U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE EDIFÍCIOS ANTIGOS

Tabique

KEVIN DA SILVA MOREIRA

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

JULHO DE 2014

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2013/2014

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 - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013*.

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.

À Cris,

à minha Família,

e aos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

Porque este caminho não se fez sozinho, agradeço a todos aqueles que me acompanharam, ajudaram e incentivaram:

Ao Professor Rui Calejo Rodrigues pela orientação, acompanhamento, aconselhamento e partilha de conhecimento.

Ao NI&DEA, Núcleo de Investigação & desenvolvimento em Engenharia Acústica, pelo esclarecimento de dúvidas, disponibilização dos equipamentos e apoio aos ensaios realizados.

Ao Engenheiro António Costa pelo esclarecimento de dúvidas relativas aos ensaios realizados.

À MRA Instrumentação pela prontidão na disponibilização dos programas para a aplicação dos modelos teóricos de cálculo.

À empresa Construções Barjocar pela construção da parede de tabique necessária aos ensaios laboratoriais.

À colega Sofia Gonçalves pelo apoio no desenvolvimento de diferentes partes do presente trabalho.

À D. Maria, à D. Aida e ao Senhor Gaspar pela disponibilização das suas casas e por toda a simpatia.

À Cristiana e à Joana pela ajuda na revisão final do documento.

À minha família pela amizade, apoio e paciência.

RESUMO

A reabilitação de edifícios apresenta-se como um "processo de conservação" cujas características e limites de aplicação não se encontram rigorosamente definidos. As dúvidas existentes relativamente à genuinidade do processo de reabilitação, constituindo parte da problemática inicial, permitiram o desenvolvimento de um tema interessante, atual e adequado ao contexto da construção nacional.

A determinação da aplicabilidade de um elemento construtivo tradicional nas operações de manutenção, conservação e reabilitação e do seu comportamento face às necessidades atuais de conforto, saúde e bem-estar, contempla a definição detalhada das suas características. Assim, a abordagem adotada atende à definição do comportamento acústico de edifícios tradicionais, aplicada concretamente aos elementos em tabique da Casa Burguesa do Porto.

O objetivo principal deste trabalho prende-se com o conhecimento do comportamento acústico de um elemento construtivo vertical de tabique. Atendendo à sua natureza e à metodologia adotada, foi necessária a aplicação de modelos teóricos para a previsão do seu comportamento e posterior comparação com a análise experimental conduzida. Neste sentido, foram realizados ensaios de caracterização em laboratório, procedendo-se à construção de uma parede de tabique. Foram ainda realizados ensaios *in-situ*, aplicados a uma amostragem coerente de elementos semelhantes localizados no centro da cidade Porto.

O índice de redução sonora *R* determinado através dos modelos teóricos foi comparado com os valores obtidos através dos ensaios realizados em laboratório para o mesmo indicador. Por sua vez, foi estabelecida uma relação de *R* com o índice de isolamento sonoro *D* obtido para os ensaios realizados *in-situ* através do cálculo teórico efetuado com base na norma EN 12354-1.

Os resultados atingidos revelam-se promissores e detentores de grande potencial. O desempenho acústico determinado para um painel de tabique configura-se ao nível do de uma solução construtiva corrente e atualmente aplicada.

PALAVRAS-CHAVE: Acústica de Edifícios, Redução Sonora-R, Tabique, Reabilitação, Casa Burguesa;

ABSTRACT

Building rehabilitation presents itself as a "process of preserving" the characteristics of the constructions techniques. However, the building rehabilitation process limits are not strictly defined and it genuineness may be contested. This premise serves as a starting point for this work and allows the development of an interesting research theme, applied to the portuguese construction context.

Traditional based constructed elements may be applied or preserved in buildings conservation and rehabilitation works. In this case, the knowledge of their behaviour towards the current needs in comfort, health and welfare is indispensable. Therefore, the detailed definition of the element characteristics is also important. The aim of this work is centred in the definition of the acoustic behaviour of traditional buildings, specifically to tabique partitions included in Porto city bourgeois houses.

The main goal is related with the determination of the acoustic behaviour of a Portuguese traditional wooden wall known as tabique wall. According to the experimental method applied, to do that implies an experimental plan. The phenomena was determined in a laboratory test facility located in the FEUP compound. The gathering of reliable data ordered the construction of an element with similar characteristics as those found in real situations. However, the experiment conducted in laboratory may allow conclusions to be drawn if the values obtained are compared to the ones acquired in *in-situ* measurements. The established control group for *in-situ* experiments was defined with independent test elements distributed in different traditional buildings – bourgeois house - in the historical Porto city centre.

The noise reduction índex *R* obtained, when theoretical behaviour models were applied, was compared with the results obtained for the same indicator determined in laboratory measurements. In turn, this values were compared with the sound insulation índex *D* acquired in accordance with the EN 12354-1 prediction method and the one gathered with the *in-situ* campaign measurements.

The promising achieved result holds in to it a great potential. The acoustic performance determined for a single partition construct with the tabique method presents itself at the same level as a modern and current partition.

KEYWORDS: Building Acoustics, R-Noise Reduction, Tabique, Rehabilitation, Porto bourgeois house;

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS ..... **I**
RESUMO ..... **III**
ABSTRACT ..... **V**
INTRODUÇÃO **1**
1.1. PREÂMBULO **1**
1.2. ÂMBITO E OBJETIVOS **2**
1.3. PROBLEMÁTICA **2**
1.4. METODOLOGIA DA INVESTIGAÇÃO **4**
1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO **5**
A ACÚSTICA: CONHECIMENTO E REGULAMENTAÇÃO **7**
2.1. INTRODUÇÃO **7**
2.2. SÍNTESE DE CONTEÚDOS **7**
2.2.1. Isolamento Sonoro a Sons de Condução Aérea 7
2.2.2. *Statistical Energy Analyses* 9
2.2.3. Modelo de comportamento 10
2.2.4. Procedimentos de medição 11
2.2.5. Isolamento sonoro em baixas frequências 13
2.2.6. Outras considerações 14
2.3. EXIGÊNCIAS REGULAMENTARES **14**
2.3.1. Perspetiva Evolutiva 14
2.3.2. Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) 16
A CASA BURGUESA E O TABIQUE **19**
3.1. INTRODUÇÃO **19**
3.2. O PORTO E A CASA BURGUESA **19**
3.3. TIPIFICAÇÃO DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA **21**
3.4. DESCRIÇÃO TECNOLÓGICA DO ELEMENTO A INVESTIGAR **23**
3.5. CONCLUSÕES **27**
A ANÁLISE TEÓRICA **29**
4.1. INTRODUÇÃO **29**
4.2. MODELOS TEÓRICOS PARA O CÁLCULO DA REDUÇÃO SONORA **29**
4.2.1. Método de Sharp experimental 29
4.2.2. Método de Ljunggren modificado 31
4.2.3. Método de Moore e Lyon 31

4.3. RESULTADOS TEÓRICOS 33
4.3.1. Dados utilizados 33
4.3.2. Condições gerais 33
4.3.3. Método de Sharp experimental 34
4.3.4. Método de Ljunggren modificado 35
4.3.5. Método de Moore e Lyon 36
4.4. CONCLUSÕES 37
A ANÁLISE EXPERIMENTAL 39
5.1. INTRODUÇÃO 39
5.2. ANÁLISE LABORATORIAL 39
5.2.1. Instalações laboratoriais 39
5.2.2. Equipamentos 40
5.2.3. Condições de montagem do elemento em tabique. 42
5.2.4. Condições de ensaio 44
5.2.5. Síntese e outras considerações 45
5.3. ANÁLISE *IN SITU* 46
5.3.1. Descrição tecnológica dos casos de estudo 46
5.3.1.1. Fração A 46
5.3.1.2. Fração B 48
5.3.2. Elementos a ensaiar 50
5.3.2.1. Fração A 50
5.3.2.2. Fração B 51
5.3.3. Condições de ensaio 52
5.3.4. Equipamentos 53
5.3.5. Síntese e outras considerações 53
OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS 55
6.1. INTRODUÇÃO 55
6.2. RESULTADOS LABORATORIAIS 55
6.2.1. Plano de ensaios 55
6.2.2. Tratamento de resultados relativos à determinação em laboratório do índice de redução sonora, R_w. 56
6.2.2.1. Correção do ruído de fundo 56
6.2.2.2. Determinação do tempo de reverberação 57
6.2.2.3. Determinação do índice único de avaliação, R_w. 57
6.2.3. Síntese de resultados 59
6.3. RESULTADOS *IN-SITU* 62
6.3.1. Plano de medições 62

6.3.2. Tratamento de resultados relativos ao isolamento sonoro a sons aéreos entre compartimentos, $D_{nT,w}$. 63
6.3.2.1. Correção do ruído de fundo 63
6.3.2.2. Determinação do tempo de reverberação 64
6.3.2.3. Determinação do índice único de avaliação, $D_{nT,w}$. 64
6.3.3. Síntese de resultados 66
6.4. MÉTODO DAS TRANSMISSÕES MARGINAIS 70
CONSIDERAÇÕES FINAIS 75
7.1. DISCUSSÃO DE RESULTADOS E SÍNTESE DE CONCLUSÕES 75
7.1.1. Ensaios laboratoriais 75
7.1.2. Modelos de cálculo teóricos 76
7.1.3. Medições *in-situ* 77
7.1.4. Método das transmissões marginais 78
7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 81
ANEXO A – BOLETINS LABORATORIAIS 85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática da transmissão sonora de sons aéreos (esquerda) e de sons de percussão (direita) [7]. 7

Figura 2 - Diferentes vias de transmissão sonora entre dois compartimentos; Situação in-situ (esquerda) [5]; Situação em laboratório (direita). 8

Figura 3 - Modelo teórico de comportamento de um elemento simples [7]. 10

Figura 4 - A cidade do Porto. 19

Figura 5 - A típica casa urbana do Porto. Representação esquemática [7]. 20

Figura 6 - Elemento de parede não estrutural. Tabique simples de duplo tabuado. 23

Figura 7 - Esquema concetual de uma parede de tabique. 24

Figura 8 - Esquematização das duas formas de execução da estrutura de madeira de um elemento em tabique [35]. 25

Figura 9 - Representação esquemática consistente com a aplicação do modelo de Sharp; a) aplicado a elementos isotrópicos; b) aplicado a elementos simples ortotrópicos [40]. 30

Figura 10 - Modos de propagação simétrico (superior) e assimétrico (inferior) [43]. 32

Figura 11 - Representação gráfica de R segundo o método de Sharp. 34

Figura 12 - Representação gráfica de R segundo o método de Ljunggren modificado. 35

Figura 13 - Representação gráfica de R segundo o método de Moore e Lyon. 36

Figura 14 - Representação gráfica de R segundo os diferentes métodos. 37

Figura 15 - Representação esquemática das câmaras reverberantes. Secção vertical e horizontal... 41

Figura 16 - Disposição do tabuado de preenchimento; vertical (esquerda); diagonal (direita). 42

Figura 17 - Diferentes fases de construção do elemento em tabique. 42

Figura 18 - Esquema representativo da montagem do elemento em tabique (cm); Corte (esquerda); Alçado (direita). 43

Figura 19 - Esquema representativo da montagem do elemento em tabique; Pormenor da ligação (cm). 43

Figura 20 - Fissuração da parede tabique. 45

Figura 21 - Pormenorização das ligações do elemento em estudo (cm). 47

Figura 22 - Pormenorização da ligação entre elementos (cm). 49

Figura 23 - Representação esquemática do local onde foram realizadas as medições. Fração A..... 50

Figura 24 - Representação esquemática do local onde foram realizadas as medições. Fração B..... 51

Figura 25 - Sinais de deterioração da fração em estudo. 52

Figura 26 - Representação gráfica do ajuste da curva real, R, à curva de referência. 59

Figura 27 - Representação gráfica do ruído de fundo registado nos ensaios laboratoriais. 60

Figura 28 - Representação gráfica do tempo de reverberação registado nos ensaios laboratoriais. .. 61

Figura 29 - Representação gráfica da redução sonora registada nos ensaios laboratoriais 62

Figura 30 - Representação gráfica do ajuste da curva real, D_{nT}, à curva de referência. 65

Figura 31 - Representação gráfica do ruído de fundo registado nas medições realizadas in-situ. 66

Figura 32 - Representação gráfica do tempo de reverberação registado nas medições realizadas in-situ. 67

Figura 33 - Representação gráfica do isolamento sonoro bruto registado nas medições realizadas in-situ. 68

Figura 34 - Representação gráfica do isolamento sonoro bruto padronizado dos elementos ensaiados in-situ. 69

Figura 35 - Ligação rígida entre elementos construtivos; Esquerda: Ligação cruzada; Direita: Ligação em T. [5] 71

Figura 36 - Nomenclatura e representação esquemática dos caminhos marginais. 73

Figura 37 - Representação gráfica do índice de redução sonora obtido através do ensaio laboratorial e do método de Sharp. 77

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens (+) e desvantagens (-) dos métodos de pressão sonora e de intensidade sonora na determinação laboratorial do isolamento sonoro de um elemento [9]. 13

Tabela 2 - Perspetiva histórica da norma EN ISO 717 [31]. 14

Tabela 3 - Indicadores e adaptadores espectrais definidos na EN ISO 717:1996 [31]. 15

Tabela 4 - Isolamento sonoro a sons de condução aérea em edifícios habitacionais e mistos, e unidades hoteleiras. 16

Tabela 5 - Decomposição da Casa Burguesa em subsistemas [35]. 21

Tabela 6 - Soluções tradicionais de revestimento [36]. 26

Tabela 7 - Parâmetros e valores de cálculo considerados. 33

Tabela 8 - Resultados obtidos através do método Sharp. 34

Tabela 9 - Resultados obtidos através do método de Ljunggren modificado. 35

Tabela 10 - Resultados obtidos através do método de Moore e Lyon. 36

Tabela 11 - Características geométricas das câmaras reverberantes R1 e E1. 40

Tabela 12 - Equipamentos utilizados nos ensaios laboratoriais. 40

Tabela 13 - Sumarização das condições de ensaio em laboratório. 44

Tabela 14 - Caracterização construtiva do edifício onde se insere a fração A. 46

Tabela 15 - Caracterização construtiva do edifício onde se insere a fração B. 48

Tabela 16 - Plano de ensaios aplicado e respetivas condições de ensaio. 55

Tabela 17 - Níveis médios de pressão sonora medidos na câmara reverberante emissora (L_1) e recetora (L_2). 56

