A legislação sobre ruído ambiente contempla duas fases, a primeira, a começar em 2006, ainda em incumprimento, e a segunda fase, a concretizar cinco anos depois, com atualização dos dados, também regista atrasos.”

“Os municípios do Porto, Matosinhos, Amadora, Oeiras e Odivelas ainda não entregaram os seus mapas à Agência Portuguesa de Ambiente (APA), exemplifica. (...)”

“Para a Quercus, os atrasos são responsabilidade de ambas as partes, tanto das entidades que têm obrigação de preparar os documentos, como da APA, na fase de aprovação.”

2.4.2 REGULAMENTO DOS REQUISITOS ACÚSTICOS DOS EDIFÍCIOS (RRAE)

O regulamento dos requisitos acústicos dos edifícios define valores do limite para o isolamento sonoro a sons aéreos e de percussão para pavimentos que separam dois compartimentos numa habitação.

É definido no RRAE no artigo 5º nas seguintes alíneas os valores regulamentares [24].

b) “O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{nT,w}$, entre compartimentos de um fogo, como locais emissores, e quartos ou zonas de estar de outro fogo, como locais receptores, deve satisfazer o seguinte: $D_{nT,w} \geq 50$ dB”

c) “O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{nT,w}$, entre locais de circulação comum do edifício, como locais emissores, e quartos ou zonas de estar dos fogos, como locais receptores, deve satisfazer o seguinte:

i) $D_{nT,w} \geq 48$ dB;

ii) $D_{nT,w} \geq 40$ dB, se o local emissor for um caminho de circulação vertical, quando o edifício seja servido por ascensores;

iii) $D_{nT,w} \geq 50$ dB, se o local emissor for uma garagem de estacionamento automóvel;”

d) “O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{nT,w}$, entre locais do edifício destinados a comércio, indústria, serviços ou diversão, como locais emissores, e quartos ou zonas de estar dos fogos, como locais receptores, deve satisfazer o seguinte: $D_{nT,w} \geq 58$ dB”

e) “No interior dos quartos ou zonas de estar dos fogos, como locais receptores, o índice de isolamento sonoro a sons de percussão, $L'_{nT,w}$, proveniente de uma percussão normalizada sobre pavimentos dos outros fogos ou de locais de circulação comum do edifício, como locais emissores, deve satisfazer o seguinte: $L'_{nT,w} \leq 60$ dB”

g) “No interior dos quartos ou zonas de estar dos fogos, como locais receptores, o índice de isolamento sonoro a sons de percussão, $L'_{nT,w}$, proveniente de uma percussão normalizada sobre pavimentos de locais do edifício destinados a comércio, indústria, serviços ou diversão, como locais emissores, deve satisfazer o seguinte: $L'_{nT,w} \leq 50$ dB”

Quadro 2.3 – Quadro síntese do RRAE [11]

Locais	$D_{nT,w}$ (dB)	$L'_{nT,w}$ (dB)
Entre compartimentos (emissão) e quartos/zonas de estar, de fogos diferentes	50	60
Entre quartos/zonas de estar (receção) e zonas comuns de circulação (emissão)	48 40 (com ascensores) 50 (com garagem)	60 -
Entre quartos/zonas de estar de fogos diferentes e locais destinados a indústria, comércio ou serviços ou diversão (emissão)	58	100 50 160

3

PARÂMETROS ACÚSTICOS QUE CARACTERIZAM OS PAVIMENTOS

3.1 INTRODUÇÃO

O estudo desta tese recai sobre o comportamento acústico de pavimentos estruturais de madeira e para tal vão ter de ser medidos parâmetros que permitam a caracterização do isolamento sonoro.

O isolamento sonoro caracteriza a redução do ruído entre dois locais adjacentes, o emissor, que pode ser um espaço interior ou exterior, e o recetor. No entanto a origem deste ruído pode ter diferentes origens, podendo ser ruídos de percussão ou ruídos de condução aérea. A diferença entre estes dois tipos de ruído está ao nível da forma de solicitação. Enquanto nos ruídos de percussão a transmissão é feita por solicitação mecânica direta da fonte sobre o elemento construtivo, nos ruídos da condução aérea a transmissão é feita unicamente pela vibração do ar [11].

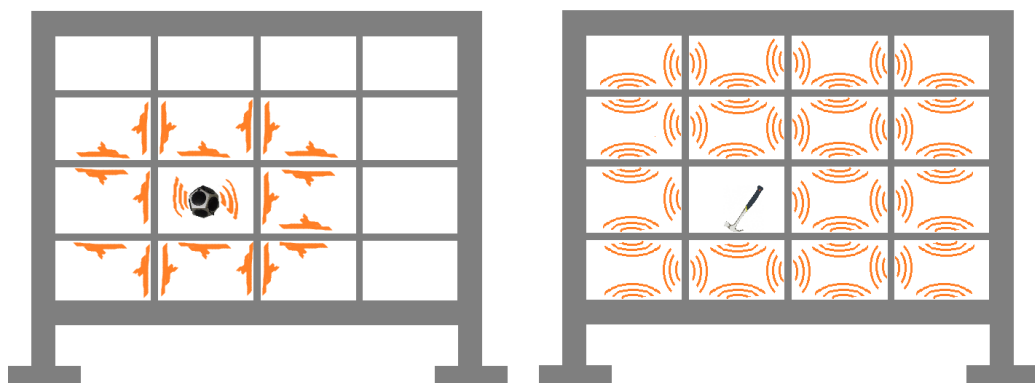


Figura 3.1 – Transmissão sonora de sons aéreos (esquerda) e de sons de percussão (direita)

Estes ruídos ainda se podem subdividir em duas formas de transmissão, por via direta ou por via marginal. Na primeira situação a transmissão da energia dá-se diretamente através do elemento que separa os compartimentos, enquanto na segunda situação a transmissão ocorre pelos elementos da envolvente do compartimento [11].

Na figura 3.2 podemos identificar a transmissão direta identificada por Dd e as transmissões marginais identificadas com Df , Ff e Fd . Quando as medições são realizadas *in-situ*, normalmente as transmissões marginais adquirem uma maior importância do que as por via direta, o que não se sucede em ensaios em

laboratório onde os compartimentos em análise são estruturalmente desligados sendo desprezáveis os caminhos marginais.

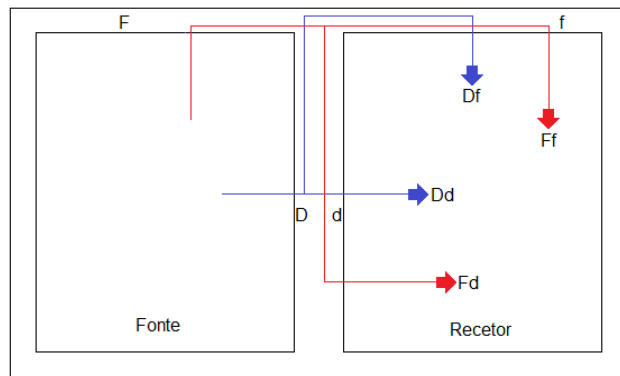


Figura 3.2 – Transmissões marginais (*in situ*)

3.2 ISOLAMENTO A SONS AÉREOS

Como já referido os sons aéreos são provenientes da excitação do ar. Estes podem ter origem no exterior (ruído de tráfego, entretenimento público) ou no interior (atividades dos ocupantes, ruído dos equipamentos).

As características do elemento separador dos compartimentos recetor e emissor, nomeadamente, a sua massa, rigidez e amortecimento interno, influenciam o isolamento a sons aéreos. Caso se pretenda aumentar o isolamento sonoro a sons aéreos existem dois grandes meios para atuar. Um consiste no aumento da massa do elemento e o outro na duplicação física do elemento, criando assim uma caixa-de-ar. Caso se pretenda um aumento mais significativo do isolamento sonoro a sons aéreos, principalmente em elementos leves, pode-se colocar material absorvente sonoro no espaço de ar [11].

O parâmetro usado para caracterizar o isolamento sonoro de um elemento é a redução sonora R em dB que se define como:

$$R = 10 \times \log \left[\frac{1}{\tau} \right] \quad (3.1)$$

τ – Coeficiente de transmissão

$$\tau = \frac{I_{transmitida}}{I_{incidente}} \quad (3.2)$$

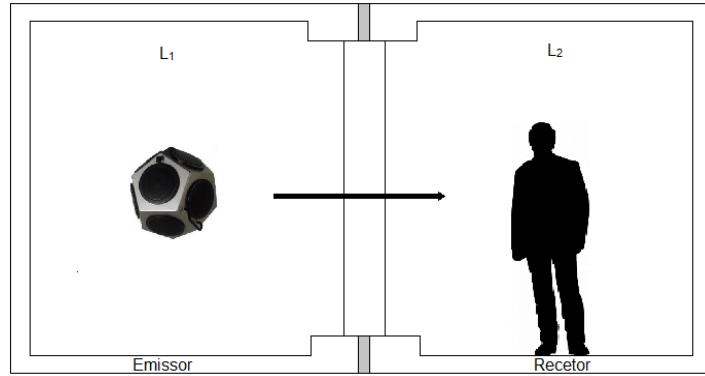


Figura 3.3 – Emissor e recetor (em laboratório)

Admitindo a existência de uma fonte sonora que tem um nível de pressão sonora L_1 que transmite para um local recetor originado neste uma pressão sonora L_2 é possível calcular o isolamento sonoro bruto, D , sem efeito das transmissões marginais, que se verifica nas medições em laboratório [11].

$$D = L_1 - L_2 \quad (3.3)$$

Caso sejam cumpridas condicionantes que a Norma NP EN 140-3 impõe é ainda possível relacionar o isolamento sonoro bruto com a redução sonora.

$$D = L_1 - L_2 = R + 10 \times \log\left(\frac{A}{S}\right) \quad (3.4)$$

A – área de absorção sonora equivalente existente no compartimento recetor (m^2)

S – superfície do elemento de separação (m^2)

Em casos de medições *in situ* podemos aplicar esta mesma expressão para o cálculo da redução sonora que neste caso se representa por R' dado existirem transferências marginais que já são contabilizadas.

$$D = L_1 - L'_2 = R' + 10 \times \log\left(\frac{A}{S}\right) \quad (3.5)$$

No entanto é feita uma correção a este índice sonoro. Como a medição *in situ* do isolamento sonoro tem em conta que nos edifícios para habitação mobilados, o tempo de reverberação é sensivelmente independente do volume e da frequência usa-se o isolamento sonoro padronizado D_{nt} normalizado para o tempo de reverberação T_0 [25].

$$D_{nT} = (L_1 - L'_2) + 10 \log \left(\frac{T}{T_0} \right) = R' + 10 \times \log \left(\frac{0.16V}{S \times T_0} \right) \quad (3.6)$$

T – tempo de reverberação do compartimento recetor (s)

T₀ – tempo de reverberação de referência; em edifícios destinados a habitação T₀ = 0.5 s

S – superfície do elemento de separação (m²)

V – volume do compartimento recetor (m³)

As medições *in situ* para determinar o parâmetro D_{nT} devem ser realizadas segundo a norma NP EN ISO 140-4. A partir dos valores de D_{nT} e usando a NP EN ISO 717-1 obtém-se um índice único de avaliação D_{nT,w}, índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea [25].

O valor de D_{nT,w} é obtido por ajuste entre uma curva de referência (CR) e os valores de D_{nT} por banda de frequência de modo que a soma dos afastamentos positivos ($\Delta = CR - D_{nT}$) a dividir pelo número de bandas de frequência seja o maior possível sem ultrapassar 2. Depois deste ajuste o valor de D_{nT,w} é o da curva ajustada para a frequência de 500 Hz [25].

3.3 ISOLAMENTO A SONS DE PERCUSSÃO

Os sons de percussão têm origem na solicitação mecânica direta da fonte sobre os elementos construtivos. Estes são em geral mais incomodativos do que os sons aéreos pois propagam-se a toda a estrutura do edifício devido à rigidez das ligações.

Ações como o bater de portas, queda de objetos, movimentação de pessoas, ações de choque no elemento construtivo como martelar, ou o funcionamento de equipamentos como sistemas de bombagem, ventoinhas, máquinas de lavar estão na origem do ruído de percussão.

Para se obter um grande efeito na redução da propagação de ruídos de percussão o aumento da massa do elemento construtivo não se revela eficaz pois este está mais ligado com a rigidez das ligações dos elementos construtivos. Uma forma mais eficaz para obter resultados desejados é atuar sobre os revestimentos tornando-os resilientes ou eliminando a continuidade entre elementos. Isto leva a uma redução da propagação do estímulo, dado que parte da energia será absorvida.

As medições do isolamento sonoro a ruídos de percussão têm uma diferença em relação às medições a sons aéreos. Enquanto nos sons aéreos se mede o isolamento sonoro por diferença dos níveis sonoros do emissor e recetor na percussão mede-se o nível sonoro perceptível no compartimento recetor.

Os ensaios de percussão, *in situ*, sob pavimentos são realizados sobre uma percussão normalizada em conformidade com a NP EN ISO 140-7. Depois de obtido o nível sonoro no recetor por banda de frequência, L'_{nT}, faz-se um ajuste de acordo com a NP EN ISO 717-2 com a curva de referência (CR) de modo que a soma dos afastamentos positivos ($\Delta = L'_{nT} - CR$) a dividir pelo número de bandas de frequência seja o máximo valor possível sem ultrapassar 2. Depois para a banda de frequência dos 500 Hz tira-se o valor de L'_{nT,w} que é o valor da curva ajustada nesta banda [26].

No caso de as medições serem efetuadas em terços de oitavas ao valor de L'_{nT,w} de bandas de oitavas deve-se subtrair o valor de 5.

$$L'_{nT,w}(\text{dB/terçooitava}) = L'_{nT,w}(\text{dB/oitava}) - 5 \quad (3.7)$$

3.4 MEDIÇÕES IN SITU

A determinação do isolamento sonoro a sons aéreos entre dois compartimentos é realizada tendo em conta os ensaios normalizados na NP EN ISO 140-4 por bandas de frequência de um terço de oitava entre as frequências centrais de 100 Hz a 3150 Hz.

O campo sonoro que se produz no emissor deve ter um espectro contínuo na gama de frequências, ruído rosa, com grande intensidade, normalmente 100 dB, não devendo apresentar diferenças de nível superiores a 6 dB entre bandas adjacentes de um terço de oitava. Deve estar garantido no compartimento recetor no mínimo um nível de pressão sonora 10 dB mais elevado do que o ruído de fundo em qualquer frequência [25].

A fonte sonora deve ser usada no mínimo em duas posições fazendo-se cinco medições, com um período por medição não inferior a 15 segundos, por cada posição de fonte com o sonómetro, tanto no compartimento emissor como no recetor [25].

O tempo de reverberação é medido 0.1s depois da fonte sonora, por exemplo, balão, deixar de emitir ou a partir de um nível sonoro inferior ao do início do decaimento. Devem ser feitas no mínimo 6 medições, 3 posições diferentes da fonte fazendo-se duas medições por cada posição [25].

Com este procedimento conseguimos determinar o isolamento sonoro padronizado, D_{nT} , que depois de ajustado à curva de referência nos dá o índice de isolamento sonoro a sons aéreos, $D_{nT,w}$ [25].

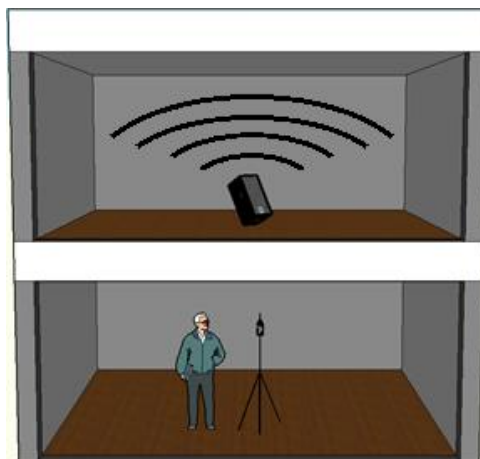


Figura 3.4 – Esquema da medição a sons aéreos

A medição do isolamento sonoro de ruídos de percussão é realizada tendo em conta os ensaios normalizados na NP EN ISO 140-7 por bandas de frequência de um terço de oitava entre as frequências centrais de 100 Hz e 3150 Hz [26].

Sobre o pavimento que se pretende avaliar é colocada a máquina de percussão normalizada que está equipada com 5 martelos alinhados de 500 g que caem de uma altura de 40 mm atingindo o pavimento a 0.033 m/s. A máquina de percussão deverá estar colocada a 45° com as nervuras das vigas. A fonte de

percussão deverá ser colocada em duas posições diferentes para as quais são realizadas 5 medições do nível de pressão sonora no recetor [26].

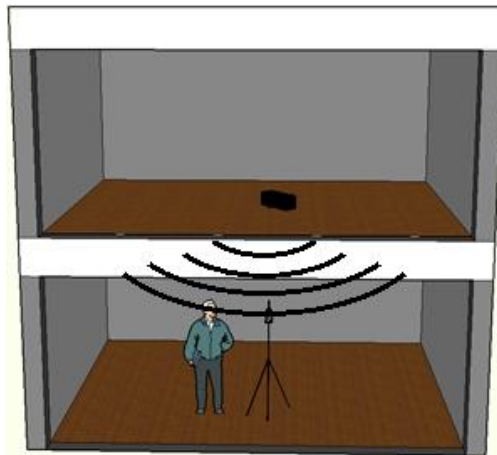


Figura 3.5 – Esquema da medição dos sons de percussão

Depois de determinado o ruído no compartimento recetor, L_i , obtém-se o nível de pressão sonora padronizado, L_{nT} , que será ajustado pela curva de referência obtendo-se o índice de isolamento sonoro a sons de percussão, $L_{nT,w}$ [26].

3.5 MODELOS TEÓRICOS

Existem vários modelos de cálculo teórico do isolamento a sons aéreos como o método de Bies e Hansel baseado num modelo proposto por Sharp para paredes simples ou duplas, o método de Josse e o método de Meisser. No entanto aqui só usaremos o modelo proposto por Sharp para paredes duplas e simples pois este modelo adequa-se ao tipo de pavimento em estudo, pavimentos leves. Para o cálculo do isolamento sonoro a sons de percussão existem os métodos da norma EN 12354-2, o modelo detalhado e o modelo simplificado, sendo que neste trabalho será usado o modelo simplificado.

3.5.1 MÉTODO DE SHARP

Sharp propôs um modelo em 1973 que permite a determinação gráfica de uma forma aproximada da redução sonora, R , em função da frequência. Este método pode ser aplicado para elementos simples ou duplos e a metodologia de cálculo vem apresentada no livro “Engineering Noise Control” de Bies e Hansen.

3.5.1.1 Paredes Simples

O método de Sharp para elementos simples consiste num método gráfico que determina de forma aproximada o valor da redução sonora, R , em função da frequência [11, 27].

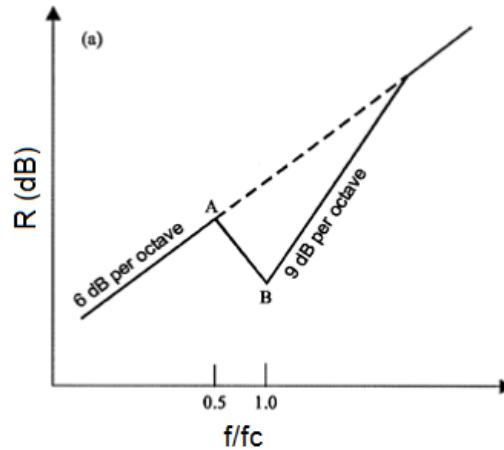


Figura 3.6 – Método gráfico para a determinação dos valores de R em função da frequência das paredes simples [27]

Para o cálculo dos pontos notáveis da Figura 3.6 começa-se pela determinação da frequência crítica do material, f_c .

$$f_{cn} = \frac{0.55c^2}{c_{Ln} * h_n} \quad (3.8)$$

c – velocidade de propagação do som (m/s)

c_{Ln} – velocidade de propagação das ondas longitudinais do material (m/s)

h – espessura (m)

Com o cálculo da f_c representa-se os valores dos pontos A e B no eixo das abcissas que são respetivamente $0.5f_c$ e f_c . O cálculo das ordenadas destes pontos é efetuado pelas expressões que se seguem [11, 27].

$$R_A = 20 * \log(f_c * m) - 54 \quad (3.9)$$

$$R_B = 20 * \log(f_c * m) + 10 * \log(\eta) - 45 \quad (3.10)$$

η - fator de perdas internas

Já determinados os pontos a representar no gráfico traça-se uma reta de 6 dB por oitava a partir do ponto A e uma de declive 9 dB por oitava a partir do ponto B. A partir do ponto de coincidência entre as duas retas de diferentes declives considera-se a reta com declive de 6 dB por oitava [11, 27].

3.5.1.2 Paredes duplas

Este método exige algumas restrições para que os resultados sejam melhores. É necessário que os painéis sejam isolados mecânica e acusticamente um do outro o máximo possível e os painéis devem ser isotrópicos [11, 27].

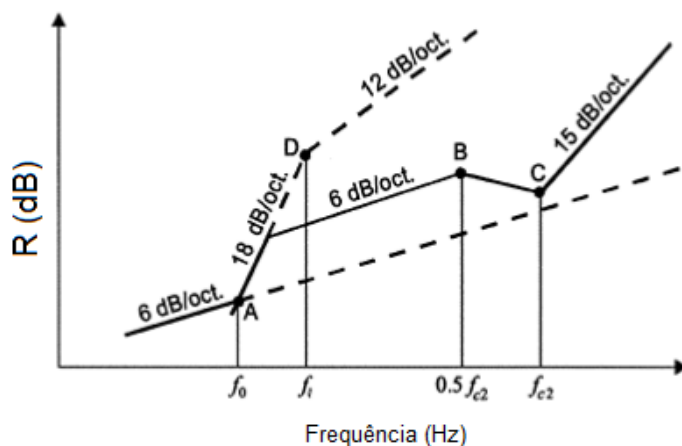


Figura 3.7 – Método gráfico para a determinação dos valores de R em função da frequência das paredes duplas [27]

Na determinação dos pontos notáveis da curva da figura 3.7 começa-se pela determinação da frequência crítica do painel 1, f_{c1} , e do painel 2, f_{c2} , pela expressão 3.8.

Garantindo que a frequência crítica do primeiro painel é inferior ou igual ao do segundo determinam-se as frequências que irão ser representadas no eixo das abcissas.

Determina-se a frequência de menor ressonância de cavidade, f_0 , a frequência limite, f_i , a frequência crítica do segundo painel, f_{c2} , e metade desta frequência que irão ser as abcissas dos pontos A, D, C e B, respetivamente, da figura 3.7. As ordenadas deste ponto irão ser calculadas em função da massa dos dois painéis (m_i) e das frequências determinadas anteriormente [11, 27].

$$f_0 = 80 \sqrt{\frac{(m_1 + m_2)}{d * m_1 * m_2}} \tag{3.11}$$

d – espessura da caixa de ar (m)

m_i – massa superficial do painel (Kg/m²)

$$f_i = \frac{55}{d} \tag{3.12}$$

$$R_A = 20 * \log(m_1 + m_2) + 20 * \log(f_0) - 48 \tag{3.13}$$

Como estamos a estudar pavimentos no seu estado original em madeira, sem qualquer tipo de intervenção de beneficiação, não existe qualquer tipo de material absorvente, logo o R_B vai ser igual ao R_{B1} .

$$R_{B1} = R_A + 20 * \log\left(\frac{f_{c1}}{f_0}\right) - 6 \quad (3.14)$$

Como as frequências entre painéis são diferentes e este é o método mais adequado a utilizar o R_c irá ser igual a:

$$R_C = R_B + 6 + 10 * \log(\eta_2) \quad (3.15)$$

η - fator de perdas internas

$$R_D = R_A + 60 * \log\left(\frac{f_1}{f_0}\right) \quad (3.16)$$

Com os pontos notáveis determinados traçam-se os segmentos de reta com declives de 6 dB/oitava, 18 dB/oitava, 12 dB/oitava e 15 dB/oitava sendo que a partir da interseção da reta de 18 dB/oitava com a de 6 dB/oitava considera-se a de 6 dB/oitava [11, 27].

3.5.2 MÉTODO DA NORMA EN 12354-2

A norma EN 12354-2 referente à estimativa do valor do isolamento sonoro a sons de percussão apresenta dois métodos possíveis de cálculo, o modelo detalhado e o modelo simplificado.

Como iremos usar nesta dissertação o modelo simplificado é este que nos importa descrever.

O modelo de cálculo simplificado faz o cálculo do índice de isolamento a sons de percussão com base nos índices únicos de isolamento envolvidos no cálculo, determinados de acordo com a EN ISO 717-2. Aplica-se unicamente a compartimentos que se encontrem um sobre o outro com um piso homogêneo. O efeito do amortecimento estrutural entra de uma forma simplificada negligenciando as especificidades da situação e as transmissões marginais são tidas em conta de uma forma global baseadas nos cálculos pelo modelo detalhado [28].

O valor do índice de isolamento sonoro a sons de percussão é calculado segundo a seguinte expressão:

$$L'_{n,w} = L_{n,w,eq} - \Delta L_w + K \quad (3.17)$$

K – correção para a transmissão do ruído de percussão que ocorre por causa das transmissões marginais.

$L_{n,w,eq}$ – nível de pressão sonora equivalente do som de percussão

ΔL_w – nível de redução do som de percussão do revestimento do piso

Os dados acústicos a ser introduzidos devem ser principalmente de medições feitas em laboratório. No entanto podem ser usados outros valores que possam ser deduzidos por modelos de cálculo teórico, podem ser estimados empiricamente ou podem ser tomados valores de medições já efetuadas [28].

Quadro 3.1 – Correção k para as transmissões marginais em dB [28]

Massa por unidade de área do elemento separador (pavimento) Kg/m ²	Massa média por unidade de área dos elementos marginais homogêneos não cobertos por camadas adicionais Kg/m ²								
	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	1	0	0	0	0	0	0	0	0
150	1	1	0	0	0	0	0	0	0
200	2	1	1	0	0	0	0	0	0
250	2	1	1	1	0	0	0	0	0
300	3	2	1	1	1	0	0	0	0
350	3	2	1	1	1	1	0	0	0
400	4	2	2	1	1	1	1	0	0
450	4	3	2	2	1	1	1	1	1
500	4	3	2	2	1	1	1	1	1
600	5	4	3	2	2	1	1	1	1
700	5	4	3	3	2	2	1	1	1
800	6	4	4	3	2	2	2	1	1
900	6	5	4	3	3	2	2	2	2

O cálculo do nível de pressão sonora equivalente normalizado do som de percussão do pavimento é calculado segundo a expressão:

$$L_{n,w,eq} = 164 - 35 * \log\left(\frac{m'}{m'_0}\right) \quad (3.18)$$

m' – massa por unidade do elemento (Kg/m²)

m'_0 – massa de referencia por unidade de área (= 1 Kg/m²)

O nível de redução do som de percussão do revestimento do piso é calculado em função da rigidez dinâmica por unidade de área, s' (N/m³), e a massa por unidade de área do revestimento do piso, m' (Kg/m²), pelo gráfico da figura 3.8 [28].

Na figura 3.8 a letra A representa a redução do som de percussão em dB, ΔL_w , a letra B representa a massa por unidade de área do elemento em Kgm^{-2} , m' , e C a rigidez dinâmica da camada resiliente em MNm^{-3} , s' [36].

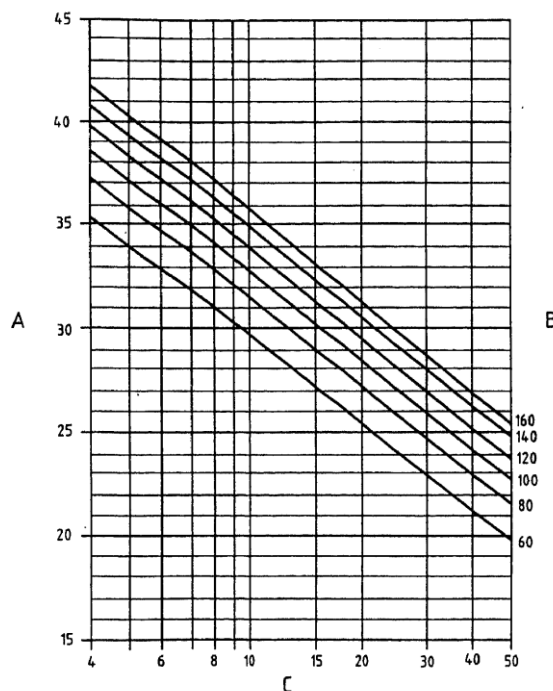


Figura 3.8 – Gráfico para o cálculo de ΔL_w [36]

3.6 REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

Existem vários estudos realizados sobre o isolamento de pavimentos em madeira. Em 1995 a CATED lançou o livro “Amelioration Acoustique des logements” onde se descrevem uma série de estudos realizados em vários pavimentos tradicionais em madeira. Um dos capítulos deste livro é completamente dedicado ao isolamento sonoro de pavimentos entre pisos. Os resultados obtidos para o isolamento a sons aéreos e sons de percussão, baseados em ensaios realizados *in situ*, dos pavimentos estudados são representados num gráfico onde se relacionam em função do isolamento obtido a sons aéreos, R, e a sons de percussão, L_n .

A figura 3.9 apresenta os resultados para pavimentos de madeira com as vigas expostas contemplando um vasto leque de soluções de pavimentos deste tipo. Podemos observar que neste caso os pavimentos com pior comportamento a sons aéreos e de percussão são aqueles que apresentam unicamente as vigas expostas com tábuas de madeira no pavimento. Os que apresentam um melhor comportamento do isolamento a sons aéreos são os que adicionam uma camada de maior massa e os que têm melhor comportamento ao nível do isolamento a sons de percussão apresentam um pavimento flutuante.

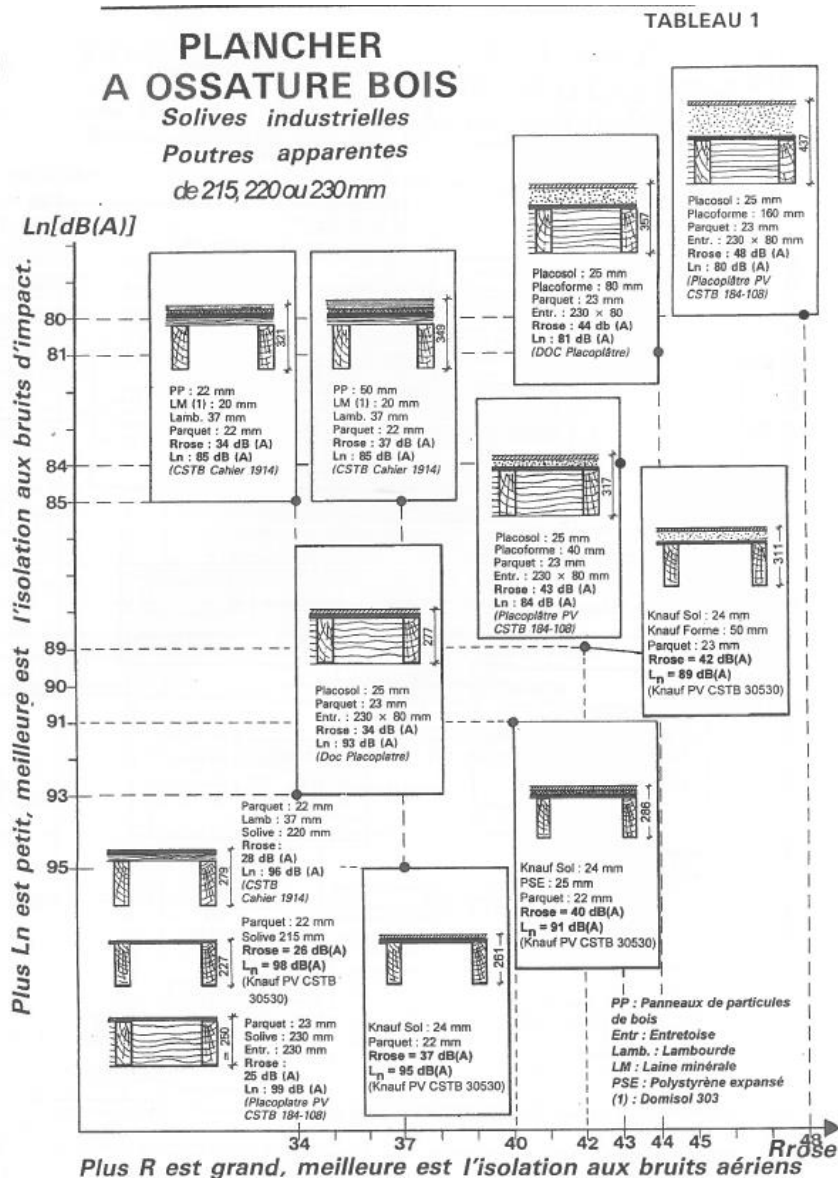


Figura 3.9 – Tabela 1 do livro Amelioration Acoustique des logements [29]

Também outros autores em Portugal têm vindo a caracterizar os pavimentos de madeira tendo em consideração resultados de várias medições *in situ*, como é o caso do Engenheiro Diogo Mateus, que publicou um artigo sobre o “Comportamento acústico de pavimentos (lajes) – soluções leves versus soluções pesadas” [30]. Neste artigo publicado na revista “Construção Magazine” Diogo Mateus dá a conhecer a inexistência de modelos de previsão fiáveis para o cálculo do isolamento sonoro de pavimentos leves, constituídos por soalho sobre estrutura de madeira, expondo a ineficácia dos modelos existentes e a falta de resultados experimentais

Diogo Mateus publica uma série de resultados obtidos para pavimentos leves do isolamento a sons aéreos e de percussão. Um dos pavimentos em análise apresenta a solução tradicional à exceção do teto que em vez de ser em madeira ou estafe é em gesso cartonado e os restantes correspondem a esta solução mas com incremento de melhorias de reforço do isolamento. Os resultados apresentados são indicativos e não entram com o efeito das transmissões marginais. Os intervalos dos índices do isolamento sonoro

encontrados têm origem em medições realizadas em laboratório e ensaios *in situ* descontando as transmissões marginais [30]. Na figura seguinte mostra-se um exemplo de alguns dos pavimentos analisados e os valores de isolamento R_w e $L_{n,w}$.

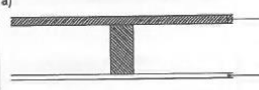
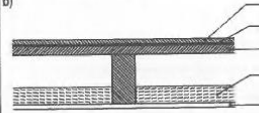
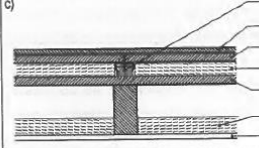
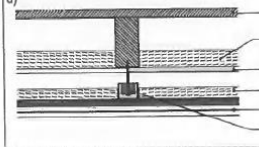
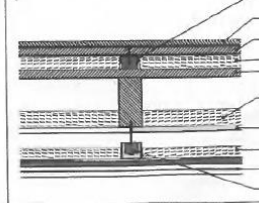
Pormenor construtivo	Índices de isolamento previstos	
	R_w	$L_{n,w}$ ↓
a)  <ul style="list-style-type: none"> Soalho em madeira (20 mm) Forro em gesso cartonado (12,5 mm) 	35 a 40 dB	80 a 85 dB
b)  <ul style="list-style-type: none"> Parquet flutuante (12 mm) Camada resiliente (3 a 5 mm) Soalho em madeira (20 mm) Material fonoabsorvente (40 mm) Forro em gesso cartonado (12,5 mm) 	45 a 50 dB	58 a 63 dB
c)  <ul style="list-style-type: none"> Régua antivibratória (30 a 40 mm) Parquet flutuante (12 mm) Contraplacado ou OSB (16 mm) Material fonoabsorvente Soalho em madeira (20 mm) Material fonoabsorvente (40 mm) Forro em gesso cartonado (12,5 mm) 	52 a 57 dB	< 55 dB
d)  <ul style="list-style-type: none"> Soalho em madeira (20 mm) Material fonoabsorvente (40 mm) Forro em gesso cartonado (12,5 mm) Material fonoabsorvente (40 mm) 2 placas de gesso cartonado Apoio de suspensão antivibratório 	54 a 59 dB	65 a 70 dB
e)  <ul style="list-style-type: none"> Régua antivibratória (30 a 40 mm) Parquet flutuante (12 mm) Contraplacado ou OSB (16 mm) Material fonoabsorvente Soalho em madeira (20 mm) Material fonoabsorvente (40 mm) Forro em gesso cartonado (12,5 mm) Material fonoabsorvente (40 mm) 2 placas de gesso cartonado Apoio de suspensão antivibratório 	60 a 65 dB	< 50 dB

Figura 3.10 – Tabela do artigo da revista *Construção Magazine* de Diogo Mateus [30]

Este mesmo autor publicou ainda um artigo onde fala sobre a influencia do ruido aéreo gerado pela percussão de pavimentos na determinação do isolamento a sons de percussão. Ele refere que quando se utiliza a máquina de percussão como fonte para a determinação do isolamento a sons de percussão de pavimentos, esta para além da vibração que provoca na estrutura origina ruido aéreo conhecido como *eco dos impactos* [31]. Através de ensaios realizados *in situ* chega à conclusão que os *ecos de impacto* são desprezáveis para a maioria das situações exceto para pavimentos flutuantes leves que apresentam um valor do isolamento a sons de percussão baixo e o valor do isolamento a sons aéreos reduzido.