Tabela 18 - Níveis de pressão sonora corrigidos, obtidos na câmara recetora. 57

Tabela 19 - Tempo de reverberação na câmara recetora. 57

Tabela 20 - Redução sonora do elemento em laboratório, por bandas de 1/3 oitava. 58

Tabela 21 - Procedimento para a determinação índice de redução sonora, R_w. 58

Tabela 22 - Registo do ruído de fundo dos ensaios laboratoriais. 59

Tabela 23 - Tempo de reverberação registado nos ensaios laboratoriais. 60

Tabela 24 - Redução sonora do elemento de tabique nas diferentes fases de construção. 61

Tabela 25 - Índices de redução sonora, R_w, determinados nos ensaios laboratoriais 62

Tabela 26 - Plano de medições aplicado na realização dos ensaios *in-situ*. 63

Tabela 27 - Níveis médios de pressão sonora medidos no compartimento emissor (L_1) e recetor (L_2) 63

Tabela 28 - Níveis de pressão sonora, obtidos no compartimento recetor, corrigidos. 64

Tabela 29 - Tempo de reverberação no compartimento recetor. 64

Tabela 30 – Isolamento sonoro bruto do elemento, por bandas de 1/3 oitava. 64

Tabela 31 – Isolamento sonoro padronizado do elemento, por bandas de 1/3 oitava. 64

Tabela 32 - Procedimento para a determinação do índice de isolamento sonoro padronizado, $D_{nT,w}$. 65

Tabela 33 - Registo do ruído de fundo das medições realizadas in-situ. 66

Tabela 34 - Tempo de reverberação registado nas medições realizadas in-situ..... 67

Tabela 35 – Isolamento sonoro bruto do elemento de tabique para as diferentes medições realizadas in-situ. 68

Tabela 36 – Isolamento sonoro bruto padronizado dos elementos ensaiados in-situ. 69

Tabela 37 - Índices de isolamento sonoro, $D_{nT,w}$, determinados nas medições realizadas in-situ. 70

Tabela 38 - Massa superficial dos elementos construtivos. 72

Tabela 39 - Índices de redução de transmissão de vibrações. 72

Tabela 40 - Índices de redução sonora de cada caminho de transmissão. 73

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

c_0 – velocidade de propagação do som no ar (m/s);

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

f – frequência (Hz);

f_o – frequência de ressonância (Hz);

f_c – frequência crítica (Hz);

h – espessura (m);

l_0 – comprimento da linha de junção de referência (m);

l_f – comprimento da linha de junção entre o elemento de separação e os elementos de flanco;

l_{ij} – comprimento da linha de junção entre o elemento i e o elemento j (m);

m – massa superficial do elemento separador (kg/m2);

p – pressão sonora (Pa);

p_t – pressão sonora total (Pa);

p_0 – pressão atmosférica = 1,013 x 105 Pa;

p_{ref} – pressão sonora de referência = 20 x 10-6 Pa;

t – tempo (s);

v – velocidade (m/s).

A – área de absorção sonora (m^2)

A_{eq} – área de absorção sonora equivalente (m2);

E – módulo de elasticidade de um dado material (N/m2);

E_{eq} – módulo de elasticidade equivalente de um dado elemento constituído por múltiplas camadas (N/m2);

E_{ref} – energia sonora de referência = 10-12 J;

I – intensidade sonora (Watt/m2);

I_{ref} – intensidade sonora de referência = 10-12 Watt/m2;

Kij – índice de redução de transmissão de vibrações (dB);

L_I – nível de intensidade sonora (dB)

L_p – nível de pressão sonora (dB)

L_{p1} – nível médio de pressão sonora no compartimento emissor (dB)

L_{p2} – nível médio de pressão sonora no compartimento recetor (dB)

R – índice de redução sonora (dB);

R’ – índice de redução sonora aparente (dB);

Rij – índice de redução sonora por transmissão marginal pelo encaminhamento ij (dB);

Rij, w – valor único do índice de redução sonora por transmissão marginal pelo encaminhamento ij (dB);

Rw – valor único do índice de redução sonora (dB);

R'w – valor único do índice de redução sonora aparente (dB);

S – área da superfície (m2);

T – temperatura relativa do ar (ºC);

T – tempo de reverberação de um compartimento (s);

T_0 – tempo de reverberação de referência = 0,5 s;

V – volume interior da sala (m3);

W – potência sonora (Watt);

W_{ref} – potência sonora de referência = 10-12Watt;

η_{int} – fator de perdas internas do elemento;

η_{tot} – fator total de perdas do elemento;

θ – ângulo de incidência da onda sonora (rad);

ν – coeficiente de Poisson;

π – constante = 3,141592654…;

ρ – massa volúmica (kg/m3);

ρ_0 – massa específica do ar (kg/m3);

ρ_{eq} – massa volúmica equivalente de um dado elemento constituído por múltiplas camadas (kg/m3);

τ – coeficiente de transmissão sonora;

τ' – coeficiente de transmissão sonora aparente;

ω – frequência angular (rad/s);

Δ – variação;

ΔR – incremento do índice de redução sonora (dB);

ΔRw – valor único do incremento do índice de redução sonora (dB).

1
INTRODUÇÃO

1.1. PREÂMBULO

A construção tradicional materializa o conhecimento empírico consolidado pela aprendizagem e pelo saber de gerações, cataloga e contém informações provenientes de épocas e lugares de que não existe memória escrita. O reconhecimento de que a memória histórica de um local é preservada nas suas construções e edificações realça a importância da contínua preservação do património existente, enquanto herança cultural [1].

Os edifícios antigos com valor económico, urbano ou cultural constituem uma evidência da dinâmica sociocultural existente no momento da sua conceção. Influenciados pela envolvente da época de construção e pelo contexto geográfico, os elementos edificados permitem a identificação de técnicas utilizadas e problemas derivados da aplicação de materiais e da interligação de elementos.

A intervenção da engenharia civil nos núcleos urbanos ocorreu de forma distinta ao longo do tempo. Durante anos, apostou-se na construção de edifícios novos e, por isso, a manutenção dos núcleos habitacionais tradicionais tornou-se secundária, levando à sua progressiva deterioração e abandono. Assim, surgiu a necessidade de reabilitar.

A reabilitação é um exercício complexo e multidisciplinar que deve satisfazer as condicionantes atuais de conforto, mantendo a identidade construtiva do edifício. Utilizando técnicas não intrusivas e reversíveis salvaguarda-se o património edificado existente. No entanto, tal só é possível se houver respeito total pelo edifício e pelo passado, e se existir conhecimento das técnicas, materiais e tecnologias utilizadas. Atualmente, o limitado domínio do conhecimento construtivo tradicional é um importante fator limitativo dos processos de reabilitação e manutenção [2].

A reabilitação de edifícios deve atender à conservação dos elementos construtivos que o constituem. Por sua vez, a conservação dos diferentes elementos pressupõe a sua adequação às condições de conforto e bem-estar dos seus ocupantes. Assim, a compatibilização dos edifícios tradicionais com as necessidades de habitação e com os regulamentos vigentes contempla a melhoria do ambiente acústico no seu interior. Atendendo a que a acústica de edifícios é o domínio de desenvolvimento do presente trabalho é essencial e poucas vezes considerada a caracterização dos elementos construtivos que constituem os edifícios antigos, incluindo os da envolvente interior, como as paredes de tabique.

Atualmente, a reabilitação de edifícios constitui uma parcela pequena do sector da construção. O aumento do nível percentual e estatístico de edifícios reabilitados não traduz o aumento real do número de alojamentos intervencionados, não se verificando ainda a tendência crescente desejável.

1.2. ÂMBITO E OBJETIVOS

Ao longo do território português existem edifícios compostos por diferentes materiais e tecnologias construtivas. Influenciados por diversos fatores, cada edifício corresponde a um conjunto particular de relações entre os seus subsistemas que os torna únicos. Neste sentido, abranger todo o edificado nacional seria um processo moroso e complexo. Pretende-se, por isso, identificar, compreender e valorizar um único sistema construtivo em ambiente urbano - o sistema construtivo tradicional da cidade do Porto, também denominado de casa burguesa.

Entende-se por edifícios tradicionais todos os que foram construídos antes da generalização das estruturas em betão armado [2]. Estes podem ser diferenciados em edifícios monumentais ou classificados e edifícios de construção corrente. Pretende-se incidir genericamente sobre os edifícios correntes.

Embora a sua organização não seja evidente, um edifício contempla um conjunto de células interligadas não sobrepostas e complementares. Estes elementos e as suas combinações particulares garantem o funcionamento do mesmo enquanto corpo organizado. O estudo e caracterização de cada uma das partes integrantes dos diferentes subsistemas revela-se tão importante quanto a caracterização do sistema global. Assim, o estudo a desenvolver pretende apresentar e caracterizar os elementos verticais interiores.

A reabilitação de edifícios compreende a melhoria do seu desempenho funcional, ao nível do conforto e da segurança. Neste domínio, as intervenções de reabilitação podem constituir uma oportunidade de melhoria do comportamento de um edifício em relação ao ruído, uma vez que a melhoria do comportamento acústico num ambiente urbano e ruidoso é particularmente importante. Atendendo a que as condições acústicas de um determinado compartimento devem proporcionar um ambiente sonoro adequado à prática das atividades para o qual foi projetado, a determinação da redução sonora e o isolamento sonoro bruto de uma parede de tabique é primordial e igualmente interessante.

Com esta investigação, procura-se conhecer o comportamento acústico de um elemento de construção tradicional – a parede de tabique. Considerando a documentação técnica existente, pretende-se avaliar a adequabilidade dos modelos de cálculo teórico existentes aos elementos edificados. Os mesmos modelos serão utilizados para caracterizar o elemento em estudo.

A caracterização do elemento construtivo é também preconizada recorrendo à definição de uma componente experimental. De forma a descrever pormenorizadamente a solução construtiva é necessário realizar alguns ensaios e medições. A caracterização experimental será concretizada em laboratório e acompanhada pela definição de casos de estudo e campanhas de medições *in-situ*.

A investigação desenvolvida pretende perceber a adequação da solução construtiva em estudo nas operações de reabilitação atuais e, procedendo à sua caracterização, potenciar a sua reintegração nas técnicas de construção atual.

1.3. PROBLEMÁTICA

A acústica beneficia de uma importância crescente. A consciência de que a melhoria contínua das condições de habitabilidade do parque edificado é fundamental para a saúde e bem-estar das populações leva ao aumento das exigências por parte dos ocupantes dos edifícios e o não cumprimento dos requisitos considerados adequados promove o abandono dos edifícios e a sua degradação. Associada à não existência de planos de manutenção, a degradação dos núcleos urbanos tradicionais tende a ser agravada.

A cidade do Porto é detentora de um vasto património arquitetónico e cultural com a contínua necessidade de recuperação, conservação e proteção. No entanto, as medidas de apoio atuais são insuficientes, facto que associado ao desconhecimento de técnicas ou inexistência mão-de-obra qualificada, conduz à demolição e reconstrução de edifícios face à aplicação de intervenções de manutenção ou reabilitação. Assim, a genuinidade de uma operação de reabilitação é duvidosa. A logica de conservação, tida como fundamental, é muitas vezes desprezada, podendo conduzir à inviabilidade económica da própria intervenção. É necessário que exista respeito pelo edificado, pelos materiais e técnicas construtivas, e pela valorização dos seus os valores de ordem cultural e histórico.

A compatibilização entre o desejável e o limite mínimo exigível resulta do compromisso ideal entre a preservação do património e a adequação do mesmo às necessidades atuais de conforto. Este compromisso é difícil e requer a resolução de um exercício complexo. Os edifícios não permitem, na maioria dos casos, a aplicação dos regulamentos vigentes, e estes, por sua vez, não atendem às especificidades e condicionalismos dos mesmos. Por outro lado, a legislação atual é orientada para a construção nova e não revela preocupação com operações de reabilitação [2].

Neste âmbito, para colmatar as falhas existentes e reforçar a importância da reabilitação urbana como fator de desenvolvimento, foi publicado recentemente, em Diário da República, o Decreto-Lei nº 53/2014 de 8 de abril. Este pretende a promoção da reabilitação urbana enquanto objetivo estratégico e realidade economicamente viável e a consequente reocupação dos centros urbanos e históricos. Contudo, a sua aplicação é subjetiva e apresenta algumas limitações. A sua análise detalhada não é objeto do presente trabalho, servindo apenas como referência para consultas futuras.

A acústica de edifícios é uma área complexa. Os modelos de cálculo existentes permitem estimar o isolamento entre compartimentos adjacentes ou a redução sonora de um determinado elemento construtivo, recorrendo a dados experimentais determinados em laboratório ou *in-situ* ou a métodos teóricos de modelos de propagação do som. No entanto, não se dispõe de modelos de cálculo ajustados a diferentes realidades construtivas. Os existentes são adequados a condições de aplicação específicas, não sendo conhecidos modelos de comportamento relativos ao desempenho de uma parede de tabique. Torna-se, por isso, necessário desenvolver e adequar as metodologias existentes, reconhecendo as suas limitações, ao elemento construtivo em estudo. A inexistência de uma base de dados que contenha informações relativas à caracterização do mesmo dificulta o processo.

Assim, a reabilitação de edifícios mantendo os elementos construtivos existentes, como os divisórios em tabique, comporta dificuldades acrescidas. O desconhecimento do seu comportamento acústico determina a compilação de informação relativa ao método construtivo e a realização de ensaios caracterizadores. Por isso, é necessário proceder-se à construção em laboratório de uma parede em tabique com o objetivo de clarificar a problemática e caracterizar o seu índice de redução sonora *Rw*.

As medições decorrem, em muitos casos, em contextos cujas condições de execução e controlo são superiores às reais e cujos contornos são suavizados. Nesta situação, é necessário atender a que o ambiente de trabalho é dinâmico e variável, podendo introduzir variações face aos resultados previstos. Assim, a caracterização acústica de uma parede em tabique implica também a realização de ensaios *in-situ* que permitam avaliar a influência das condicionantes de montagem, incluindo as transmissões marginais. É também necessário atender a que a investigação decorre num contexto e domínio específico, não sendo sempre possível generalizar as conclusões obtidas.

1.4. METODOLOGIA DA INVESTIGAÇÃO

Em qualquer área de investigação, não obstante à metodologia escolhida, os problemas a resolver são semelhantes. A aplicação de métodos de investigação, se devidamente preparados, permite que o processo seja melhorado. Para isso, é também necessário estabelecer hábitos de pesquisa. Uma investigação, se rigorosa e tecnicamente exigente, permite a resolução de problemas e o aumento do conhecimento [3].

Classificar o tipo de abordagem de uma investigação não significa que a pesquisa seja conseguida exclusivamente através de métodos associados à mesma. Cada abordagem tem vantagens e desvantagens e é adequada a um determinado contexto. Em qualquer metodologia, os métodos de recolha de informação dependem da natureza da mesma informação [4].

A escolha do tema de investigação atendeu à área de interesse do investigador, garantindo a compreensão clara da temática a desenvolver e o seu empenho. A definição de um tópico foi fácil e compreendeu a utilidade e propósito do mesmo e considerou potenciais aplicações práticas.

No presente caso, após a definição do tema, a metodologia adotada requereu a pormenorização da problemática que envolve a investigação e respetivas implicações ou limitações. Por sua vez, os problemas a resolver ou hipóteses a testar foram sendo transformados em objetivos, descritos anteriormente. Para isso, foi necessário planear e desenhar uma metodologia adequada e prever e negociar a ajuda de terceiros e o acesso a materiais ou equipamentos.

O domínio de uma investigação experimental, como a presente, requer a consideração de variáveis dependentes e independentes e a definição das suas relações. Neste sentido, foram definidos os métodos de ensaio e medições a realizar e as dimensões de amostragem a contemplar no estudo. Foram também considerados diferentes métodos de cálculo teóricos na definição inicial dos indicadores caracterizadores do comportamento acústico do elemento de estudo e contemplados ensaios de caracterização em laboratório e *in-situ*. A interpretação de princípios subjacentes aos conceitos referidos são importantes para a gestão da investigação.

Proceder à medição de parâmetros mesuráveis é simples e permite o desenho de conclusões através da determinação de causas e efeitos. Os ensaios possibilitam o registo de observações, medidas, problemas e de possíveis alterações ou modificações aos planos e procedimentos [4].

Face ao tamanho da investigação, é necessário analisar e compilar grandes volumes de informação e desenvolver ou propor alterações às mesmas. É fundamental a pesquisa de métodos, técnicas, ideias ou informação do conhecimento existente para assegurar a resolução da problemática. O conhecimento científico atual depende de referências a literatura ou trabalhos existentes. É, por isso, necessário perceber a objetividade e adequabilidade da informação recolhida e medir e reunir informação factual e fundamentada recorrendo a métodos ou técnicas existentes.

O resultado final da investigação consistirá na validação ou refutação do problema base. No entanto, a determinação do sucesso de um resultado existe, em muitos casos, apenas no futuro, dificultando a verificação do mesmo. Nesta situação, o que é possível medir ou verificar não é o que se pretende validar.

Toda a informação é posteriormente compilada no presente relatório, trabalhado sob a forma de texto técnico-científico. O mesmo é produzido de acordo com a normalização aplicável.

1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação apresenta uma organização concordante com os objetivos a atingir. No primeiro capítulo consta uma curta introdução do tema a desenvolver e é contemplada a definição da problemática. É apresentado também o âmbito, os objetivos a atingir pela temática investigada e a própria estrutura e metodologia subjacente à investigação.

O *Capítulo 2 – A Acústica: Conhecimento e Regulamentação* pretende identificar os principais conceitos e o estado atual de conhecimento numa perspetiva evolutiva. Pretende ainda descrever os conceitos e bases com particular interesse no desenvolvimento do trabalho e apresentar as imposições regulamentares.

O *Capítulo 3 – A Casa Burguesa e o Tabique* descreve o edifício da baixa do Porto e tipifica a solução construtiva em análise. Articula alguns conhecimentos teóricos e procura perceber o funcionamento e comportamento do sistema construtivo, mostrando técnicas e materiais constituintes. Contextualiza a dinâmica social, económica e histórica da cidade do Porto.

O *Capítulo 4 – A Analise Teórica* esclarece o comportamento dos elementos intervenientes na transmissão sonora e analisa os modelos de cálculo teóricos existentes. Procura avaliar a aplicabilidade e adequabilidade dos mesmos modelos ao elemento a investigar.

O *Capítulo 5 – A Analise Experimental* apresenta todas as informações relativas à caracterização experimental, em laboratório e *in-situ*, do objeto de estudo. Contempla a descrição dos ensaios a realizar e dos parâmetros envolvidos. Discrimina o local de realização dos ensaios e os diferentes casos de estudo.

O *Capítulo 6 – Os Resultados Experimentais* apresenta os métodos de cálculo necessários ao tratamento dos resultados decorrentes dos ensaios em laboratório e *in-situ* da parede de tabique e compila todos os indicadores obtidos.

O *Capítulo 7 – Considerações Finais* contempla uma síntese das conclusões obtidas, uma análise crítica ao tema desenvolvido, uma discussão dos resultados alcançados e uma perspetiva das aplicações práticas e possibilidades de desenvolvimento.

2

A ACÚSTICA: CONHECIMENTO E REGULAMENTAÇÃO

2.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo pretende fazer uma revisão do conhecimento com base na bibliografia relativa a métodos de previsão e medição do isolamento sonoro a sons aéreos, incluindo problemáticas e desenvolvimentos recentes. Pretende-se o estudo e compreensão da transmissão sonora através de um elemento simples, limitando-se ao estudo do desempenho de um elemento construtivo face aos ruídos aéreos.

Não se pretende descrever os conceitos teóricos de base que sustentam a Acústica de Edifícios pois parte-se do pressuposto que o leitor se encontra familiarizado com os mesmos.

2.2. SÍNTESE DE CONTEÚDOS

2.2.1. ISOLAMENTO SONORO A SONS DE CONDUÇÃO AÉREA

Em acústica de edifícios o isolamento sonoro traduz a redução sonora num compartimento face ao som produzido numa zona adjacente. De acordo com a EN 12354, o isolamento sonoro pode ser a ruídos aéreos [5] e a ruídos de percussão [6]. A diferença reside no tipo e forma de solicitação. No primeiro caso a propagação do ruído ocorre devido a vibração do meio (ar). No segundo existe uma solicitação direta e mecânica da fonte sobre o elemento.

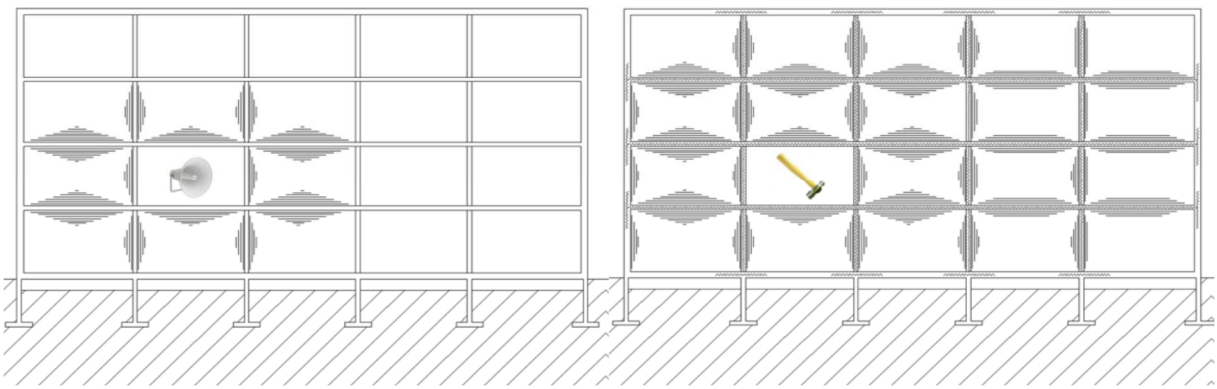


Figura 1 - Representação esquemática da transmissão sonora de sons aéreos (esquerda) e de sons de percussão (direita) [7].

Nas situações referidas a transmissão de energia sonora não acontece apenas por via direta através do elemento separador de dois compartimentos. Ocorre também por vias que o contornam, constituindo um caminho marginal de transmissão de ruído. A caracterização realizada em laboratório não prevê a existência dos caminhos marginais. No entanto, a existência de transmissões marginais determina que o isolamento de um elemento separador é inferior ao estabelecido em laboratório. A transmissão direta ocorre devido às deformações do elemento de separação, sob a ação das ondas sonoras.

Gerretson [8], em 1979, definiu um dos primeiros modelos que permitem a previsão das transmissões marginais. Consiste numa simplificação do método associado ao Statistical Energy Analyses (SEA) formulada para dois compartimentos adjacentes e não contempla a transmissão sonora devido a ruídos de impacto. O método define coeficientes de transmissão, associados as vias diretas e marginais, e precisa de índices de redução sonora e das características geométricas dos elementos marginais. Serviu de base à formulação da EN 12354 que será usada neste trabalho.

A Figura 2 ilustra os diferentes caminhos de transmissão definidos pela EN 12354-1. As vias marginais consideradas representam apenas aquelas que envolvam uma ligação entre o elemento de separação e os elementos adjacentes. Na figura, *Dd* constitui o caminho direto de transmissão sonora e *Df*, *Ff* e *Fd* são os caminhos marginais. Para dois compartimentos adjacentes, existem 12 transmissões marginais e 1 transmissão direta, constituindo um total de 13 caminhos de transmissão. A transmissão sonora entre compartimentos é preconizada pela relação entre o valor do índice de redução sonora do elemento em estudo e dos valores de índices de redução sonora das diferentes transmissões marginais.

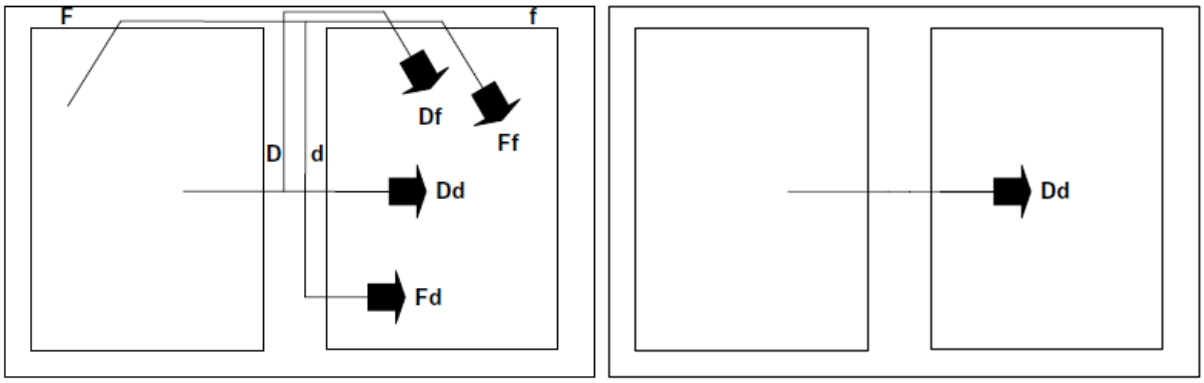


Figura 2 - Diferentes vias de transmissão sonora entre dois compartimentos; Situação *in-situ* (esquerda) [5]; Situação em laboratório (direita).

Em laboratório, o elemento a investigar separa dois compartimentos teoricamente isolados, onde a transmissão sonora através de caminhos marginais é desprezável se comparada com a transmissão sonora através do elemento. Em experiências conduzidas *in-situ* as transmissões marginais são por vezes mais importantes do que as transmissões por via direta. Por estas razões, a existência de caminhos marginais de transmissão em ensaios conduzidos *in-situ* leva a diferenças de resultados quando estes são obtidos por ensaios realizados em laboratório [9].

É ainda importante referir que um elemento construído em laboratório, em condições definidas e controladas, é conseguido com um rigor pouco comum na construção. De acordo com a investigação conduzida por Trevathan e Pearse [10], mesmo para elementos idênticos, construídos em ambientes semelhantes e utilizando as mesmas técnicas, a performance acústica obtida não é a mesma.

Minimizadas as diferenças construtivas entre elementos, os autores concluíram que a mão-de-obra é determinante na irradicação das diferenças observadas.

Laurent Galbrun refere que a metodologia constante na EN 12354-1 tem algumas limitações. A sua aplicação é limitada a transmissões entre compartimentos adjacentes e não inclui transmissões marginais diferentes das resultantes da ligação direta entre o elemento separador e os elementos adjacentes - transmissões marginais de primeira ordem. Perante transmissões marginais mais longas a simples adição dos percursos não é válida, sendo necessário adaptar o método por arranjo das equações existentes. No entanto, a consideração da norma é aceitável atendendo a que considera apenas ondas de flexão e que apenas ondas de outra natureza influenciam transmissões com distâncias superiores à dos compartimentos adjacentes. A investigação conduzida determina que algumas das equações adaptadas compreendem erros devido à consideração de pressupostos errados. O autor refere ainda que o método foi desenvolvido principalmente para elementos pesados e homogéneos e que pode ser aplicado a outros elementos se consideradas correções [11].