Como forma de minimizar a transmissão dos *ecos de impacto* é proposta uma alteração aos modelos de cálculo efetuando-se medições no comportamento emissor e determinando-se posteriormente o índice $L'_{n,w}$ com base na componente de percussão (L_{pi}) [31].

$$L_{pi} = 10 * \log(10^{\frac{L_i}{10}} - 10^{\frac{L_{2i}}{10}}) \tag{3.19}$$

L_i – nível sonoro medido no compartimento recetor (dB)

L_{2i} – nível sonoro no compartimento recetor transmitido pelos ecos de impacto (dB)

$$L_{2i} = L_{1i} - D \quad (3.20)$$

L_{1i} – nível sonoro produzido pela máquina de percussão no compartimento emissor (dB)

$$L'_{ni} = L_{pi} - 10 * \log\left(\frac{0.16V}{A_0T}\right) \quad (3.21)$$

Outros estudos foram levados a cabo pelo autor Jorge Patrício que apresenta no livro “Acústica nos edifícios” resultados de ensaios realizados em laboratório de pavimentos em madeira de países Europeus, nomeadamente França e Holanda. Num dos capítulos do livro o autor fala sobre a inexistência de métodos de cálculo específicos para a determinação do isolamento sonoro neste tipo de pavimentos realçando a importância da conservação deste tipo de edificado na preservação da história e cultura de um país e o crescente aumento da reabilitação como necessidade de caracterizar acusticamente estes pavimentos [32].

Quadro 3.2 – Tabela com valores do isolamento a sons de percussão e aéreos [32]

Descrição	Isolamento $L_{n,w}$ (dB)	Isolamento R_w (dB)
Tabuado com 25 mm de espessura assente sobre barrotes, afastados 0.60 m entre si.	90	18
Tabuado com 22 mm de espessura assente sobre barrotes, afastados 0.60 m entre si, e com teto muito flexível.	85	28
	72 ¹	
	66 ²	
Tabuado com 22 mm de espessura assente sobre barrotes, afastados 0.60 m entre si, e com teto em gesso cartonado.	81	33
	68 ¹	46 ¹
	62 ²	43 ²
Tabuado com 22 mm de espessura assente sobre barrotes, afastados 0.60 m entre si, e com teto em placas de “estafe”.	80	35
	67 ¹	48 ¹
	61 ²	45 ²
1 – Com lã mineral de massa específica igual a 140 kg/m ³ (100 mm de espessura)		
2 – Com lã mineral de massa específica igual a 70 kg/m ³ (100 mm de espessura)		

Para além do método de Sharp em estudo na presente dissertação, que se destina ao cálculo teórico de elementos de separação leves, cuja metodologia de cálculo é apresentada no livro “Engineering Noise

Control” de Bies e Hansen (2003) e que tem por base o modelo proposto por Sharp em 1973, e os métodos das normas EN 12354, existem ainda estudos levados a cabo em artigos publicados em revistas científicas como é o caso dos seguintes: “Lightweight Floor/Ceiling systems with improved impact sound” de Hyuck Chung, “Prediction Method Adapted to wood frame lightweight constructions” de Catherine Guigou-Carter e “ A finite element solution of structure-borne sound attenuation for a lightweight timber floor” de D.Bard, publicados na revista Building Acoustics.

Em 2008 D.Bard, J. Sonnerup e G. Sandberg publicam na revista “Buildings Acoustic” um artigo sobre a atenuação do som para pavimentos leves baseado em elementos finitos. O principal foco foi saber qual era a transmissão e atenuação do som em diferentes direções, direção da propagação, direção vertical e transversa, tendo como objetivo melhorar os modelos de previsão teóricos. Para isso são feitas medições numéricas e experimentais que servem de base de comparação da eficácia dos modelos. Os resultados apontam para a conclusão que existe uma grande dependência entre a atenuação do som e o local de excitação se os restantes parâmetros se mantiverem constantes [33].

Nos modelos a testar as placas foram modeladas com recurso aos elementos finitos com 20 nós assim como as vigas. A verificação experimental foi realizada com uma máquina de percussão sendo registado os valores da vibração por um acelerómetro. Apresenta-se no seguinte gráfico os resultados dos valores experimentais e dos valores calculados pelos elementos finitos.

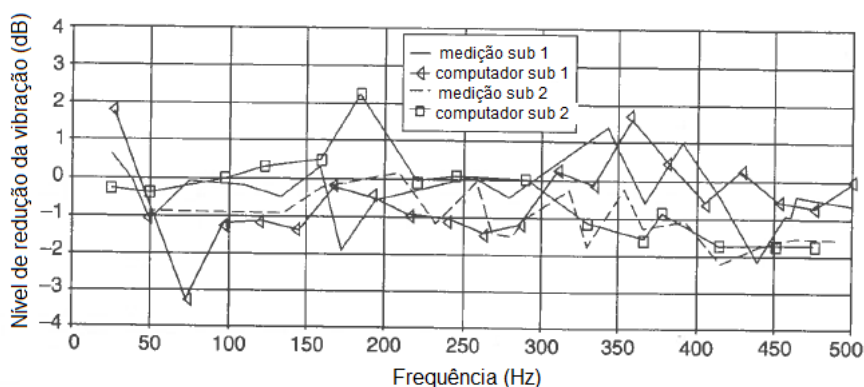


Figura 3.11 – Gráfico do nível da vibração para os dois modelos propostos na direção da propagação [33]

O autor conclui pelos resultados obtidos que o método apresenta uma previsão satisfatória no seu geral sendo que em algumas frequências existem diferenças significativas em relação à realidade.

4

A CASA BURGUESA DO PORTO

4.1 INTRODUÇÃO

“Aquilo que coloca a burguesia no centro de qualquer discussão acerca do conforto doméstico, é que, ao contrário da aristocracia que vivia num castelo fortificado, ou do clérigo que vivia num mosteiro, ou do servo que vivia num casebre, os burgueses viviam numa casa” [34].



Figura 4.1 – O Porto em 1789, gravura de Teodoro Maldonado [35]

A cidade do Porto é rica e apresenta um grande património histórico que muito caracteriza a cidade. São estes edifícios que têm de ser alvo de intervenção para que seja preservado o seu valor económico e cultural. “É o Património Cultural, dimensão alargada da identidade ao coletivo, reunindo bens imóveis ou móveis, tangíveis ou intangíveis, definidores do que fomos e somos.” [36]

Este capítulo pretende então dar a conhecer o edifício típico da cidade como é o caso da *Casa Burguesa*, que vai ser alvo de análise desta dissertação, descrevendo-o para posteriormente fazer a sua caracterização acústica. Esta análise será feita para um elemento deste tipo de edificado, os pavimentos.

4.2 ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

A origem da casa Burguesa como habitação existente nos dias de hoje na cidade remonta, de acordo com Ernesto Veiga de Oliveira, aos séculos XVII, XVIII e XIX [37] sendo acompanhada por um conjunto de fatores políticos, económicos e sociais. Apesar de este tipo de edificado já existir no período medieval o conceito de habitação como local de intimidade e privacidade não se podia aplicar pois como refere Rybczynsky “a habitação medieval era um espaço público e não privado”. Só no século XVII viriam a criar-se condições para o desenvolvimento da habitação como um espaço íntimo e privado [34]. A sua origem segundo a maioria dos autores remonta a este século. Segundo Francisco Barata podemos ter três modelos da Casa Burguesa Portuense: a do Porto mercantilista, a do Porto iluminista e a do Porto liberal [38].

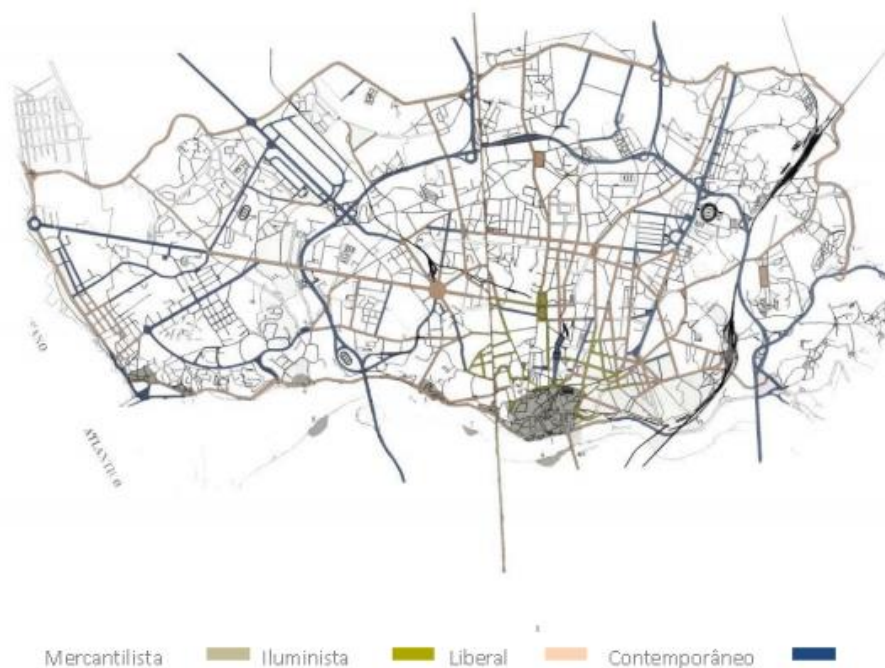


Figura 4.2 – Fases de desenvolvimento da cidade do Porto [39]

Apesar de ser possível definir mais do que um tipo de casa burguesa no tempo, existem características semelhantes entre os diferentes tipos. As habitações são em banda apresentando paredes de meação, os lotes são estreitos e compridos podendo a largura e o comprimento variar respetivamente entre os quatro e os sete metros e os quinze e os vinte e cinco metros, uso de materiais tradicionais como a pedra, a madeira, cal, argila, areia e ferro, uso de pedra na vertical, estrutura horizontal que vence a totalidade dos vãos, paredes interiores em tabique, coberturas de quatro águas, diferentes tipos de claraboias (redondas, ovais, quadradas ou retangulares) localizadas na cobertura, caixa de escadas compostas por vigamentos de menor comprimento na zona do patamar onde apoia a estrutura da escada e duas fachadas, a principal e o tardo. Como bem caracterizou Oliveira, “o Porto é uma cidade grande feita de casas pequenas” [40].

“As cidades constroem-se suportadas num contexto que as informa sempre de maneira distinta e, por isso, são todas únicas. A história da “casa estreita e alta”, morada comum da burguesia portuense do século XIX também é assim: é única porque o Porto é diferente de qualquer outra cidade.” [41].

4.3 SOLUÇÃO CONSTRUTIVA

4.3.1 SISTEMAS CONSTRUTIVOS

A casa burguesa do Porto segundo Ernesto Veiga de Oliveira eram “ as ditas *tiras* ou as *casas estreitas e altas*”.



Figura 4.3 – Representação da casa burguesa portuense [42]

Para fazer a análise de um sistema construtivo temos de o decompor em subsistemas. No caso da casa burguesa é possível dividi-la em dois tipos de estruturas, a principal e a secundária, apresentadas no quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Divisão em estrutura principal e secundária da Casa Burguesa Portuense [37]

Estrutura principal	Estrutura secundária
Paredes de meação	Paredes das fachadas
Estrutura dos sobrados	Paredes interiores de compartimentação
Estrutura da cobertura	Estrutura das escadas
	Estrutura da Claraboia
	Estruturas das águas furtadas

As paredes de meação e de fachada são em alvenaria de pedra com espessuras de 30 cm e 70 cm respetivamente. Estas formam uma estrutura que assenta sobre o nivelamento para as paredes de fundações. De modo a garantir uma melhor distribuição dos esforços no terreno, as paredes de fundação aumentam de espessura até atingir o solo. Se o terreno for rochoso a profundidade da fundação é menor do que se for um terreno com má qualidade [37].

As paredes de fachada são mais espessas porque contém aberturas de grandes dimensões, garantem a continuidade das paredes de meação, servem de travamento à estrutura dos pisos e de apoio a parte da estrutura do telhado. As paredes de tardoiz têm varandas largas apoiadas em cachorros onde se localizavam os sanitários. O revestimento exterior da parede é à base de argamassa de saibro e cal com

acabamento estucado e pintado passando em meados do século XIX a usar-se o azulejo como revestimento. Já pelo interior eram revestidas por reboco à base de argamassa de saibro e cal, com acabamento estucado e pintado [37].



Figura 4.4 – Parede de fachada em alvenaria de pedra

As paredes de meação variam a sua composição conforme o século em que estão inseridas. Inicialmente, século XVII, as paredes de meação, em casas com mais de um piso, eram de pedra no rés-do-chão e de tabique nos restantes pisos. Contudo devido à grande abundância de pedra, principalmente granito, nos arredores da cidade do Porto, estas passam a ser construídas inteiramente em alvenaria de granito assente com argamassa de cal, areia e saibro. Estas paredes eram revestidas pelo interior com o mesmo material utilizado para as paredes de fachada e pelo exterior levam uma impermeabilização asfáltica protegida por soletos de ardósia ou chapa zincada ondulada [37].

Quando existem pisos acrescentados, as suas paredes eram realizadas inicialmente em tabique misto e posteriormente em tabique simples ou simples reforçado. O tabique misto era uma parede executada com barrotes de madeira e preenchida com pedra miúda ou tijolo maciço em forma de cunha. No tabique simples o preenchimento é substituído por um duplo tabuado de madeira. O revestimento interior é igual ao das paredes de alvenaria já no exterior pode variar desde argamassas de saibro com acabamento estucado a azulejo, ou chapa zincada. As paredes interiores de compartimentação e da caixa de escadas são construídas com tabique simples ou simples reforçado [37].



Figura 4.5 – Parede de meação em alvenaria de pedra (esquerda) e parede de tabique (direita)

A estrutura dos pavimentos ou sobrados era constituída por paus rolados que foram substituídos posteriormente por vigas de madeira esquadriada, espaçados de 50 cm e apoiados nas paredes de meação. A estabilização do vigamento era feito por tarugos, espaçados entre si de 1.5m, com travamento nas paredes de fachada. Estes pisos eram revestidos superiormente com tábuas de soalho de 3cm de espessura e inferiormente por tabuado que viria a ser substituído pelo teto estucado. Esta opção só viria a ser conseguida devido à introdução de fasquios pregados no vigamento de suporte [37].

O telhado é constituído por asnas espaçadas de 3 metros que apoiam nas paredes de meação. A forma das asnas pode variar conforme sejam mais antigas ou mais recentes. As mais antigas são estruturas mais simples compostas por linha, perna e asna, enquanto as mais recentes, a partir do século XIX, são mais complexas sendo compostas por linha, perna, pendural e escoras. As asnas eram unidas pelos contra frechais, as madres e o pau de fileira onde era pregado o vareado espaçado de 50 cm onde iria ser colocado o ripado onde assentavam as telhas. As coberturas que desde o século XVII eram de quatro águas viriam a cair em desuso passando no século XIX a ser mais utilizado a cobertura de duas águas. Tal foi possível devido à introdução da telha Marselha, que permitiu aumentar as pendentes do telhado, visto terem encaixes entre si. Isto era uma vantagem em relação às telhas anteriormente utilizadas que não possuíam encaixes entre si tendo que ser fixadas com argamassa. O facto de se aumentar as pendentes do telhado permitiu que este espaço pudesse ser habitável [37].



Figura 4.6 – Estrutura de um pavimento tradicional de madeira (esquerda) e estrutura típica de um telhado de madeira (direita)

4.3.2 ELEMENTOS DA CASA BURGUESA

A casa Burguesa é um edifício muito típico da cidade do Porto. Como tal possui termos que caracterizam certos elementos deste tipo de habitação que podem não ser muito comuns. A figura 4.7 é um exemplo de uma casa burguesa onde são identificados alguns dos diferentes elementos que a constituem.

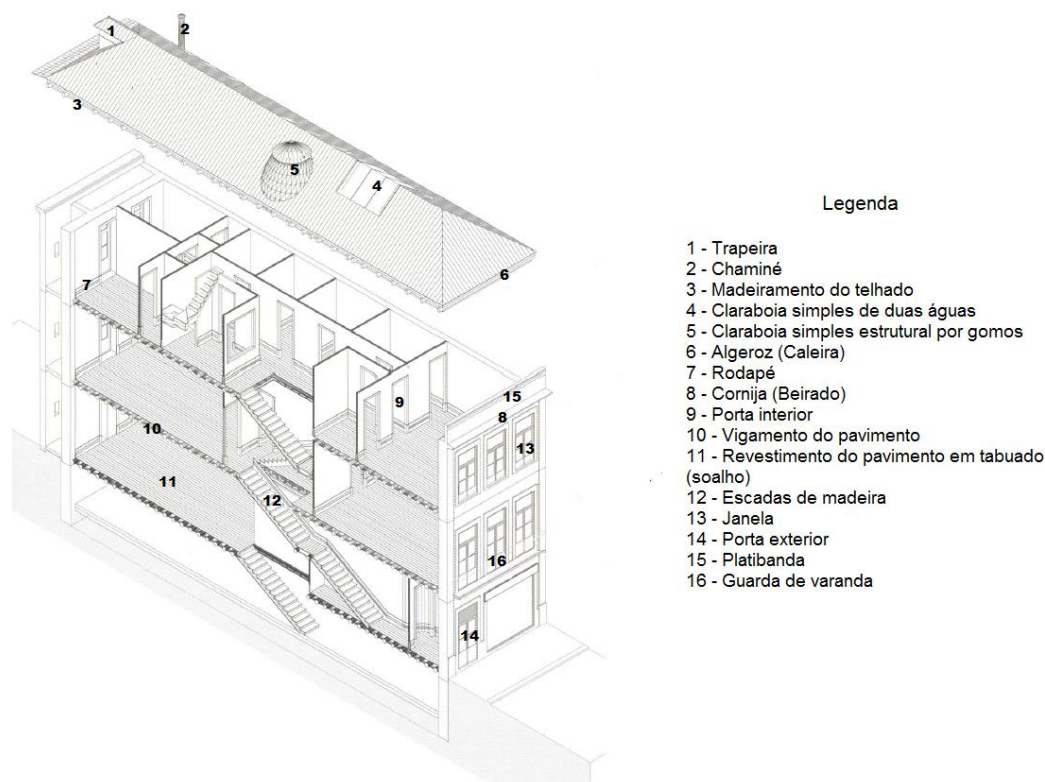


Figura 4.7 – Esquema legendado da Casa Burguesa adaptado de [42]

4.4 ELEMENTO EM ESTUDO

4.4.1 INTRODUÇÃO

Nesta dissertação o que irá ser alvo de estudo é o pavimento da típica casa Burguesa Portuense, como tal, é feita uma descrição mais pormenorizada deste elemento. Os pavimentos estruturais em madeira podem também tomar a designação de sobrados e são constituídos por uma diversidade de elementos. Apresentasse no quadro 4.2 esses elementos divididos em elementos principais e secundários.

Quadro 4.2 – Elementos base dos pavimentos estruturais de madeira

Elementos principais	Elementos secundários
Vigamento	Tarugos
Soalho	Cadeias

A estrutura dos pisos apresenta um vigamento de troncos de madeira que são paralelos entre si e também elementos secundários como os tarugos que tornam o conjunto mais homogéneo e melhoram o funcionamento do piso a ações pontuais. Ao vigamento, tarugos e cadeias podemos atribuir a designação de *obras de tosco* pois são raras as ocasiões em que estas estruturas estão à vista, já aos elementos referentes aos acabamentos atribui-se a designação de trabalhos *limpos* pois têm um acabamento mais cuidado [43].

4.4.2 VIGAMENTO

O vigamento é constituído normalmente por vigas ou barrotes podendo apresentar uma geometria redonda, forma dos troncos de madeira que tomavam a designação de “paus rolados”, ou falqueados nas duas faces, paus rolados aparados na face superior e inferior para permitir o correto assentamento dos revestimentos do pavimento e do teto, ou esquadriada, secção retangular perfeita, dispostos paralelamente entre si e com um comprimento que depende do vão a vencer [6, 43, 44].

Normalmente estes elementos estruturais podem ter comprimentos entre os 4 e os 7 metros pois não era apropriado por razões estruturais terem mais do que estas dimensões dado não serem realizados com recurso a cálculos. O seu diâmetro geralmente varia entre os 20 e os 30 cm mas aparados em duas faces. Quando o elemento chegava próximo da fachada do edifício as vigas apareciam falqueadas nas quatro faces [6, 43, 44].

A partir do século XX é que começam a ser implementadas soluções com o vigamento de madeira esquadriado, secção retangular, cujas dimensões variam entre os 8 e os 12 cm de altura e os 20 a 25 cm de largura [6, 43, 44].



Figura 4.8 – Vigamento (esquerda) e vigamento esquadriado (direita)

O espaçamento entre as vigas pode variar geralmente entre os 50 e os 70 cm entre eixos sendo as últimas vigas encostadas às paredes. Apesar de estas serem as dimensões mais habituais, Segurado diz que os espaçamentos entre vigas deveriam ser de cerca de 30 cm pois facilita a colocação do fasquiado para o revestimento dos tetos [6, 43, 44].

Um dos pontos mais importantes na elaboração destes pavimentos são os apoios. Estes normalmente são efetuados nas paredes estruturais de alvenaria com uma determinada dimensão de penetração na mesma. Esta dimensão, segundo Costa 1995, deve estar entre os 20 e os 25 cm, no mínimo, para além da face da parede, para garantir uma boa estabilidade e uma redução das vibrações. Usualmente estes apoios ocupavam toda a largura da parede sendo que na maioria dos casos a viga apoia em 2/3 da parede. Era mais usual este último caso pois assim a viga não estava sujeita às intempéries o que podiam levar a problemas funcionais graves na estrutura. Com vista a evitar este problema é usual encontrar nos edifícios antigos topos das vigas com tratamento através de uma pintura com tinta de óleo, zarcão ou alcatrão [6, 43, 44].

Nas ligações das vigas de madeira às paredes de alvenaria é frequente o uso de ferrolhos metálicos de variadas configurações que são pregadas ou aparafusadas às vigas e que posteriormente se prendem à

parede. Estas podem ser feitas pelo exterior da parede, através de uma chaveta, ou pelo interior, com um ferrolho tipo esquadro que vergam a 90° no interior da mesma [6, 43, 44].

O pavimento poderia por vezes estar sujeito a cargas elevadas e para resolver este problema era normal aumentar a área de apoio e distribuição do peso dos vigamentos. Isto era possível através da colocação de elementos de pedra, chapas de ferro ou elementos de madeira encaixados na parede. Era comum a existência de cachorros de pedra salientes para dentro das divisões onde assentavam as vigas [6, 43, 44].

Quando os apoios eram realizados sobre paredes de tabique interiores era comum a colocação de frechais corridos e embutidos nas paredes que levava a uma distribuição uniforme das cargas evitando a deformação pontual da parede [6, 43, 44].

4.4.3 TARUGOS

Os tarugos são elementos de madeira de menor secção do que o das vigas principais e que são colocados nos espaços livres transversalmente às vigas procurando fazer assim o seu travamento. Os tarugos podem apresentar-se de forma simples ou esquadriada, sendo a primeira forma mais comum para edifícios anteriores ao século XX, e normalmente estão espaçados, em média, cerca de 1.50 m [6, 43, 44].

O uso dos tarugos permite reduzir a secção das vigas do pavimento, dado estes passarem a funcionar em conjunto, e reduz o efeito de bambeamento. Ainda podem ser usados para provocar no pavimento uma contra flecha embora este ato tenha de ser feito com o devido cuidado por forma a evitar a danificação das ligações entre o pavimento e a parede [6, 43, 44].

Segundo ,Costa,1955, existem três tipos de vigamentos que são mais utilizados [6, 43, 44]:

- Tarugamento simples – tarugos com comprimento igual ao espaçamento entre as vigas, colocados de baixo para cima e com secção preferencialmente igual ao das vigas. A sua ligação às vigas é efetuada com recurso a pregos.



Figura 4.9 – Tarugamento simples

- Tarugamento de cruzeta – introdução de ripas de madeira de pequena secção de encontro às vigas, onde são abertas previamente umas reentrâncias para encaixe das extremidades das ripas. A sua aplicação consiste na introdução de tarugos cruzados entre si, ou seja, primeiro coloca-se uma ripa apoiada na parte superior de uma viga e na parte inferior da outra sendo colocada a

seguir outro tarugo cruzado formando uma cruzeta. A sua utilização no entanto é condicionada não podendo ser usada para distância entre vigas superiores a três vezes a sua altura.



Figura 4.10 – Tarugamento de cruzeta [43]

- Tarugamento entalonado – introdução de tarugos, com a mesma secção das vigas, nos vigamentos que dá origem a um sistema rígido e complexo. Começa-se pela abertura de entalhes nas vigas de forma a criar uma base para o entalhe dos tarugos, mede-se o comprimento necessário para estes e nos topos dos tarugos são deixados orelhas e talões que facilitam o encaixe nas vigas. Este encaixe deve ser efetuado à compressão para uma melhor coesão sendo a sua fixação efetuada com pregos.

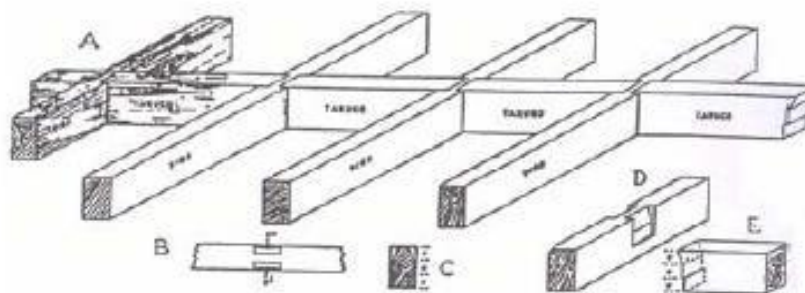


Figura 4.11 – Tarugamento entalonado [43]

4.4.4 CADEIAS

A utilização deste tipo de elemento surge quando existe a necessidade de alterar a configuração do pavimento por surgimento de impedimentos construtivos. São exemplo as caixas de escada ou chaminés que levam à interrupção do vigamento antes de encontrarem o seu apoio nas paredes [44].



Figura 4.12 – Vista de patamar das escadas onde se observa a cadeia a servir de apoio a uma das pernas da escada [40]

A colocação de cadeias consiste na introdução de vigas perpendiculares e encastradas em vigas principais de modo a contornar o obstáculo. Isto permite a transmissão de cargas desses vigamentos para outros que apoiem nas paredes. É importante que a secção destas vigas principais seja superior às restantes para resistir melhor ao excesso de carga [44].

4.4.5 SOALHO

O principal revestimento dos pavimentos superiores é um tabuado designado normalmente por soalho. A madeira que normalmente era empregue era o pinho, que tinha espessuras e larguras que podiam variar respetivamente entre os 2,5 e os 5 cm e entre os 12 e os 30 cm. O comprimento deste tabuado podia chegar aos 10 m. As habitações mais antigas são as que apresentam geralmente as dimensões de soalho maiores, tendo vindo a diminuir ao longo do século XIX [6, 43, 44].



Figura 4.13 – Estrutura do pavimento com soalho visível

Em Portugal o tipo mais comum de ligações entre as tábuas nos edifícios antigos são:

- Macho-fêmea;
- Meio-fio.

Nas juntas macho-fêmea as pregagens das tábuas às vigas são feitas sobre os machos onde posteriormente se encaixam as fêmeas que o ocultavam. As juntas a meio-fio eram feitas com uma espécie de rebaixo até metade da espessura da tábua sendo depois visível os pregos de fixação. Dava-se preferência ao primeiro método pois este permitia esconder as pregagens das tábuas nas vigas [6, 43, 44].

Depois de serem assentes as tábuas de soalho são afagadas manualmente de modo a obter uma superfície uniforme sendo posteriormente enceradas para aumentar a sua preservação e conservação [6, 43, 44].

4.4.6 TETO

Podemos identificar no tempo dois tipos diferentes de revestimentos usados no teto destas habitações. Até ao final do século XVIII os tetos eram feitos em tabuado de madeira já durante o século XIX passou-se a utilizar os tetos em estuque [6, 43, 44].

O tabuado em madeira era diretamente pregado ao vigamento, em forma de forro de esteira ou em forma de “camisa e saia”, sobreposto em duas camadas. Em alguns casos de habitações mais ricas verifica-se a utilização de um tabuado de castanho de grande qualidade que toma a forma de masseira ou caixotões, com molduras e ricos ornatos em talha [6, 43, 44].

Os tetos em estuque começaram a ser mais usados a partir do século XIX. Tal sucede devido à invenção de uma técnica que permitia o suporte dos revestimentos e acabamentos em gesso dos tetos. Esta técnica consistia numa estrutura de ripas trapezoidais designadas de fasquios que eram dispostas em forma de grelha. Estes fasquios eram espaçados entre si da espessura de um dedo e eram fixados, por pregagem, diretamente sob os paus rolados ou a uma estrutura intermédia de barrotes com dimensões de 5 por 7 cm espaçados de 50 cm que compensavam o desnivelamento do vigamento. Sob o fasquio depositava-se a primeira camada de argamassa à base de saibro e cal, antes da colocação do soalho, e depois uma segunda camada de argamassa à base de areia fina e cal, sob os fasquios já preenchidos com a argamassa anterior, regularizando o teto para a aplicação do acabamento em estuque. Estes podiam depois ter outros tipos de elementos decorativos [6, 43, 44].



Figura 4.14 – Teto em tabuado de madeira (esquerda) e teto em estuque (direita)

5

DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

5.1 INTRODUÇÃO

A avaliação do desempenho acústico do elemento estrutural em estudo pode ser feita por modelos teóricos, por medições *in situ* e medições em laboratório. Embora se caracterizem os elementos tendo em conta modelos teóricos, que são mais importantes na estimativa de valores para usar em fase de estudo, quando estes são aplicados poderão apresentar valores diferentes dos pretendidos em consequência das aproximações tomadas nos modelos de cálculo.

Como os modelos teóricos podem divergir em relação às medições *in situ* este trabalho analisa os dois métodos.

A análise *in situ*, a sons aéreos e de percussão, a habitações com pavimentos estruturais em madeira são realizadas segundo as normas NP EN ISO 140-4 para sons aéreos e NP EN ISO 140-7 para sons de percussão.

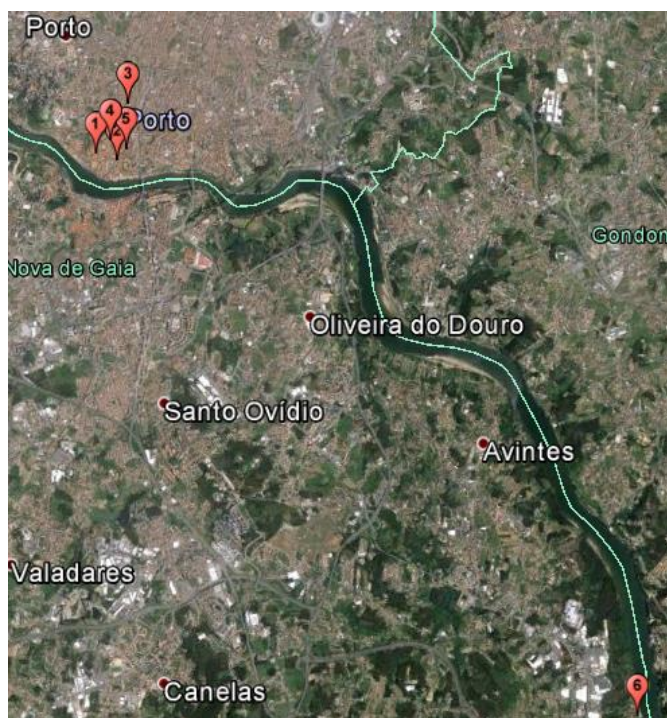


Figura 5.1 – Localização dos edifícios para realização das medições *in situ*

5.2 MEDIÇÕES IN SITU

5.2.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NAS MEDIÇÕES

Para a realização dos ensaios *in situ* é necessário a utilização de equipamentos técnicos específicos que permitam a determinação dos dados pretendidos. A emissão do ruído branco para a determinação do isolamento a sons aéreos é feita através de um altifalante da EON, fonte sonora, e no caso do isolamento a sons de percussão a emissão é feita por uma máquina de percussão normalizada, sendo a medição dos níveis de pressão sonora nos compartimentos emissores e recetores e para a determinação do ruído de fundo e do tempo de reverberação realizada usando um sonómetro da 01 dB modelo SOLO.

5.2.2 EDIFÍCIO RUA DAS TAIPAS (E1)

Um dos edifícios em estudo localiza-se no centro histórico da cidade do Porto na Rua das Taipas.



Figura 5.2 – Edifício Rua das Taipas

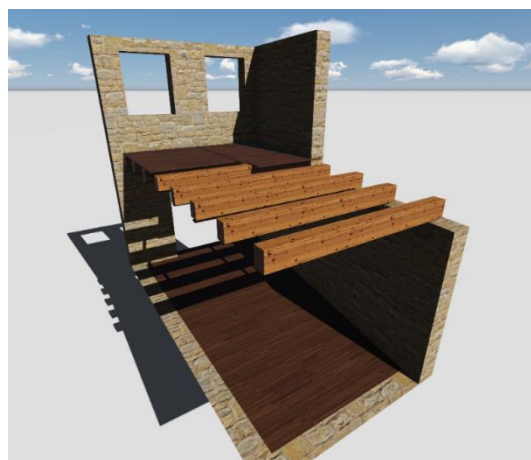


Figura 5.3 - Esquema representativo do pavimento e dos compartimentos em análise da Rua das Taipas

O edifício em causa apresenta as soluções de construção originais, encontrando-se degradado em muitas divisões devido ao tempo que esteve abandonado, à falta de manutenção e à sua idade. O pavimento é o original, típico da casa burguesa, sendo constituído por paus rolados (vigamento), tarugos, soalho pregado ao vigamento e no teto um tabuado de madeira. O restante edifício apresenta paredes de alvenaria de pedra no rés-do-chão sendo os restantes pisos constituídos por paredes de tabique.



Figura 5.4 – Estrutura do pavimento do edifício da Rua das Taipas

As medições efetuadas neste edifício seguiram os preceitos das normas NP EN ISO 140-4 para determinação do isolamento a sons aéreos e a NP EN ISO 140-7 para a determinação do isolamento sonoro de pavimentos à percussão.

Foram realizados ensaios apenas numa solução de pavimento, devido ao mau estado de conservação das restantes soluções. Os compartimento emissor e recetor que apresentavam-se devidamente limitados e isolados dos restantes compartimentos de modo a que no ensaio a maioria do som produzido pela fonte passasse através do pavimento.

O pavimento analisado é o pavimento de separação do primeiro andar e do rés-do-chão. O compartimento emissor tem um volume de 32,4 m³ enquanto o recetor apresenta 73,5 m³.