Pedersen [12] e Metzen [13] conduziram, individualmente, estudos comparativos, que incluíam elementos construtivos leves, entre a redução sonora obtida através da EN 12354-1 e da ISO 717-1 [14] e os valores medidos para o mesmo indicador. O primeiro autor identificou a ocorrência de desvios face ao estipulado na EN 12354. Dependendo da situação, a norma sobrevaloriza ou desvaloriza as transmissões marginais. O segundo autor refere que o método estabelecido pela norma prevê índices de redução sonora, aparente e ponderado, inferiores aos valores das medições.

A EN 12354-1, desenvolvida para considerar dados obtidos através de medições laboratoriais normalizadas, pode também introduzir dados provenientes de cálculos teóricos e medições *in-situ*. A norma contempla ainda um método simplificado que exclui correções relativas aos índices de redução de transmissão de vibrações.

2.2.2. *STATISTICAL ENERGY ANALYSES*

O método descrito na EN 12354 é uma aproximação de primeira ordem ao modelo do *Statistical Energy Analyses* (SEA) [11]. O SEA é utilizado para prever e modelar transmissão de som e de vibrações através de elementos de construção. Divide um sistema complexo em subsistemas com propriedades vibratórias, analisa a energia transferida entre eles e pode ser usado para ultrapassar limitações da EN 12354-1. É uma ferramenta que facilita a determinação de todas as transmissões marginais e considera as propriedades dos diferentes caminhos marginais de forma a priorizar a importância dos mesmos [15].

De acordo com Craik [15], a aplicação do método contempla o cálculo das transmissões sonoras de cada via individual ou no conjunto total da estrutura. A consideração de um sistema total, maior do que dois compartimentos, e de mecanismos adicionais é permitida e pode ser adicionada ao modelo, adaptando-se a diferentes conceções. A incorporação de transmissões diretas num modelo geral que inclua transmissões marginais é permitida. Não contempla todas as propriedades das paredes e considera que todos os subsistemas de um elemento são constituídos por diferentes componentes o que não corresponde à verdade para elementos pequenos a baixas frequências.

A investigação conduzida por Elmallawny [16] revela que o SEA é menos preciso a baixas frequências. O autor analisa a aplicabilidade do método na determinação do isolamento de elementos separadores simples e compara-o com os restantes métodos. Nightingale [17] conclui que quer o SEA quer o método da EN são fiáveis para frequências superiores à frequência crítica.

As conclusões reiteradas por Galburn [11] indicam que existem algumas diferenças entre os resultados obtidos pelos dois métodos. As diferenças, em muitos casos consideráveis, derivam da consideração de um dos métodos de caminhos marginais mais longos. No entanto, o autor refere que o estudo deve ser aprofundado uma vez que a consideração de sistemas maiores e elementos construtivos de separação mais leves podem minimizar as diferenças verificadas.

A EN12354 revela-se mais fácil de aplicar do que o método inerente ao SEA, cuja análise requer a definição detalhada de alguns indicadores. No entanto, a aparente simplicidade do primeiro método, deriva da adoção de pressupostos relativos aos elementos e respetivas ligações. Não sendo necessário, no âmbito deste trabalho, o desenvolvimento aprofundado do método associado ao SEA, recomenda-se, para leitura complementar, um manual, desenvolvido por Craik, que auxilia a compreensão do método e da sua aplicabilidade à transmissão sonora em edifícios [18].

2.2.3. MODELO DE COMPORTAMENTO

Cremer apresentou, em 1942, um dos primeiros modelos aplicáveis a elementos finos. O mesmo incluía o efeito das ondas de flexão e contemplava o ângulo de incidência do som. A principal limitação do modelo consistia em este não considerar elementos finitos, não sendo válido em paredes normais [9].

A transmissão sonora através de um elemento simples é influenciada pela inércia, massa superficial, características geométricas e elásticas (rigidez e amortecimento interno) do elemento e pelo ângulo de incidência do som [19]. Em elementos simples e homogéneos sujeitos a um campo sonoro difuso, o comportamento acústico varia em função da gama de frequências do som incidente. De acordo com Carvalho [20], é possível avaliar o mesmo comportamento fazendo a distinção, em função da frequência, e de acordo com a Figura 3, entre cinco zonas.

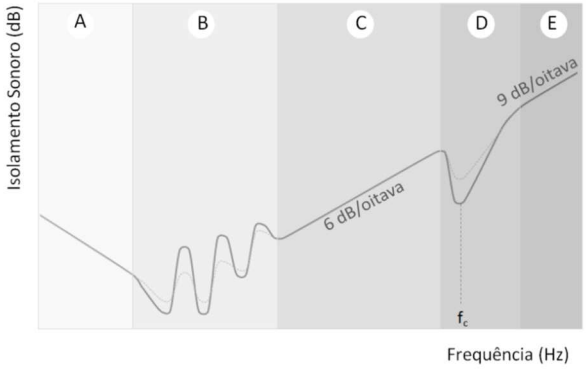


Figura 3 - Modelo teórico de comportamento de um elemento simples [7].

A primeira zona (A), caracterizada por frequências inferiores às do limiar da audição, é definida pela relação, direta e inversa, entre a rigidez do elemento e a redução sonora. Para a gama de frequências representada, o aumento da frequência traduz a diminuição da redução sonora do elemento. Geralmente, não é realizada uma análise detalhada da transmissão sonora nesta gama de frequências.

A zona seguinte (B) é influenciada pela elasticidade do elemento construtivo. Caracterizada por baixas frequências, denominadas de frequências de ressonância, é influenciada pelos modos próprios de vibração transversal e pelo tipo de apoio do elemento.

A zona C, delimitada pela frequência de ressonância e pela frequência crítica, é caracterizada pelo crescimento da redução sonora a uma taxa de 6dB/oitava. A massa do elemento influencia a transmissão sonora através do sistema vibrante e potencia o acréscimo de 6dB sempre que se verifique a duplicação da massa.

A frequência crítica *fc* corresponde à frequência de coincidência de um elemento. Nesta situação, zona D, o comprimento de onda da onda sonora, projetada no plano do elemento, e da onda de flexão coincidem, não existindo atenuação do som incidente. A redução sonora do elemento colapsa. A frequência crítica corresponde sempre a uma frequência de coincidência – coincidência perfeita – e é inversamente proporcional à massa superficial do elemento.

Para frequências superiores à crítica, delimitadas na zona E, a redução sonora aumenta 9dB/oitava. A antecipação desta taxa de crescimento para frequências mais baixas, por indução antecipada da frequência crítica, não compromete a redução sonora nas frequências audíveis e promove um acréscimo de isolamento sonoro para as mesmas frequências.

O ângulo de incidência da onda sonora, inferior a 90º, condiciona o coeficiente de transmissão do elemento. Dado que as incidências rasantes não são frequentes, é prática comum considerar no máximo um ângulo de incidência igual a 80º. Teoricamente, não existem ondas com incidência perpendicular em laboratório devido à dimensão das câmaras e à posição do elemento na abertura de montagem [19].

2.2.4. PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO

A redução sonora *R* (dB) é o indicador caracterizador do isolamento sonoro a ruídos aéreos [20]. Segundo Beranek *et al* [21] o coeficiente de transmissão τ é definido, em função do angulo de incidência da onda sonora θ e da sua frequência angular ω, como a razão entre a potencia sonora transmitida (W/m) e a potencia sonora incidente (W/m).

$$\tau(\theta,\omega) = \frac{W_{trans}}{W_{inc}} = \frac{W_2}{W_1} \tag{2.1}$$

Sabendo a pressão sonora (Pa) do compartimento é possível determinar a potência sonora incidente:

$$W_1 = \left(\frac{p_1^2}{4\times\rho_0\times C_0}\right) S \tag{2.2}$$

onde *S* (m^2) é área do elemento a investigar, ρ_0 (kg/m^3) é a densidade do ar, c_0 é a velocidade do som no ar e p_1 (Pa) é a pressão sonora no compartimento emissor. De forma análoga a potencia sonora transmitida é determinada por:

$$W_2 = \left(\frac{p_2^2}{4\times\rho_0\times C_0}\right) A \tag{2.3}$$

$$A \cong 0{,}16\,\frac{V_2}{T_2} \tag{2.4}$$

em que p_1 (Pa) e A (m^2) são, respetivamente, a pressão sonora e a área de absorção sonora do compartimento recetor. A área de absorção pode ser determinada recorrendo à utilização dos coeficientes de absorção das superfícies dos diferentes elementos construtivos da sala recetora ou, de forma aproximada, aplicando a fórmula de Sabine (2.4), onde V_2 é o volume do compartimento recetor e T_2 o seu tempo de reverberação. No seguimento do descrito, o índice de redução sonora, R, do elemento de construção:

$$R = 10log\frac{1}{\tau} = 10log\frac{W_1}{W_2} \quad (2.5)$$

Partindo da definição de nível de pressão sonora,

$$L_p = 10\log\left(\frac{p}{p_0}\right)^2 = 10\log\left(\frac{p}{2x10^{-5}}\right)^2 = 20\log\left(\frac{p}{2x10^{-5}}\right) \quad (2.6)$$

e aplicando as expressões determinadas anteriormente, é possível obter a formulação geral do índice de redução sonora:

$$R = L_{p1} - L_{p2} + 10log\frac{S}{A_2} \quad \text{(dB)} \quad (2.7)$$

onde L_{p1} e L_{p2} correspondem, respetivamente, aos níveis de pressão sonora dos compartimentos emissor e recetor.

A partir do valor da redução, para cada banda de frequência e por ajuste com a curva de referência constante na NP EN ISO 717-1 [14], é possível determinar um índice de avaliação denominado de redução sonora a sons de condução aérea padronizado, R_w. Este indicador permite a comparação de diferentes soluções construtivas ensaiadas em laboratório. Assim, a equação determinada pressupõe que toda a energia sonora é transmitida através do elemento separador, quando, na prática, existem diversos caminhos de transmissão e a energia sonora captada no recetor provém também de outras superfícies radiativas. O fenómeno encontra-se descrito no subcapítulo 2.2.1. O indicador pode também ser aplicado a medições *in-situ*, sendo representado por R'_w e denominado por redução sonora aparente.

Apesar de se tratar de um método simples, a sua aplicação requer o cumprimento de alguns pressupostos. Experiências teóricas e laboratoriais conduzidas por Warnock [22] [23], Mulholland e Lyon [24], Kihlman e Nilsson [25], entre outros, concluem que os valores a medir ou resultados a obter podem ser influenciados pela medição em laboratório e pela forma como os ensaios são conduzidos. Hongisto [9] reúne informação relativa aos testes conduzidos e aos resultados atingidos.

Craik [26], investigou a influência do laboratório nos resultados. Observou que diferentes laboratórios conduzem a índices de redução sonora distintos e conclui que as características construtivas dos laboratórios têm influência nas transmissões marginais. O autor sugere que o fator de perdas das câmaras laboratoriais deva ser medido para que possa existir a comparação de resultados entre laboratórios.

O trabalho desenvolvido por Oleson *et al* [27] [28] permitiu determinar a influência da localização da fonte no desenvolvimento do método de ensaio. O autor investigou uma posição que representaria a média das posições da fonte no compartimento emissor, de forma a simplificar o processo de medição. Concluiu que, para a maioria das situações, dois ou três locais de posicionamento seriam suficientes para manter o rigor do processo de medição. O método foi posteriormente contemplado na legislação.

Hongisto [9] descreve o método de medição referido anteriormente, associado à pressão sonora, e compara-o com métodos que têm por base a intensidade sonora. A descrição do método derivado da intensidade sonora não é do interesse da investigação em curso, uma vez que não é contemplado na legislação nacional. No entanto, a sua referência, e demonstração de vantagens, permite a compreensão do mesmo enquanto alternativa viável aos métodos de pressão.

Tabela 1 - Vantagens (+) e desvantagens (-) dos métodos de pressão sonora e de intensidade sonora na determinação laboratorial do isolamento sonoro de um elemento [9].

Método de Pressão Sonora	Método de Intensidade Sonora
+ método de aplicação rápida e simples	+ permite a determinação de caminhos marginais
+ largamente divulgado e aplicado	+ utiliza uma camara reverberante
- incerteza associada	+ não necessita de tempos de reverberação
- utiliza duas camaras reverberantes	+ avalia elementos de pequenas dimensões
- compartimentos isolados e com campos difusos	+ determina a posição da fonte
- grandeza escalar, não fornece informação sobre a direção e magnitude da energia sonora	- indicadores necessários
	- calibração necessária
	- ensaio moroso
	- custo equipamento
	- não contempla absorção da superfície do elemento no compartimento recetor

2.2.5. ISOLAMENTO SONORO EM BAIXAS FREQUÊNCIAS

A ISO 140-4 descreve os procedimentos de medição do isolamento a sons aéreos entre compartimentos com campos difusos. Apenas na situação descrita, onde a pressão é constante no compartimento emissor e no compartimento recetor, é possível comparar a redução sonora de um elemento construtivo medida em laboratório com a medida *in-situ* [29]. No entanto, um campo sonoro é difuso para frequências superiores à frequência de Schroeder. Nesta situação, os modos acústicos do compartimento, dado o seu número, são indiferenciáveis. Com o objetivo de considerar campos difusos para frequências inferiores a 100Hz, a norma prevê a aplicação do método descrito em baixas frequências. Apesar das recomendações, os resultados obtidos não são fiáveis para a gama de frequência pretendida.

Osipov *et al* [30] refere que a transmissão sonora nas baixas frequências adquire crescente importância, não sendo incluído nas normas e regulamentos e não sendo considerado nos métodos de

medição. A análise da transmissão sonora nas baixas frequências é conduzida em elementos retangulares, simples, planos, homogéneos e isotrópicos. Utiliza três modelos de cálculo teóricos e compara-os com resultados experimentais obtidos em laboratório. Os autores concluem que a transmissão sonora de baixas frequências não depende apenas das propriedades do elemento em estudo mas também das características do sistema envolvente. Variações do isolamento de baixas frequências compromete os resultados obtidos *in-situ*.

Hopkins e Turner [31] referem a importância da adequação do método de medição a compartimentos com campos não-difusos. Sendo que, para baixas frequências, o comportamento de um compartimento de um edifício é não-difuso, a fiabilidade das medições pode ser posta em causa. Os regulamentos sobre o isolamento a ruídos aéreos definem variáveis calculadas para frequências compreendidas entre 100Hz e 3.15kHz. Frequências adequadas para a palavra mas não compatíveis com frequências geradas por equipamentos modernos que produzem, por vezes, frequências inferiores a 100Hz. A norma permite a consideração de frequências inferiores, no entanto, restringe a área mínima dos compartimentos a 50m^3.

A investigação conduzida analisa a possibilidade da normativa contemplar medições adicionais para aumentar a fiabilidade dos resultados para frequências baixas e propõe uma solução para colmatar a limitação da norma em relação a compartimentos com campos difusos.

2.2.6. OUTRAS CONSIDERAÇÕES

O presente trabalho pretende conhecer o comportamento acústico a sons de condução aérea das paredes de tabique a partir de processos normalizados de cálculo e de caracterização em laboratório e *in-situ*. Assim, as normas necessárias ao desenvolvimento dos elementos referidos (EN ISO 10140, EN 12354 e EN ISO 717) encontram-se descritas nas respetivos capítulos de aplicação.

2.3. EXIGÊNCIAS REGULAMENTARES

Este subcapítulo apresenta a regulamentação nacional em vigor aplicável à investigação. Os regulamentos não se encontram descritos de forma detalhada pelo que a consulta dos documentos legislativos é indispensável. Não se pretende com o exposto que o leitor consiga aplicar as disposições normativas, servindo apenas de enquadramento particular ao objeto da investigação.

2.3.1. PERSPETIVA EVOLUTIVA

A regulamentação que determina os requisitos e indicadores de isolamento sonoro em edifícios existe, em alguns países, desde 1950. Os indicadores constituídos inicialmente eram meramente comparativos, tendo evoluído de aritméticos simples para indicadores variados e complexos. Atualmente, a regulamentação internacional europeia que comporta os indicadores relativos ao isolamento sonoro a ruídos aéreos é a EN ISO 717:1996 [31]. Na tabela seguinte consta a evolução da norma desde a sua conceção.

Tabela 2 - Perspetiva histórica da norma EN ISO 717 [31].

1968	ISO/R 717:1968, Determinação do isolamento sonoro em edifícios

1982	ISO 717:1982, Acústica - Determinação do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção; Parte 1: Isolamento sonoro a sons de condução aérea em edifícios e elementos de construção interiores; Parte 2: Isolamento sonoro a sons de percussão; Parte 3: Isolamento sonoro a sons de condução aérea de elementos de construção e fachadas;
1996	ISO 717:1996, Acústica - Determinação do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção; Parte 1: Isolamento sonoro a sons de condução aérea; Parte 2: Isolamento sonoro a sons de percussão;

A versão atual da norma contribui de forma decisiva para a variedade de indicadores existentes. A existência de um conjunto de indicadores europeus, harmonizados e universais, facilitaria a troca de informações e experiência no desenvolvimento de ferramentas e tecnologias. A harmonização referida não se aplicaria aos requisitos. A tabela seguinte evidencia os indicadores e adaptadores espectrais, constantes na EN ISO 717:1996.

Tabela 3 - Indicadores e adaptadores espectrais definidos na EN ISO 717:1996 [31].

ISO 717:1996, indicadores para determinação do isolamento sonoro *in situ*	Isolamento sonoro a sons de condução aérea – elementos interiores (1) (ISO 717-1)	Isolamento sonoro a sons de condução aérea – fachadas (1) (ISO 717-1)	
Indicadores base	R'_w $D_{n,w}$ $D_{nT,w}$	R'_w $D_{n,w}$ $D_{2mnT,w}$	
Adaptadores espectrais	C C50-3150 C100-5000 C50-5000	C C50-3150 C100-5000 C50-5000	C_{tr} C_{tr}50-3150 C_{tr}100-5000 C_{tr}50-5000
Numero total de indicadores	3 x 5 =15	3 x 9 = 27	

(1) Por simplicidade, apenas constam na tabela indicadores e adaptadores espectrais para a banda de frequência de 1/3 oitava.

Os códigos de construção europeus incluem, geralmente, no âmbito da acústica de edifícios, requisitos relativos ao isolamento a sons aéreos e de percussão entre edifícios, ao isolamento de sons aéreos entre

o exterior e o edifício recetor e relativos ao ruído de edifícios de serviços ou de equipamentos. A especificidade construtiva de algumas zonas leva a que existam outros requisitos [32].

Apesar da evolução verificada nos indicadores, os requisitos acústicos não sofreram alterações ao longo de diversas décadas. Apenas recentemente, foram revistos e, em casos pontuais, permitiram a introdução de um sistema de classificação que caracteriza os edifícios segundo níveis de qualidade. Porem, nenhum dos sistemas implementados é semelhante [32].

Os indicadores relativos ao isolamento sonoro a sons aéreos são facilmente aplicáveis a elementos construtivos pesados. No entanto, para elementos construtivos leves, uma vez que atendem a baixas frequências, os mesmos indicadores não são fiáveis [32].

2.3.2. Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE)

As imposições regulamentares nacionais no âmbito da acústica de edifícios constam no Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) [33], aprovado inicialmente pelo *Decreto-Lei* 129/2002 de 11 de Maio. A nova versão, alterada pelo *Decreto-Lei* 96/2008 de 9 de Junho, pretende atender ao conforto acústico no âmbito da edificação e contribuir para a melhoria da qualidade do ambiente acústico e para o bem-estar e saúde das populações. Exige a elaboração de projetos de condicionamento acústico de edifícios abrangidos pelo regulamento, devendo ser elaborados e subscritos por técnicos qualificados. É compatível com as disposições constantes no Regulamento Geral do Ruído [34] e é aplicado a edifícios habitacionais e mistos, unidades hoteleiras, edifícios comerciais, industriais e de serviços, edifícios escolares e de investigação, edifícios hospitalares e desportivos, estações de transporte de passageiros e a auditórios e salas.

O descritor de isolamento a sons aéreos constante na legislação é o índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea padronizado, $D_{nT,w}$ (dB). Trata-se de um valor medido *in-situ*, ajustado pela curva de referência normalizada da NP EN ISO 717-1 [14] e padronizado para um tempo de reverberação do compartimento recetor T_0 (em geral, igual a 0,5 s). Este inclui o efeito das transmissões marginais. O descritor relaciona-se com a redução sonora aparente padronizada, R'_w, através da expressão:

$$\mathrm{DnT,w} = \mathrm{R'w} + 10\log(\frac{0{,}16*V}{S*\mathrm{T0}}) \qquad (2.8)$$

O artigo 5º do RRAE estabelece alguns requisitos acústicos de edifícios habitacionais ou mistos. O isolamento sonoro a sons de condução aérea para elementos de construção:

Tabela 4 - Isolamento sonoro a sons de condução aérea em edifícios habitacionais e mistos, e unidades hoteleiras.

Isolamento sonoro a sons de condução aérea de elementos construtivos exteriores	$D_{2m,nT,w}$ (dB)
Zonas sensíveis	28
Zonas mistas (ou zonas sensíveis na proximidade de grande infraestrutura de transporte)	33

Isolamento sonoro a sons de condução aérea de elementos construtivos interiores	$D_{nT,w}$ (dB)
Entre compartimento de um fogo e quarto/zona de estar de fogo contíguo	50
Entre zonas de circulação comum e quarto/zona de estar de fogo contíguo	48 40 (1) 50 (2)
Entre locais destinado a comércio, indústria e serviços e quarto/zona de estar de fogo contíguo	58

(1) Se local emissor for uma caixa de escadas

(2) Se local emissor for uma garagem

O RRAE contempla um fator I associado à incerteza das medições. Para os índices de redução sonora a ruídos de condução aérea, associados a elementos de construção exteriores ou interiores, o valor de +3 dB a considerar deve ser adicionado aos valores constantes na tabela 4. Os edifícios situados em zonas históricas que sejam alvo de reabilitação mantendo o uso e identidade patrimonial beneficiam ainda de uma tolerância de 3 dB.

É necessário atender que os referenciais regulamentares apresentados servem apenas para orientação, já que o tabique, enquanto solução construtiva, não é definido como elemento de fachada embora possa ser utilizado como solução divisória entre fogos. No entanto, nenhuma destas considerações se encontra no âmbito do trabalho a apresentar.

3
A CASA BURGUESA E O TABIQUE

3.1. INTRODUÇÃO

Os núcleos urbanos constituem parte de um património histórico e cultural que deve ser preservado. Caracterizados pelo desenvolvimento de um aglomerado populacional reúnem referências arquitetónicas e sociais, e constituem fontes importantes de informação. A cidade do Porto apresenta um centro histórico repleto de elementos com características semelhantes, no qual os edifícios presentes conferem identidade ao tecido urbano e revelam diferentes formas de construir recorrendo a um número limitado de técnicas e de materiais. A história geral do edificado da cidade define a Casa Burguesa como elemento intemporal e permanente, representativo de um esquema tradicional de construção. No domínio descrito, é ainda conveniente identificar o tabique como técnica de construção principal incorporada nos mesmos edifícios.

3.2. O PORTO E A CASA BURGUESA

"Leal cidade, donde teve origem (como é fama) o nome eterno de Portugal"

in *Lusíadas*



Figura 4 - A cidade do Porto.

O Porto é uma cidade urbana e portuária (Figura 4), cujo desenvolvimento se encontrou associado às atividades comerciais. O seu edificado adaptou-se, na sua forma, às condicionantes do terreno. Ao longo dos perfis de rua, é possível identificar características homogéneas e transversais nos diferentes edifícios, sendo difícil encontrar aqueles que detêm significativas alterações à construção original. A repetição de aspetos construtivos, formais e organizacionais, e de características exteriores e interiores visíveis, permitem tipificar o património construtivo e caracterizar a típica casa urbana do Porto [1].



Figura 5 - A típica casa urbana do Porto. Representação esquemática [7].

A casa urbana do Porto é também denominada Casa Burguesa devido à sua origem. A Casa Burguesa como hoje a conhecemos e da qual é possível encontrar registos fiéis remonta, segundo a maioria dos autores, ao século XVII. É o resultado da influência direta ou indireta de um processo evolutivo marcado por vários acontecimentos de ordem social, política, económica e cultural que tiveram lugar nos séculos XVII, VXIII e VIX.

"As casas de que se compõem estas e todas as outras ruas de que não faço menção particular chegam a dez mil. Ordinàriamente são de três andares, muitas de quatro e algumas de cinco, além das sôbrecozinhas e lojas subterrâneas. A sua fábrica é tôda de pedra e cal: os portais, janelas, cunhais e balcões são de cantaria fina e bem lavrada, pois a muita pedra de que abundam os arrabaldes e subúrbios desta cidade (incomparável neste género) subministra ainda a necessária para outras muitas obras. Quási tôdas as casas, principalmente as modernas, têm os seus quartos interiores ilustrados com altas e grandes clara-boias, que lhes comunicam tanta luz quanta poderiam receber se faceassem com a rua; os portais são altamente elevados e à sua proporção as ornadas de grandes e cristalinas vidraças; pela parte exterior tem largos balcões ou sacadas com parapeitos de ferro, lavrado em grades, que se rematam com pirâmides douradas, ficando deste modo livres do rançoso e melancólico uso das rótulas de pau com que os antigos portugueses se figuravam recatar a

honestidade das suas famílias; o resto, com são os tetos, paredes, etc. é tudo pintado, segundo o diferente gosto dos seus moradores."

in *Descrição topográfica e histórica da cidade do Porto*.

A típica casa Burguesa detém um caracter multifuncional. Adaptada à habitação e prestação de serviços, tem, em geral, entre três a cinco pisos. É constituída por uma cave e uma loja ou armazém amplo à cota da rua. Contém uma sala de visitas, localizada no primeiro piso, destinada à receção e reserva do lar enquanto espaço pessoal. Os quartos localizam-se nos pisos intermédios e os pisos superiores são reservados para a instalação da cozinha, da sala de jantar e dos espaços destinados a trabalhos domésticos e à acomodação de empregados ou criados. A maioria dos edifícios é intramuros e de "parcela estreita", assim denominados por serem esguios. O parcelamento do século XVII é atualmente mantido e apresenta lotes de formas irregulares com, em geral, uma ou duas frentes [1].

3.3. TIPIFICAÇÃO DA SOLUÇÃO CONSTRUTIVA

Os edifícios do centro histórico da cidade do Porto desenvolvem-se, na forma corrente, num corpo único de implantação retangular, com largura variável entre 4 e 7m, e comprimento variável entre 15 e 20m, e uma altura média equivalente a três pisos [35].

A análise de um edifício leva à sua decomposição em diferentes subsistemas. A compreensão de que um elemento edificado corresponde a um sistema complexo, onde cada uma das suas partes desempenha um papel determinante ao seu funcionamento, determina também a priorização de cada um dos diferentes subsistemas como elementos independentes e de importância diversificada. Neste sentido, a descrição da Casa Burguesa deve atender a que existem elementos construtivos que incorporam a estrutura principal do edifício, e que outros, sejam remetidos para um nível secundário. A divisão sugerida, apresentada na tabela 5, atende apenas às condições estruturais e de suporte, e pretende a explicação e fácil compreensão do sistema.

Tabela 5 - Decomposição da Casa Burguesa em subsistemas [35].

Estrutura Principal	Estrutura Secundária
Paredes de meação	Paredes de fachada
Estrutura de sobrados	Paredes interiores
Estrutura de cobertura	Estrutura das escadas
	Estrutura da claraboia
	Estrutura das águas furtadas

O solo sobre o qual a cidade do Porto se encontra edificada é maioritariamente rochoso. No entanto, sendo uma cidade portuária, detêm junto ao rio solos de qualidade inferior. Face ao apresentado, é comum o desenho de fundações que correspondam a ensoleiramento geral, quando o afloramento rochoso se encontra a profundidades reduzidas ou que assentem sobre estacaria, quando o solo de fundação é de menor qualidade [36].