Figura 5.5 – Compartimento recetor (esquerda) e compartimento emissor (direita)

Na medição do isolamento a sons aéreos dos pavimentos colocou-se no compartimento emissor um altifalante a produzir um ruído branco de 100 dB. Como se usou apenas uma fonte sonora esta foi disposta em duas posições. Para cada uma destas posições da fonte com recurso a um microfone ligado a um sonómetro mediu-se o nível de pressão sonora em 5 pontos do compartimento. Como este compartimento tem dimensões pequenas não foi possível cumprir as distâncias mínimas de separação entre as posições do microfone expressas na norma. No compartimento recetor por cada posição da fonte sonora fazem-se também 5 medições com o microfone ligado ao sonómetro. Neste compartimento mediu-se o ruído de fundo sendo feitas no total 5 medições. O tempo de reverberação do compartimento recetor foi medido 4 vezes com o sonómetro, 2 vezes por cada posição de fonte (balão).

Na medição do isolamento sonoro a ruídos de percussão foi colocado no compartimento emissor a máquina de percussão normalizada colocada na diagonal ao pavimento do pavimento em duas posições. Para cada posição mediram-se 5 vezes o nível de pressão sonora com o sonómetro. O tempo de reverberação e o ruído de fundo como se trata dos mesmos compartimentos em estudo são os mesmos dos determinados para os ruídos aéreos.



Figura 5.6 – Fonte sonora (direita) e máquina de percussão (esquerda)

5.2.3 EDIFÍCIO RUA MOUZINHO DA SILVEIRA (E2)

O segundo edifício em estudo está localizado também no centro histórico da cidade do Porto na Rua Mouzinho da Silveira.



Figura 5.7 – Edifício Rua Mouzinho da Silveira

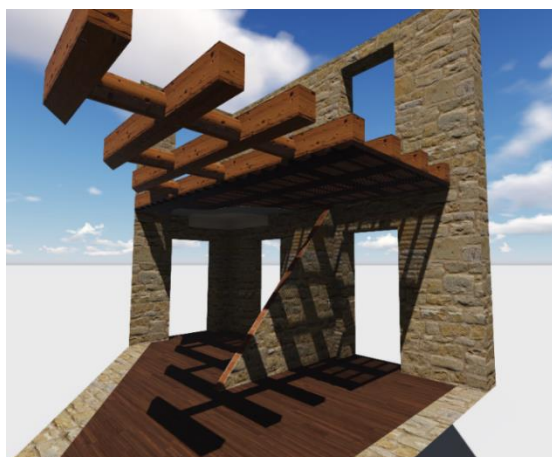


Figura 5.8 – Esquema representativo do pavimento e dos compartimentos em análise na Rua Mouzinho da Silveira

Este edifício é constituído por rés-do-chão mais 4 pisos e apresenta soluções de construção tradicionais, nos pisos a que se teve acesso, segundo ao quarto piso, apresentando, apesar do tempo que esteve fechado um grau de degradação menor do que o primeiro edifício analisado. O pavimento ainda é o original, tipo o da casa burguesa, sendo constituído por troncos de madeira falqueados nas duas faces (vigamento), tarugos, soalho pregado ao vigamento e o teto em estuque. O restante edifício apresenta paredes de alvenaria de pedra nas fachadas e as paredes interiores em tabique.



Figura 5.9 – Estrutura do pavimento da Rua Mouzinho da Silveira

As medições efetuadas neste edifício seguiram as normas NP EN ISO 140-4 para determinação do isolamento a sons aéreos e a NP EN ISO 140-7 para a determinação do isolamento sonoro de pavimentos à percussão.

Apesar do edifício estar em melhores condições que o primeiro, os pavimentos apresentam na maioria dos compartimentos buracos e em alguns não existem portas que delimitem o espaço. Foi analisado um único compartimento emissor e dois compartimentos recetores que se apresentavam devidamente limitados e isolados dos restantes compartimentos de modo a que no ensaio a maioria do som produzido pela fonte passasse através do pavimento. Procedeu-se à medição em dois compartimentos recetores, com ruídos de fundo distintos, para se proceder à comparação de resultados e estudar a influência do ruído de fundo nas medições efetuadas.

O pavimento analisado foi o que separa o terceiro andar do segundo. O compartimento emissor tem um volume de $94,5 \text{ m}^3$, o primeiro recetor apresenta 36 m^3 e o segundo $28,5 \text{ m}^3$.



Figura 5.10 – Compartimento emissor



Figura 5.11 – Compartimento recetor 1 (esquerda) e compartimento recetor 2 (direita)

Na medição do isolamento a sons aéreos dos pavimentos colocou-se no compartimento emissor um altifalante a produzir um ruído branco de 100 dB. Como se usou apenas uma fonte sonora esta foi usada em duas posições. Para cada uma destas posições da fonte e com recurso a um microfone ligado a um sonómetro mediu-se a pressão sonora em 5 pontos do compartimento. No compartimento recetor 1 por cada posição da fonte sonora fizeram-se 5 medições do nível sonoro com o microfone ligado ao sonómetro. No compartimento recetor 2 fizeram-se 4 medições do nível de pressão sonora. O ruído de fundo das duas salas recetoras foi medido com o sonómetro 5 vezes em cada sala. O tempo de reverberação dos compartimentos recetores foi medido com o sonómetro, duas vezes por cada posição de fonte (balão), 6 vezes no recetor 1 e 5 vezes no recetor 2.



Figura 5.12 – Emissão (fonte sonora e sonómetro)

Na medição do isolamento sonoro a ruídos de percussão foi colocado no compartimento emissor a máquina de percussão normalizada colocada na diagonal ao vigamento do pavimento em duas posições.

Para cada posição mediram-se 5 vezes o nível de pressão sonora com o sonómetro nas duas salas receptoras. O tempo de reverberação e o ruído de fundo como se tratam dos mesmos compartimentos em estudo são os mesmos dos determinados para os ruídos aéreos.



Figura 5.13 – Máquina de percussão no compartimento emissor (esquerda) e sonómetro na sala recetora 2 (direita)

5.2.4 EDIFÍCIO RUA DA PICARIA (E3)

O terceiro edifício em estudo está localizado também no centro histórico da cidade do Porto na Rua da Picaria.



Figura 5.14 – Edifício Rua da Picaria



Figura 5.15 – Esquema representativo do pavimento e dos compartimentos em análise da Rua da Picaria

Este edifício é constituído por rés-do-chão mais 2 pisos, apresenta na sua constituição as soluções de construção originais. O pavimento em estudo foi o piso de separação do segundo para o primeiro andar, apresentando-se todo o edifício em bom estado, uma vez que foi alvo de reabilitação, mantendo todas as soluções originais. O pavimento encontra-se no estado original, tipo o da casa burguesa, sendo constituído por troncos de madeira falqueados nas duas faces (vigamento), tarugos, soalho pregado ao vigamento e o teto em estuque. O restante edifício apresenta paredes de alvenaria de pedra nas fachadas

e as paredes interiores em tabique. No rés-do-chão devido a maiores exigências acústicas, originadas pela existência de um restaurante, o pavimento apresenta outras soluções mais favoráveis acusticamente, teto em gesso cartonado com lã de rocha.

As medições efetuadas neste edifício seguiram as normas NP EN ISO 140-4 para determinação do isolamento a sons aéreos e a NP EN ISO 140-7 para a determinação do isolamento sonoro de pavimentos à percussão.

O facto de o edifício estar em bom estado permitiu fazer mais do que uma medição. Foi possível fazer a medição de dois compartimentos do segundo para o primeiro andar que se apresentavam devidamente limitados e com o piso em muito bom estado sendo visível apenas uma pequena inclinação do mesmo.

Os compartimentos analisados situam-se no segundo piso correspondendo um a uma sala com o volume de 52 m^3 e um quarto com o volume de 15 m^3 . Os compartimentos recetores no primeiro piso estão neste momento desabitados e apresentam respetivamente os volumes de 60 m^3 e 48.6 m^3 .



Figura 5.16 – Compartimento emissor 1, sala, (esquerda) e compartimento recetor 1 (direita)

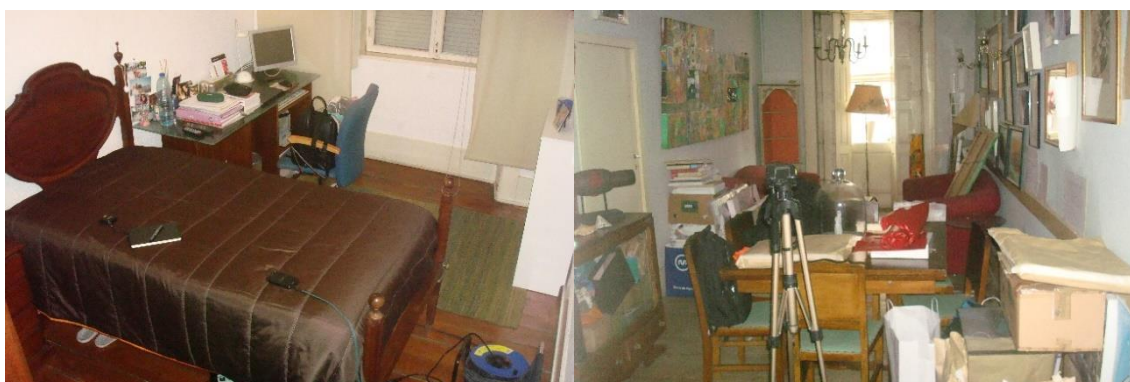


Figura 5.17 – Compartimento emissor 2, quarto, (esquerda) e compartimento recetor 2 (direita)

Na medição do isolamento a sons aéreos dos pavimentos colocou-se no compartimento emissor um altifalante a produzir um ruído branco de 100 dB. Nas medições referentes ao primeiro compartimento a fonte sonora foi colocada em duas posições fazendo-se para cada posição do altifalante a medição da pressão sonora em 5 pontos no compartimento emissor. No recetor foram realizadas também para cada posição da fonte sonora 5 medições da pressão sonora sendo medido também neste compartimento o ruído de fundo em 5 posições distintas. O tempo de reverberação foi medido com o uso de um

sonómetro, 2 vezes por cada posição de fonte (balão), fazendo-se 4 medições. No segundo compartimento emissor como este apresentava dimensões muito reduzidas optou-se por fazer as medições apenas para uma posição da fonte sonora realizando-se 5 medições da pressão sonora no compartimento emissor e cinco no compartimento recetor sendo o ruído de fundo e o tempo de reverberação medido em 5 pontos neste compartimento.



Figura 5.18 – Fonte sonora no compartimento emissor 1 (esquerda) e compartimento emissor 2 (direita)

Na medição do isolamento sonoro a ruídos de percussão o ensaio foi igual nos dois compartimentos. Colocou-se no compartimento emissor a máquina de percussão normalizada colocada na diagonal ao vigamento do pavimento em duas posições. Para cada posição mediram-se 5 vezes o nível de pressão sonora com o sonómetro na sala recetora. O tempo de reverberação e o ruído de fundo como se tratam dos mesmos compartimentos em estudo são os mesmos dos determinados para os ruídos aéreos.

5.2.5 EDIFÍCIO RUA DOS CALDEIREIROS (E4)

O quarto edifício em estudo está localizado também no centro histórico da cidade do Porto na Rua dos Caldeireiros.



Figura 5.19 – Edifício Rua dos Caldeireiros

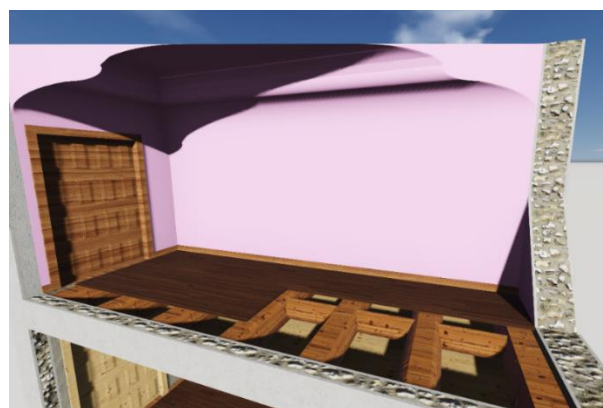


Figura 5.20 – Esquema representativo do pavimento e dos compartimentos da Rua dos Caldeireiros

O edifício é constituído por rés-do-chão mais 2 pisos e encontra-se neste momento em obras de reabilitação. Apesar de todos os pisos apresentarem as vigas em madeira alguns pavimentos já

apresentam soluções alteradas em relação às originais, como tetos falsos com lã de rocha, betonilha colocada em alguns pavimentos ou soluções que já incorporam manta acústica. Existe no entanto um pavimento entre o segundo e o primeiro andar que ainda não foi intervencionado e que apresenta a estrutura original tipo da casa burguesa. O pavimento a estudar é constituído por vigas de madeira (vigamento), tarugos, soalho pregado ao vigamento e o teto em tabuado de madeira. O restante edifício apresenta paredes de alvenaria de pedra nas fachadas e as paredes interiores em tabique.



Figura 5.21 – Exemplo da estrutura do pavimento da Rua dos Caldeireiros (não corresponde ao pavimento analisado)

As medições efetuadas neste edifício seguiram as normas NP EN ISO 140-4 para determinação do isolamento a sons aéreos e a NP EN ISO 140-7 para a determinação do isolamento sonoro de pavimentos à percussão.

O compartimento onde se fizeram as medições não se apresenta degradado e encontra-se isolado dos restantes compartimentos e do exterior pois a porta e a caixilharia da janela encontram-se em bom estado. Estas condições permitem que a maioria do som produzido atravessasse o pavimento o que torna os resultados mais representativos.

O pavimento analisado divide duas salas do segundo e do primeiro andar com um volume de 57.6 m^3 para o compartimento emissor e de 55.8 m^3 para o recetor.

Na medição do isolamento a sons aéreos dos pavimentos colocou-se no compartimento emissor um altifalante a produzir um ruído branco de 100 dB. Como se usou apenas uma fonte sonora esta foi usada em duas posições. Para cada uma destas posições da fonte com recurso a um sonómetro mediu-se a pressão sonora em 5 pontos do compartimento. No compartimento recetor por cada posição da fonte sonora fizeram-se 5 medições do nível sonoro com o sonómetro. O ruído de fundo no compartimento recetor foi medido com o sonómetro cerca de 5 vezes e o tempo de reverberação deste compartimento foi medido com o sonómetro duas vezes por cada posição de fonte (balão).



Figura 5.22 – Compartimento emissor (esquerda) e compartimento recetor (direita)

Na medição do isolamento sonoro a ruídos de percussão foi colocado no compartimento emissor a máquina de percussão normalizada colocada na diagonal ao vigamento do pavimento em duas posições. Para cada posição mediram-se 5 vezes o nível de pressão sonora com o sonómetro no compartimento recetor. O tempo de reverberação e o ruído de fundo como se tratam dos mesmos compartimentos em estudo são os mesmos dos determinados para os ruídos aéreos.

5.2.6 EDIFÍCIO RUA MOUZINHO DA SILVEIRA (E5)

O quinto edifício em estudo está localizado também no centro histórico da cidade do Porto na Rua Mouzinho da Silveira.



Figura 5.23 – Edifício Rua Mouzinho da Silveira 2



Figura 5.24 – Esquema representativo do pavimento e dos compartimentos em análise da Rua Mouzinho da Silveira

O edifício é constituído por rés-do-chão mais 1 piso e encontra-se neste momento abandonado. O pavimento que separa o primeiro piso do rés-do-chão apresenta as soluções de construção originais do pavimento típico da casa burguesa, constituído por paus rolados (vigamento), tarugos e soalho pregado ao vigamento não apresentando qualquer tipo de revestimento no teto. Em alguns locais do compartimento emissor, que se encontram fora da área de pavimento a medir, este pavimento encontra-se degradado. As paredes de fachada e meação são de alvenaria de pedra e no interior as paredes que dividem compartimentos são compostas por placas de madeira com uma estrutura de suporte também em madeira.



Figura 5.25 – Estrutura do pavimento do edifício da Rua Mouzinho da Silveira 2

As medições efetuadas neste edifício seguiram as normas NP EN ISO 140-4 para determinação do isolamento a sons aéreos e a NP EN ISO 140-7 para a determinação do isolamento sonoro de pavimentos à percussão.

O pavimento analisado apresentava alguns elementos do revestimento do piso degradado, sendo que foi possível identificar algumas zonas onde o revestimento original foi substituído por placas de madeira. O compartimento emissor apresentava-se delimitado com portas enquanto o recetor não tinha porta. No entanto como as caixilharias estavam em bom estado garantia-se a estanquidade aos sons provenientes do exterior.

O pavimento analisado divide duas salas do primeiro andar para o rés-do-chão com um volume de 85 m³ para o compartimento emissor e de 145 m³ para o recetor.

Na medição do isolamento a sons aéreos dos pavimentos colocou-se no compartimento emissor uma fonte sonora omnidirecional a produzir um ruído branco de 100 dB. Como se usou apenas uma fonte sonora esta foi usada em duas posições. Para cada uma destas posições da fonte com recurso a um sonómetro mediu-se a pressão sonora em 5 pontos do compartimento. No compartimento recetor por cada posição da fonte sonora fizeram-se 5 medições do nível sonoro com o sonómetro. O ruído de fundo no compartimento recetor foi medido com o sonómetro cerca de 5 vezes e o tempo de reverberação deste compartimento foi medido com o sonómetro duas vezes por cada posição de fonte sonora.



Figura 5.26 – Compartimento emissor (esquerda) e compartimento recetor (direita)

Na medição do isolamento sonoro a ruídos de percussão foi colocado no compartimento emissor a máquina de percussão normalizada colocada na diagonal ao vigamento do pavimento em duas posições. Para cada posição mediram-se 5 vezes o nível de pressão sonora com o sonómetro no compartimento recetor. O tempo de reverberação e o ruído de fundo como se tratam dos mesmos compartimentos em estudo são os mesmos dos determinados para os ruídos aéreos.

Na medição dos sons de percussão mediu-se o nível sonoro provocado pela máquina de percussão no compartimento emissor. O objetivo desta medição é saber se existe influência dos sons aéreos provocados no compartimento emissor pelo contacto da máquina de percussão com o pavimento de modo a aumentar o nível sonoro no recetor. Para isso foram efetuadas cerca de 5 medições com o sonómetro no compartimento recetor para uma posição da máquina de percussão.

5.2.7 EDIFÍCIO RUA SANTO ANTÓNIO DE ARNELAS, OLIVAL (E6)

O sexto edifício em estudo está localizado em Gaia na Rua Santo António de Arnela no Olival.



Figura 5.27 – Edifício Rua Santo António de Arnelas



Figura 5.28 - Esquema representativo do pavimento e dos compartimentos em análise da Rua Santo António de Arnelas

O edifício é constituído por uma cave mais dois pisos destinados a habitação. O pavimento que separa os dois pisos destinados a habitação apresentam as soluções de construção originais do pavimento típico da casa burguesa, constituído por paus rolados (vigamento), tarugos e soalho pregado ao vigamento e teto em estuque. O restante edifício apresenta paredes de alvenaria de pedra nas fachadas revestidas a cerâmico e as paredes interiores em tabique. O pavimento que separa o primeiro piso de habitação da cave é também constituído por soalho com vigamento de madeira não apresentando qualquer revestimento no teto.

As medições efetuadas neste edifício seguiram as normas NP EN ISO 140-4 para determinação do isolamento a sons aéreos e a NP EN ISO 140-7 para a determinação do isolamento sonoro de pavimentos à percussão.

O pavimento onde foram realizadas as medições é o que separa os dois pisos que servem de habitação. Os compartimentos em análise não se apresentam degradados e encontram-se vedados dos restantes compartimentos e do exterior pois as portas e as caixilharias das janelas encontram-se em bom estado. Estas condições permitem que a maioria do som produzido atravessasse o pavimento o que torna os resultados mais representativos.

O compartimento recetor em análise tem um volume de 90 m³ enquanto o compartimento emissor tem um volume de 120 m³.



Figura 5.29 – Compartimento emissor (esquerda) e compartimento recetor (direita)

Na medição do isolamento a sons aéreos dos pavimentos colocou-se no compartimento emissor um altifalante a produzir um ruído branco de 100 dB. Como se usou apenas uma fonte sonora esta foi usada em duas posições. Para cada uma destas posições da fonte com recurso a um sonómetro mediu-se a pressão sonora em 5 pontos do compartimento. No compartimento recetor por cada posição da fonte sonora fizeram-se 5 medições do nível sonoro com o sonómetro. O ruído de fundo no compartimento recetor foi medido com o sonómetro cerca de 5 vezes e o tempo de reverberação deste compartimento foi medido com o sonómetro uma vez por cada posição de fonte (balão).



Figura 5.30 – Fonte sonora (esquerda) e máquina de percussão (direita)

Na medição do isolamento sonoro a ruídos de percussão foi colocado no compartimento emissor a máquina de percussão normalizada colocada na diagonal ao vigamento do pavimento em duas posições. Para cada posição mediram-se 5 vezes o nível de pressão sonora com o sonómetro no compartimento recetor. O tempo de reverberação e o ruído de fundo como se tratam dos mesmos compartimentos em estudo são os mesmos dos determinados para os ruídos aéreos.

Na medição dos sons de percussão mediu-se o nível sonoro provocado pela máquina de percussão no compartimento emissor. O objetivo desta medição é saber se existe influência dos sons aéreos provocados no compartimento emissor pelo contacto da máquina de percussão com o pavimento, *eco dos impactos*, de modo a aumentar o nível sonoro no recetor. Para isso foram efetuadas cerca de 5 medições com o sonómetro no compartimento recetor para uma posição da máquina de percussão.

6

ANÁLISE EXPERIMENTAL E TEÓRICA

6.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados obtidos nas medições *in situ* procedendo-se à explicação do processo de determinação dos índices únicos. Será também dada a conhecer a metodologia de cálculo teórico para o isolamento sonoro a sons aéreos, segundo o método de Sharp, e para o isolamento sonoro a sons de percussão, pelo método da norma EN 12354 – 2, procedendo-se também à explicação de determinação dos índices únicos.

A combinação dos resultados dos ensaios experimentais *in situ* com os modelos teóricos resulta numa maior quantidade de informação de desempenho dos pavimentos em análise.

6.2 ANÁLISE DAS MEDIÇÕES *IN SITU* EDIFÍCIO DA RUA DOS CALDEIREIROS.

A metodologia de cálculo aplicada é transversal a todos os edifícios. Como tal apresenta-se, como exemplo, a metodologia de cálculo aplicada ao edifício da Rua dos Caldeireiros.

6.2.1 TRATAMENTO DOS RESULTADOS PARA OBTENÇÃO DO ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A SONS AÉREOS $D_{NT,W}$

Os dados em seguida apresentados como já referido anteriormente dizem respeito ao edifício situado na Rua dos Caldeireiros. Através da sua análise pretende-se chegar ao valor único do isolamento a sons aéreos entre compartimentos adjacentes de pisos consecutivos.

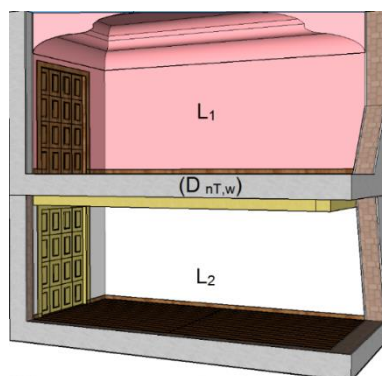


Figura 6.1 – Esquema de medição do isolamento a sons aéreos na Rua dos Caldeireiros

6.2.1.1 Cálculo do nível médio de pressão sonora, L, no compartimento emissor e recetor

O cálculo do índice de isolamento a sons aéreos começa na determinação do nível médio de pressão sonora no compartimento emissor (L_1) e no compartimento recetor (L_2).

Na determinação dos níveis de pressão sonora do emissor (L_1) e do recetor (L_2) foram medidas dez posições distribuídas uniformemente, do microfone, pelo respetivo compartimento, cinco por cada posição da fonte sonora.

O parâmetro L corresponde a uma média energética dos níveis de pressão sonora medidos nas n posições do microfone e é determinado pela seguinte equação:

$$L = 10 * \log\left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{\frac{L_j}{10}}\right) \tag{6.1}$$

Sendo L_i os níveis de pressão sonora nas n posições do microfone (dB).

Quadro 6.1 – Níveis de pressão sonora obtidos no compartimento emissor em bandas de 1/3 de oitava

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
L ₁	70,8	78,0	85,2	81,7	82,8	82,1	81,0	82,9	84,3	83,1	83,4	81,6	83,2	82,3	80,9	85,5
L ₂	75,6	78,2	85,1	79,3	81,6	83,0	83,9	86,7	87,1	85,4	85,6	84,3	84,4	83,4	82,3	86,8
L ₃	83,3	81,4	83,9	77,2	86,4	89,3	89,7	86,0	85,8	86,7	86,7	87,2	88,1	86,1	85,1	89,5
L ₄	73,3	79,0	84,9	77,8	79,7	83,1	82,7	83,4	82,8	81,9	81,4	79,7	82,3	82,0	79,3	83,4
L ₅	76,8	76,7	76,4	74,7	77,9	82,6	82,8	81,6	82,6	82,1	80,8	78,7	81,4	81,4	79,6	83,3
L ₆	77,0	78,5	79,9	76,1	78,9	82,5	82,9	83,7	83,7	83,3	83,0	81,4	83,5	82,1	80,9	85,3
L ₇	76,3	76,7	83,0	79,4	79,3	83,6	86,0	85,8	85,5	84,7	83,8	82,0	84,3	83,4	81,7	85,8
L ₈	80,0	79,0	82,4	78,0	82,3	86,0	86,2	85,4	84,7	84,3	83,3	81,8	84,7	84,2	82,3	86,9
L ₉	75,4	75,5	78,2	77,4	78,5	82,6	82,0	83,5	83,5	82,8	80,8	79,5	82,0	81,6	79,8	83,9
L ₁₀	73,0	75,9	80,1	77,0	77,4	81,3	82,1	81,2	82,0	81,5	80,3	78,4	81,6	80,9	79,2	83,1
L₁	70,8	78,0	85,2	81,7	82,8	82,1	81,0	82,9	84,3	83,1	83,4	81,6	83,2	82,3	80,9	85,5

Quadro 6.2 – Níveis de pressão sonora obtidos no compartimento recetor em bandas de 1/3 de oitava

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
L ₁	64,1	61,4	61,6	59,7	57,8	56,9	52,7	50,6	47,5	43,0	38,9	35,3	34,8	32,0	28,6	30,8
L ₂	60,8	61,2	61,1	58,6	57,9	57,2	52,2	50,4	47,0	43,5	39,0	34,7	34,7	32,0	28,0	30,7
L ₃	57,6	60,6	59,2	59,8	59,0	56,9	53,1	51,0	47,2	43,7	40,5	39,6	43,4	33,8	31,9	32,4

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
L ₄	56,1	59,5	58,6	58,3	57,7	55,9	52,3	49,7	47,2	43,4	40,6	39,3	43,9	35,8	32,3	33,0
L ₅	60,7	58,0	61,2	56,5	56,7	56,8	51,8	51,2	47,4	43,5	40,8	35,0	35,2	33,2	29,6	33,9
L ₆	64,2	62,7	61,1	57,2	57,1	56,9	52,7	51,5	47,5	44,0	40,3	36,4	36,8	33,5	30,0	34,5
L ₇	57,4	61,3	60,8	59,2	57,2	59,0	53,2	51,3	47,7	43,4	40,2	36,6	38,8	32,7	29,5	33,7
L ₈	57,7	61,9	60,9	59,2	56,8	57,8	52,4	50,6	47,5	43,3	40,2	36,1	35,7	32,7	29,9	32,9
L ₉	55,3	59,9	60,8	59,2	55,8	56,5	53,2	50,6	47,2	43,2	39,9	35,7	35,2	32,5	29,2	32,3
L ₁₀	57,8	59,1	61,2	59,3	55,9	57,1	52,5	50,6	46,9	42,8	40,1	37,4	37,9	35,2	32,6	33,9
L₂	60,3	60,8	60,7	58,8	57,3	57,2	52,6	50,8	47,3	43,4	40,1	36,9	39,1	33,5	30,4	33,0

6.2.1.2 Correção do ruído de fundo

A medição do ruído de fundo no compartimento recetor tem como principal objetivo a identificação de possíveis perturbações que possam surgir exteriores ao local do ensaio.

A norma recomenda que se deve garantir uma diferença entre o nível sonoro medido combinado com o ruído de fundo e o ruído de fundo de no mínimo 6 dB. A norma recomenda também uma diferença superior ou igual a 10 dB para evitar o uso de qualquer tipo de correção. Caso o valor da diferença seja inferior a 6 dB o nível de pressão sonora medido deve usar uma correção de 1.3 dB para todas as bandas de frequência. Já se essa diferença for superior a 6 dB mas inferior a 10 dB aplica-se uma correção calculada através da equação:

$$L = 10 * \log\left(10^{\frac{L_{sb}}{10}} - 10^{\frac{L_b}{10}}\right) \quad (6.2)$$

onde L (dB) é o nível do sinal corrigido, L_{sb} (dB) é o nível do sinal e do ruído de fundo combinados e L_b (dB) é o nível do ruído de fundo.

O nível do ruído de fundo é obtido fazendo uma média energética utilizando a expressão (6.1).

Quadro 6.3 – Nível do ruído de fundo (RF)

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
RF1	33,3	27,5	31,7	31,3	28,4	27,0	25,4	26,4	23,4	20,8	18,2	18,2	16,9	14,9	13,3	11,9
RF2	38,8	35,8	32,1	29,8	30,7	31,7	25,3	26,4	30,7	22,8	20,0	22,5	23,3	18,8	19,0	13,7
RF3	33,3	33,1	33,5	33,2	29,6	30,9	27,3	28,3	27,9	26,2	23,8	24,6	22,3	19,1	17,4	15,3
RF4	44,6	40,1	43,7	40,1	36,5	33,9	29,1	26,6	27,6	23,7	21,1	22,4	21,1	16,7	15,7	12,3
RF5	36,8	39,3	36,8	34,1	30,3	30,8	25,4	24,7	25,9	21,6	18,8	20,8	19,2	15,5	16,6	13,0
L_b	39,6	37,0	38,3	35,4	32,2	31,4	26,8	26,6	27,7	23,5	20,9	22,2	21,1	17,3	16,8	13,4

Quadro 6.4 – Níveis de pressão sonora no local recetor corrigidos por banda de 1/3 de oitava

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
L_{sb}	60,3	60,8	60,7	58,8	57,3	57,2	52,6	50,8	47,3	43,4	40,1	36,9	39,1	33,5	30,4	33,0
L_b	39,6	37,0	38,3	35,4	32,2	31,4	26,8	26,6	27,7	23,5	20,9	22,2	21,1	17,3	16,8	13,4
$L_{sb}-L_b$	20,7	23,7	22,5	23,4	25,1	25,8	25,9	24,1	19,6	19,9	19,2	14,8	18,0	16,2	13,6	19,6
L_2	60,3	60,8	60,7	58,8	57,3	57,2	52,6	50,8	47,3	43,4	40,1	36,9	39,1	33,5	30,4	33,0

Como o valor do ruído de fundo se encontra em mais de 10 dB abaixo do nível do sinal combinado com o ruído de fundo não foram necessárias correções neste caso.

6.2.1.3 Cálculo do Tempo de reverberação

O tempo de reverberação foi medido no compartimento recetor. Como já foi definido o tempo de reverberação é o tempo medido em segundos que o nível de pressão sonora demora a decair 60 dB (T_{60}). No entanto é por vezes difícil conseguir o decaimento de 60 dB optando por se efetuar um decaimento mínimo de metade, 30 dB (T_{30}), e depois é extrapolado.

Para tal faz-se a excitação do campo sonoro através de uma fonte (balão) com energia suficiente para garantir esse decaimento.

O tempo de reverberação calculado é uma média aritmética dos tempos de reverberação das várias medições efetuadas por banda de frequência.

Quadro 6.5 – Tempo de reverberação no compartimento recetor

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
T_{60}	0,51	0,67	0,73	0,79	0,87	0,81	0,86	0,88	0,77	0,80	0,74	0,68	0,66	0,65	0,67	0,64

6.2.1.4 Determinação do índice único de avaliação, $D_{nT,w}$

Usando os valores dos níveis médios de pressão sonora obtidos no compartimento emissor (L_1) e os valores obtidos para o compartimento recetor (L_2), obtém-se, através da sua diferença, o isolamento sonoro bruto (D_n) calculado pela expressão 3.3.

Estes valores são corrigidos posteriormente para o tempo de reverberação do compartimento recetor face a um valor de referência T_0 através da expressão:

$$D_{nT} = (L_1 - L_2) + 10 * \log\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (6.3)$$

Quadro 6.6 – Valores do isolamento sonoro padronizado D_{nT} por bandas de 1/3 de oitava

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
L_1	77,6	78,2	82,8	78,3	81,4	84,3	84,8	84,4	84,5	83,9	83,4	82,3	84,0	83,0	81,5	85,8
L_2	60,3	60,8	60,7	58,8	57,3	57,2	52,6	50,8	47,3	43,4	40,1	36,9	39,1	33,5	30,4	33,0
T_{60}	0,51	0,67	0,73	0,79	0,87	0,81	0,86	0,88	0,77	0,80	0,74	0,68	0,66	0,65	0,67	0,64
D_{nT}	17,5	18,7	23,7	21,4	26,5	29,2	34,5	36,0	39,0	42,5	45,0	46,7	46,1	50,6	52,3	53,9

Obtidos os valores do isolamento sonoro padronizado, D_{nT} , para cada banda de frequência faz-se um ajuste, segundo a norma NP EN ISO 717-1, da curva real, de D_{nT} , à curva de referência obtendo o índice único de avaliação, o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{nT,w}$.

O ajuste é feito por iterações da curva de referência (CR) relativamente à curva real de forma que a soma dos desvios favoráveis, valor medido no compartimento é superior ao valor da curva de referência ($\Delta_1 = CR_1 - D_{nT}$), a dividir pelo número total de bandas de frequência seja no máximo 2,0. O valor único $D_{nT,w}$ vai corresponder ao valor da ordenada da curva ajustada para a frequência de 500 Hz.

Quadro 6.7 – Ajuste da curva real D_{nT} à curva de referência

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
D_{nT}	17,5	18,7	23,7	21,4	26,5	29,2	34,5	36,0	39,0	42,5	45,0	46,7	46,1	50,6	52,3	53,9
CR	19	22	25	28	31	34	37	38	39	40	41	42	42	42	42	42
ΔCR	1,5	3,3	1,3	6,6	4,5	4,8	2,5	2,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-
$\Sigma \Delta CR$	$1,5 + 3,3 + 1,3 + 6,6 + 4,5 + 4,8 + 2,5 + 2,0 + 0,0$															
	16														1,6	

O valor do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{nT,w}$, para o pavimento do edifício em análise toma o valor de 38 dB.

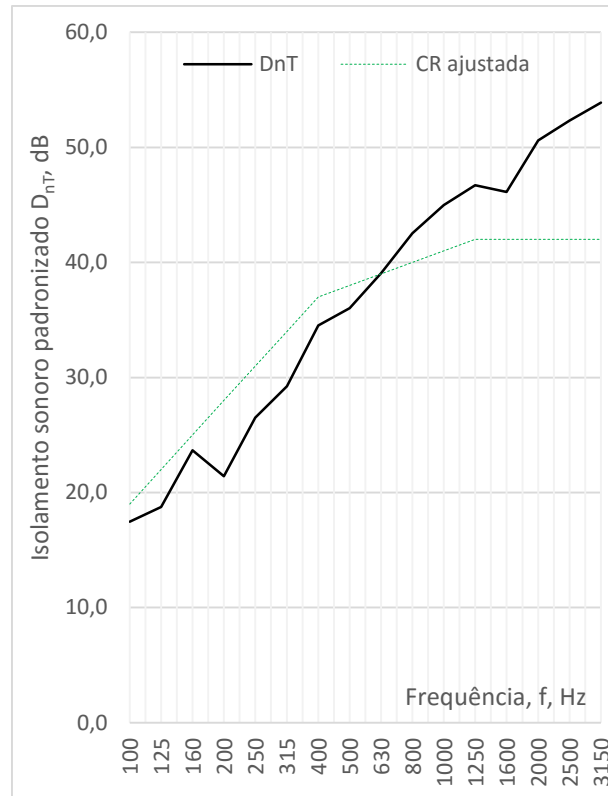


Figura 6.2 – Representação gráfica do ajuste da curva real, D_{nT} , à curva de referência

O mesmo método é apresentado na figura 6.2 mas na forma gráfica de acordo com o especificado na NP ISO 140-5.

6.2.2 TRATAMENTO DOS RESULTADOS PARA OBTENÇÃO DO ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO A SONS DE PERCUSSÃO $L'_{nT,w}$

Os dados em seguida apresentados como já referido anteriormente dizem respeito ao edifício situado na Rua dos Caldeireiros. Através da sua análise pretende-se calcular o valor único do isolamento a sons de percussão entre compartimentos adjacentes de pisos consecutivos.

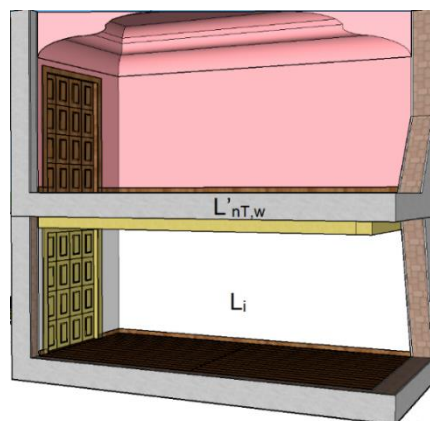


Figura 6.3 – Esquema de medição do isolamento a sons de percussão na Rua dos Caldeireiros

6.2.2.1 Cálculo do nível médio de pressão sonora no recetor, L_i

O cálculo do índice de isolamento a sons de percussão começa pela determinação do nível médio de pressão sonora no compartimento recetor (L_i) aquando de uma percussão normalizada no compartimento emissor.

O nível médio de pressão sonora obtido no compartimento recetor (L_i) foi determinado pela medição em dez pontos distintos uniformemente distribuídos, cinco medições por cada posição da máquina de percussão.

O parâmetro L_i calcula-se por uma média energética dos níveis de pressão sonora medidos nas n posições do microfone determinado pela expressão (6.1).

Quadro 6.8 – Níveis de pressão sonora obtidos no compartimento recetor em bandas de 1/3 de oitava

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
L_1	85,0	80,0	83,5	81,8	81,5	82,2	79,3	77,0	74,6	72,5	71,3	67,1	63,1	58,0	50,6	43,6
L_2	81,0	86,4	85,8	82,6	81,9	82,0	79,9	77,3	75,8	73,2	72,1	67,9	64,2	59,2	52,5	45,4
L_3	82,4	83,7	88,1	85,2	82,9	81,7	80,0	77,5	75,8	74,5	72,7	68,5	64,3	60,1	53,7	46,4
L_4	79,5	81,8	85,2	84,0	81,8	83,4	79,5	77,7	75,5	73,8	72,6	67,7	64,8	60,6	53,3	46,2
L_5	79,5	80,4	84,6	83,6	81,8	83,3	79,9	76,9	75,4	74,2	72,2	67,5	64,4	60,2	54,6	46,8
L_6	90,5	79,7	83,1	82,3	82,0	83,2	79,9	78,5	75,7	74,3	72,6	68,6	65,5	61,4	55,0	47,5
L_7	85,6	84,1	83,9	84,3	83,2	81,3	80,6	78,3	76,2	75,7	73,9	69,7	66,2	61,5	55,1	48,2
L_8	85,4	82,0	87,5	87,4	82,8	82,5	80,0	78,4	77,0	76,0	73,6	69,6	67,4	62,7	56,1	48,9
L_9	80,2	81,1	86,9	84,4	82,2	81,5	81,2	78,4	76,8	76,4	73,1	70,5	66,9	62,8	56,1	49,7
L_{10}	78,1	81,4	82,4	86,9	82,4	81,8	80,2	78,6	76,4	75,8	73,3	70,0	66,9	62,9	57,1	50,4
L_i	84,5	82,6	85,5	84,6	82,3	82,4	80,1	77,9	76,0	74,8	72,8	68,9	65,6	61,2	54,8	47,7

6.2.2.2 Correção do ruído de fundo

As medições do ruído de fundo no compartimento recetor são realizadas para garantir que os resultados obtidos não sejam afetados por ruídos perturbadores que possam vir do exterior do compartimento em análise.

As correções do ruído de fundo fazem-se de acordo com o descrito em 6.2.1.2 através da expressão (6.2).

Como estamos a analisar o mesmo pavimento e os mesmos locais emissores e recetores o ruído de fundo vai ser o mesmo do presente no quadro 6.3 e consequentemente o nível de pressão sonora no local recetor corrigido para o ruído de fundo vai ser o mesmo do quadro 6.4.

6.2.2.3 Cálculo do tempo de reverberação

O tempo de reverberação foi medido no compartimento recetor. Como já foi definido o tempo de reverberação é o tempo, medido em segundos, que o nível de pressão sonora demora a decair 60 dB

(T_{60}). No entanto é por vezes difícil conseguir o decaimento de 60 dB optando por efetuar um decaimento mínimo de metade, 30 dB (T_{30}), e depois é extrapolado.

Para tal faz-se a excitação do campo sonoro através de uma fonte (balão) com energia suficiente para garantir esse decaimento.

O tempo de reverberação calculado é uma média aritmética dos tempos de reverberação das várias medições efetuadas por banda de frequência.

Como se trata do mesmo compartimento emissor e recetor o tempo de reverberação vai ser igual ao do quadro 6.5.

6.2.2.4 Determinação do índice único, $L'_{nT,w}$

Tendo os valores do nível sonoro no local recetor (L_i) corrigidos posteriormente para o tempo de reverberação do compartimento recetor face a um valor de referência T_0 através da expressão:

$$L'_{nT} = L_i + 10 * \log\left(\frac{T}{T_0}\right) \tag{6.4}$$

obtém-se o isolamento sonoro padronizado, L'_{nT} .

Quadro 6.9 - Valores do isolamento sonoro padronizado L'_{nT} por bandas de 1/3 de oitava

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
L_i	84,5	82,6	85,5	84,6	82,3	82,4	80,1	77,9	76,0	74,8	72,8	68,9	65,6	61,2	54,8	47,7
T_{60}	0,51	0,67	0,73	0,79	0,87	0,81	0,86	0,88	0,77	0,80	0,74	0,68	0,66	0,65	0,67	0,64
L'_{nT}	84,6	83,8	87,1	86,6	84,7	84,4	82,4	80,3	77,9	76,9	74,5	70,2	66,8	62,3	56,0	48,8

Obtidos os valores do isolamento sonoro padronizado, L'_{nT} , para cada banda de frequência faz-se um ajuste, segundo a norma NP EN ISO 717-2, da curva real, L'_{nT} , à curva de referência obtendo o índice único de avaliação, o índice de isolamento sonoro a sons de percussão, $L'_{nT,w}$.

O ajuste é feito por iterações da curva de referência (CR) relativamente à curva real de forma que a soma dos afastamentos positivos, valor da curva de referência é superior ao valor medido no compartimento ($\Delta_1 = L'_{nT} - CR_1$), a dividir pelo número total de bandas de frequência seja no máximo 2.0. O valor único $L'_{nT,w}$ vai corresponder ao valor da ordenada da curva ajustada para a frequência de 500 Hz.

Quadro 6.10 – Ajuste da curva real L'_{nT} à curva de referência

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
L'_{nT}	84,6	83,8	87,1	86,6	84,7	84,4	82,4	80,3	77,9	76,9	74,5	70,2	66,8	62,3	56,0	48,8
CR	81	81	81	81	81	81	80	79	78	77	76	73	70	67	64	61

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	
ΔCR	3,6	2,8	6,1	5,6	3,7	3,4	2,4	1,3	-	-	-	-	-	-	-	-	
$\Sigma \Delta CR$	$3,6 + 2,8 + 6,1 + 5,6 + 3,7 + 3,4 + 2,4 + 1,3$								16								1,8

O valor do isolamento sonoro a sons de percussão para o pavimento do edifício em estudo é 79 dB.

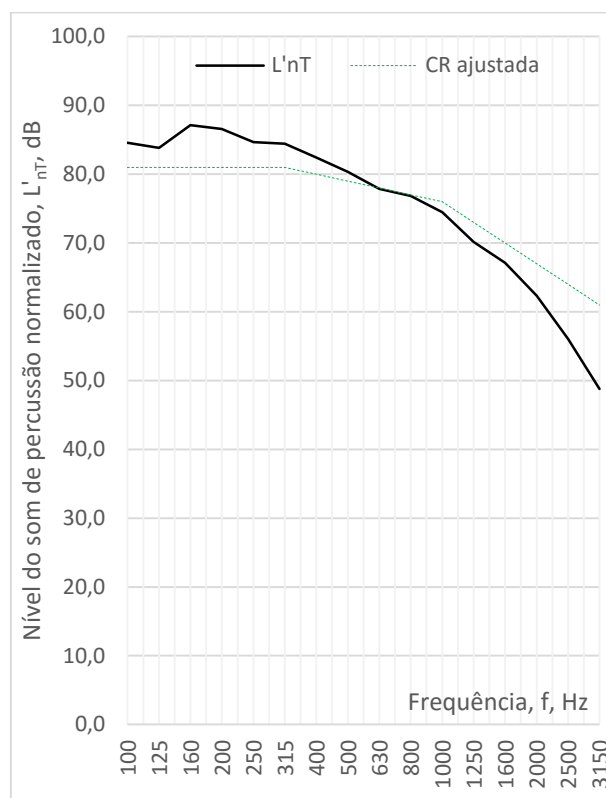


Figura 6.4 - Representação gráfica do ajuste da curva real, L'_{nT} , à curva de referência

O mesmo método é apresentado na figura 6.4 mas na forma gráfica de acordo com o especificado na NP ISO 140-7.

6.2.3 MEDIÇÃO DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA NO EMISSOR PROVOCADO PELA MÁQUINA DE PERCUSSÃO

Num dos edifícios em estudo foi realizada a medição do nível de pressão sonora no compartimento emissor provocado pela máquina de percussão. Esta medição irá permitir concluir se existe ou não influência do ruído aéreo produzido pela máquina de percussão na medição do nível de isolamento a sons de percussão $L'_{nT,w}$.

Para tal foram feitas cinco medições do nível de pressão sonora no compartimento emissor e calculado o nível de pressão sonora médio.

Quadro 6.11 - Níveis de pressão sonora obtidos no compartimento emissor em bandas de 1/3 de oitava

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
L ₁	76,6	80,7	86,3	85,1	84,9	85,1	89,3	87,4	87,2	87,0	84,1	82,9	80,2	77,5	74,7	69,9
L ₂	75,8	82,0	85,3	86,6	82,7	84,6	87,1	86,8	86,8	87,0	83,7	82,3	79,6	76,6	73,7	68,8
L ₃	71,1	80,6	84,9	83,6	83,8	82,2	87,1	85,4	85,6	86,1	82,6	80,7	77,7	74,8	71,4	66,5
L ₄	79,3	79,5	84,9	84,0	84,6	84,5	86,0	84,5	84,9	84,1	80,7	79,5	76,0	74,0	70,5	65,7
L ₅	78,7	81,3	85,0	86,7	84,4	85,1	84,5	83,9	84,4	84,3	81,2	79,1	75,7	73,1	69,6	64,5
L_{li}	77,1	80,9	85,3	85,4	84,1	84,4	87,1	85,8	85,9	85,9	82,7	81,2	78,2	75,5	72,4	67,5

L_{li} – Nível sonoro no compartimento emissor

Com os valores de L_{li}, de L'_{nT} e D_{nT} já calculados para o pavimento procede-se à verificação da influência dos sons aéreos produzidos pela máquina de percussão na medição do L'_{nT,w}.

Para que não exista influência dos sons aéreos estes têm de cumprir a expressão seguinte:

$$L_{li} - D_{nT} < L'_{nT} - 10 \tag{6.5}$$

Ou seja o nível de pressão sonora que se ouve no recetor proveniente do som aéreo produzido pela máquina de percussão têm de ser 10 dB inferior ao nível de isolamento sonoro a sons de percussão.

Quadro 6.12 – Verificação da influência dos sons aéreos produzidos pela máquina de percussão na medição de L'_{nT,w}

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
L _{li}	77,1	80,9	85,3	85,4	84,1	84,4	87,1	85,8	85,9	85,9	82,7	81,2	78,2	75,5	72,4	67,5
L' _{nT}	70,8	78,1	79,1	77,3	75,5	77,9	83,3	80,3	81	79,2	78,8	77,6	77,6	75,7	73,3	68,7
D _{nT}	22	23,5	19,4	22,2	21,3	21,2	22,5	23,2	22,9	24,5	25,2	26,8	27,5	27,1	27,2	28,7
L _{li} -D _{nT}	55,1	57,4	65,9	63,2	62,8	63,2	64,6	62,6	63,0	61,4	57,5	54,4	50,7	48,4	45,2	38,8
L' _{nT} -10	60,8	68,1	69,1	67,3	65,5	67,9	73,3	70,3	71	69,2	68,8	67,6	67,6	65,7	63,3	58,7
	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok

6.2.4 SÍNTESE DOS RESULTADOS

A síntese dos resultados obtidos do nível médio de pressão sonora obtidos na medição do isolamento a sons aéreos no compartimento emissor (L_l), no compartimento recetor (L₂) corrigido do ruído de fundo, o nível médio de pressão sonora no compartimento recetor (L_i) para os sons de percussão, são apresentados no quadro 6.13.

Quadro 6.13 – Valores de L₁, L₂ e L_i do edificado ensaiado

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	
E1	L ₁	67,9	76,1	78,2	77,7	79,3	83,0	84,6	84,5	84,6	82,5	81,5	79,8	81,4	80,7	79,0	82,6
	L ₂	51,5	51,0	46,7	44,3	43,9	41,6	40,5	40,8	39,3	36,6	33,9	31,3	31,9	31,1	28,5	27,0
	L _i	70,0	73,7	67,7	67,9	65,1	63,1	60,4	57,3	54,9	53,4	51,7	50,1	47,4	45,5	42,8	33,4
E2	L ₁	70,2	71,6	76,0	74,8	75,5	79,4	80,5	80,5	80,6	78,7	76,9	75,2	77,3	76,2	74,2	77,9
	L ₂	57,0	55,4	56,0	53,4	50,5	50,8	48,0	46,4	45,5	42,7	40,1	38,2	35,2	33,0	30,9	29,6
	L _i	65,2	67,1	70,2	69,2	68,7	65,1	70,1	70,2	67,0	65,0	63,0	59,0	53,0	49,2	43,1	37,7
E3.1	L ₁	64,2	67,3	75,4	73,3	74,3	85,0	83,7	84,5	85,5	84,9	82,9	80,8	82,4	81,5	78,7	80,9
	L ₂	44,6	43,0	43,4	39,4	39,4	40,8	40,5	38,2	37,7	35,3	33,9	32,0	34,0	32,3	31,5	33,1
	L _i	68,0	67,2	67,8	65,9	64,5	61,9	61,1	60,9	59,9	57,2	55,5	52,1	47,3	43,9	40,8	37,0
E3.2	L ₁	64,9	72,2	74,1	76,4	76,8	80,5	81,7	83,5	85,9	85,1	84,3	82,9	83,6	82,9	79,0	81,6
	L ₂	44,9	40,9	41,8	36,9	34,6	35,7	34,6	33,5	32,1	30,8	29,9	30,5	32,0	30,9	31,0	28,8
	L _i	62,1	66,1	66,8	64,0	61,5	58,8	60,3	58,9	54,9	51,6	47,2	43,8	39,5	33,3	30,4	30,9
E4	L ₁	77,6	78,2	82,8	78,3	81,4	84,3	84,8	84,4	84,5	83,9	83,4	82,3	84,0	83,0	81,5	85,8
	L ₂	60,3	60,8	60,7	58,8	57,3	57,2	52,6	50,8	47,3	43,4	40,1	36,9	39,1	33,5	30,4	33,0
	L _i	84,5	82,6	85,5	84,6	82,3	82,4	80,1	77,9	76,0	74,8	72,8	68,9	65,6	61,2	54,8	47,7
E5	L ₁	95,1	99,6	98,8	95,9	94,5	93,3	93,8	92,6	93,1	91,5	90,3	91,8	93,2	91,3	90,8	91,3
	L ₂	78,6	80,3	83,2	77,8	76,7	75,6	74,5	72,7	73,3	70,4	68,4	68,0	68,3	66,3	65,6	64,7
	L _i	76,3	82,4	82,9	81,5	78,9	81,4	86,6	83,6	84,1	82,7	82,1	80,6	80,2	78,0	75,3	70,7
E6	L ₁	72,2	71,8	77,2	75,5	75,4	81,0	81,7	82,6	82,7	80,7	79,4	76,9	78,0	76,6	74,6	77,9
	L ₂	39,7	38,8	41,2	35,7	32,2	33,4	33,1	31,0	26,2	23,7	22,2	24,3	25,5	22,8	19,2	20,8
	L _i	66,3	67,2	70,1	66,0	61,0	60,6	62,4	60,6	58,2	54,9	49,2	44,5	38,9	33,9	30,0	24,2

O quadro 6.14 reúne os valores das medições do ruído de fundo nos compartimentos recetores dos edifícios analisados.

Quadro 6.14 – Ruído de fundo das medições realizadas

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	
E1	RF	47,1	43,8	40,5	38,4	38,1	36,5	34,3	36,2	37,1	36,1	33,5	31,9	34,3	45,8	41,5	26,9
E2	RF	54,8	55,4	52,8	50,4	48,7	47,2	45,1	44,1	43,9	42,5	38,6	36,1	32,1	29,1	25,8	23,5

f (Hz)		100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
E3.1	RF	40,2	38,5	37,2	33,3	30,8	30,3	29,6	29,6	29,8	28,4	26,8	25,9	26,4	26,0	25,5	26,0
E3.2	RF	45,1	44,4	38,0	34,8	33,7	33,2	30,7	31,0	30,6	30,4	27,3	26,2	26,4	24,6	23,8	23,8
E4	RF	39,6	37,0	38,3	35,4	32,2	31,4	26,8	26,6	27,7	23,5	20,9	22,2	21,1	17,3	16,8	13,4
E5	RF	49,0	46,5	44,6	41,6	38,3	38,1	36,7	36,0	37,1	36,6	35,7	34,9	33,8	30,8	27,0	23,5
E6	RF	34,0	32,0	30,9	30,0	23,2	20,5	19,8	20,5	17,6	17,0	17,3	19,9	19,9	14,9	14,1	13,8

O quadro 6.15 contém os valores medidos no compartimento recetor de cada edifício para o tempo de reverberação, T_{30} .

Quadro 6.15 – Tempo de reverberação dos compartimentos recetores

f (Hz)		100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
E1	T	1,41	0,64	1,21	0,82	1,10	1,33	1,34	1,50	1,36	1,30	1,21	1,02	1,06	1,05	1,00	0,93
E2	T	0,71	0,91	0,72	0,81	0,88	0,92	0,98	0,85	0,83	0,79	0,77	0,76	0,77	0,74	0,75	0,71
E3.1	T	1,03	1,08	0,88	0,99	1,07	1,11	1,03	1,13	1,10	1,09	1,16	1,13	1,14	1,07	1,06	0,98
E3.2	T	0,39	0,37	0,35	0,37	0,34	0,34	0,38	0,37	0,36	0,35	0,37	0,35	0,37	0,37	0,37	0,38
E4	T	0,51	0,67	0,73	0,79	0,87	0,81	0,86	0,88	0,77	0,80	0,74	0,68	0,66	0,65	0,67	0,64
E5	T	1,57	1,5	1,29	1,29	1,14	1,16	1,16	1,12	1,13	1,12	1,08	1,02	0,94	0,9	0,84	0,80
E6	T	1,02	0,65	0,68	0,67	0,62	0,69	0,61	0,67	0,69	0,67	0,67	0,65	0,64	0,64	0,61	0,59

No quadro 6.16 estão representados os níveis sonoros medidos no compartimento emissor produzidos pela máquina de percussão. É de realçar que as medições só foram realizadas em dois edifícios, E5 e E6, sendo para os restantes edifícios adotados os valores do E6 pois o pavimento, o compartimento emissor e recetor são semelhantes ao deste.

Quadro 6.16 – Nível sonoro produzido pela máquina de percussão no compartimento emissor e verificação segundo a expressão 6.5

f (Hz)		100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
E1	L_{ii}	77,1	80,9	85,3	85,4	84,1	84,4	87,1	85,8	85,9	85,9	82,7	81,2	78,2	75,5	72,4	67,5
	(6.5)	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
E2	L_{ii}	77,1	80,9	85,3	85,4	84,1	84,4	87,1	85,8	85,9	85,9	82,7	81,2	78,2	75,5	72,4	67,5
	(6.5)	ok	ko	ok	ko	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
E3.1	L_{ii}	77,1	80,9	85,3	85,4	84,1	84,4	87,1	85,8	85,9	85,9	82,7	81,2	78,2	75,5	72,4	67,5

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
(6.5)	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
E3.2 L _{1i}	77,1	80,9	85,3	85,4	84,1	84,4	87,1	85,8	85,9	85,9	82,7	81,2	78,2	75,5	72,4	67,5
(6.5)	ko	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ko	ko	ok
E4 L _{1i}	77,1	80,9	85,3	85,4	84,1	84,4	87,1	85,8	85,9	85,9	82,7	81,2	78,2	75,5	72,4	67,5
(6.5)	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
E5 L _{1i}	57,0	67,2	71,3	70,9	73,9	76,0	79,9	81,7	84,1	86,2	86,1	85,5	84,5	82,4	79,7	75,5
(6.5)	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
E6 L _{1i}	77,1	80,9	85,3	85,4	84,1	84,4	87,1	85,8	85,9	85,9	82,7	81,2	78,2	75,5	72,4	67,5
(6.5)	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok

Ok – cumpre

Ko – não cumpre

Por fim são apresentados os valores dos índices únicos do isolamento a sons aéreos, $D_{nT,w}$, e do isolamento a sons de percussão, $L'_{nT,w}$, dos pavimentos analisados.

Quadro 6.17 – Índices únicos, $D_{nT,w}$ e $L'_{nT,w}$, dos pavimentos em análise

Edifício	$D_{nT,w}$ (dB)	$L'_{nT,w}$ (dB)
E1	47	63
E2	39	68
E3.1	49	63
E3.2	48	56
E4	38	79
E5	26	81
E6	53	61

6.3 ANÁLISE TEÓRICA PARA O CÁLCULO DO ISOLAMENTO A SONS AÉREOS E DE PERCUSSÃO.

A análise teórica do comportamento acústico do elemento construtivo em análise, pavimentos de madeira, mostra-se importante e de maior interesse pois permite ter uma previsão do comportamento que o elemento irá ter. Esta previsão pode depois ser comparada com os valores determinados pela

análise *in situ*. Os modelos adotados para a previsão dos valores de isolamento são pouco abrangentes e não estão adaptados para os pavimentos de madeira.

6.3.1 MÉTODO DE SHARP PARA PAREDES DUPLAS

O modelo proposto por Sharp em 1973 permite a determinação da redução sonora, R , em função da frequência, f , pelo método gráfico como foi explicado em 3.5.1 onde se apresenta a metodologia de cálculo.

Apresenta-se neste ponto um exemplo da metodologia de cálculo aplicado ao pavimento de um dos edifícios em estudo, o edifício da Rua dos Caldeireiros.

Os principais componentes dos pavimentos em análise são a madeira e os tetos em fasquiado de madeira com camadas de argamassa e acabamento em estuque. Com base na consulta realizada à bibliografia existente foi possível definir valores teóricos dos parâmetros físicos destes materiais. Os parâmetros que surgem no quadro 6.18 são provenientes de várias fontes [11, 27, 45]. Como existe ausência de informação de alguns indicadores foram tomados valores tendo por base intervalos de valores encontrados ou valores calculados aproximadamente.

Quadro 6.18 – Parâmetros e valores de cálculo

Parâmetros	Madeira	Fasquio com revestimento
Densidade (kg/m^3)	600	1500
Fator de perdas	0,04	0,015
C_L (m/s)	4470	1600
Coefficiente de Poisson	0,4	0,2
Módulo de Elasticidade (Mpa)	2000	12200

Para o cálculo pelo método de Sharp são necessárias também algumas dimensões dos pavimentos. Na figura 6.5 está representado um corte do pavimento tipo, em análise neste exemplo com as suas dimensões.



Figura 6.5 – Corte do pavimento da Rua dos Caldeireiros

Tendo as dimensões do pavimento e os parâmetros dos elementos que o constituem pode-se proceder ao cálculo.

Começa-se por calcular os pontos notáveis da figura 3.7 apresentados no quadro 6.19.

Quadro 6.19 – Pontos notáveis para representação no método gráfico de Sharp

Ordenadas		Abcissas	
f_0 (Hz) calculado pela expressão 3.11	60	R_A (dB) calculado pela expressão 3.13	15,1
f_1 (Hz) calculado pela expressão 3.12	183	R_D (dB) calculado pela expressão 3.16	44,4
$0.5 \cdot f_{c2}$ (Hz)	363	R_{B1} (dB) calculado pela expressão 3.14	30,8
f_{c2} (Hz) calculado pela expressão 3.8	726	R_C (dB) calculado pela expressão 3.15	22,8

Pelo método gráfico de Sharp, ilustrado na Figura 6.6, obtêm-se os dados da redução sonora, R, por frequência para o pavimento em estudo.

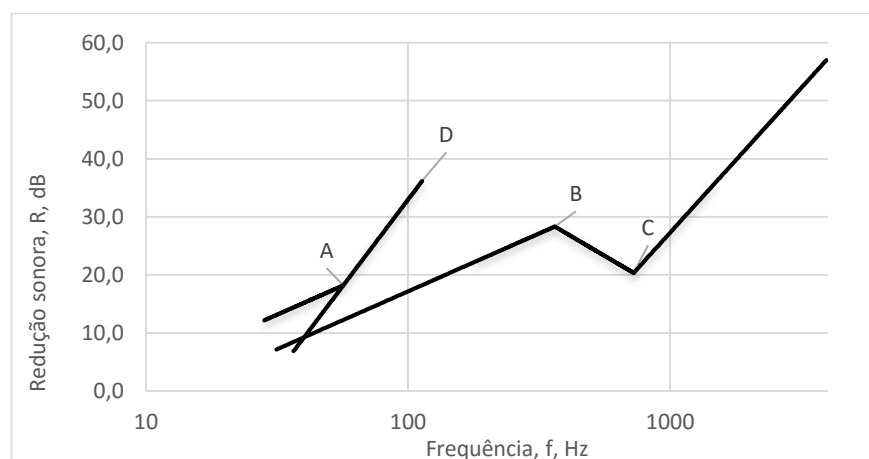


Figura 6.6 – Método gráfico de Sharp para cálculo dos valores de R do pavimento da Rua dos Caldeireiros

Os valores de R são ajustados depois à curva de referência, CR, através de iterações sucessivas de forma que a soma dos afastamentos positivos ($\Delta = CR - R$) a dividir pelo número total de bandas de frequências seja o máximo sem ultrapassar 2,0.

Quadro 6.20 - Ajuste da curva real R à curva de referência

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k
R (dB)	19,7	21,6	23,7	25,7	27,6	29,6	29,7	27,1	24,5	24,9	29,8	34,6	39,9	44,8	49,6	54,6
CR	13	16	19	22	25	28	31	32	33	34	35	36	36	36	36	36

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	
ΔCR	-	-	-	-	-	-	1,3	4,9	8,5	9,1	5,2	1,4	-	-	-	-	
$\Sigma \Delta CR$							$1,3 + 4,9 + 8,5 + 9,1 + 5,2 + 1,4$										
							16										
												1,9					

O valor do índice de redução sonora é o da curva de referência para uma frequência de 500 Hz, ou seja, R_w , de 32 dB.

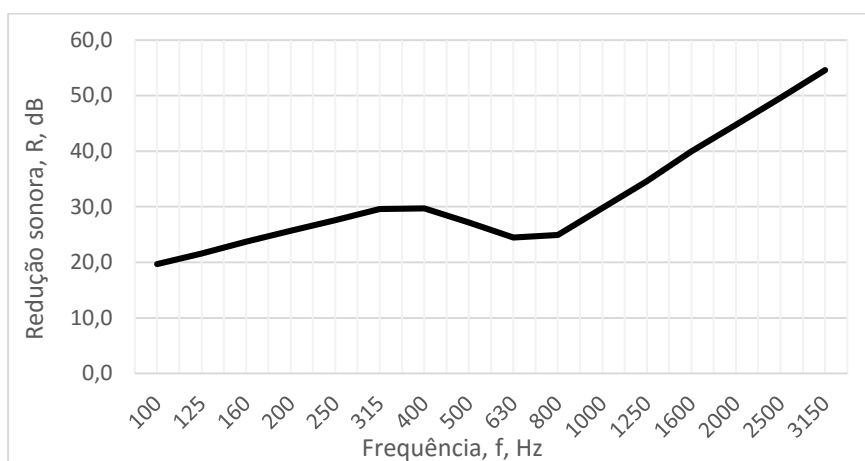


Figura 6.7 – Valor de R pelo método de Sharp

6.3.2 MÉTODO SIMPLIFICADO DA NORMA EN 12354 – 2

O modelo simplificado da norma EN 12354-2 permite a determinação do índice de isolamento sonoro a sons de percussão, $L'_{nT,w}$, e a metodologia de cálculo foi apresentada em 3.5.2.

Apresenta-se neste capítulo um exemplo da metodologia de cálculo aplicado ao pavimento de um dos edifícios em estudo, o edifício da Rua dos Caldeireiros.

Os parâmetros necessários para o cálculo do índice de isolamento a sons de percussão estão representados no quadro 6.21. Os valores dos parâmetros foram retirados por medições efetuadas no próprio edifício ou por valores usado experimentalmente.

Quadro 6.21 – Parâmetros para o cálculo pelo método simplificado da norma EN 12354-2

Parâmetros	Valores
m' pavimento (kg/m ²)	123
Área do pavimento (m ²)	12
Volume compartimento emissor (m ³)	57,6
Volume compartimento recetor (m ³)	55,8
s'	0

Parâmetros	Valores
m' betonilha (kg/m ²)	0
Módulo de Elasticidade (MPa)	2000
Densidade das paredes exteriores em alvenaria de pedra (kg/m ³)	2600
Espessura paredes exteriores (m)	0,4
S _j paredes exteriores (m ²)	24
Densidade das paredes interiores em tabique (kg/m ³)	1500
Espessura paredes de tabique (m)	0,1
S _j paredes interiores (m ²)	24

Recorrendo à expressão 2.29 é possível obter o valor de $L_{n,w,eq}$, através do valor de m' , massa por unidade de área, do pavimento. Depois calcula-se o valor do incremento de isolamento a sons de percussão, ΔL_w , que no caso do pavimento em estudo é zero pois não existe qualquer melhoria, estamos a analisar o pavimento original. Este método aplica também uma correção relativa às transmissões marginais, correção K, valor obtido pela massa do pavimento e pela massa dos elementos da envolvente entre o recetor e o emissor que radiam som. Tendo os valores das massas e pelo quadro 3.1 chegámos ao valor da correção K.

Assim, pela equação 2.28, calcula-se o índice de isolamento sonoro normalizado a sons de percussão, $L'_{n,w}$. Com o volume do compartimento recetor e $L'_{n,w}$ obtemos o índice único de isolamento a sons aéreos, $L'_{nT,w}$, pela seguinte expressão:

$$L'_{nT,w} = L'_{n,w} - 10 * \log\left(\frac{V_{recetor}}{30}\right) \quad (6.5)$$

No quadro 6.22 são apresentados os resultados do edifício em análise.

Quadro 6.22 – Resultado do cálculo de $L'_{nT,w}$ segundo a norma EN 12354-2

Parâmetros	Valores
$L_{n,w,eq}$ (dB)	91
ΔL_w (dB)	0
K (dB)	0
$L'_{n,w}$ (dB)	91
$L'_{nT,w}$ (dB)	88

6.3.3 SÍNTESE DOS RESULTADOS

Os resultados da redução sonora, R, calculados pelo método de Sharp para os diferentes edifícios analisados apresentam-se no quadro 6.23.

Quadro 6.23 – Valores de R (dB) por bandas de 1/3 de frequência do edificado em análise

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	
E1	R	18,7	20,7	22,8	24,7	26,7	28,7	28,8	26,2	23,6	24,0	28,9	33,7	39,0	43,9	48,7	53,7
E2	R	20,3	22,2	24,4	26,3	28,2	30,2	32,3	34,2	36,2	33,8	29,8	25,9	28,3	33,1	37,9	42,9
E3.1	R	20,3	22,2	24,4	26,3	28,2	30,2	32,3	34,2	36,2	33,9	29,9	26,0	28,2	33,1	37,9	42,9
E3.2	R	20,3	22,2	24,4	26,3	28,2	30,2	32,3	34,2	36,2	33,9	29,9	26,0	28,2	33,1	37,9	42,9
E4	R	19,7	21,6	23,7	25,7	27,6	29,6	29,7	27,1	24,5	24,9	29,8	34,6	39,9	44,8	49,6	54,6
E5	R*	15,6	17,5	19,6	21,6	23,5	24,2	22,5	20,8	20,9	24,0	26,9	29,8	33,0	35,9	38,8	41,8
E6	R	20,3	22,2	24,4	26,3	28,2	30,2	32,3	34,2	36,2	33,9	29,9	26,0	28,2	33,1	37,9	42,9

*- valor calculado pelo método de Sharp simplificado

Os valores de R são ajustados à curva de referência, CR, através de iterações sucessivas de forma que a soma dos afastamentos positivos ($\Delta=CR-R$) a dividir pelo número total de bandas de frequências seja o máximo sem ultrapassar 2.0. O valor da curva de referência ajustada para a frequência de 500 Hz é o valor de R_w . No quadro 6.24 são apresentados os valores de R_w dos vários pavimentos.

Quadro 6.24 – Valor de R_w dos pavimentos em análise, obtidos pelo método de Sharp

Edifício	R_w (dB)
E1	31
E2	33
E3.1	33
E3.2	33
E4	32
E5*	27
E6	33

*- valor calculado pelo método de Sharp simplificado

Com os valores de R_w , pelo método simplificado de cálculo das transmissões marginais, podemos calcular o valor teórico do índice de isolamento a sons aéreos, $D_{nT,w}$, através da seguinte expressão:

$$D_{nT,w} = R_w + \left[10 * \log \left(\frac{0,16 * V}{S * T_0} \right) - K_{TM} \right] \quad (6.6)$$

V – volume do compartimento recetor (m³)

S – área do elemento de separação (m²)

K_{TM} – constante que atende ao efeito das transmissões marginais que em geral assume valores entre 0 e 7 dB

No quadro 6.25 estão representados os valores de cálculo utilizados para a determinação de D_{nT,w} teórico e os valores deste índice obtidos para cada edifício em estudo.

Quadro 6.25 – Cálculo do valor de D_{nT,w} teórico

Parâmetros	E1	E2	E3.1	E3.2	E4	E5	E6
R _w (dB)	31	33	33	33	32	27	33
V (m ³)	73,5	36	60	48,6	55,8	145	90
S (m ²)	12	12	20	6	18	30	30
K _{TM}	0	0	0	0	0	0	0
D _{nT,w} (dB) teórico	34	33	33	37	32	29	33

O método da norma EN 12354-2 permite a determinação do índice de isolamento sonoro a sons de percussão, L_{nT,w}, e a metodologia de cálculo foi apresentada em 3.5.2.

Os parâmetros necessários para o cálculo do índice de isolamento a sons de percussão, do modelo simplificado da norma EN 12354-2, dos vários edifícios em análise são representados no quadro 6.26.