As paredes de meação são correntemente em alvenaria de pedra e de aparelho irregular. Com espessuras médias entre 30cm a 60cm podem também apresentar-se como soluções de alvenaria mista de madeira e tijolo. Pelo exterior, nas zonas expostas, as paredes são, nas configurações mais frequentes, revestidas com soletos de ardósia, chapa zincada ou por uma impermeabilização de asfalto. O revestimento interior é constituído por uma camada correspondente ao emboço e à regularização [35].

A composição das paredes de fachada, de maior espessura por conterem aberturas, é predominantemente em alvenaria de granito aparelhada. Estes elementos, autoportantes, servem de travamento à estrutura dos pavimentos e permitem o apoio das tacaniças pertencentes à estrutura do telhado. É ainda ocasional o aparecimento de edifícios com soluções mistas, de pedra e madeira ou tijolo e madeira, e em pisos acrescentados, soluções simples de tabique. Quando constituídos por madeira, o seu revestimento incorpora fasquios de forma a assegurar a ligação da argamassa à estrutura. As paredes de fachada eram revestidas pelo exterior com rebocos à base de argamassa de saibro e cal, com acabamento estucado e pintado ou, para soluções nobres, com azulejos. Em conjunto com as paredes de meação formam um elemento contínuo que assenta sobre a fundação [1].

Os pavimentos estruturais em madeira, constituídos por um vigamento de paus rolados, e posteriormente substituídos por vigas de madeira esquadriada, apoiam diretamente nas paredes de meação. Em situações pontuais, o apoio pode ser conseguido recorrendo a um elemento em madeira disposto ao longo da parede. O vigamento com início e fim nas paredes de fachada é disposto paralelamente com um espaçamento de 50cm, tem secções que dependem das características do vão a vencer e é estabilizado por elementos de madeira, denominados por tarugos. O revestimento superior de piso, é constituído, nos casos mais frequentes, por um tabuado em madeira de pinho com espessura, largura e comprimento variáveis. As tábuas que constituem o soalho são dispostas entre si recorrendo a um sistema de encaixe, pregadas ao vigamento principal do pavimento e posteriormente enceradas conferindo o acabamento final de piso. Os revestimentos e acabamentos de teto sofreram algumas variações ao longo das diferentes épocas. Inicialmente, o revestimento da face inferior do pavimento era constituído exclusivamente por madeira, sendo que os exemplares ainda existentes são diminutos. A utilização de estuque enquanto elemento de revestimento substituiu gradualmente os revestimentos de teto em madeira. A sua aplicação só foi possível devido à incorporação de fasquios, pregados sob o vigamento, no seu suporte. A argamassa de revestimento é aplicada em duas camadas, sendo a primeira depositada sobre o fasquiado antes da colocação do soalho, e a segunda sob o mesmo conjunto de fasquios regularizando o teto. O acabamento é garantido recorrendo a um barramento de gesso e podia incluir diferentes motivos decorativos [1,35].

A definição da estrutura de um telhado é rudimentar, simples e coexiste entre soluções construtivas há diversos séculos. A sua estrutura é construída, há semelhança dos restantes elementos apresentados, em madeira e toma como apoio as paredes de meação oriundas das fundações. As vigas que o compõe são, em geral, paus rolados que, à semelhança do vigamento dos pavimentos, foram posteriormente substituídos por elementos em madeira esquadriados. A composição do próprio telhado foi alvo de diferentes evoluções tecnológicas. O conjunto estrutural constituído por pernas, fileiras, contrafrechais, madres e paus de fileira definiu mais tarde, e sob outra forma, a asna complexa com a linha, o pendural e as escoras. O telhado tradicional, e constante na cidade do Porto, de quatro águas deu origem ao telhado de duas águas. E, com a generalização deste último, verificou-se a substituição da telha caleira, que necessitava de argamassa para a sua solidarização, pela telha Marselha. Este elemento construtivo não é, por isso, constante. Mesmo ao nível da sua estrutura existem diferentes tipos de configurações, com diferentes pendentes, para diversas utilizações [1,35].

3.4. DESCRIÇÃO TECNOLÓGICA DO ELEMENTO A INVESTIGAR

O tabique é uma das técnicas antigas de construção mais utilizada em Portugal. Em geral, é composta por uma estrutura simples de madeira e uma camada de argamassa de elementos naturais. A capacidade de resistência é conferida pela estrutura de madeira e a argamassa funciona como material de enchimento e de revestimento. À semelhança de outras técnicas de construção tradicional, o tabique utiliza materiais naturais e disponíveis no local de construção [37].

É conveniente proceder à distinção entre as aplicações possíveis e à clarificação da nomenclatura a atribuir a cada tipo de parede. A bibliografia consultada denomina por taipas todas as paredes estruturais e por tabique os elementos de parede não estruturais (Figura 6). No entanto, a atribuição do nome taipa a elementos construídos em madeira não é consensual, uma vez que se refere igualmente a paredes de terra. Assim, no caso descrito, a designação atribuída às paredes tradicionais em madeira é acompanhada por um indicador técnico associado à forma de execução do elemento (taipa de fasquio ou taipa de rodízio). O leitor deve atender a que a consulta de trabalhos executados por diferentes autores pode introduzir, para o mesmo tipo de parede, denominações distintas [2].



Figura 6 - Elemento de parede não estrutural. Tabique simples de duplo tabuado.

Não sendo primordial, no âmbito desta investigação, a definição clara dos elementos com funções estruturais, a sua menção é relevante para a compreensão dos limites de aplicação do tabique enquanto técnica de construção. Para o conhecimento aprofundado sobre o assunto recomenda-se a leitura [1,2,35].

De acordo com o descrito, a aplicação de tabique é predominante em elementos divisórios interiores, podendo também ser encontrado em paredes de caixa de escada e em claraboias ou contorno de chaminés. Os elementos de compartimentação não têm um cariz estrutural, uma vez que não são concebidos para o suporte direto de cargas e que a sua execução surge apenas na fase de acabamentos, após aplicação do soalho. No entanto, por um lado contribuem para o contraventamento global do edifício, através da ligação de diferentes elementos resistentes e, por outro lado, recebem cargas após deformação dos elementos estruturais. A ligação a outros elementos é assegurada pela disposição das paredes de compartimentação sobre a estrutura do pavimento, atendendo à sua orientação e localização.

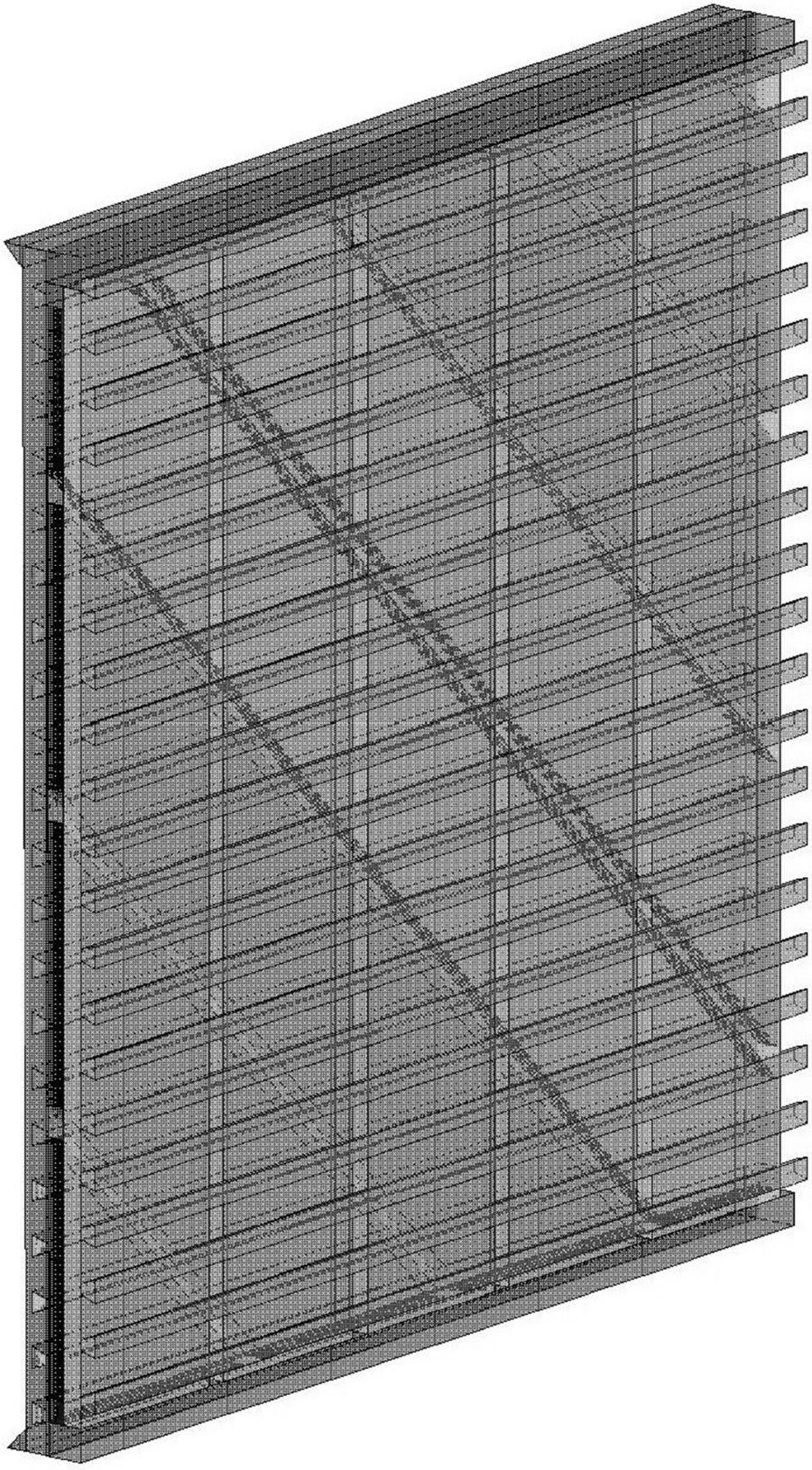


Figura 7 - Esquema concetual de uma parede de tabique.

Investigações conduzidas por diferentes autores, resultantes da análise de inúmeros casos, concluem que existem pequenas variações ao método construtivo potenciadas pela adaptabilidade do mesmo ao local de implementação. Em geral, os elementos verticais interiores constituídos por tabique podem ser simples ou duplos, sendo que a denominação depende da composição da estrutura de madeira. Em elementos pertencentes ao século XVII, a estrutura de madeira é constituída por barrotes de 7 a 8cm que compõem um quadro geral de frechais, prumos e vergas, preenchidos com um tabuado de tábuas costaneiras com 4 a 5cm e espaçadas de 1cm. As tábuas são dispostas na vertical e pregadas aos frechais. O tabuado é posteriormente revestido com um fasquiado de madeira que permite a aderência do revestimento e acabamento à estrutura. Para paredes mais recentes, pertencentes ao final do século XVII e século XVIII, é adotado o mesmo esquema estrutural mas disposto de forma distinta. O conjunto de frechais, prumos e vergas é preenchido com um duplo tabuado e a estrutura de barrotes é executada de duas formas. A primeira contempla o afastamento dos prumos de 1m e seu apoio no vigamento principal do pavimento, mediado pela sua fixação ao frechal superior e travado por travessanhos à altura do rodapé (Figura Figura *8*8 - Superior). A segunda forma de execução contempla apenas prumos na envolvente do vão, um frechal superior e um frechal inferior, colocado à altura do rodapé e apoiado em prumos assentes no soalho (Figura Figura *8*8 - Inferior) [1,35].

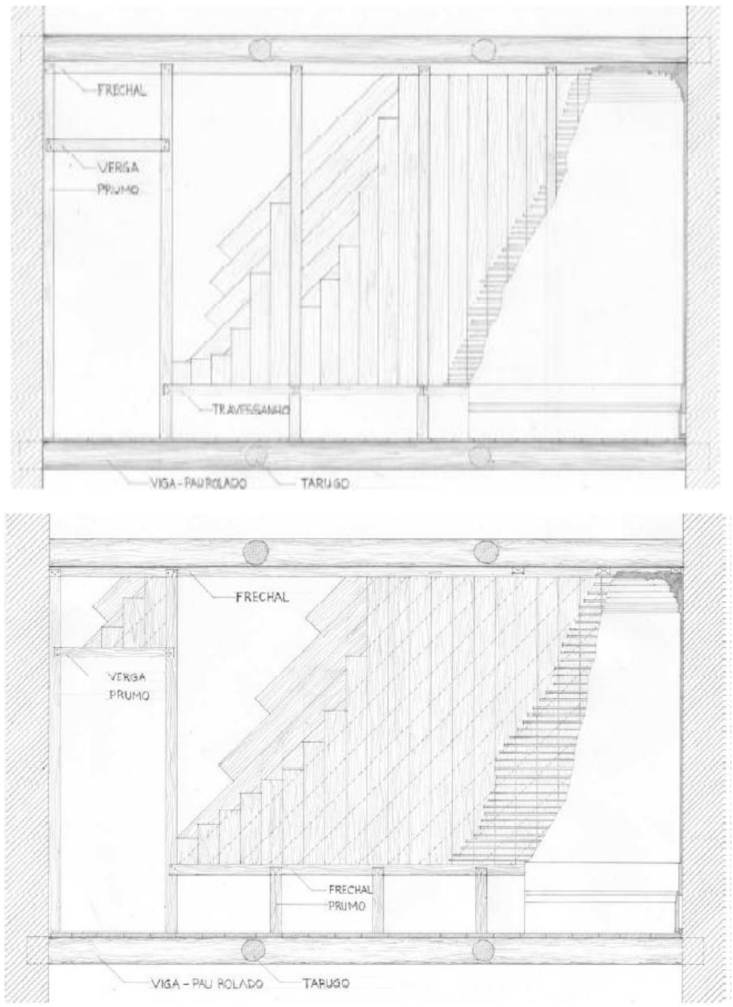


Figura 8 - Esquematização das duas formas de execução da estrutura de madeira de um elemento em tabique [35].