Quadro 6.26 – Parâmetros para o cálculo de L_{nT,w} segundo o modelo simplificado da EN 12354-2

Parâmetros	E1	E2	E3.1	E3.2	E4	E5	E6
m' pavimento (kg/m ²)	149	155	167	167	123	110	196
Área do pavimento (m ²)	12	31,5	20	6	12	30	30
Volume compartimento recetor (m ³)	73,5	36	60	48,6	57,6	145	90

Apresenta-se no quadro seguinte os valores calculados, $L_{n,w,eq}$ e $L'_{n,w}$, e o valor do índice único do isolamento sonoro a sons de percussão, $L'_{nT,w}$, para cada edifício.

Quadro 6.27 – Valores de $L_{n,w,eq}$, $L'_{n,w}$ e $L'_{nT,w}$ para todos os edifícios

Parâmetros	E1	E2	E3.1	E3.2	E4	E5	E6
$L'_{n,w,eq}$ (dB)	88	87	86	86	91	93	84
$L'_{n,w}$ (dB)	88	87	86	86	91	93	84
$L'_{nT,w}$ (dB)	84	87	83	84	88	86	79

6.3.4 SÍNTESE DE RESULTADOS

Em síntese deste capítulo retemos como mais importante os valores dos índices de isolamento a sons aéreos e de percussão medidos *in situ* e calculados pelos métodos teóricos.

O quadro 6.28 contém todos os valores finais calculados para os edifícios analisados neste estudo.

Quadro 6.28 – Valores medidos *in situ* e calculados pelos modelos teóricos

Edifício	$D_{nT,w}$ (dB)	R_w (dB) teórico	$D_{nT,w}$ (dB) teórico	$L'_{nT,w}$ (dB)	$L'_{nT,w}$ (dB) teórico
E1	47	31	34	63	84
E2	39	33	33	68	87
E3.1	49	33	33	63	84
E3.2	48	33	37	56	84
E4	38	32	32	79	88
E5	26	27*	29	81	86
E6	53	33	33	60	79

*- valor calculado pelo método de Sharp simplificado

Os valores teóricos e obtidos por *medições in situ* do isolamento a sons aéreos e de percussão dos pavimentos são representados na figura 6.8 e na figura 6.9 de forma a facilitar a interpretação das diferenças entre os resultados obtidos *in situ* e os obtidos pelos métodos teóricos.

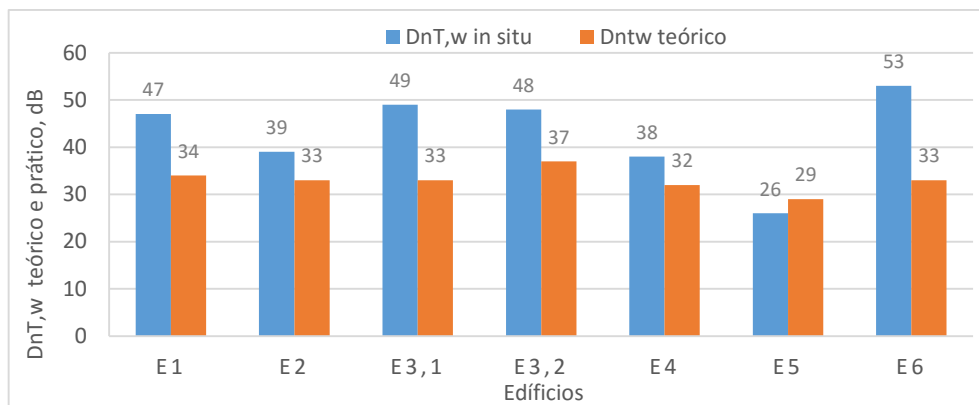


Figura 6.8 – Representação dos valores de $D_{nT,w}$ medidos *in situ* e calculados pelos métodos teóricos

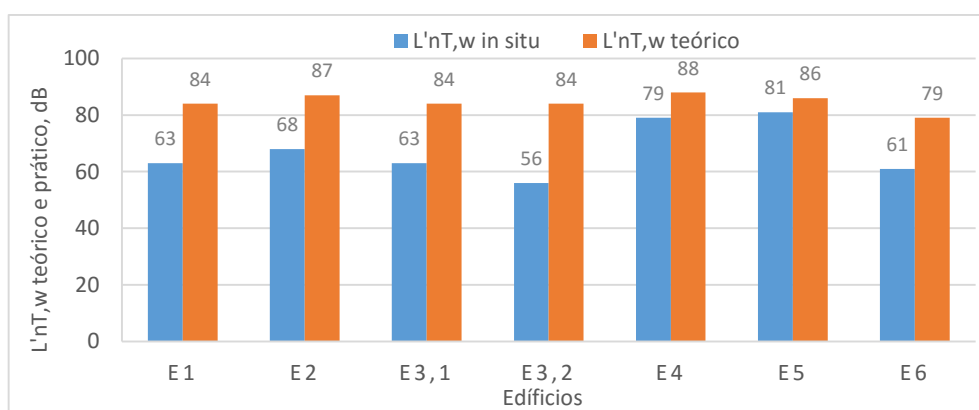


Figura 6.9 - Representação dos valores de $L'_{nT,w}$ medidos *in situ* e calculados pelos métodos teóricos

7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 INTRODUÇÃO

A reabilitação de edifícios do centro histórico do Porto está a crescer devido ao aumento da procura da cidade principalmente para turismo nestes últimos anos e devido também à implementação de alguns incentivos a particulares que queiram reabilitar o seu edifício.

Neste processo, muitas vezes só se preservam dos edifícios originais as fachadas procedendo-se a uma modificação total ou parcial dos elementos interiores de divisão dos compartimentos.

Entre estes elementos estão os pavimentos em madeira da típica casa burguesa do Porto que em muitas situações são substituídos por pavimentos de betão ou outro tipo de soluções mistas em vez de serem restaurados e/ou reforçados, isto porque, existe um desconhecimento acerca do desempenho dos pavimentos em madeira, originando a ideia de que este tipo de soluções não são capazes de se adaptarem aos padrões atuais de conforto.

7.2 VERIFICAÇÃO DO CUMPRIMENTO DA LEGISLAÇÃO

Um dos fatores que leva também à substituição dos pavimentos são os problemas associados à transmissão sonora entre pavimentos de pisos consecutivos. Estes problemas estão relacionados com o tipo de pavimento e as ligações existentes entre os vários elementos que o constituem. No caso de pavimentos estruturais em betão é mais fácil prever os valores do isolamento a sons aéreos e de percussão e como existe um maior controlo na construção destas soluções é possível garantir o isolamento pretendido ao contrário dos pavimentos de madeira onde não existem métodos próprios de cálculo para a obtenção de valores de isolamento, a sua construção e os materiais utilizados variam de pavimento para pavimento, são pavimentos que não possuem grande massa, e os estudos que existem não chegaram a nada concreto.

Assim, e com o objetivo de discutir alguns destes aspetos abordados, avaliou-se o desempenho acústico de vários pavimentos com soluções tradicionais com o objetivo de estudar as suas características acústicas.

De acordo com o referido em 2.4.2 no RRAE o valor do parâmetro $L'_{nT,w}$ entre o compartimento emissor onde irá ser emitida uma percussão normalizada e o quartos ou zonas de estar de fogos diferentes é de 60 dB, sendo que para zonas históricas pode ir a um máximo de 63 dB e o parâmetro $D_{nT,w}$ medido nos

quartos ou zonas de estar dos diferentes fogos assume o valor de 50 dB podendo em zonas históricas assumir o valor limite de 47 dB.

O quadro 7.1 faz a comparação dos valores obtidos *in situ* com os valores do regulamento.

Quadro 7.1 – Comparação dos valores dos índices $D_{nT,w}$ e $L'_{nT,w}$ com os índices expressos no RRAE

Edifício	In situ	Zona histórica	Restantes zonas	In situ	Zona histórica	Restantes zonas
	$D_{nT,w}$ (dB)	$D_{nT,w} \geq 47$ dB	$D_{nT,w} \geq 50$ dB	$L'_{nT,w}$ (dB)	$L'_{nT,w} \leq 63$ dB	$L'_{nT,w} \leq 60$ dB
E1	47	Cumpre	Não cumpre	63	Cumpre	Não cumpre
E2	39	Não cumpre	Não cumpre	68	Não cumpre	Não cumpre
E3.1	49	Cumpre	Não cumpre	63	Cumpre	Não cumpre
E3.2	48	Cumpre	Não cumpre	56	Cumpre	Cumpre
E4	38	Não cumpre	Não cumpre	79	Não cumpre	Não cumpre
E5	26	Não cumpre	Não cumpre	81	Não cumpre	Não cumpre
E6	53	Cumpre	Cumpre	61	Cumpre	Não cumpre
E7*	49	Cumpre	Não cumpre	62	Cumpre	Não cumpre
E8*	51	Cumpre	Cumpre	44	Cumpre	Cumpre

*- Valores retirados da bibliografia [42], de pavimentos de madeira

É possível concluir que dos nove pavimentos em análise seis verificam as exigências impostas pelo regulamento em zonas históricas. Os edifícios E1, E3, E6, E7 e E8 cumprem as exigências de isolamento a sons aéreos e a sons de percussão, alguns no limite e outros com um desempenho melhorado como é o caso do E6 e do E8. Estas duas soluções mostram-se assim capazes de obter valores que se aproximam dos pavimentos mais utilizados nos dias de hoje.

Os restantes edifícios E2, E4 e E5 não cumprem os limites regulamentares. Estas divergências obtidas são explicadas pela grande permeabilidade destes pavimentos, a existência de ligações rígidas existentes entre os diferentes elementos dos pavimentos, na maioria através de pregagens, que são condutoras de energia sonora propiciando assim a sua transmissão. A falta de camadas contínuas e estanques permitem a passagem de som diminuindo o isolamento do pavimento a sons aéreos.

Nos casos dos edifícios que não cumprem os índices de isolamento impostos pelo regulamento, E2, E4 e E5, teriam todos de ser intervencionados. O pavimento que tem um pior comportamento tanto a sons aéreos como a sons de percussão é o E5. Isto sucede porque este pavimento era constituído apenas por vigas à vista e soalho.

Cria-se assim espaço para do ponto de vista acústico existir uma maior utilização dos pavimentos tradicionais evitando a sua total demolição que contribui não só para perda de parte do património

histórico da cidade do Porto como num aumento do custo das ações de reabilitação, que pressupõem a demolição destes pavimentos para uma construção nova em vez de conservar as soluções melhorando-as para cumprir os requisitos atuais. Isto permite manter os materiais e características da casa burguesa sem haver perda total dos materiais que a constituem.

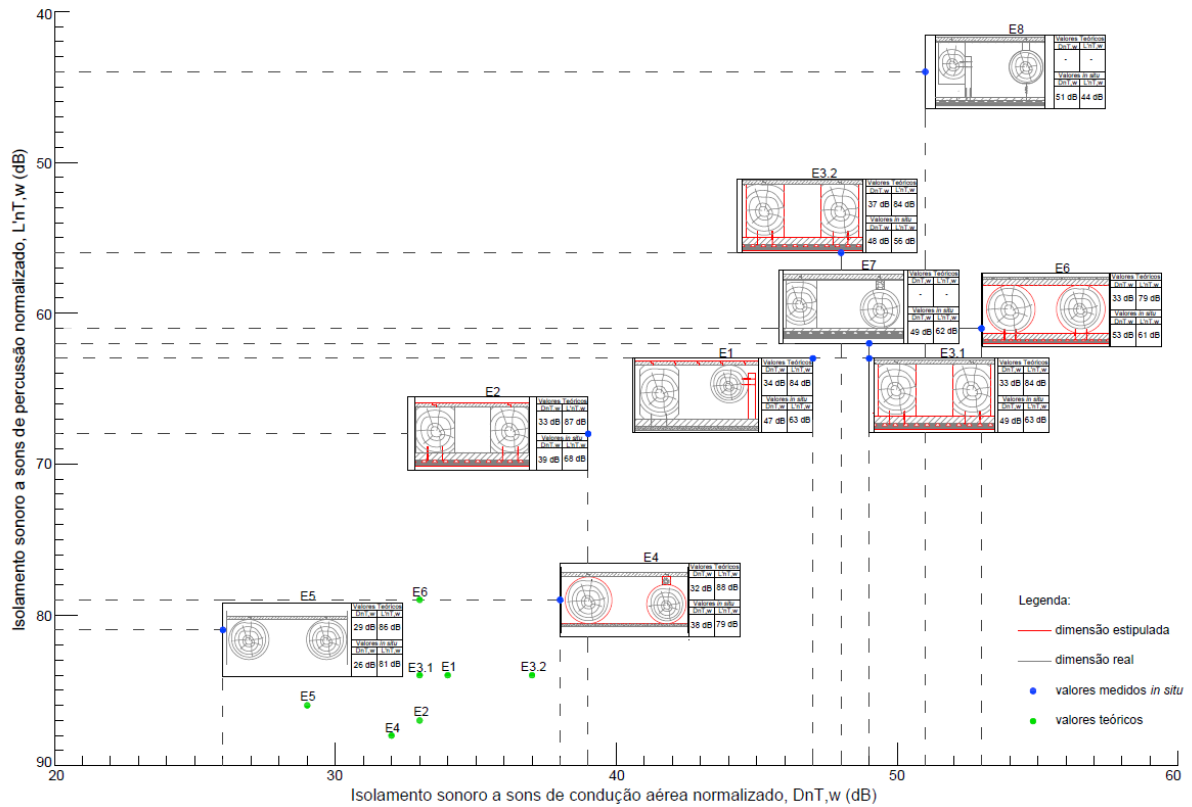


Figura 7.1 – Representação dos pavimentos em análise em função de $L'_{nT,w}$ e $D_{nT,w}$ (tabela A1 dos anexos)

Na figura 7.1 é feita a representação de todos os pavimentos em análise em função do seu índice de isolamento sonoro a sons aéreos e de percussão obtido nas medições *in situ*. Estão também representados os valores teóricos do isolamento a sons de condução aérea e do isolamento a sons de percussão obtidos pelos métodos teóricos. Podemos observar na figura que existe uma maior concentração de pavimentos entre os 47 e os 53 dB ao nível de isolamento a sons de condução aérea. Relativamente a sons de percussão a maior concentração ocorre entre os 57 e os 63 dB. Estes pavimentos apresentam na sua constituição vigas de madeira, soalho e teto em tabuado de madeira ou estuque. Os pavimentos que são mais simples como o E5, constituído apenas por vigas estruturais de madeira e soalho, são os que apresentam piores características de isolamento a sons aéreos e de percussão encontrando-se assim mais afastados da zona de maior concentração dos pavimentos analisados. Por outro lado o pavimento E8 é o que apresenta melhores características principalmente ao nível do isolamento sonoro a sons de percussão. Isto pode suceder caso exista uma separação entre as vigas estruturais e o teto que reduz as vibrações provocadas no pavimento fazendo com que estas não se transmitam com tanta intensidade.

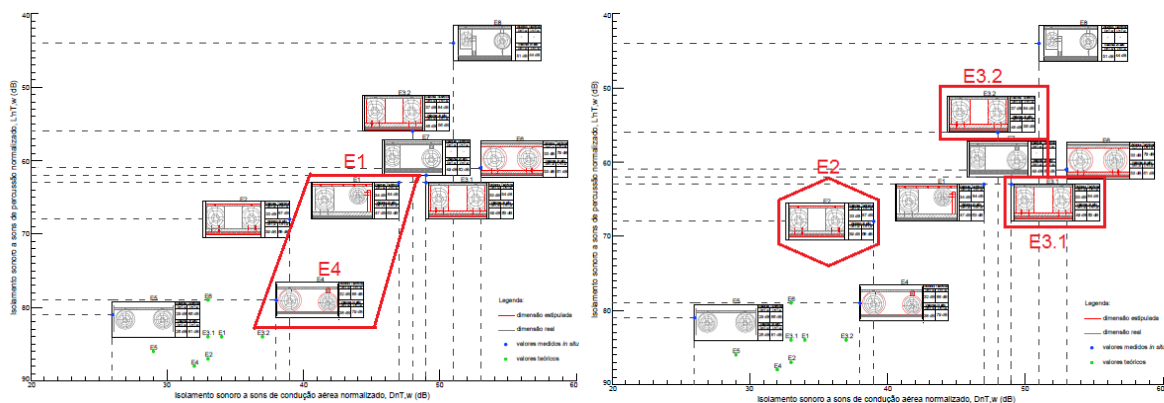


Figura 7.2 – Comparação dos resultados dos pavimentos E1 e E4 (esquerda) e E3.1, E3.2 e E2 (direita)

Os pavimentos destacados na figura 7.2 do lado esquerdo, E1 e E4, apresentam a mesma constituição no entanto os valores obtidos *in situ* são diferentes. Isto pode acontecer devido às condições do edifício. Enquanto no E4 o compartimento era completamente isolado garantindo que o som passava na maioria através do pavimento o mesmo não se sucedeu no pavimento E1 onde o compartimento emissor e recetor tinham algumas frinchas por baixo das portas não garantindo a completa estanquidade do compartimento. Nas observações realizadas nos ensaios *in situ* o pavimento E4 apresentava uma constituição menos robusta do que o E1. Enquanto o E1 apresentava uma estrutura em barotes para suporte do teto e algumas vigas desligadas da estrutura de barotes, permitindo desta forma uma diminuição da transmissão sonora através dos diferentes elementos do pavimento, o E4 apresentava o tabuado do teto diretamente pregado ao vigamento piorando o comportamento do isolamento aos sons de percussão.

Os pavimentos da figura 7.2 do lado direito, E3.1 e E3.2, destacados com o contorno retangular (vermelho) são pavimentos que foram medidos no mesmo edifício e que se supõe que apresentam a mesma constituição apresentam valores das medições que diferem entre si. O facto de não se poder observar a constituição concreta dos pavimentos em análise pode estar na origem desta diferença pois apesar do pavimento estar no mesmo edifício poderão existir algumas diferenças na constituição da estrutura, a existência de uma camada de separação diferente, ou um tipo de ligação entre camadas mais resilientes e pode originar resultados mais satisfatórios para o índice de isolamento sonoro a sons de percussão.

O pavimento destacado nessa mesma figura com um hexágono, E2, também apresenta uma constituição semelhante à dos pavimentos dos edifícios E3.1 e E3.2. Os resultados obtidos do isolamento a sons aéreos e a sons de percussão são, no entanto, inferiores. Este facto pode ser explicado devido à degradação existente no pavimento em análise, pois foi possível observar uma zona do pavimento onde não existia revestimento superior. Na realização do ensaio *in situ* houve a percepção que muito do som emitido e que atingia o recetor passava pelas portas. Foi realizada uma medição num compartimento recetor adjacente ao primeiro recetor para ver se existia influência desta transmissão na medição dos índices de isolamento. Como os valores em ambos os recetores deram iguais foi possível concluir que não havia influência.

7.3 RESULTADOS MEDIDOS *IN SITU* VS MODELOS TEÓRICOS

Uma das principais dificuldades deste tipo de pavimentos é a previsão dos valores do isolamento a sons aéreos e de percussão. É perceptível a falta de modelos de cálculo adaptados para o cálculo de pavimentos

leves de madeira. Na elaboração deste estudo fez-se a adaptação de modelos de cálculo já existentes, nomeadamente o método de Sharp que permite a obtenção da redução sonora do pavimento para os sons aéreos, R_w , e o método da norma EN 12354-2 para obtenção do índice de isolamento sonoro a sons de percussão $L'_{nT,w}$.

A comparação dos valores medidos *in situ* com os valores obtidos pelos métodos teóricos irá permitir verificar se estes modelos se adequam ao estudo deste tipo de pavimentos.

Quadro 7.2 – Valores medidos *in situ* e calculados pelos modelos teóricos

Edifício	$D_{nT,w}$ (dB)	R_w (dB) teórico	$D_{nT,w}$ (dB) teórico	$L'_{nT,w}$ (dB)	$L'_{nT,w}$ (dB) teórico
E1	47	31	34	63	84
E2	39	33	33	68	87
E3.1	49	33	33	63	4
E3.2	48	33	37	56	84
E4	38	32	32	79	88
E5	26	27*	29	81	86
E6	53	33	33	60	79

*- valor calculado pelo método de Sharp simplificado

No quadro 7.2 estão representados os valores obtidos *in situ* e os valores obtidos por modelos teóricos, este quadro é repetido neste ponto para conforto do leitor.

No que diz respeito ao isolamento a sons aéreos podemos constatar que existe uma grande discrepância entre os valores obtidos pelo método de Sharp para elementos duplos e as medições realizadas *in situ*. O valor de R_w do edifício E5 foi o único estimado pelo método de Sharp para elementos simples pois o pavimento deste edifício não tinha teto sendo constituído apenas pelas vigas e o soalho. O valor teórico deste edifício é o que se encontra mais próximo dos medidos *in situ*. Podemos concluir que para elementos simples parece haver uma melhor adaptação do método de Sharp à realidade ao contrário da adaptação feita para elementos duplos onde a diferença entre valores varia entre 6 dB e 20 dB. Os valores de $D_{nT,w}$ teóricos estão afastados dos valores obtidos pelas medições *in situ* o que mostra a dificuldade de adaptação de métodos teóricos capazes de preverem o comportamento destes pavimentos.

É no entanto de se notar que a constituição detalhada destes pavimentos é muito importante quando se tenta fazer a aproximação dos modelos de cálculo teórico aos valores reais e que o desconhecimento, pela impossibilidade de uma inspeção mais detalhada ao pavimento, das espessuras reais de cada camada que constitui o pavimento dificulta a aproximação dos valores teóricos aos reais.

Relativamente ao isolamento a sons de percussão os valores estimados pela norma EN 12354-2 distanciam-se dos valores obtidos *in situ*. Enquanto os valores obtidos nas medições efetuadas variam entre os 56 dB e os 81 dB os valores calculados pela norma variam entre 79 dB e 88 dB. É observável a incompatibilidade, já expectável, da norma para o cálculo deste tipo de pavimentos que chega a resultados muito piores do que os reais. A menor diferença entre os valores calculados e os medidos é de 6 dB, sendo o valor teórico o quádruplo do medido. Na figura 7.3 pode-se ver graficamente a

diferença entre os valores medidos *in situ* e os valores teóricos que se encontram realçados com o quadrado vermelho.

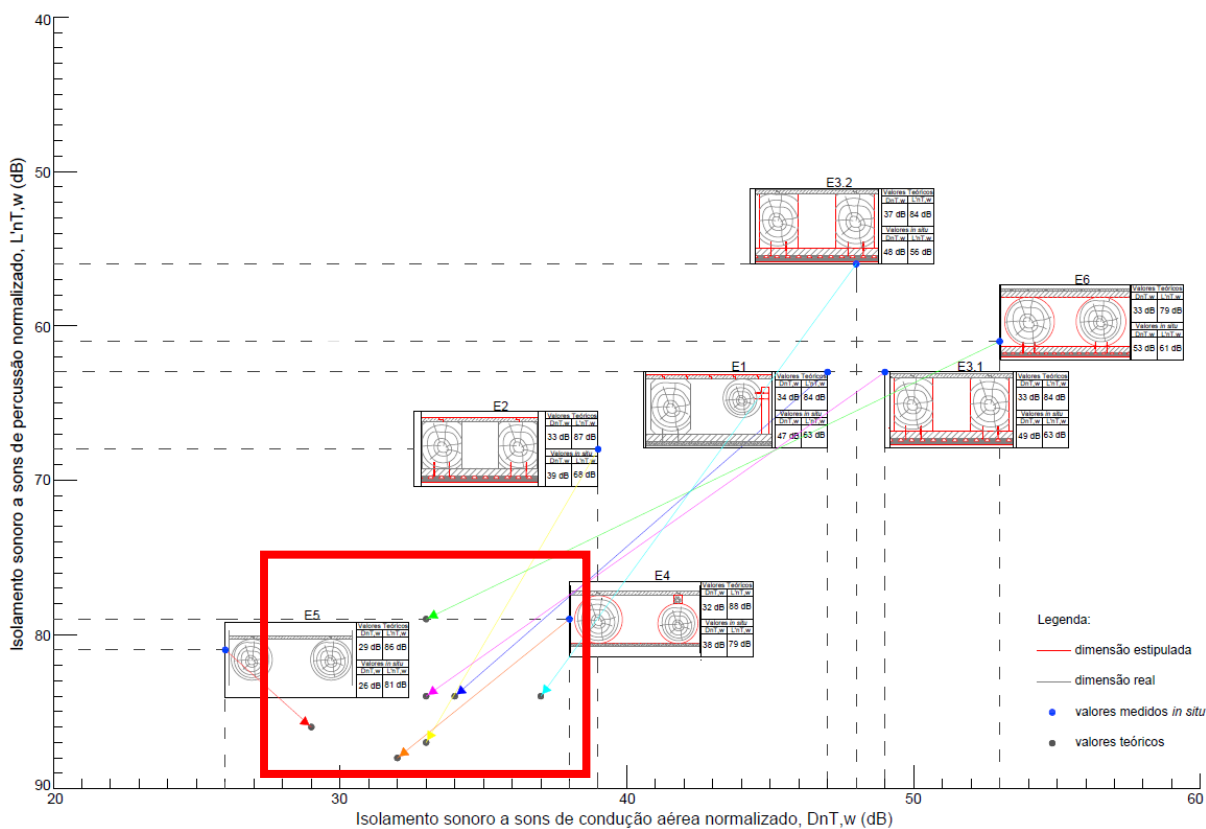


Figura 7.3 – Comparação gráfica dos valores obtidos pelos resultados medidos *in situ* com os valores obtidos pelos métodos teóricos (tabela A2 dos anexos)

Conclui-se assim a falta de adaptação das normas para pavimentos leves de madeira e a falta de modelos de cálculo capazes de prever eficazmente valores de isolamento próximos dos obtidos pelos ensaios dos pavimentos *in situ*.

7.4 SONS AÉREOS DE PERCUSSÃO

A medição do isolamento sonoro a sons de percussão nos pavimentos medidos pode não ser só influenciado pelo impacto produzido pela máquina de percussão sobre o pavimento mas também pelo som aéreo que esta produz na sala consequência deste mesmo impacto. Esta hipótese é colocada a estes tipos de pavimentos devido à sua maior permeabilidade aos sons em comparação com pavimentos mais atuais. De facto Diogo Mateus já publicou um artigo a abordar esta temática onde refere que para não existir influencia dos sons aéreos produzidos no compartimento emissor, aos quais dá o nome de *ecos de percussão*, no nível sonoro medido no recetor, o valor do nível sonoro proveniente dos *ecos de percussão* que chegam ao compartimento recetor tem de ser no mínimo 10 dB inferior ao valor medido só resultante da percussão. Estas medições foram efetuadas em dois dos edifícios ensaiados, E5 e E6, sendo os resultados obtidos no E6 extrapolados para os restantes pavimentos pois é o que apresenta o pavimento mais semelhante aos restantes.

Quadro 7.3 – Nível sonoro produzido pela máquina de percussão no compartimento emissor e verificação segundo a expressão 6.5

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	
E1	L_{1i}	77,1	80,9	85,3	85,4	84,1	84,4	87,1	85,8	85,9	85,9	82,7	81,2	78,2	75,5	72,4	67,5
(6.5)		ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
E2	L_{1i}	77,1	80,9	85,3	85,4	84,1	84,4	87,1	85,8	85,9	85,9	82,7	81,2	78,2	75,5	72,4	67,5
(6.5)		ok	ko	ok	ko	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
E3.1	L_{1i}	77,1	80,9	85,3	85,4	84,1	84,4	87,1	85,8	85,9	85,9	82,7	81,2	78,2	75,5	72,4	67,5
(6.5)		ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
E3.2	L_{1i}	77,1	80,9	85,3	85,4	84,1	84,4	87,1	85,8	85,9	85,9	82,7	81,2	78,2	75,5	72,4	67,5
(6.5)		ko	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ko	ko	ok
E4	L_{1i}	77,1	80,9	85,3	85,4	84,1	84,4	87,1	85,8	85,9	85,9	82,7	81,2	78,2	75,5	72,4	67,5
(6.5)		ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
E5	L_{1i}	57,0	67,2	71,3	70,9	73,9	76,0	79,9	81,7	84,1	86,2	86,1	85,5	84,5	82,4	79,7	75,5
(6.5)		ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok
E6	L_{1i}	77,1	80,9	85,3	85,4	84,1	84,4	87,1	85,8	85,9	85,9	82,7	81,2	78,2	75,5	72,4	67,5
(6.5)		ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok

No quadro 7.3 estão representados os valores do nível de pressão sonora medido no emissor e a verificação da influência da medição do nível de isolamento a sons de percussão $L'_{nT,w}$. Verifica-se que nos edifícios E1, E3.1, E4, E5 e E6 não existe qualquer influência enquanto no edifício E2 e E3.2 nas bandas de baixas e altas frequências não cumpre o especificado pelo método proposto por Diogo Mateus. A influência dos sons aéreos de percussão podem estar associados a diferenças do isolamento a sons de percussão entre estes pavimentos e outros do mesmo tipo.

Apesar de haver influência em algumas bandas de frequência estas são muito poucas em comparação com as restantes pelo que se conclui que não interfere no cálculo do $L'_{nT,w}$.

7.5 RECOMENDAÇÕES

Pela observação das conclusões referidas anteriormente podemos ver que alguns dos pavimentos cumprem a legislação, a maioria nos limites mínimos, enquanto outros já se encontram mais afastados desses limites não cumprindo os mínimos exigidos.

São apresentadas neste ponto algumas sugestões de beneficiação de soluções que podem ser aplicadas para melhorar o isolamento acústico dos pavimentos.

Como a constituição dos pavimentos pode variar de caso para caso considerou-se o pavimento tipo da casa burguesa representado na figura 7.4.

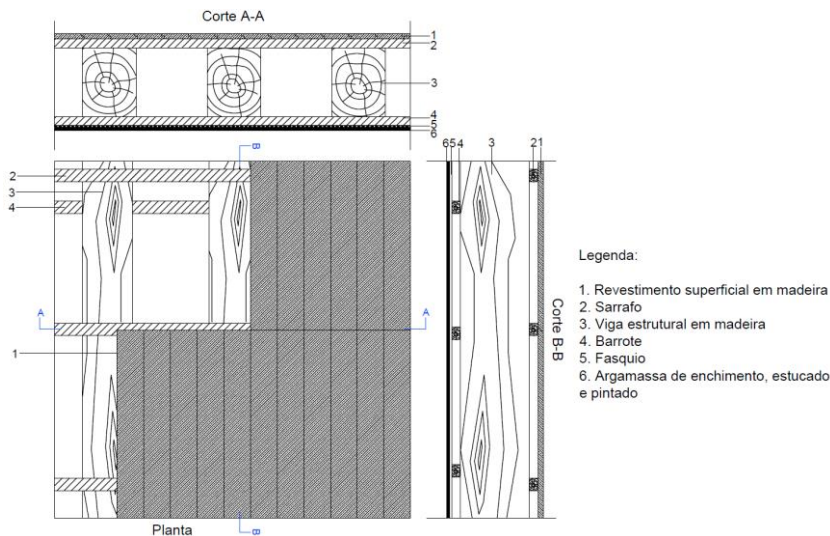


Figura 7.4 – Esquema de um pavimento tipo tradicional

Na reabilitação de pavimentos tradicionais podemos nos deparar com duas situações distintas e contudo correntes, uma é a necessidade de preservar os tetos originais restringindo assim a solução de beneficiação do pavimento e outra o aproveitamento apenas da estrutura em madeira do pavimento, havendo desta forma menos restrições à solução de beneficiação do pavimento.

Quando a intervenção no pavimento para melhorar o seu comportamento acústico impuser a necessidade de manter o teto original, porque este se encontra em bom estado, podemos optar por uma das duas opções seguintes:

- Levantar o pavimento original, remover os sarrafos, colocar material absorvente sonoro sobre o teto, colocar sobre as vigas placas de aglomerado madeira cimento, colocação sobre estas de um material resiliente e colocação do pavimento original ou um novo (figura 7.5).
- Levantar o pavimento original, colocação de material absorvente sonoro sobre o teto, colocação de um complexo resiliente sobre ou sob os sarrafos e colocação do pavimento original (figura 7.6).

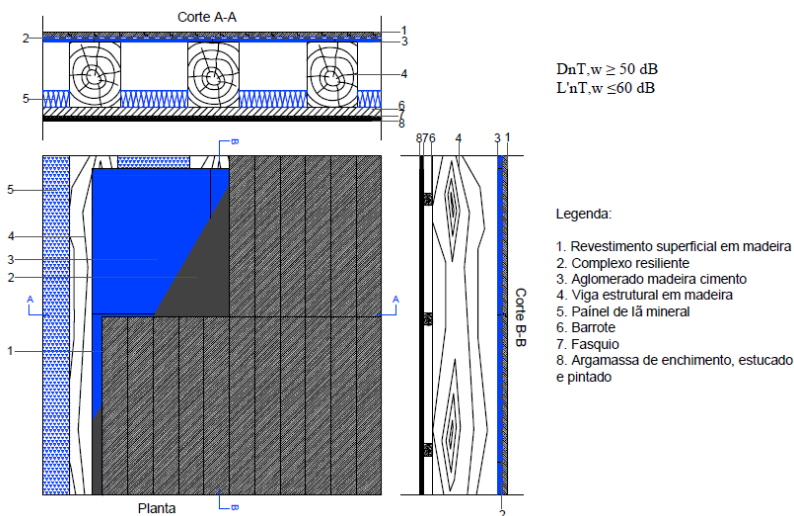


Figura 7.5 – Esquema de pavimento tradicional reforçado com material resiliente e material absorvente sonoro

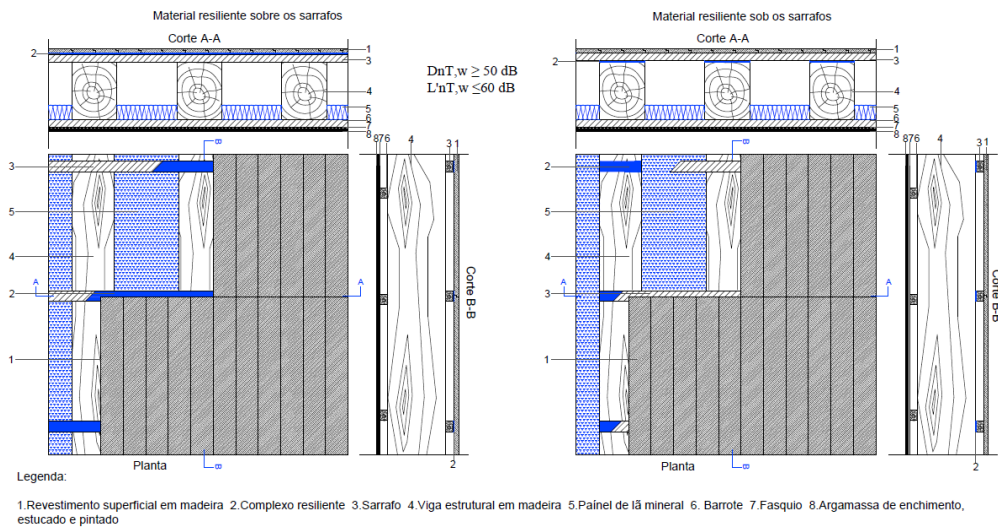


Figura 7.6 – Esquema de pavimento tradicional com material resiliente e material absorvente sonoro

Caso o teto esteja muito degradado ou exista um pé direito suficiente pode-se optar pela colocação de um teto falso com dupla camada de gesso cartonado com material resiliente entre as duas camadas e colocação de material absorvente sobre este juntamente com a colocação de material resiliente entre o pavimento e as vigas (figura 7.7).

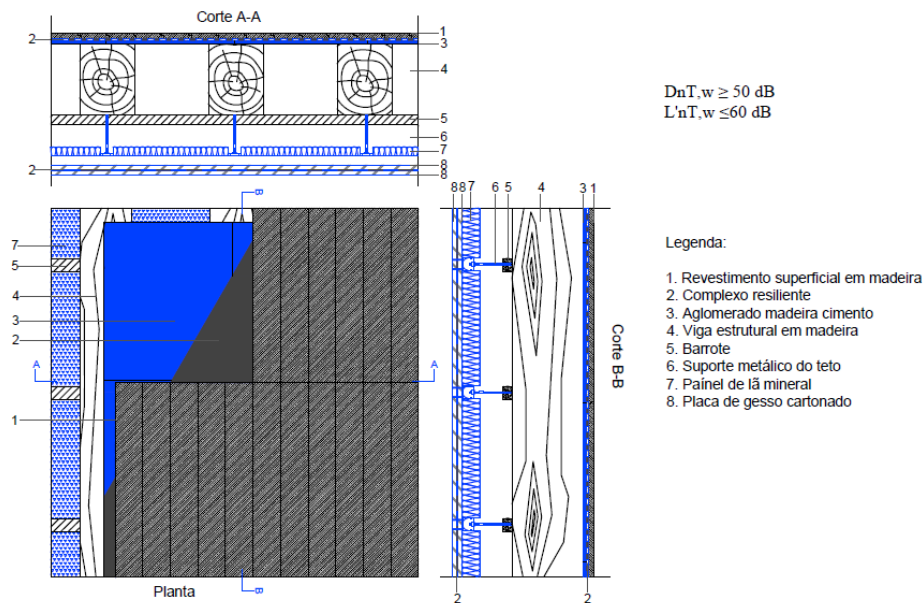


Figura 7.7 – Esquema de um pavimento tradicional com colocação de um teto falso, material absorvente sonoro e material resiliente

7.6 CONCLUSÕES

Os pavimentos em análise são capazes de verificar as exigências impostas pelo regulamento. Do edificado analisado seis pavimentos cumprem os limites mínimos impostos para zonas históricas, sendo que existe uma tendência para os pavimentos dos edifícios se concentrarem na zona de isolamento a

sons aéreos de 50 dB e de isolamento a sons de percussão de 60 dB. As diferenças obtidas entre alguns pavimentos nas análises *in situ* são explicadas pela permeabilidade das soluções, característica destes pavimentos, pela existência de ligações rígidas entre camadas e pela falta de camadas contínuas e estanques ao som. Para que estes pavimentos consigam ter um comportamento capaz de cumprir as exigências atuais podem ser feitas correções pouco intrusivas como a colocação de materiais absorventes sonoros e camadas resilientes. Surge assim espaço para uma maior utilização destes pavimentos evitando a sua total demolição.

Conclui-se que existe a falta de normas e métodos teóricos capazes de prever eficazmente os valores dos índices de isolamento. Em todos os casos ensaiados os resultados obtidos para os índices de isolamento dos pavimentos leves de madeira são significativamente melhores do que os obtidos através dos modelos teóricos.

Conclui-se também não existir influência significativa dos sons aéreos produzidos pela máquina de percussão no cálculo do índice $L'_{nT,w}$.

7.7 PERSPETIVAS DE DESENVOLVIMENTO FUTURO

Este trabalho centrou-se na caracterização acústica dos pavimentos típicos da casa burguesa portuense. Como existe um aumento da reabilitação no centro histórico do Porto torna-se necessário ter um maior conhecimento sobre as soluções tradicionais que estão aplicados nesses edifícios relativamente aos seus elementos, materiais e sistemas aplicados.

Um possível desenvolvimento futuro deste trabalho seria fazer um conjunto maior de medições em edifícios que têm o género do pavimento em análise onde prevaleçam as soluções originais e também a avaliação acústica de soluções de reabilitação aplicadas a estes pavimentos permitindo assim comparar a eficácia das soluções adotadas. A realização de ensaios laboratoriais em pavimentos deste tipo onde fosse possível testar esta solução original e vários tipos de soluções que possam ser adotadas seria muito relevante para o estudo do comportamento acústico de pavimentos em madeira.

Seria adequado para os pavimentos analisados calcular o seu isolamento por outros métodos/programas de cálculo teóricos para comparar com os resultados obtidos *in situ*, desenvolvendo um modelo teórico de cálculo para aplicação exclusiva a estes pavimentos.

A caracterização das propriedades dos materiais que constituem o pavimento de madeira, como a velocidade de propagação das ondas longitudinais, o fator de perdas, o tipo de madeira, a espessura das diferentes camadas, também poderá ser estudada pois influencia os resultados calculados pelos métodos teóricos.

Poderão também ser feitas medições em mais edifícios sobre a influência dos sons aéreos produzidos pela máquina de percussão na medição do isolamento sonoro a sons de percussão.

Por fim torna-se necessário fazer uma análise de viabilidade económica para perceber se a conservação de um pavimento de madeira com algumas melhorias aplicadas de forma a cumprir os valores dos regulamentos é mais vantajosa em comparação com a total demolição do pavimento e construção de um novo com uma nova solução, por exemplo betão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Paiva, J.V., J. Aguiar, Guia Técnico de Reabilitação Habitacional. 2006, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- [2] www.cmlisboa.pt. 23/02/2015.
- [3] www.portovivosru.pt. 17/03/2015.
- [4] Moreira, K., *Caracterização Acústica de Edifícios Antigos*, Dissertação de Mestrado FEUP. 2014.
- [5] Ribeiro, Catarina. Coleção de postais particular, 1911.
- [6] Freitas, V., Manual de apoio ao projecto de reabilitação de edifícios antigos, ed. 1. 2012.
- [7] Patologia e Reabilitação da construção - I seminário de materiais de construção.
- [8] pt.wikipedia.org. 13/03/2015.
- [9] economia.sapo.pt. 24/02/2015.
- [10] Quase metade dos Portugueses expostos a níveis demasiado elevados de ruído. Jornal de Notícias.
- [11] Carvalho, A.P., Acústica Ambiental e de Edifícios. 2014, Porto: FEUP.
- [12] Vizinhança Barulhenta gera 25 queixas por mês. Jornal de Notícias, 25/01/2009.
- [13] d.M. Inspeção-Geral da Agricultura, do Ambiente e do Ordenamento do território, Balanço, Reclamações-Denúncias-Queixas. 2013.
- [14] Silva, R., Avaliação Acústica de Edifícios Habitacionais - Análise dos coeficientes de ponderação associados a índices de desempenho acústico de habitações, Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa,. 2014.
- [15] Donoso, J.P., História da Acústica Apresentação da disciplina de Acústica Física. Universidade de São Paulo - Instituto de Física de São Carlos.
- [16] www.estacaomusical.com.br. 23/02/2015.
- [17] Dalmas, A., VITRUVÉ Les dix livres d'architecture, A. Balland. 1965.
- [18] en.wikipedia.org. 05/03/2015.
- [19] www.prof2000.pt. 22/05/2015.
- [20] moiseslaguna.com.
- [21] rickcperry.com. 04/03/2015.
- [22] Patrício, J., Método LNEC para avaliação e classificação da qualidade acústica de edifícios habitacionais, ed. 1. 2013, Lisboa.
- [23] Quercus apresenta queixa a Bruxelas sobre incumprimento da lei do ruído. TSF, 11/02/2014.
- [24] d.o.d.t.e.d.d.r. Ministério do ambiente, Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios. 2008.
- [25] NP EN ISO 140-4. Acústica. Parte 4: Medição in situ do isolamento sonoro a sons aéreos entre compartimentos. 2000, IPQ.
- [26] NP EN ISO 140-7. Acústica. Parte 7: Medição, in situ, do isolamento sonoro a sons de percussão. 2008, IPQ.

- [27] Bies, D., C. Hansen, *Engineering noise control, Theory and Practice*. 2003, Spon press: London.
- [28] EN 12354-2. *Building acoustics - Estimation of acoustics performance of buildings from the performance of elements - Part 2: Impact sound insulation between rooms*. 2000, CEN.
- [29] Pinçon, G., *Amélioration acoustique des logements*. 1995.
- [30] Mateus, D., *Comportamento acústico de pavimentos (lajes) - soluções leves VERSUS soluções pesadas*, *Construção Magazine*.
- [31] Mateus, D., *Influência do ruído aéreo gerado pela percussão de pavimentos na determinação de $L'n,w$* .
- [32] Patrício, J., *Acústica nos Edifícios*. 5 ed. 2008.
- [33] Bard, D., *A finite element solution of structure-borne sound attenuation for a lightweight timber floor*, *Building Acoustics*. 2008.
- [34] Mota, N., *At Home com a burguesia do Porto, Fronteiras entre o público e o privado*.
- [35] www.pt.wikipedia.org. 24/02/2015.
- [36] balcaovirtual.cm-porto.pt. 13/03/2015.
- [37] Teixeira, J.J.L., *Descrição do sistema construtivo da casa burguesa do Porto entre os séculos XVII e XIX*, Prova de aptidão pedagógica e capacidade científica. 2004.
- [38] Santos, B.I.R., *O novo velho - A reabilitação da casa Burguesa Portuense*, Dissertação de Mestrado, Universidade Lusófona do Porto, 2013.
- [39] Barata, F., *Transformação e permanência na habitação Portuense - as formas da casa na forma da cidade*, Dissertação de doutoramento, FAUP, 1999.
- [40] Teixeira, J., R. Póvoas, *Contributo das teorias do restauro para a conceção de uma metodologia de intervenção na casa burguesa do Porto*. 2014, FAUP: Porto. p. 8.
- [41] Mota, N., *Viagem à arquitetura do quotidiano*. 2006.
- [42] Queirós, D., *Caracterização do Comportamento acústico de edifícios reabilitados*, Dissertação de Mestrado FEUP, 2010.
- [43] Costa, L., *Reabilitação de pavimentos estruturais em madeira em edifícios antigos*, Dissertação de Mestrado, FEUP, 2009.
- [44] Santos, C., *Manutenção das soluções construtivas de edifícios com valor patrimonial - Elementos fonte de manutenção*, Dissertação de Mestrado, FEUP, 2012.
- [45] www.acoustique-materiaux.net. 25/04/2015.

Anexo A – Boletins de Ensaio

ISOLAMENTO SONORO PADRONIZADO DE ACORDO COM A NORMA ISO 140-4

MEDIÇÃO DO ISOLAMENTO SONORO *IN SITU* ENTRE COMPARTIMENTOS

Localização: Rua das Taipas

Data: 01/04/2015

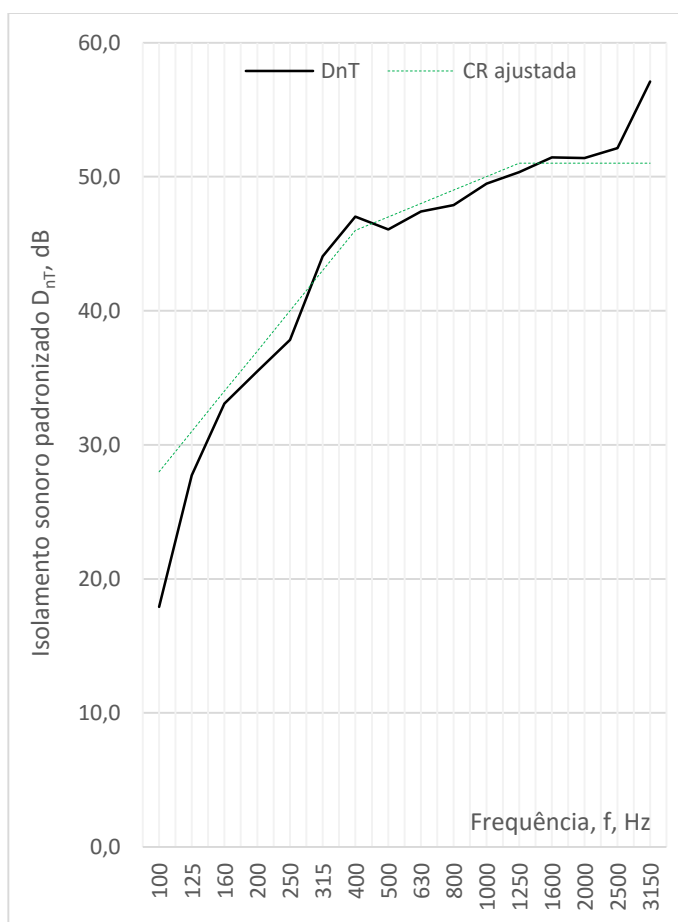
Descrição e identificação dos elementos de construção, configuração do ensaio e direção de medição:

Paredes exteriores em alvenaria de pedra, paredes interiores em tabique e pavimento em estrutura de madeira (soalho (e=2.5cm), vigas (e=0.35m), tarugos (e=0.30m) e teto em tabuado de madeira com suporte (e=7 cm)).

Volume do compartimento emissor: 32,4 m³

Volume do compartimento recetor: 73,5 m³

Frequência Hz	D _{nT} dB
100	17,9
125	27,7
160	33,1
200	35,5
250	37,8
315	44,1
400	47,0
500	46,1
630	47,4
800	47,9
1000	49,5
1250	50,3
1600	51,4
2000	51,4
2500	52,1
3150	57,1



Determinação conforme a norma ISO 717-1

D_{nT,w} = 47 dB

Determinação baseada nos resultados obtidos por meio de um método de engenharia com medições realizadas *in situ*

Nº DO RELATÓRIO DE ENSAIO: 01

BOLETIM DE ENSAIO 02

NÍVEIS DE SONS DE PERCUSSÃO, PADRONIZADOS, CONFORME A NORMA ISO 140-7

MEDIÇÃO, *IN SITU*, DO ISOLAMENTO SONORO DE PAVIMENTOS A SONS DE PERCUSSÃO

Localização: Rua das Taipas

Data: 01/04/2015

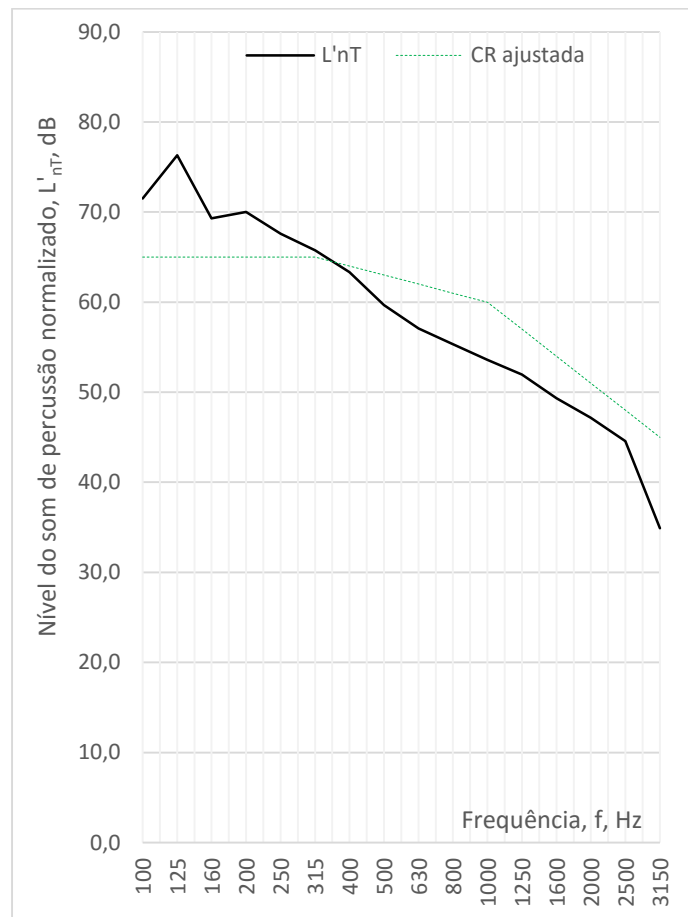
Descrição e identificação dos elementos de construção, configuração do ensaio e direção de medição:

Paredes exteriores em alvenaria de pedra, paredes interiores em tabique e pavimento em estrutura de madeira (soalho (e=2.5cm), vigas (e=0.35m), tarugos (e=0.30m) e teto em tabuado de madeira com suporte (e=7 cm)).

Volume do compartimento emissor: 32,4 m³

Volume do compartimento recetor: 73,5 m³

Frequência Hz	L' nT dB
100	71,5
125	76,3
160	69,3
200	70,0
250	67,6
315	65,7
400	63,3
500	59,7
630	57,1
800	55,3
1000	53,6
1250	52,0
1600	49,3
2000	47,2
2500	44,6
3150	34,9



Determinação conforme a norma ISO 717-2

$L'_{nT,w} = 63$ dB

Determinação baseada nos resultados obtidos por meio de um método de engenharia com medições realizadas *in situ*

Nº DO RELATÓRIO DE ENSAIO: 02

ISOLAMENTO SONORO PADRONIZADO DE ACORDO COM A NORMA ISO 140-4

MEDIÇÃO DO ISOLAMENTO SONORO *IN SITU* ENTRE COMPARTIMENTOS

Localização: Rua Mouzinho da Silveira

Data: 09/04/2015

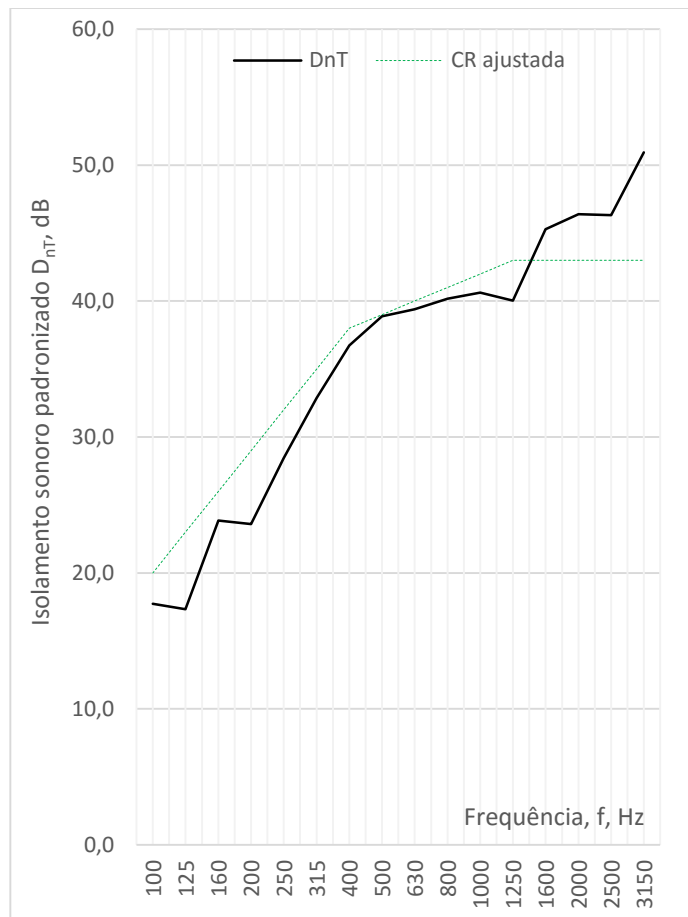
Descrição e identificação dos elementos de construção, configuração do ensaio e direção de medição:

Paredes exteriores em alvenaria de pedra, paredes interiores em tabique e pavimento em estrutura de madeira (soalho (e=2.5cm), vigas (e=0.30m), tarugos (e=0.30m) e teto em estuque com suporte (e=8 cm)).

Volume do compartimento emissor: 94 m³

Volume do compartimento recetor: 36 m³

Frequência Hz	D _{nT} dB
100	17,7
125	17,3
160	23,9
200	23,6
250	28,5
315	32,9
400	36,7
500	38,9
630	39,4
800	40,2
1000	40,6
1250	40,0
1600	45,3
2000	46,4
2500	46,3
3150	50,9



Determinação conforme a norma ISO 717-1

D_{nT,w} = 39 dB

Determinação baseada nos resultados obtidos por meio de um método de engenharia com medições realizadas *in situ*

Nº DO RELATÓRIO DE ENSAIO: 03

BOLETIM DE ENSAIO 04

NÍVEIS DE SONS DE PERCUSSÃO, PADRONIZADOS, CONFORME A NORMA ISO 140-7

MEDIÇÃO, *IN SITU*, DO ISOLAMENTO SONORO DE PAVIMENTOS A SONS DE PERCUSSÃO

Localização: Rua Mouzinho da Silveira

Data: 09/04/2015

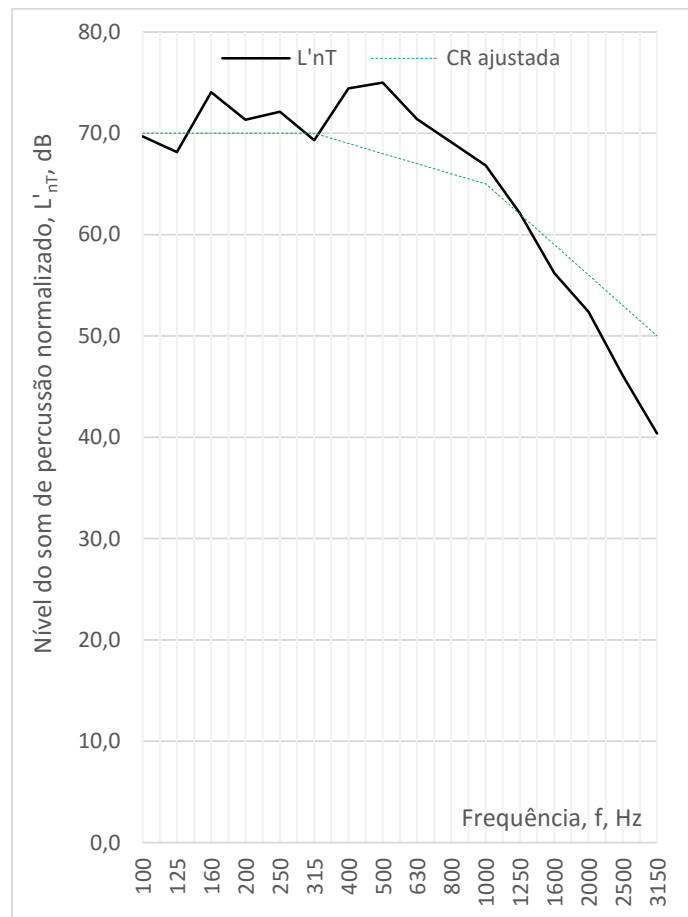
Descrição e identificação dos elementos de construção, configuração do ensaio e direção de medição:

Paredes exteriores em alvenaria de pedra, paredes interiores em tabique e pavimento em estrutura de madeira (soalho (e=2.5cm), vigas (e=0.30m), tarugos (e=0.30m) e teto em estuque com suporte (e=8 cm)).

Volume do compartimento emissor: 94 m³

Volume do compartimento recetor: 36 m³

Frequência Hz	L' nT dB
100	69,7
125	68,2
160	74,0
200	71,3
250	72,1
315	69,3
400	74,4
500	75,0
630	71,4
800	69,1
1000	66,8
1250	62,1
1600	56,2
2000	52,4
2500	46,1
3150	40,4



Determinação conforme a norma ISO 717-2

L' nT,w = 68 dB

Determinação baseada nos resultados obtidos por meio de um método de engenharia com medições realizadas *in situ*

Nº DO RELATÓRIO DE ENSAIO: 04

ISOLAMENTO SONORO PADRONIZADO DE ACORDO COM A NORMA ISO 140-4

MEDIÇÃO DO ISOLAMENTO SONORO *IN SITU* ENTRE COMPARTIMENTOS

Localização: Rua da Picaria

Data: 04/05/2015

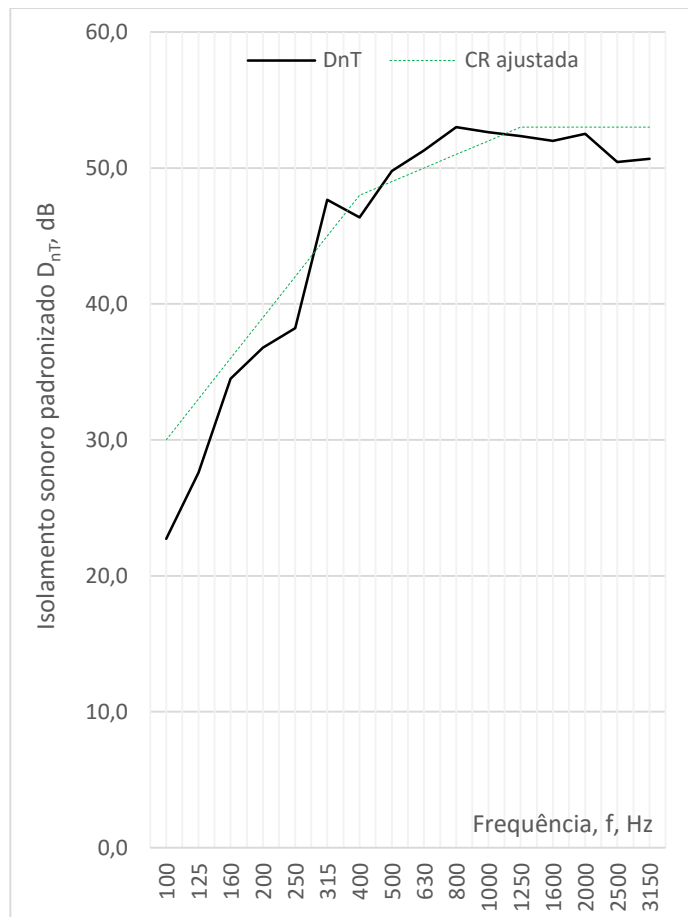
Descrição e identificação dos elementos de construção, configuração do ensaio e direção de medição:

Paredes exteriores em alvenaria de pedra, paredes interiores em tabique e pavimento em estrutura de madeira (soalho (e=2.5cm), vigas (e=0.35m), tarugos (e=0.35m) e teto em estuque com suporte (e=8 cm)).

Volume do compartimento emissor: 52 m³

Volume do compartimento recetor: 60 m³

Frequência Hz	D _{nT} dB
100	22,7
125	27,6
160	34,5
200	36,8
250	38,2
315	47,6
400	46,4
500	49,8
630	51,3
800	53,0
1000	52,6
1250	52,3
1600	52,0
2000	52,5
2500	50,4
3150	50,7



Determinação conforme a norma ISO 717-1

D_{nT,w} = 49 dB

Determinação baseada nos resultados obtidos por meio de um método de engenharia com medições realizadas *in situ*

Nº DO RELATÓRIO DE ENSAIO: 05

NÍVEIS DE SONS DE PERCUSSÃO, PADRONIZADOS, CONFORME A NORMA ISO 140-7

MEDIÇÃO, *IN SITU*, DO ISOLAMENTO SONORO DE PAVIMENTOS A SONS DE PERCUSSÃO

Localização: Rua da Picaria

Data: 04/05/2015

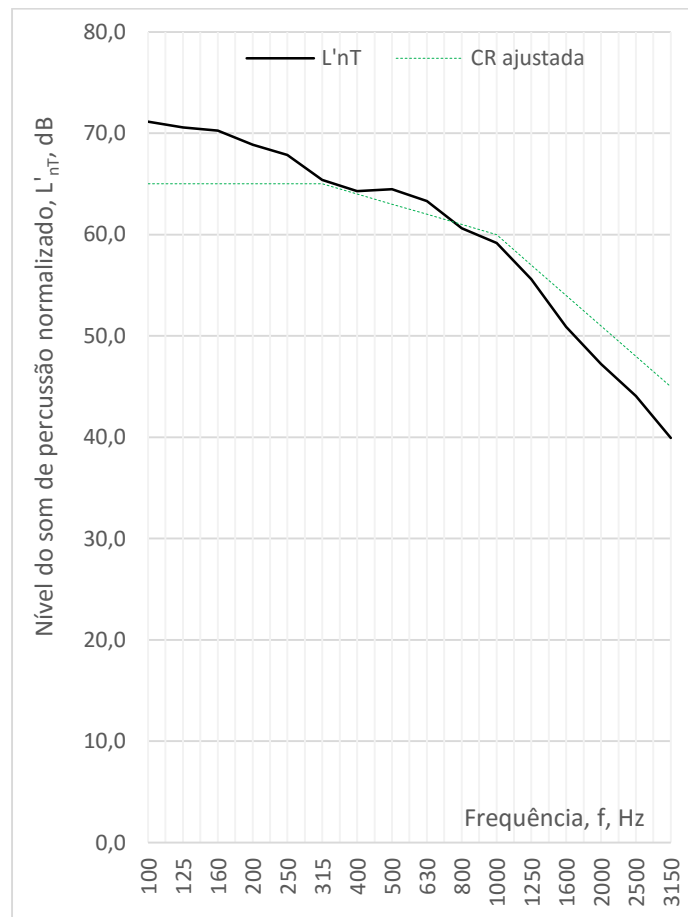
Descrição e identificação dos elementos de construção, configuração do ensaio e direção de medição:

Paredes exteriores em alvenaria de pedra, paredes interiores em tabique e pavimento em estrutura de madeira (soalho (e=2.5cm), vigas (e=0.35m), tarugos (e=0.35m) e teto em estuque com suporte (e=8 cm)).

Volume do compartimento emissor: 52 m³

Volume do compartimento recetor: 60 m³

Frequência Hz	L' nT dB
100	71,1
125	70,6
160	70,3
200	68,9
250	67,8
315	65,4
400	64,3
500	64,5
630	63,3
800	60,6
1000	59,2
1250	55,6
1600	50,9
2000	47,2
2500	44,1
3150	39,9



Determinação conforme a norma ISO 717-2

$L'_{nT,w} = 63$ dB

Determinação baseada nos resultados obtidos por meio de um método de engenharia com medições realizadas *in situ*

Nº DO RELATÓRIO DE ENSAIO: 06

ISOLAMENTO SONORO PADRONIZADO DE ACORDO COM A NORMA ISO 140-4

MEDIÇÃO DO ISOLAMENTO SONORO *IN SITU* ENTRE COMPARTIMENTOS

Localização: Rua da Picaria

Data: 04/05/2015

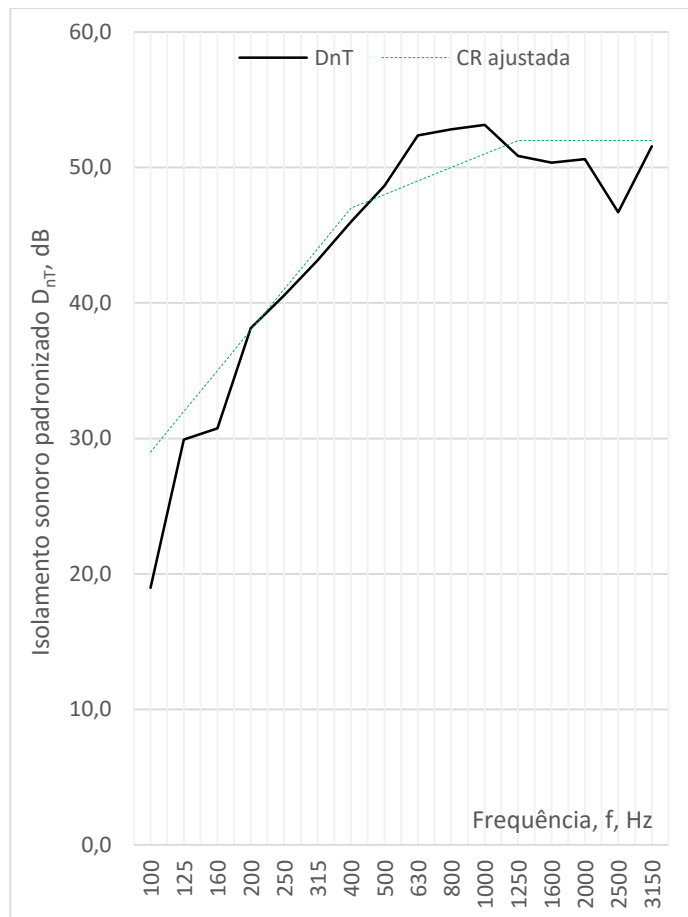
Descrição e identificação dos elementos de construção, configuração do ensaio e direção de medição:

Paredes exteriores em alvenaria de pedra, paredes interiores em tabique e pavimento em estrutura de madeira (soalho (e=2.5cm), vigas (e=0.35m), tarugos (e=0.35m) e teto em estuque com suporte (e=8 cm)).

Volume do compartimento emissor: 15 m³

Volume do compartimento recetor: 48,6 m³

Frequência Hz	D _{nT} dB
100	19,0
125	29,9
160	30,7
200	38,1
250	40,6
315	43,1
400	46,0
500	48,7
630	52,4
800	52,8
1000	53,1
1250	50,8
1600	50,4
2000	50,6
2500	46,7
3150	51,6



Determinação conforme a norma ISO 717-1

$D_{nT,w} = 48$ dB

Determinação baseada nos resultados obtidos por meio de um método de engenharia com medições realizadas *in situ*

Nº DO RELATÓRIO DE ENSAIO: 07

BOLETIM DE ENSAIO 08

NÍVEIS DE SONS DE PERCUSSÃO, PADRONIZADOS, CONFORME A NORMA ISO 140-7

MEDIÇÃO, *IN SITU*, DO ISOLAMENTO SONORO DE PAVIMENTOS A SONS DE PERCUSSÃO

Localização: Rua da Picaria

Data: 04/05/2015

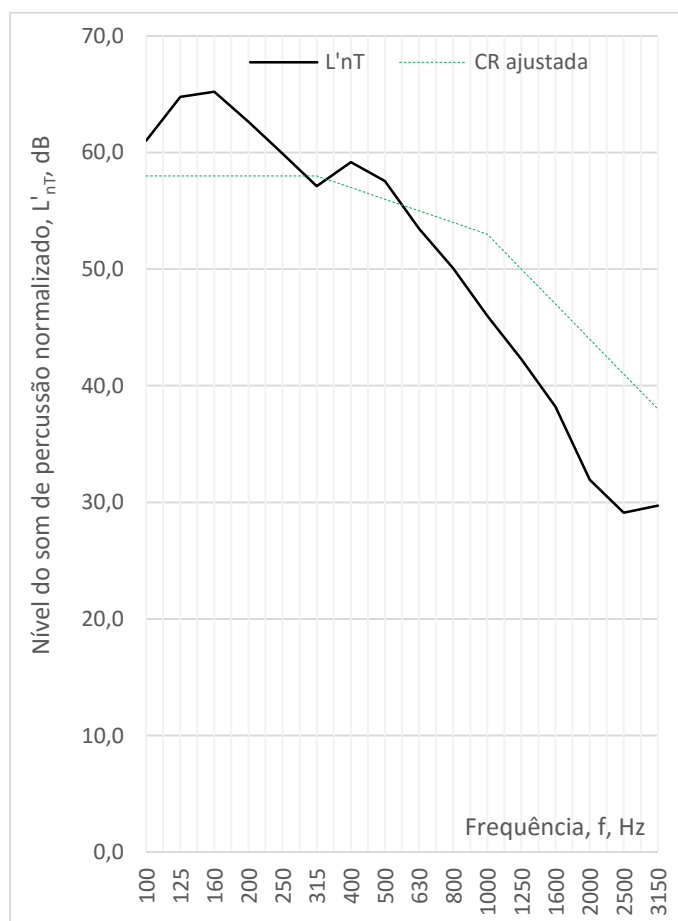
Descrição e identificação dos elementos de construção, configuração do ensaio e direção de medição:

Paredes exteriores em alvenaria de pedra, paredes interiores em tabique e pavimento em estrutura de madeira (soalho (e=2.5cm), vigas (e=0.35m), tarugos (e=0.35m) e teto em estuque com suporte (e=8 cm)).