As soluções são preenchidas por um tabuado duplo com tábuas de 2 cm de espessura, dispostas na vertical e na diagonal. Sobre o duplo tabuado é pregado, nas duas faces, um ripado de madeira que permite o suporte das argamassas de revestimento. Os fasquios, de forma trapezoidal, com 1cm de espessura, bases variáveis entre 1 a 4cm, espaçados entre 3 a 5cm e dispostos com a face mais larga para o exterior, garantem a aderência por parte da argamassa. Os mesmos são aplicados desde do teto até à altura do lambrim ou rodapé. Os rodapés eram utilizados para assegurar a transição entre paredes e pavimentos. Exigências de desempenho e/ou questões estéticas poderiam determinar alturas de 50cm. No entanto, a aplicação de rodapés simples rondava, na maioria das situações, os 15cm. As tábuas que constituem os rodapés são pregadas à estrutura da parede [1,35].

Investigações recentes, conduzidas pela Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD) [38,39], revelam que o material mais utilizado nas estruturas de madeira na região norte é a *Pinus pinaster*. E que, embora seja a mais utilizada, é possível encontrar elementos constituídos por castanho e/ou carvalho. A incorporação generalizada da madeira, enquanto material de construção, nos elementos de tabique provinha da sua existência em abundância no território nacional e das suas características mecânicas e de trabalhabilidade. Os estudos, desenvolvidos no sentido de examinar a construção de tabique na região do norte de Portugal, têm por base a recolha de informação relativa às características dos edifícios, às soluções construtivas e aos materiais aplicados, e pretendem a identificação e caracterização experimental dos materiais incorporados nestas técnicas construtivas. As mesmas revelam que a estrutura de madeira de um elemento construído em tabique é revestida com uma argamassa de materiais naturais. As paredes são emboçadas e regularizadas com argamassa de cal, areia e saibro, e alvo de um acabamento de estuque, materializado recorrendo a uma pasta de cal e posteriormente caiado ou pintado [38,39]. Todas as paredes são revestidas da mesma forma, assegurando a continuidade de revestimentos e acabamentos interiores. A tabela seguinte descreve as soluções tradicionais de revestimento.

Tabela 6 - Soluções tradicionais de revestimento [36].

Camadas		**Traço**			
2 camadas	Reboco	1 areia de rio	1 cal hidráulica	1/5 cal aérea	2 saibro
	Estanhado	3 areia fina	1/2 cal hidráulica	1/2 cal aérea	
3 camadas	Salpico	5 areia de rio	1 cal hidráulica		
	Camada Base	3 areia fina	1 cal hidráulica		
	Acabamento	4 areia fina	1 cal hidráulica		

A definição de uma solução standard é complexa, uma vez que não existe consenso em relação às características geométricas, físicas ou químicas das argamassas aplicadas. O desconhecimento dos traços, números de camadas ou espessuras permite apenas a definição de um conjunto limitado de linhas orientadoras.

De acordo com o apresentado na Tabela 6, as argamassas utilizavam a cal aérea e/ou hidráulica como ligante e a areia ou saibro, de granulometrias variáveis, como inerte. A descontinuidade existente devido à existência de diferentes camadas e a porosidade dos materiais incorporados na argamassa garantiam simultaneamente uma boa permeabilidade ao vapor de água e a impermeabilização do elemento construtivo face à penetração de água no estado liquido.

A variação de propriedades entre camadas contribui para a sua utilização em diferentes níveis. A camada interna confere resistência ao revestimento e permite a fixação de diversos elementos. No entanto, a sua aplicação em camadas de espessura superior contribui de forma decisiva para o aparecimento de fissura. A granulometria dos inertes utilizados tende a ser mais fina no sentido de afastamento em relação ao núcleo de madeira. Assim, a camada superficial do revestimento incorpora areia fina e cal conferindo um aspeto cuidado e um acabamento nobre à superfície visível das paredes [35].

3.5. CONCLUSÕES

A informação recolhida foi organizada e sistematizada de forma a garantir a elaboração de uma síntese. Não pretende ser um manual de suporte para potenciais interessados, relativamente aos assuntos da casa burguesa e das suas soluções construtivas, mas remete para bibliografia abrangente e consolidada.

A bibliografia analisada caracteriza o património edificado, ao nível do seu processo construtivo e dos materiais que o constituem, de forma satisfatória. Assim, foi possível esclarecer algumas dúvidas existentes. No entanto, o conhecimento no domínio das construções tradicionais é limitado, tendo sido insuficiente para a compreensão do seu comportamento acústico.

A sistematização do processo construtivo em detalhe é complexa. As soluções encontradas para os diferentes elementos construtivos decorrem da formulação de linhas orientadoras desenvolvidas através do contacto com diferentes casos reais. Tratando-se, no caso dos elementos divisórios interiores em tabique, de um método construtivo passível de ser ajustado a diferentes condições é possível encontrar inúmeras configurações diferentes, dificultando a apresentação de uma solução única e universal.

Atendendo a que o conhecimento técnico tradicional é diminuto e a que, em geral, os elementos construídos em tabique se encontram num avançado estado de degradação, o desenvolvimento de estudos científicos e de trabalhos de investigação configuram-se fundamentais para o suporte de operações de reabilitação, manutenção e conservação. Os aspetos referidos conduzem à necessidade de identificar e caracterizar o tabique, enquanto sistema construtivo, assim como os materiais que o constituem.

4
A ANÁLISE TEÓRICA

4.1. INTRODUÇÃO

A determinação do comportamento acústico teórico de um elemento construtivo é considerada na metodologia adotada e integra o capítulo seguinte. A modelação teórica aplicada revela-se particularmente interessante e importante. Os modelos de previsão apresentados são abrangentes e não foram adaptados ao elemento em foco – a parede de tabique.

4.2. MODELOS TEÓRICOS PARA O CÁLCULO DA REDUÇÃO SONORA

4.2.1. MÉTODO DE SHARP EXPERIMENTAL

O modelo proposto por Sharp, em 1973, permite a determinação gráfica, de forma aproximada, da redução sonora *R* em função da frequência. De acordo com o modelo teórico de comportamento de elementos simples, apresentado no capítulo 2, o método considera que para frequências inferiores à frequência crítica, o sistema é condicionado pela lei da massa e que o seu isolamento sonoro é alvo de um incremento de 6 dB por oitava e/ou 6 dB por duplicação da massa. À medida que a espessura e a rigidez dos painéis aumentam, o seu comportamento tende a ser inferior ao previsto pela lei da massa.

O modelo não atende a frequências inferiores às definidas, delimitadas em zonas onde o regime de transmissão sonora é determinado pela ressonância ou pela rigidez do elemento. A mínima frequência válida para a sua aplicação corresponde a 1,5 vezes a frequência de ressonância do painel. No entanto, o facto descrito não é determinante. Segundo Carvalho [20], as zonas referidas encontram-se, na maioria das situações, fora das frequências de interesse da Acústica de Edifícios. Nos demais casos, para frequências superiores à frequência crítica, o isolamento sonoro do elemento é condicionado pela zona de coincidência e cresce a uma taxa de 9 dB por oitava. No limite, a transmissão sonora através de um elemento construtivo simples pode ser determinada partindo apenas da massa superficial e do módulo de elasticidade do elemento.

A metodologia de cálculo subjacente traduz-se graficamente através das representações esquemáticas constantes na Figura 9. O gráfico a) é aplicado a elementos isotrópicos. As ordenadas dos pontos A e B correspondem aos valores de redução sonora a partir dos quais são desenhadas as retas com declive de 6 dB e 9 dB, representativas das zonas condicionadas pela massa e pela coincidência, respetivamente. São calculadas recorrendo às expressões:

$$\text{(A) } R = 20\log(f_c * m) - 54 \text{ (dB)} \qquad (4.1)$$

$$\text{(B) } R = 20\log(f_c * m) + 10\log(\eta) - 45 \text{ (dB)} \qquad (4.2)$$

sendo *fc* a frequência critica (*hz*), *m* a massa superficial (kg/m^2) e η o factor de perdas do sistema. Em caso da não existência de valores tabelados para o fator de perdas, deve ser considerado um abaixamento, a partir do ponto A, de 10, 7 e 4 dB para elementos com amortecimento interno pequeno, médio ou elevado, respetivamente [20].

As abcissas dos pontos A e B têm relação direta e exclusiva com a frequência crítica do sistema. O eixo das abcissas é definido numa escala logarítmica e o eixo das ordenadas numa escala linear. A partir do ponto de intersecção dos segmentos de reta com declive de 6 dB e 9 dB, é definido um novo segmento que adota o declive do primeiro.

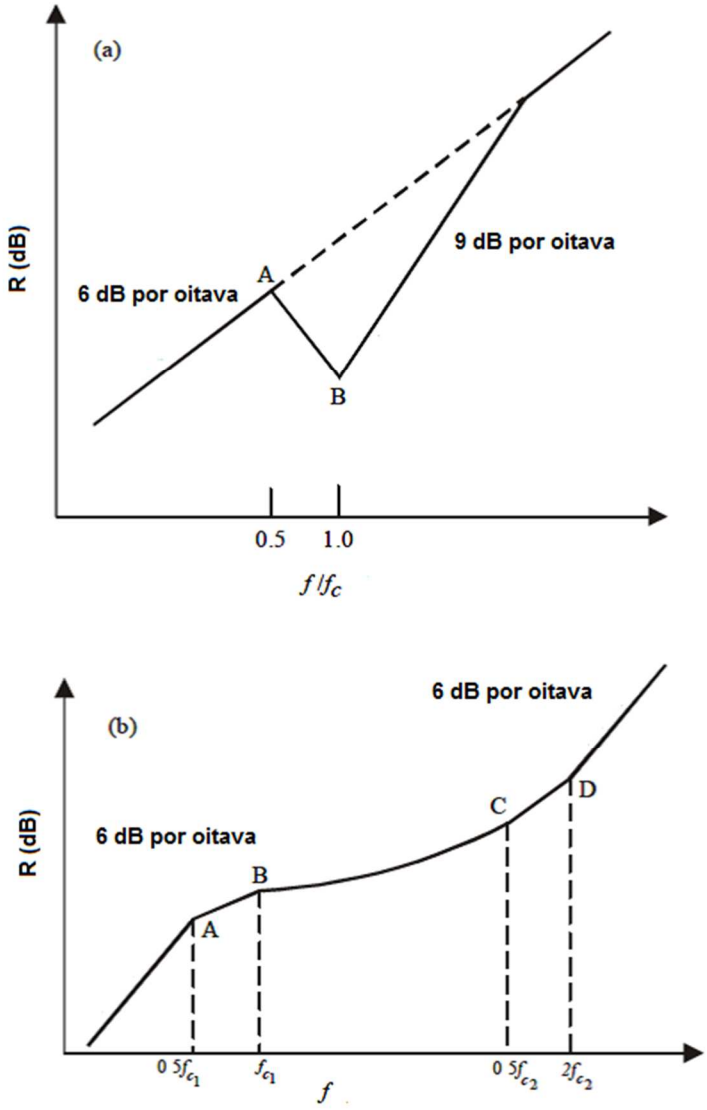


Figura 9 - Representação esquemática consistente com a aplicação do modelo de Sharp; a) aplicado a elementos isotrópicos; b) aplicado a elementos simples ortotrópicos [40].

O modelo aplicado atende à incorporação de painéis ortotrópicos. O gráfico b) é aplicado a elementos ortotrópicos com amortecimento interno pequeno. De desenvolvimento semelhante ao anterior tem a particularidade de no seu desenho atender a existência de materiais com duas frequências críticas distintas, f_{C1} e f_{C2}. Os valores de R correspondentes às diferentes frequências são calculados recorrendo às expressões seguintes:

$$\text{(A) } R = 20\log((f_{c1} * m) - 54 \text{ (dB)} \quad (4.3)$$

$$\text{(Entre B e C) } R = 20\log(f) + 10\log(m) - 10\log(f_{c1}) - 20\log(log_e(4f/f_{c1}) - 13{,}2 \text{ (dB)} \quad (4.4)$$

$$\text{(D) } R = 10\log(m) + 15\log(f_{c2}) - 5\log(f_{c1}) - 17 \text{ (dB)} \quad (4.5)$$

sendo f_{c1} e f_{c2} a primeira e segunda frequência crítica do elemento (*hz*), e *m* a sua massa superficial (kg/m^2). No mesmo domínio, o gráfico a) pode ainda ser utilizado para a determinação da redução sonora de painéis ortotrópicos com propriedades que determinem um amortecimento interno elevado. Neste caso, a frequência critica f_c adota o valor da frequência critica mais elevada do elemento, f_{c2}. Por sua vez, este ultimo parâmetro, assume um valor determinado através da massa superficial total e da rigidez do elemento [40].

4.2.2. MÉTODO DE LJUNGGREN MODIFICADO

Ljunggren propôs, em 1991, um modelo relativo à previsão da redução sonora de elementos de espessura elevada em meios difusos. O modelo permite a consideração de painéis homogéneos e isotrópicos com espessuras superiores a 1/6 do comprimento de onda da onda incidente. É geralmente aplicado quando os edifícios se encontram em ambientes urbanos ruidosos para a determinação da redução sonora de elementos de fachada. O modelo introduz correções ao método de Sharp e colmata algumas das suas limitações nas gamas de frequências mais elevadas.

O modelo de previsão é baseado na determinação analítica da redução sonora de elementos infinitos com espessura variável. Os resultados obtidos demonstram que, em certas circunstâncias, pode também ser aplicado a elementos finitos. As expressões analíticas de cálculo podem ser encontradas em [41].

O modelo adotado contempla uma aproximação à teoria geral de elementos elásticos, de acordo com o proposto por Folds e Loggins em 1977 [42].

4.2.3. MÉTODO DE MOORE E LYON

A redução sonora característica de um painel simples constituído por um núcleo e duas camadas superficiais foi investigada por Moore e Lyon em 1991 [43]. Os autores desenvolveram modelos de cálculo analítico aplicáveis a elementos com núcleos isotrópicos e ortotrópicos. No entanto, foram definidas algumas condições simplificadoras. O método aplicado considera que as três camadas, núcleo e superfícies, são homogéneas e isotrópicas e que ambas as camadas superficiais são idênticas.