Volume do compartimento emissor: 15 m³

Volume do compartimento recetor: 48,6 m³

Frequência Hz	L' nT dB
100	61,0
125	64,8
160	65,2
200	62,6
250	59,9
315	57,1
400	59,2
500	57,6
630	53,5
800	50,1
1000	46,0
1250	42,3
1600	38,2
2000	31,9
2500	29,1
3150	29,7



Determinação conforme a norma ISO 717-2

L' nT,w = 56 dB

Determinação baseada nos resultados obtidos por meio de um método de engenharia com medições realizadas *in situ*

Nº DO RELATÓRIO DE ENSAIO: 08

ISOLAMENTO SONORO PADRONIZADO DE ACORDO COM A NORMA ISO 140-4

MEDIÇÃO DO ISOLAMENTO SONORO *IN SITU* ENTRE COMPARTIMENTOS

Localização: Rua dos Caldeireiros

Data: 08/05/2015

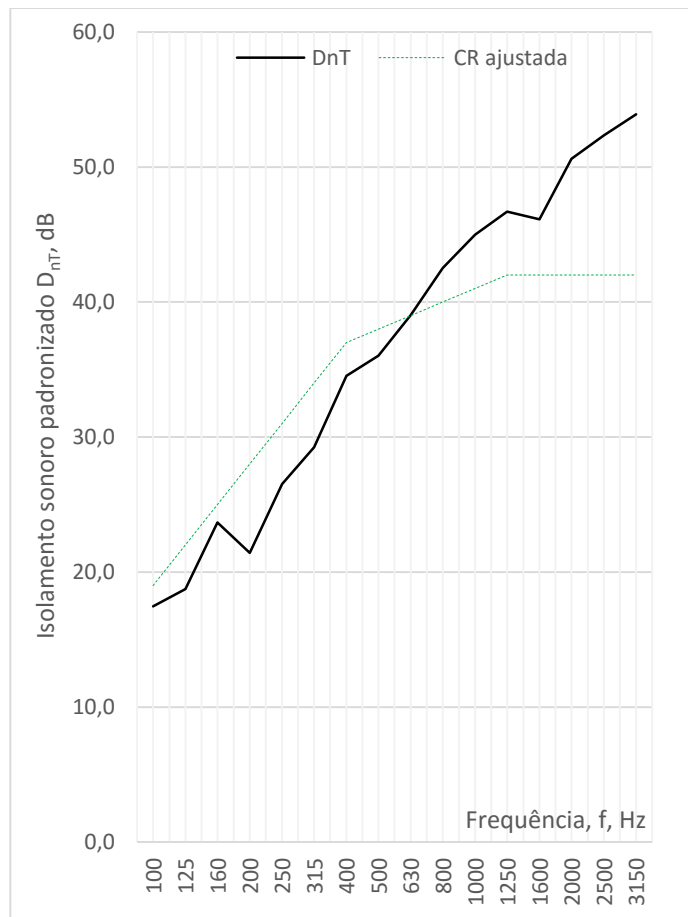
Descrição e identificação dos elementos de construção, configuração do ensaio e direção de medição:

Paredes exteriores em alvenaria de pedra, paredes interiores em tabique e pavimento em estrutura de madeira (soalho (e=2.5cm), vigas (e=0.30m), tarugos (e=0.25m) e teto em tabuado de madeira (e=3 cm)).

Volume do compartimento emissor: 57,6 m³

Volume do compartimento recetor: 55,8 m³

Frequência Hz	D _{nT} dB
100	17,5
125	18,7
160	23,7
200	21,4
250	26,5
315	29,2
400	34,5
500	36,0
630	39,0
800	42,5
1000	45,0
1250	46,7
1600	46,1
2000	50,6
2500	52,3
3150	53,9



Determinação conforme a norma ISO 717-1

D_{nT,w} = 38 dB

Determinação baseada nos resultados obtidos por meio de um método de engenharia com medições realizadas *in situ*

Nº DO RELATÓRIO DE ENSAIO: 09

NÍVEIS DE SONS DE PERCUSSÃO, PADRONIZADOS, CONFORME A NORMA ISO 140-7

MEDIÇÃO, *IN SITU*, DO ISOLAMENTO SONORO DE PAVIMENTOS A SONS DE PERCUSSÃO

Localização: Rua dos Caldeireiros

Data: 08/05/2015

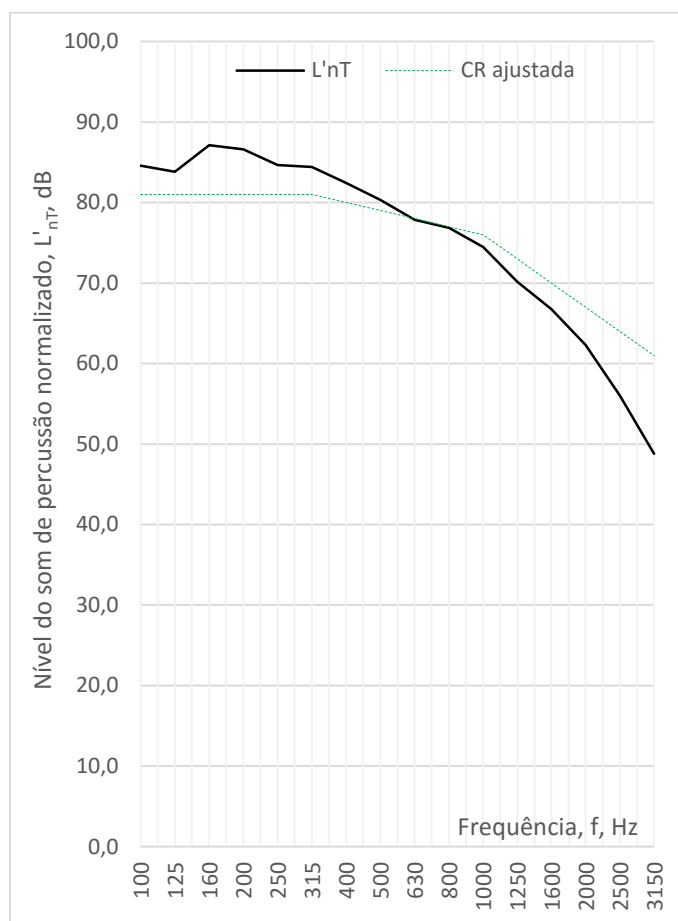
Descrição e identificação dos elementos de construção, configuração do ensaio e direção de medição:

Paredes exteriores em alvenaria de pedra, paredes interiores em tabique e pavimento em estrutura de madeira (soalho (e=2.5cm), vigas (e=0.30m), tarugos (e=0.25m) e teto em tabuado de madeira (e=3 cm)).

Volume do compartimento emissor: 57,6 m³

Volume do compartimento recetor: 55,8 m³

Frequência Hz	L' nT dB
100	84,6
125	83,8
160	87,1
200	86,6
250	84,7
315	84,4
400	82,4
500	80,3
630	77,9
800	76,9
1000	74,5
1250	70,2
1600	66,8
2000	62,3
2500	56,0
3150	48,8



Determinação conforme a norma ISO 717-2

L' nT,w = 79 dB

Determinação baseada nos resultados obtidos por meio de um método de engenharia com medições realizadas *in situ*

Nº DO RELATÓRIO DE ENSAIO: 10

ISOLAMENTO SONORO PADRONIZADO DE ACORDO COM A NORMA ISO 140-4

MEDIÇÃO DO ISOLAMENTO SONORO *IN SITU* ENTRE COMPARTIMENTOS

Localização: Rua Mouzinho da Silveira

Data: 21/05/2015

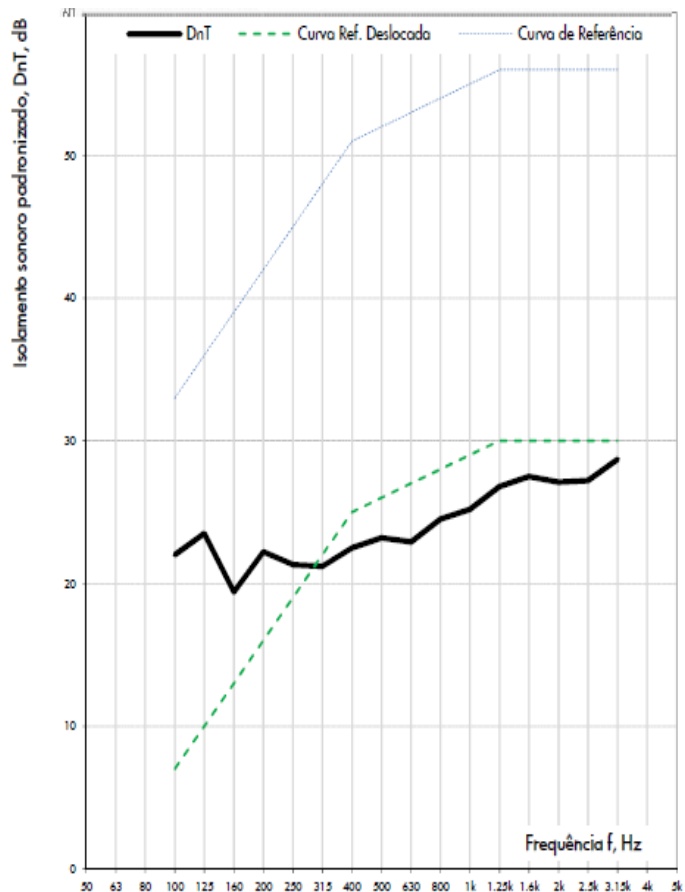
Descrição e identificação dos elementos de construção, configuração do ensaio e direção de medição:

Paredes exteriores em alvenaria de pedra, paredes interiores em tabique e pavimento em estrutura de madeira (soalho (e=2.5cm), vigas (e=0.30m), tarugos (e=0.15m))

Volume do compartimento emissor: 85 m³

Volume do compartimento recetor: 145 m³

Frequência Hz	D _{nT} dB
100	22,0
125	23,5
160	19,4
200	22,2
250	21,3
315	21,2
400	22,5
500	23,2
630	22,9
800	24,5
1000	25,2
1250	26,8
1600	27,5
2000	27,1
2500	27,2
3150	28,7



Determinação conforme a norma ISO 717-1

D_{nT,w} = 26 dB

Determinação baseada nos resultados obtidos por meio de um método de engenharia com medições realizadas *in situ*

Nº DO RELATÓRIO DE ENSAIO: 11

NÍVEIS DE SONS DE PERCUSSÃO, PADRONIZADOS, CONFORME A NORMA ISO 140-7

MEDIÇÃO, *IN SITU*, DO ISOLAMENTO SONORO DE PAVIMENTOS A SONS DE PERCUSSÃO

Localização: Rua Mouzinho da Silveira

Data: 21/05/2015

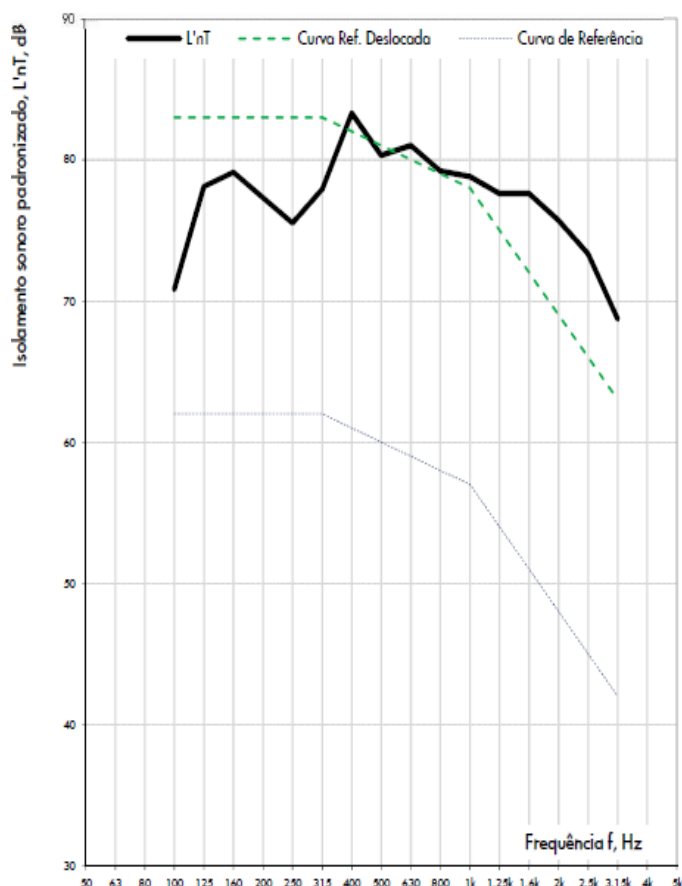
Descrição e identificação dos elementos de construção, configuração do ensaio e direção de medição:

Paredes exteriores em alvenaria de pedra, paredes interiores em tabique e pavimento em estrutura de madeira (soalho (e=2.5cm), vigas (e=0.30m), tarugos (e=0.15m))

Volume do compartimento emissor: 85 m³

Volume do compartimento recetor: 145 m³

Frequência Hz	L' nT dB
100	70,9
125	78,1
160	79,1
200	77,3
250	75,5
315	77,9
400	83,3
500	80,3
630	81,0
800	79,2
1000	78,8
1250	77,6
1600	77,6
2000	75,7
2500	73,3
3150	68,7



Determinação conforme a norma ISO 717-2

L' nT,w = 81 dB

Determinação baseada nos resultados obtidos por meio de um método de engenharia com medições realizadas *in situ*

Nº DO RELATÓRIO DE ENSAIO: 12

ISOLAMENTO SONORO PADRONIZADO DE ACORDO COM A NORMA ISO 140-4

MEDIÇÃO DO ISOLAMENTO SONORO *IN SITU* ENTRE COMPARTIMENTOS

Localização: Rua Santo António de Arnelas, Olival

Data: 26/05/2015

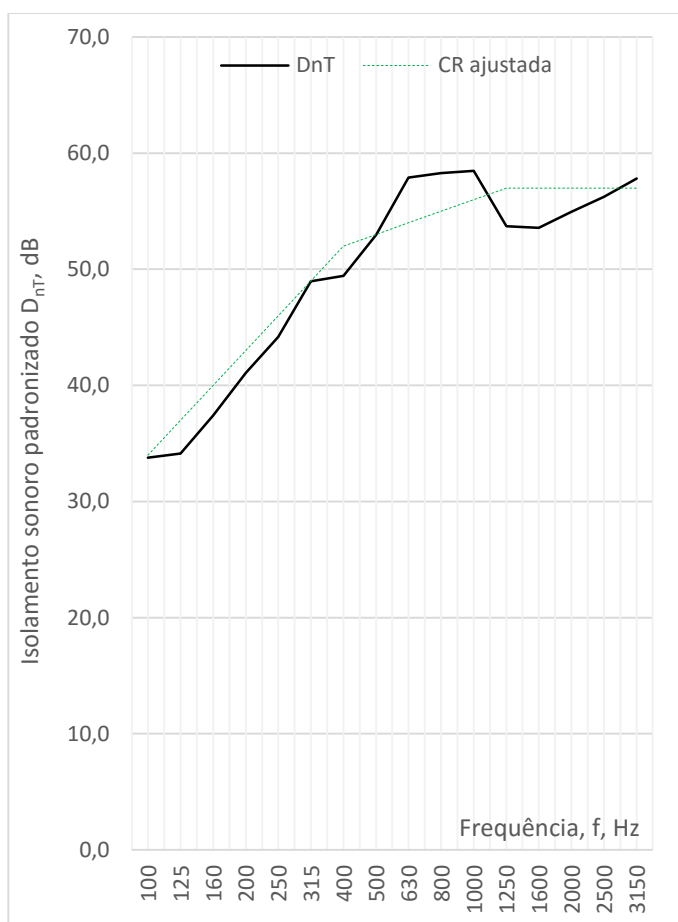
Descrição e identificação dos elementos de construção, configuração do ensaio e direção de medição:

Paredes exteriores em alvenaria de pedra, paredes interiores em tabique e pavimento em estrutura de madeira (soalho com suporte (e=7.5cm), vigas (e=0.40m), tarugos (e=0.35m) e teto em estuque com suporte (e=8 cm)).

Volume do compartimento emissor: 120 m³

Volume do compartimento recetor: 90 m³

Frequência Hz	D _{nT} dB
100	35,5
125	34,1
160	37,4
200	41,1
250	44,2
315	49,0
400	49,4
500	53,0
630	57,9
800	58,3
1000	58,5
1250	54,4
1600	53,6
2000	54,9
2500	56,2
3150	57,8



Determinação conforme a norma ISO 717-1

D_{nT,w} = 53 dB

Determinação baseada nos resultados obtidos por meio de um método de engenharia com medições realizadas *in situ*

Nº DO RELATÓRIO DE ENSAIO: 13

NÍVEIS DE SONS DE PERCUSSÃO, PADRONIZADOS, CONFORME A NORMA ISO 140-7

MEDIÇÃO, *IN SITU*, DO ISOLAMENTO SONORO DE PAVIMENTOS A SONS DE PERCUSSÃO

Localização: Rua Santo António de Arnelas, Olival

Data: 26/05/2015

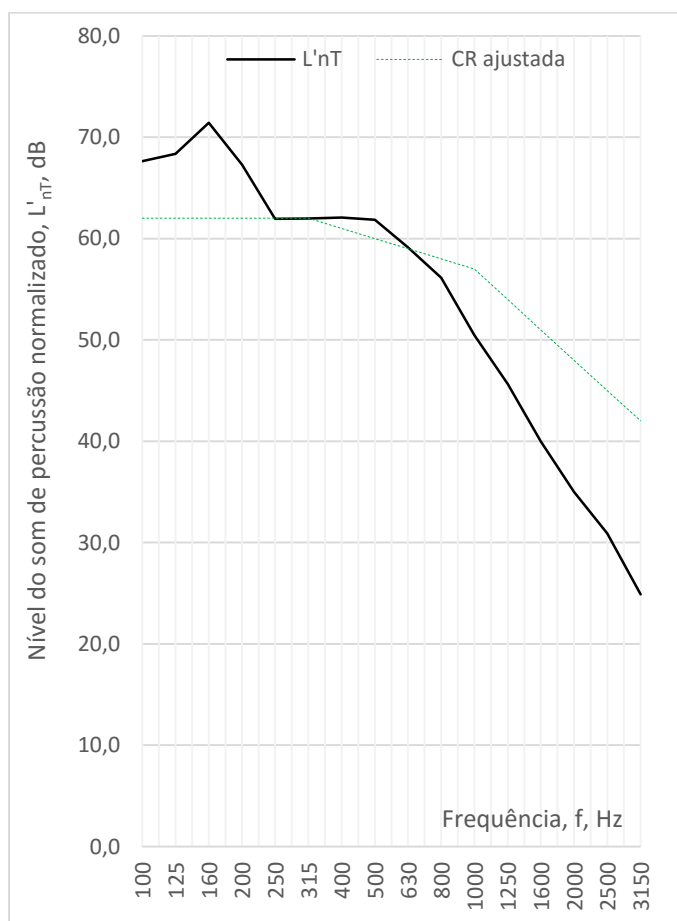
Descrição e identificação dos elementos de construção, configuração do ensaio e direção de medição:

Paredes exteriores em alvenaria de pedra, paredes interiores em tabique e pavimento em estrutura de madeira (soalho com suporte (e=7.5cm), vigas (e=0.40m), tarugos (e=0.35m) e teto em estuque com suporte (e=8 cm)).

Volume do compartimento emissor: 120 m³

Volume do compartimento recetor: 90 m³

Frequência Hz	L' nT dB
100	69,4
125	68,4
160	71,4
200	67,3
250	62,0
315	62,0
400	63,3
500	61,9
630	59,7
800	56,2
1000	50,4
1250	45,6
1600	40,0
2000	35,0
2500	30,9
3150	24,9



Determinação conforme a norma ISO 717-2

L' nT,w = 61 dB

Determinação baseada nos resultados obtidos por meio de um método de engenharia com medições realizadas *in situ*

Nº DO RELATÓRIO DE ENSAIO: 14

Anexo B – Fichas Resumo

ENSAIOS ACÚSTICOS DO ISOLAMENTO A SONS AÉREOS E DE PERCUSSÃO SEGUNDO AS NORMAS EN ISO 140-4 E EN ISO 140-7

Edifício em estudo:
Rua das Taipas

Data do ensaio:
01/04/2015

Caracterização construtiva dos elementos do ensaio:

Paredes exteriores em alvenaria de pedra, paredes interiores em tabique e pavimento em estrutura de madeira (soalho (e=2.5cm), vigas (e=0.35m), tarugos (e=0.30m) e teto em tabuado de madeira com suporte (e=7 cm)).

Condições de ensaio:

Volume do compartimento emissor = 32,4 m³
Volume do compartimento recetor = 73,5 m³

Equipamentos utilizados:

Fonte sonora EON, sonómetro 01dB solo e máquina de percussão normalizada

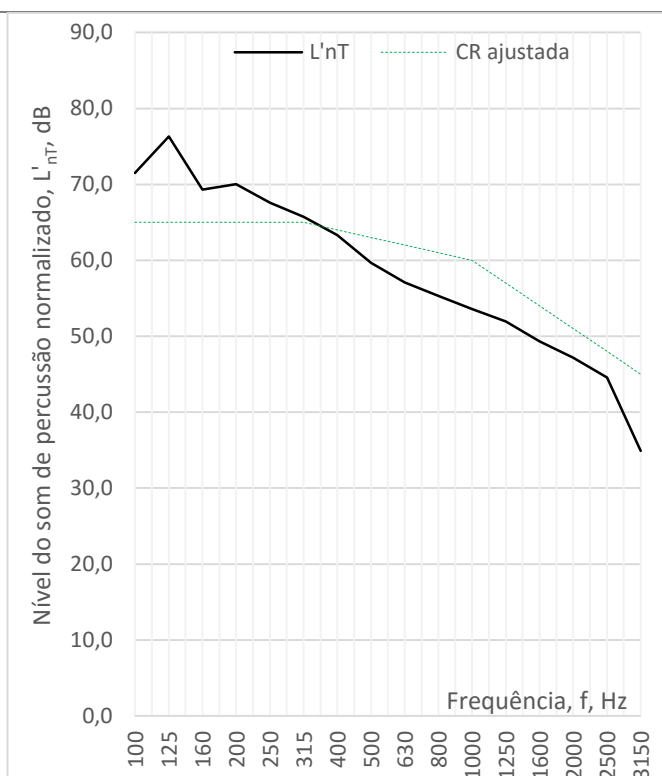


Esquema de corte do pavimento



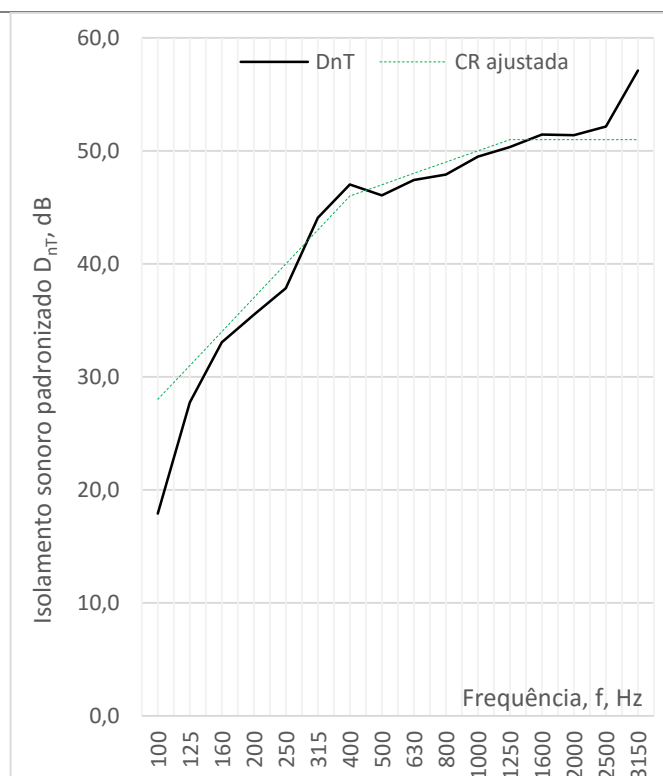
Localização do edifício

Curva de isolamento, L'nT



Índice de isolamento sonoro a sons de percussão,
L'_{nT,w} = 63 dB

Curva de isolamento, DnT



Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea,
D_{nT,w} = 47 dB

ENSAIOS ACÚSTICOS DO ISOLAMENTO A SONS AÉREOS E DE PERCUSSÃO SEGUNDO AS NORMAS EN ISO 140-4 E EN ISO 140-7

Edifício em estudo:

Rua Mouzinho da Silveira

Data do ensaio:

09/04/2015

Caracterização construtiva dos elementos do ensaio:

Paredes exteriores em alvenaria de pedra, paredes interiores em tabique e pavimento em estrutura de madeira (soalho (e=2.5cm), vigas (e=0.30m), tarugos (e=0.30m) e teto em estuque com suporte (e=8 cm)).

Condições de ensaio:

Volume do compartimento emissor = 94 m³

Volume do compartimento recetor = 36 m³

Equipamentos utilizados:

Fonte sonora EON, sonómetro 01dB solo e máquina de percussão normalizada

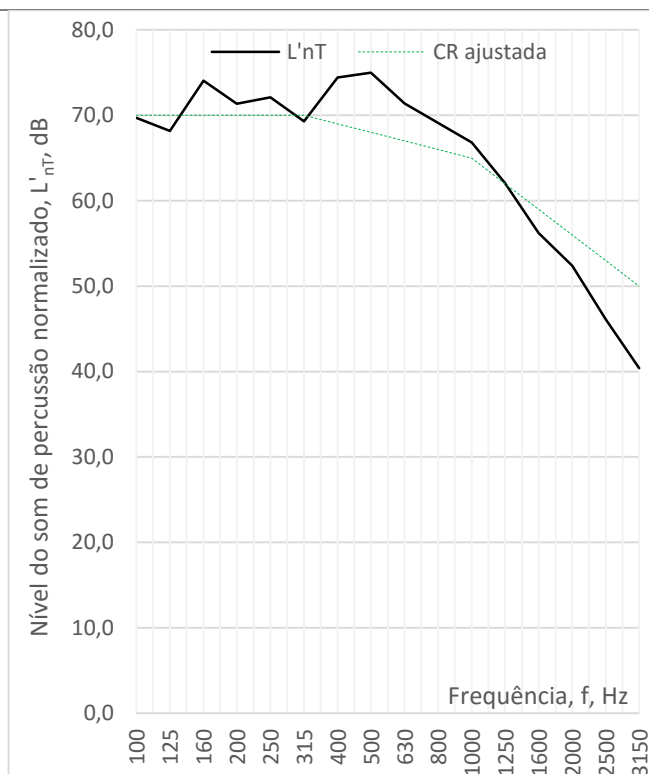


Esquema de corte do pavimento



Localização do edifício

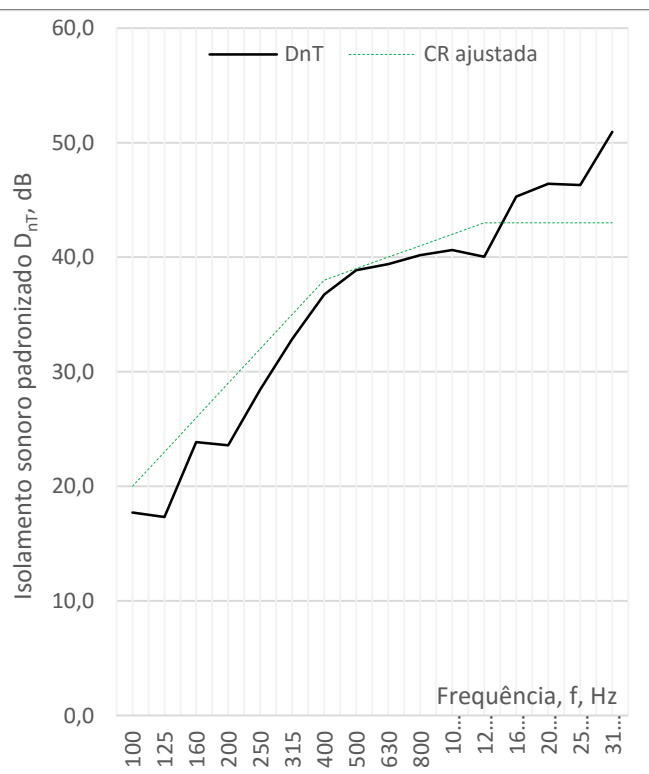
Curva de isolamento, L'nT



Índice de isolamento sonoro a sons de percussão,

L'nT,w = 68 dB

Curva de isolamento, DnT



Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea,

DnT,w = 39 dB

ENSAIOS ACÚSTICOS DO ISOLAMENTO A SONS AÉREOS E DE PERCUSSÃO SEGUNDO AS NORMAS EN ISO 140-4 E EN ISO 140-7
Edifício em estudo:

Rua da Picaria

Data do ensaio:

04/05/2015

Caracterização construtiva dos elementos do ensaio:

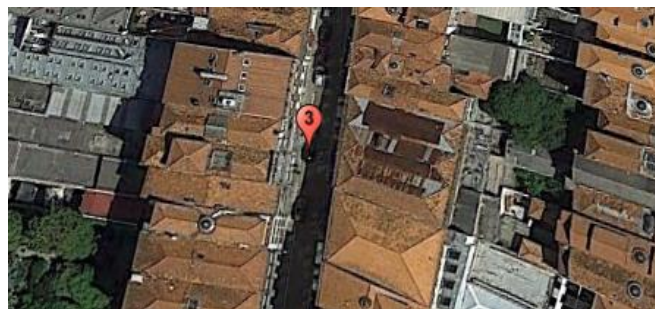
Paredes exteriores em alvenaria de pedra, paredes interiores em tabique e pavimento em estrutura de madeira (soalho (e=2.5cm), vigas (e=0.35m), tarugos (e=0.35m) e teto em estuque com suporte (e=8 cm)).

Condições de ensaio:
Volume do compartimento emissor = 52 m³Volume do compartimento recetor = 60 m³
Equipamentos utilizados:

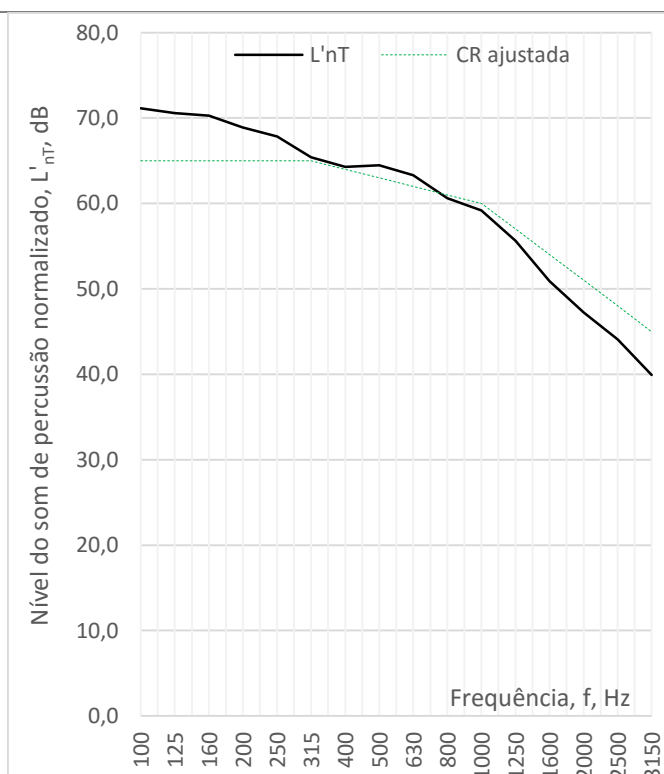
Fonte sonora EON, sonómetro 01dB solo e máquina de percussão normalizada



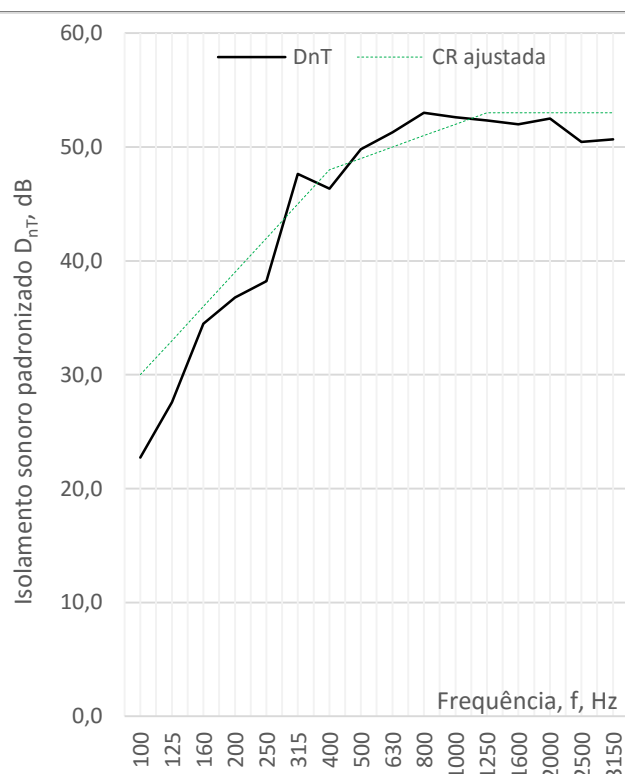
Esquema de corte do pavimento



Localização do edifício

Curva de isolamento, L'nT


Índice de isolamento sonoro a sons de percussão,

L'nT,w = 63 dB
Curva de isolamento, DnT


Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea,

DnT,w = 49 dB

ENSAIOS ACÚSTICOS DO ISOLAMENTO A SONS AÉREOS E DE PERCUSSÃO SEGUNDO AS NORMAS EN ISO 140-4 E EN ISO 140-7

Edifício em estudo:
Rua da Picaria

Data do ensaio:
04/05/2015

Caracterização construtiva dos elementos do ensaio:

Paredes exteriores em alvenaria de pedra, paredes interiores em tabique e pavimento em estrutura de madeira (soalho (e=2.5cm), vigas (e=0.35m), tarugos (e=0.35m) e teto em estuque com suporte (e=8 cm)).

Condições de ensaio:

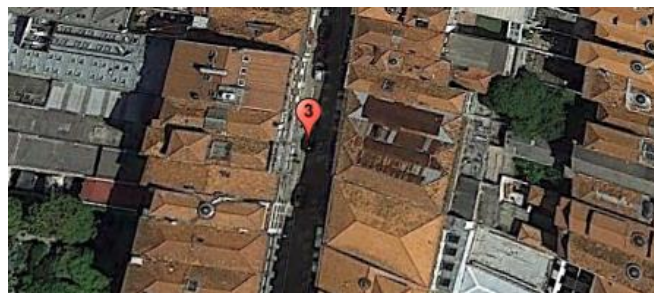
Volume do compartimento emissor = 15 m³
Volume do compartimento recetor = 48,6 m³

Equipamentos utilizados:

Fonte sonora EON, sonómetro 01dB solo e máquina de percussão normalizada

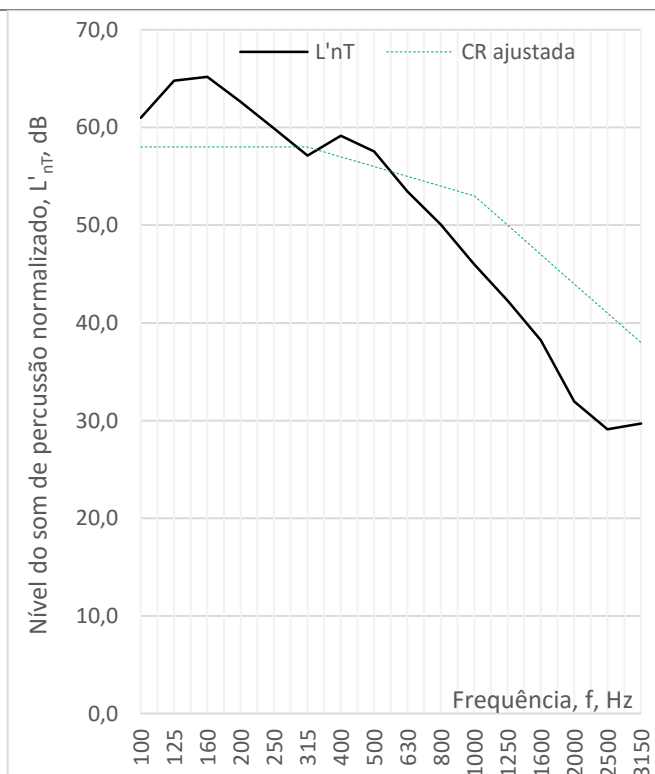


Esquema de corte do pavimento



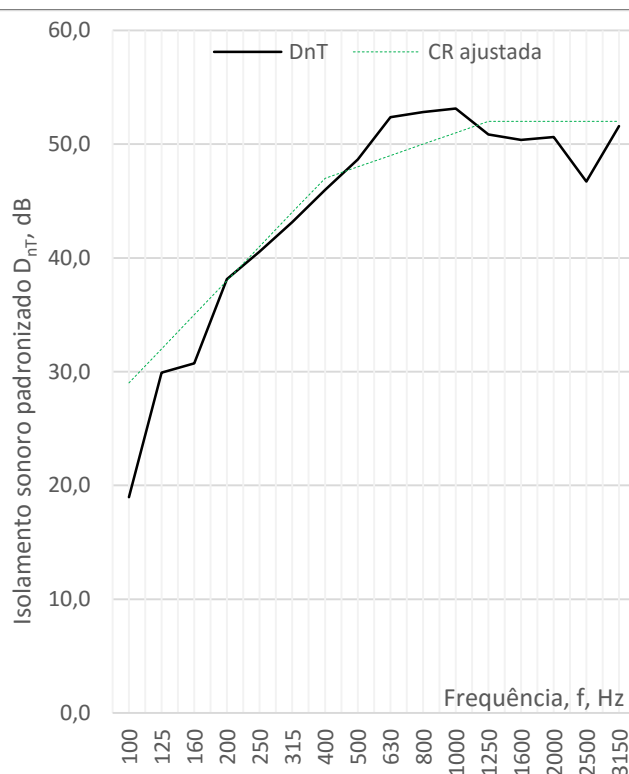
Localização do edifício

Curva de isolamento, L'nT



Índice de isolamento sonoro a sons de percussão,
L'nt,w = 56 dB

Curva de isolamento, DnT



Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea,
Dnt,w = 48 dB

ENSAIOS ACÚSTICOS DO ISOLAMENTO A SONS AÉREOS E DE PERCUSSÃO SEGUNDO AS NORMAS EN ISO 140-4 E EN ISO 140-7

Edifício em estudo:
Rua dos caldeiros

Data do ensaio:
08/05/2015

Caracterização construtiva dos elementos do ensaio:

Paredes exteriores em alvenaria de pedra, paredes interiores em tabique e pavimento em estrutura de madeira (soalho (e=2.5cm), vigas (e=0.30m), tarugos (e=0.25m) e teto em tabuado de madeira (e=3 cm)).

Condições de ensaio:

Volume do compartimento emissor = 57,6 m³
Volume do compartimento recetor = 55,8m³

Equipamentos utilizados:

Fonte sonora EON, sonómetro 01dB solo e máquina de percussão normalizada

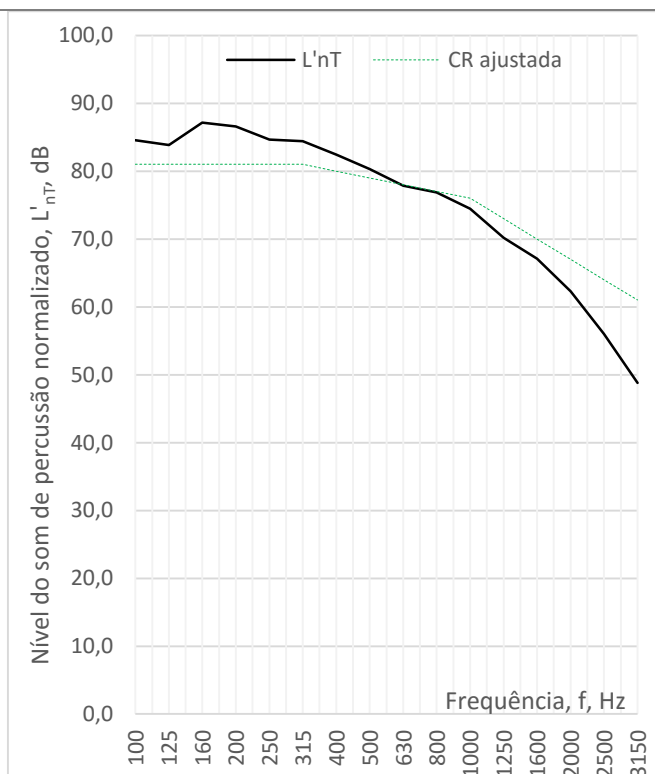


Esquema de corte do pavimento



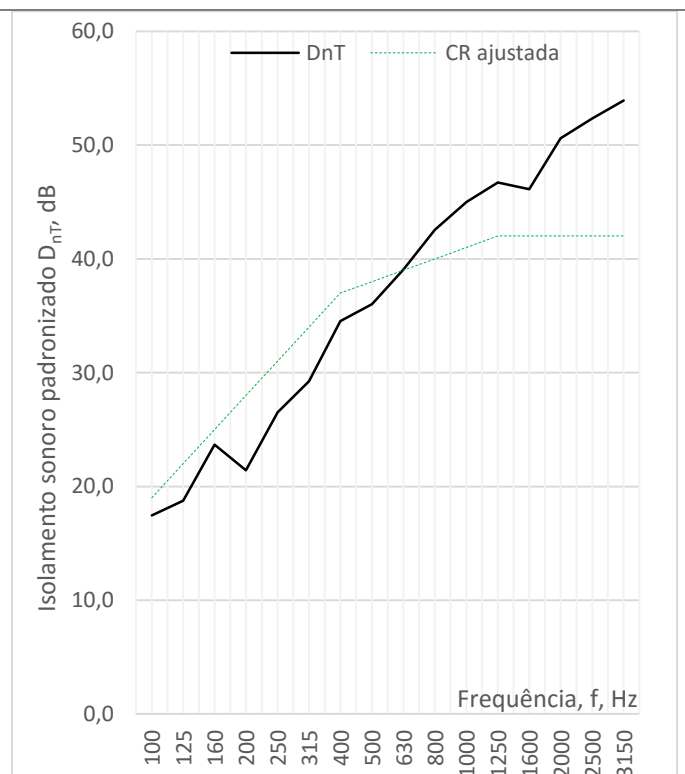
Localização do edifício

Curva de isolamento, L'nT



Índice de isolamento sonoro a sons de percussão,
L'nT,w = 79 dB

Curva de isolamento, DnT



Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea,
DnT,w = 38 dB

ENSAIOS ACÚSTICOS DO ISOLAMENTO A SONS AÉREOS E DE PERCUSSÃO SEGUNDO AS NORMAS EN ISO 140-4 E EN ISO 140-7

Edifício em estudo:
Rua Mouzinho da Silveira

Data do ensaio:
21/05/2015

Caracterização construtiva dos elementos do ensaio:

Paredes exteriores em alvenaria de pedra, paredes interiores em tabique e pavimento em estrutura de madeira (soalho (e=2.5cm), vigas (e=0.30m), tarugos (e=0.15m))

Condições de ensaio:

Volume do compartimento emissor = 85 m³
Volume do compartimento recetor = 145 m³

Equipamentos utilizados:

Fonte sonora EON, sonómetro 01dB solo e máquina de percussão normalizada

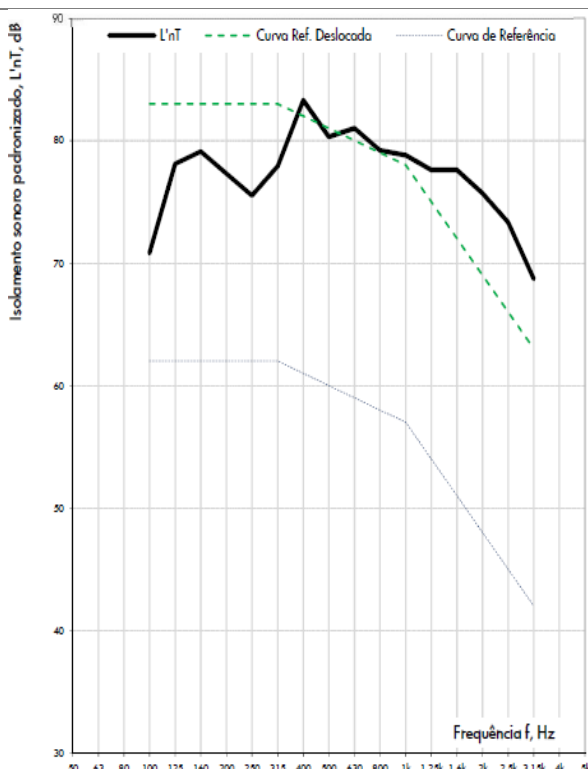


Esquema de corte do pavimento



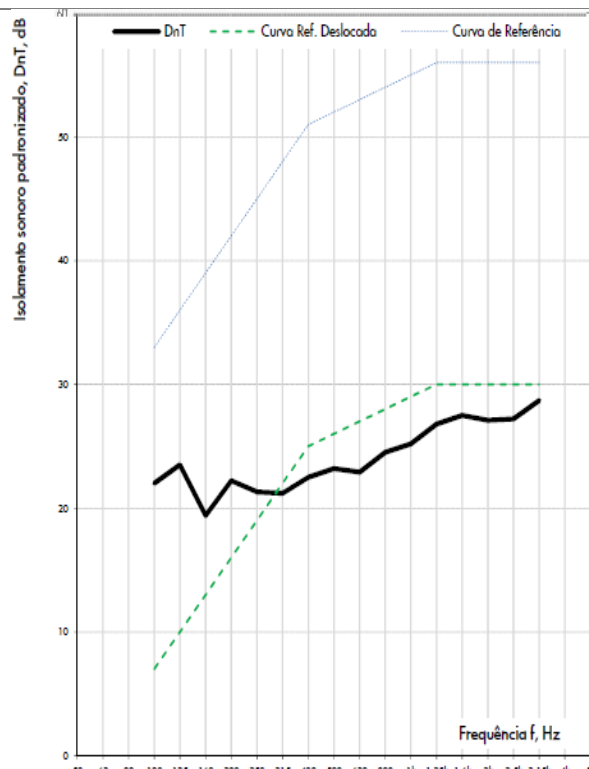
Localização do edifício

Curva de isolamento, L'nT



Índice de isolamento sonoro a sons de percussão,
L'nT,w = 81 dB

Curva de isolamento, DnT



Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea,
DnT,w = 26 dB

ENSAIOS ACÚSTICOS DO ISOLAMENTO A SONS AÉREOS E DE PERCUSSÃO SEGUNDO AS NORMAS EN ISO 140-4 E EN ISO 140-7

Edifício em estudo:

Rua Santo António de Arnelas, Olival

Data do ensaio:

26/05/2015

Caracterização construtiva dos elementos do ensaio:

Paredes exteriores em alvenaria de pedra, paredes interiores em tabique e pavimento em estrutura de madeira (soalho com suporte (e=7.5cm), vigas (e=0.40m), tarugos (e=0.35m) e teto em estuque com suporte (e=8 cm)).

Condições de ensaio:

Volume do compartimento emissor = 120 m³

Volume do compartimento recetor = 90 m³

Equipamentos utilizados:

Fonte sonora EON, sonómetro 01dB solo e máquina de percussão normalizada

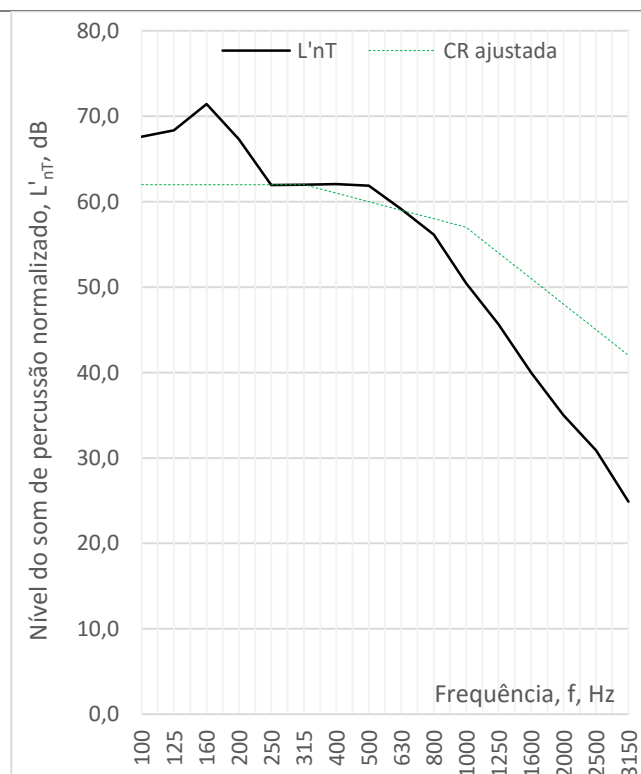


Esquema de corte do pavimento



Localização do edifício

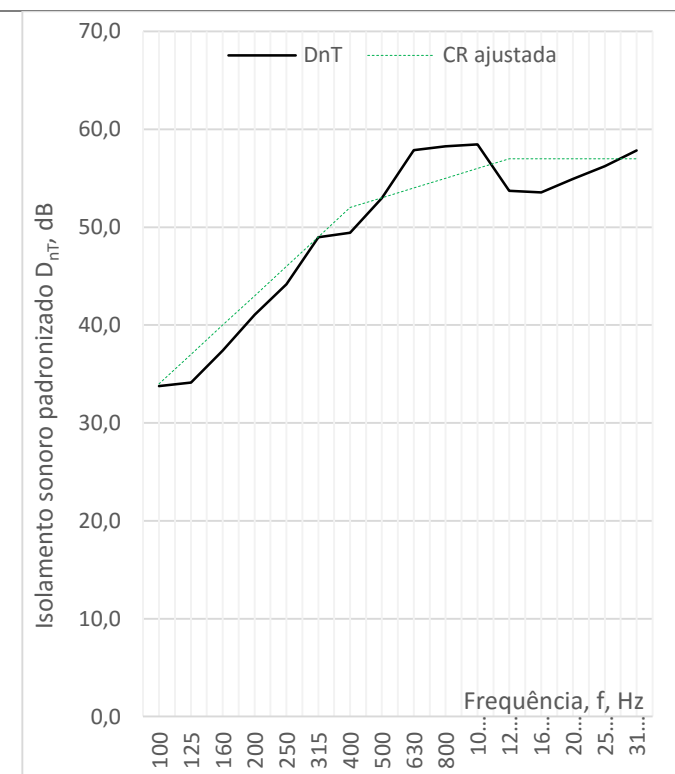
Curva de isolamento, L'nT



Índice de isolamento sonoro a sons de percussão,

L'nT,w = 61 dB

Curva de isolamento, DnT

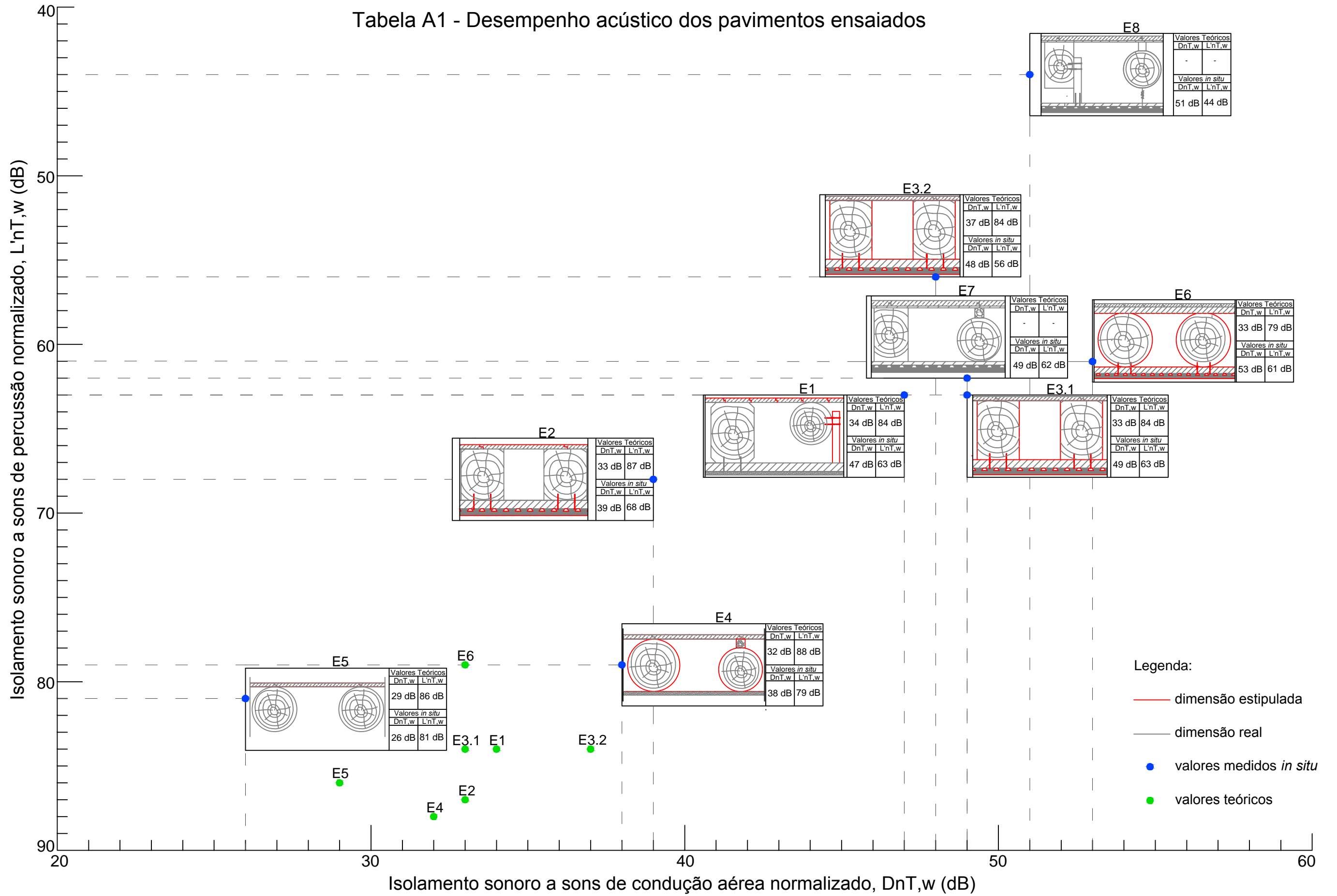


Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea,

DnT,w = 53 dB

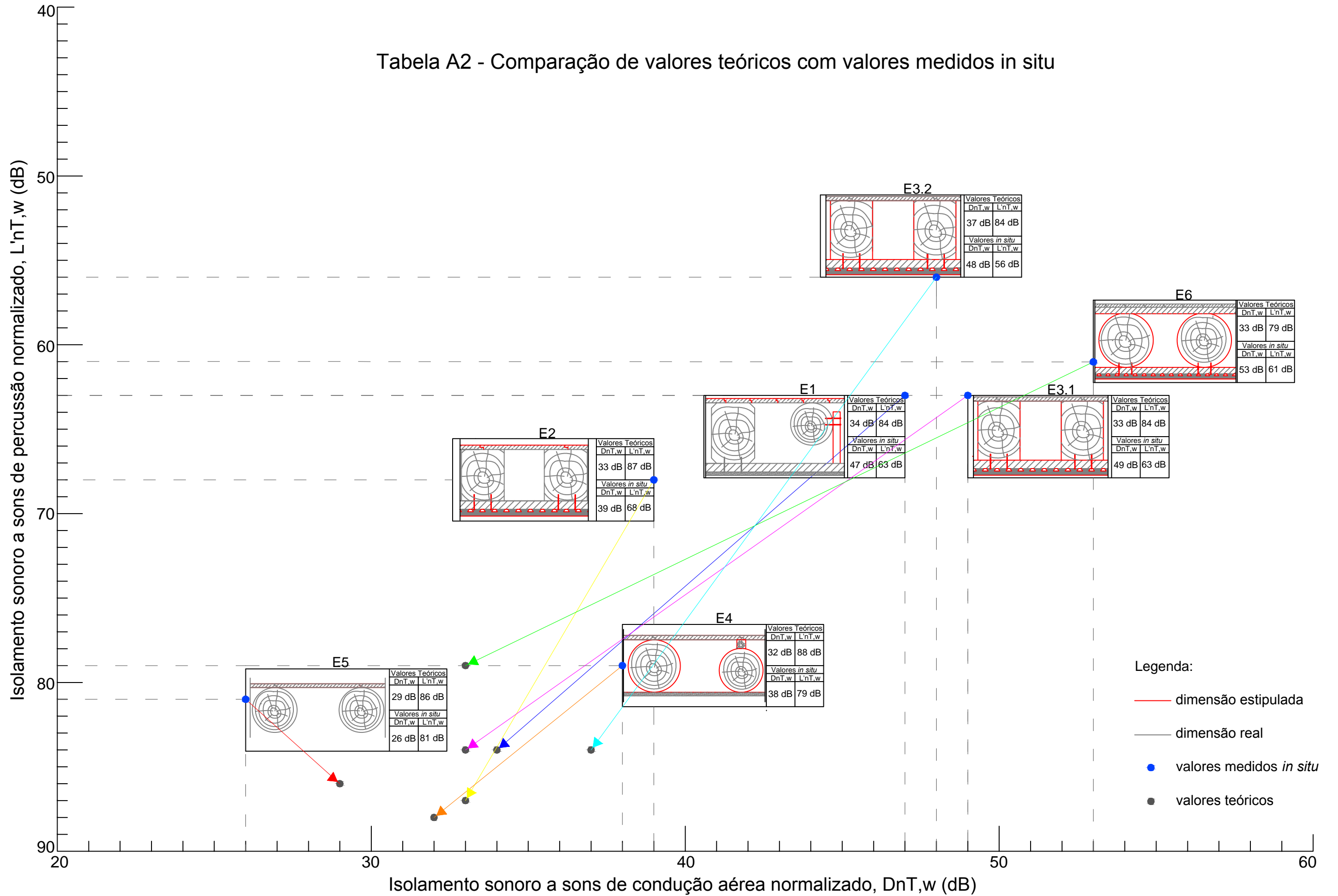
Anexo C – Tabelas Síntese dos Pavimentos Analisados

Tabela A1 - Desempenho acústico dos pavimentos ensaiados



- Legenda:
- dimensão estipulada
 - dimensão real
 - valores medidos *in situ*
 - valores teóricos

Tabela A2 - Comparação de valores teóricos com valores medidos in situ



Anexo D – Soluções de Intervenção

Figura A1 - Pavimento tipo da casa burguesa

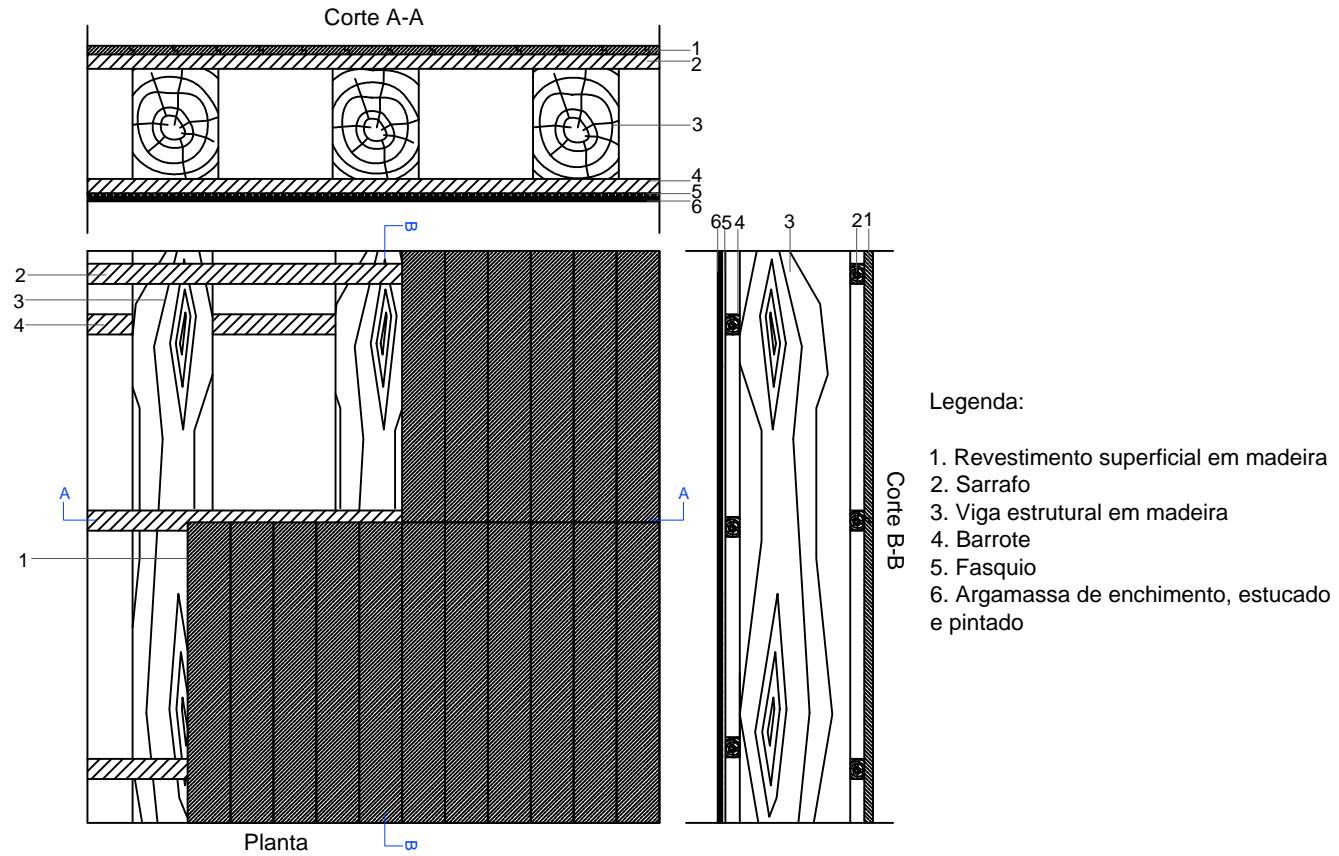


Figura A2 - Solução de intervenção nº1

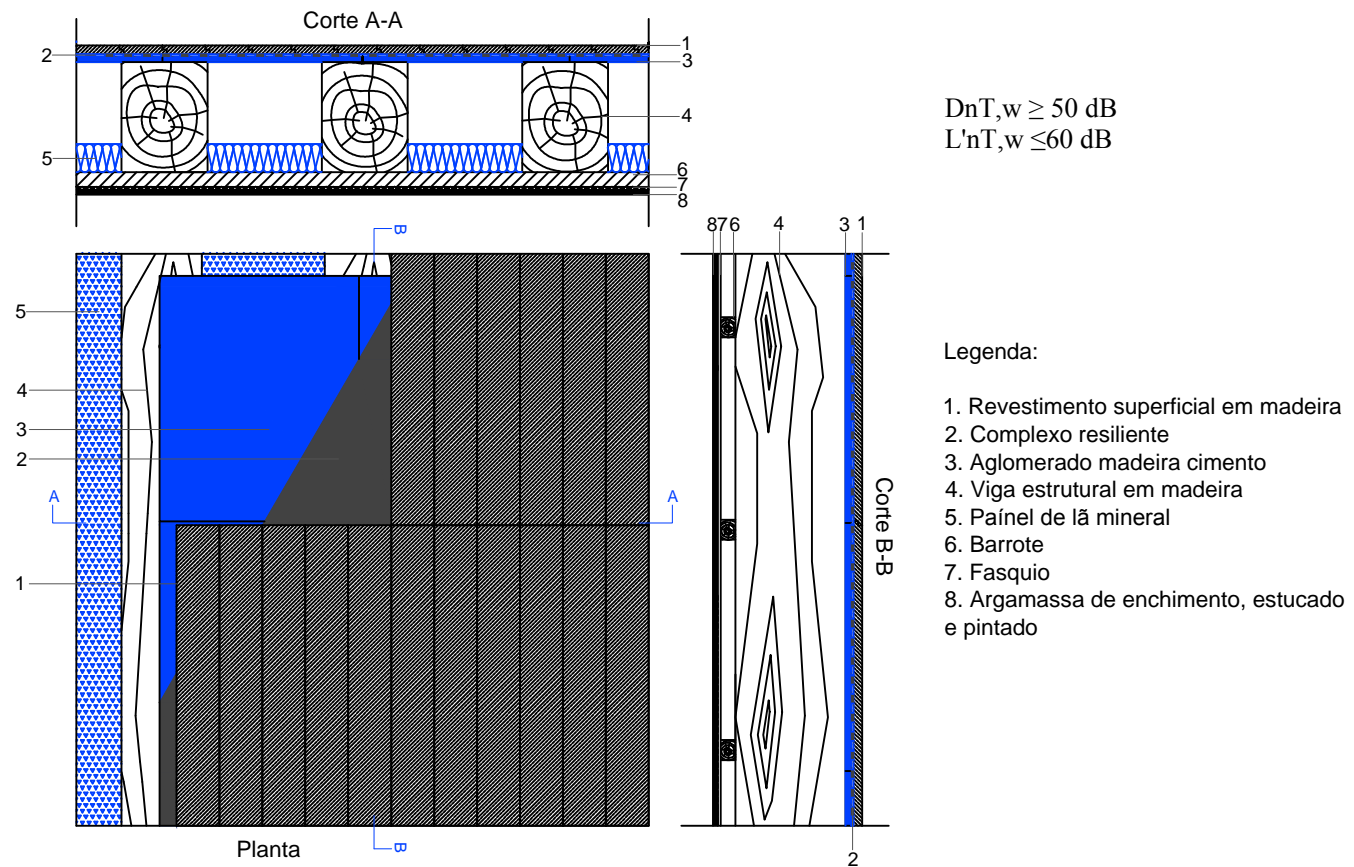
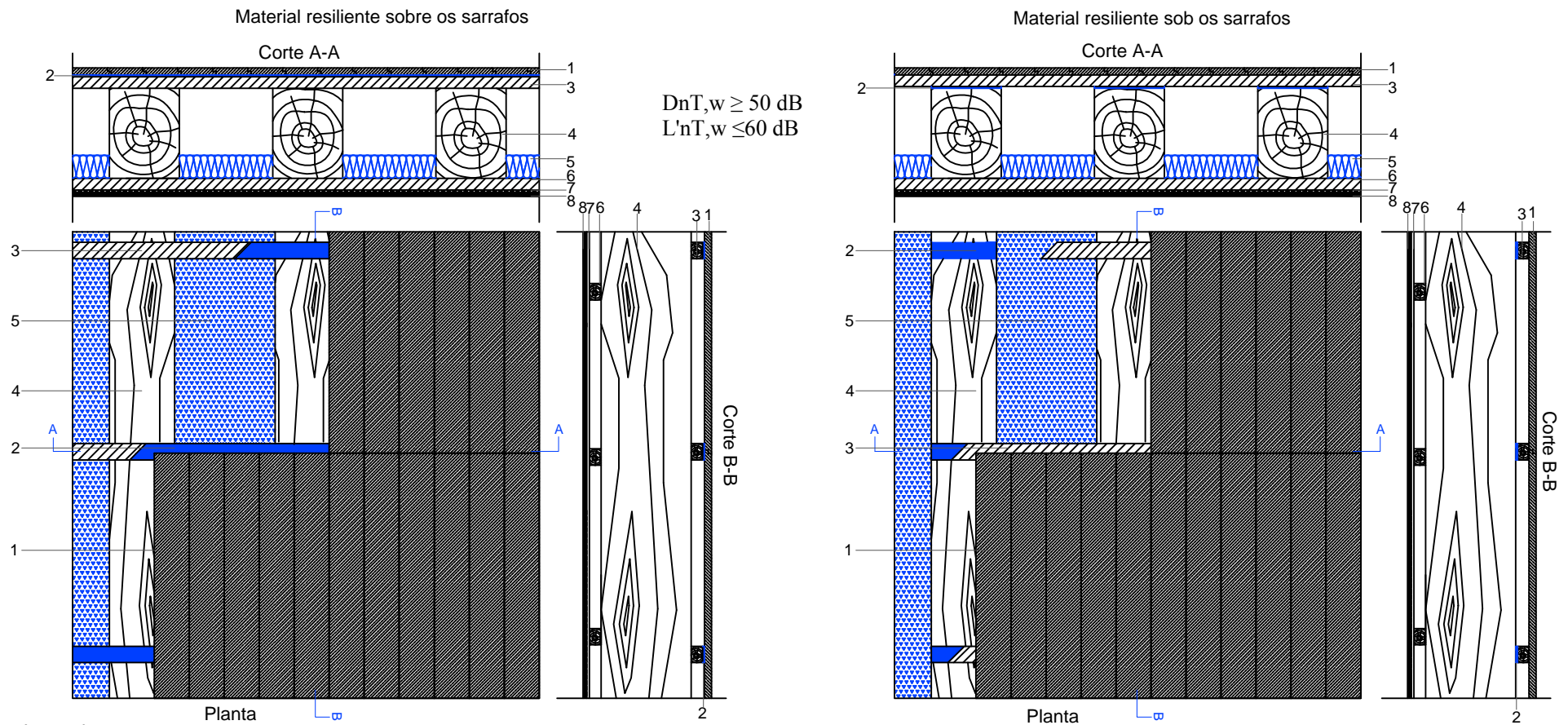


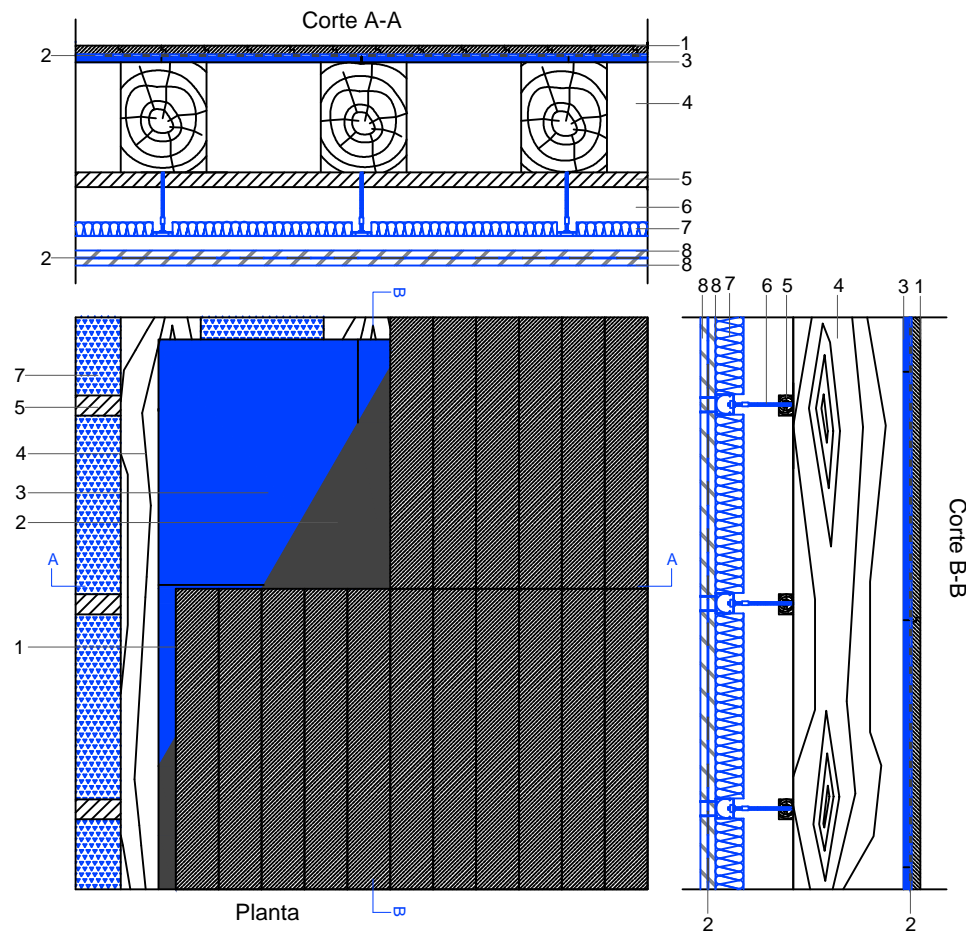
Figura A3 - Solução de intervenção nº2



Legenda:

- 1.Revestimento superficial em madeira
- 2.Complexo resiliente
- 3.Sarrafo
- 4.Viga estrutural em madeira
- 5.Painel de lã mineral
6. Barrote
- 7.Fasquio
- 8.Argamassa de enchimento, estucado e pintado

Figura A4 - Solução de intervenção nº3



$D_nT,w \geq 50 \text{ dB}$
 $L'nT,w \leq 60 \text{ dB}$

Legenda:

1. Revestimento superficial em madeira
2. Complexo resiliente
3. Aglomerado madeira cimento
4. Viga estrutural em madeira
5. Barrote
6. Suporte metálico do teto
7. Painel de lã mineral
8. Placa de gesso cartonado