A investigação conduzida descreve a influência das ondas sonoras em painéis com duas camadas superficiais finas e um núcleo leve e mais espesso. A combinação de diferentes materiais num único elemento, formando um painel sandwich, determina a melhoria das suas propriedades de rigidez e promove a redução do peso dos elementos. A integridade mecânica do conjunto é garantida pela rigidez do material incorporado no núcleo. No domínio da acústica, painéis com núcleos elásticos e de maior espessura têm desempenhos superiores para frequências mais elevadas e desempenhos inferiores para frequências de gama intermédia. Contudo, é necessário atender a que o desempenho do elemento não depende exclusivamente de propriedades geométricas. As camadas superficiais podem ter melhor comportamento do que o núcleo dependendo das frequências em análise.

À semelhança de um elemento elástico, um painel sandwich pode ter diferentes modos próprios. O modelo atende à existência de modos de propagação distintos que promovem a ocorrência de diferentes fenómenos de deformação com implicações associadas à coincidência acústica. A propagação simétrica envolve a deformação do núcleo e determina a ocorrência do efeito de coincidência para duas frequências. A primeira é semelhante à frequência de ressonância de uma parede dupla, caracterizada pela rigidez do núcleo e pela massa das camadas superficiais, e a segunda ocorre para frequências superiores. O modo de propagação assimétrico envolve a deformação do painel sem a variação da sua espessura, resultante da diminuição da rigidez do núcleo para frequências elevadas.

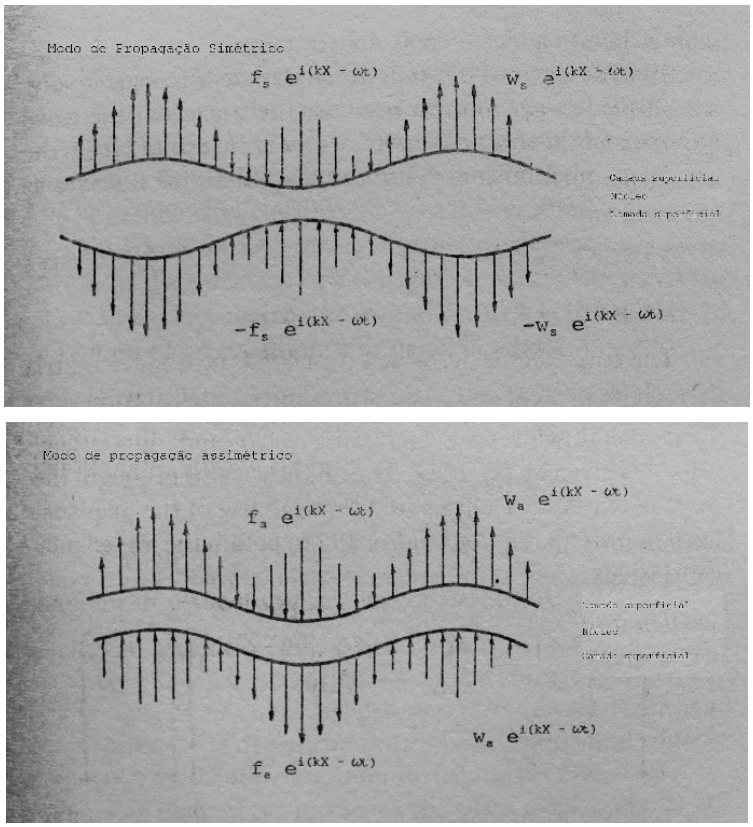


Figura 10 - Modos de propagação simétrico (superior) e assimétrico (inferior) [43].

O desempenho de um elemento com características semelhantes às descritas é convenientemente explicado e demonstrado, analiticamente e experimentalmente, no artigo citado.

4.3. RESULTADOS TEÓRICOS

Os modelos apresentados no subcapítulo anterior pretendem a definição de uma base que permita a sua comparação com os valores determinados através da avaliação experimental realizada em laboratório e *in-situ*. Tendo sido desenvolvidos e descritos numa fase anterior à da determinação experimental constituem um indicador importante no que toca à definição de uma ordem de grandeza expectável para a redução sonora de um elemento de tabique.

A aplicação dos modelos foi realizada recorrendo a diferentes rotinas informáticas.

4.3.1. DADOS UTILIZADOS

O desenvolvimento dos modelos referidos pressupõe o conhecimento das diferentes propriedades dos materiais constituintes do painel a investigar. Para facilitar a aplicação das metodologias, foi considerado que a parede de tabique é apenas constituída por um elemento resistente, a madeira de pinho, e duas camadas superficiais em argamassa de saibro. A simplificação proposta atende à influência principal destas camadas no seu desempenho acústico.

Tabela 7 - Parâmetros e valores de cálculo considerados.

Parâmetros	Madeira de Pinho	Argamassa de Saibro
Módulo de Elasticidade (Gpa)	10	2
Densidade (kg/m^3)	480	2150
Espessura (mm)	40	20
Coeficiente de Poisson	0,4	0,2
Fator de Perdas	0,03	0,03
Velocidade do som (m/s)	700	3160
Frequência crítica (Hz) – 1cm	6000	1900

Os parâmetros de cálculo contemplados na tabela derivam da recolha de informação em diversas fontes [20,38,39,44,45]. No entanto, a ausência de informação validada relativa a alguns dos indicadores ou à definição de outros sob a forma de intervalo determinou a escolha e adoção de alguns dos valores considerados.

4.3.2. CONDIÇÕES GERAIS

Os resultados do cálculo da redução sonora foram obtidos por bandas de 1/3 oitava. A descrição da perda de energia sonora no domínio da frequência, *R* (dB), foi substituída pelo indicador único, *Rw* (dB), de acordo com o considerado na norma ISO 717-1. Os resultados são apresentados sob a forma de tabela que contempla a redução sonora, *R*, a variação dos valores de referência, ΔCR, e os dados da curva de referência relativos à última iteração aplicável, *CR*. São também apresentados na forma de um gráfico que contempla apenas *R* (dB). A determinação dos mesmos resultados foi obtida para campos difusos e para uma amostra com 10m^2 de área.

4.3.3. MÉTODO DE SHARP EXPERIMENTAL

Os dados relativos à aplicação do método de Sharp experimental encontram-se sumarizados na Tabela 8 e representados graficamente na Figura 11.

Tabela 8 - Resultados obtidos através do método Sharp.

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1,0k	1,25	1,6k	2,0k	2,5k	3,15
R (dB)	35,0	36,3	38,0	39,4	40,8	42,1	43,0	43,1	40,1	30,8	36,0	41,4	45,4	49,0	52,5	56,2
ΔCR	0	3	6	9	12	15	18	19	20	21	22	23	23	23	23	23
CR	23	26	29	32	35	38	41	42	43	44	45	46	46	46	46	46

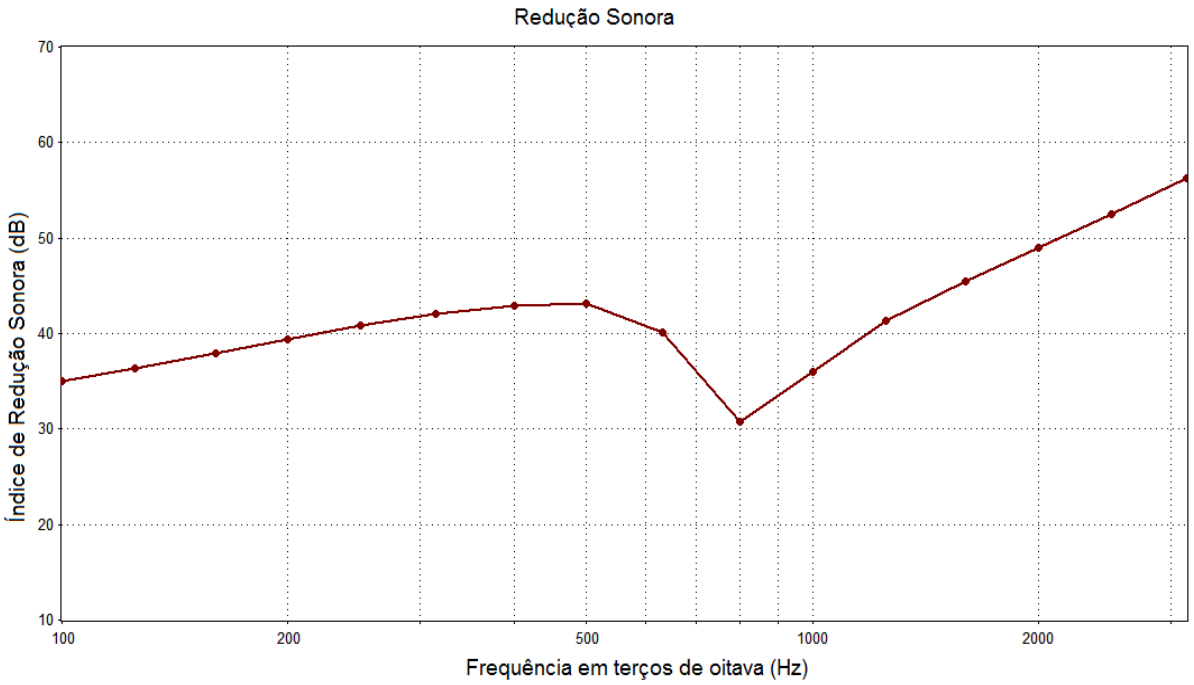


Figura 11 - Representação gráfica de R segundo o método de Sharp.

O modelo de previsão aplicado resultou num *Rw* de 42 dB.

4.3.4. MÉTODO DE LJUNGGREN MODIFICADO

Utilizando o método de Ljunggren modificado obtiveram-se os dados que se encontram na Tabela 9. A Figura 12 representa graficamente a evolução de *R* em função da frequência.

Tabela 9 - Resultados obtidos através do método de Ljunggren modificado.

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1,0k	1,25	1,6k	2,0k	2,5k	3,15
R (dB)	34,9	36,2	37,7	39,1	40,2	40,9	40,5	33,2	29,9	35,8	40,3	44,4	48,2	51,2	55,3	57,7
ΔCR	0	3	6	9	12	15	18	19	20	21	22	23	23	23	23	23
CR	22	25	28	31	34	37	40	41	42	43	44	45	45	45	45	45

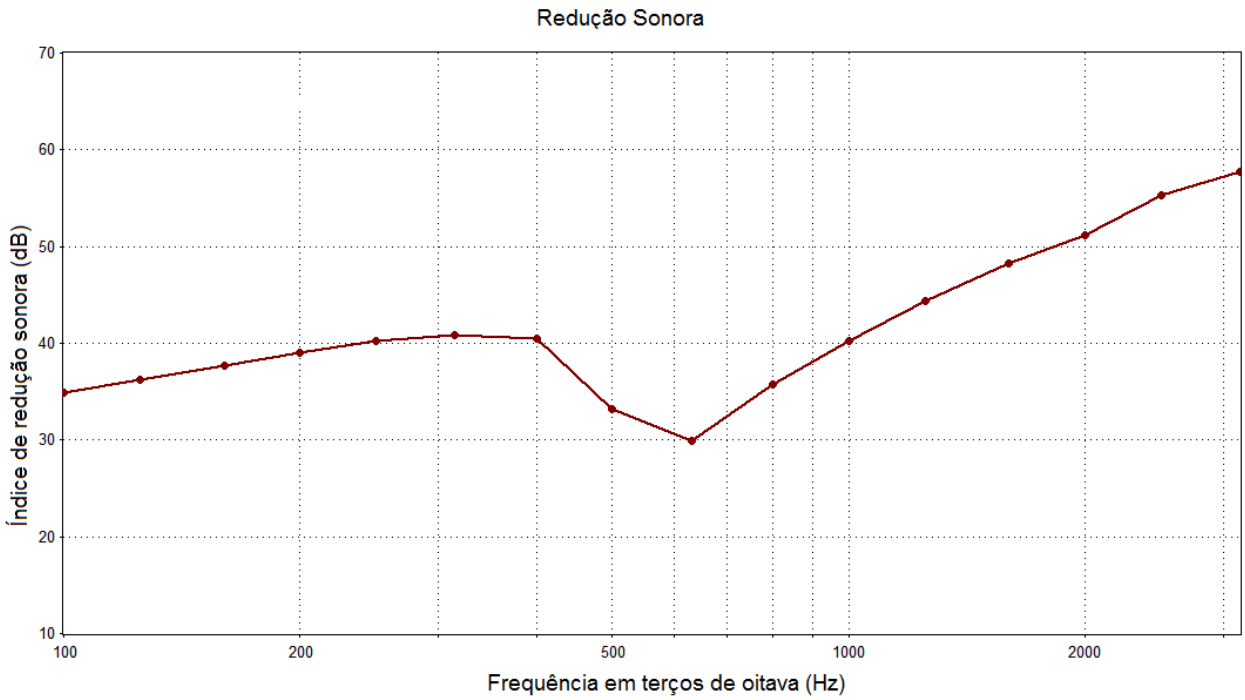


Figura 12 - Representação gráfica de R segundo o método de Ljunggren modificado.

O modelo de previsão aplicado resultou num *Rw* de 41 dB.

4.3.5. MÉTODO DE MOORE E LYON

Os dados relativos à aplicação do método de Moore e Lyon encontram-se sumarizados na Tabela 10 e representados graficamente na Figura 13.

Tabela 10 - Resultados obtidos através do método de Moore e Lyon.

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1,0k	1,25	1,6k	2,0k	2,5k	3,15
R (dB)	32,2	33,9	34,9	35,2	35,5	34,6	35,9	34,7	31,4	32,8	38,5	41,8	45,0	49,1	52,2	56,6
ΔCR	0	3	6	9	12	15	18	19	20	21	22	23	23	23	23	23
CR	20	23	26	29	32	35	38	39	40	41	42	43	43	43	43	43

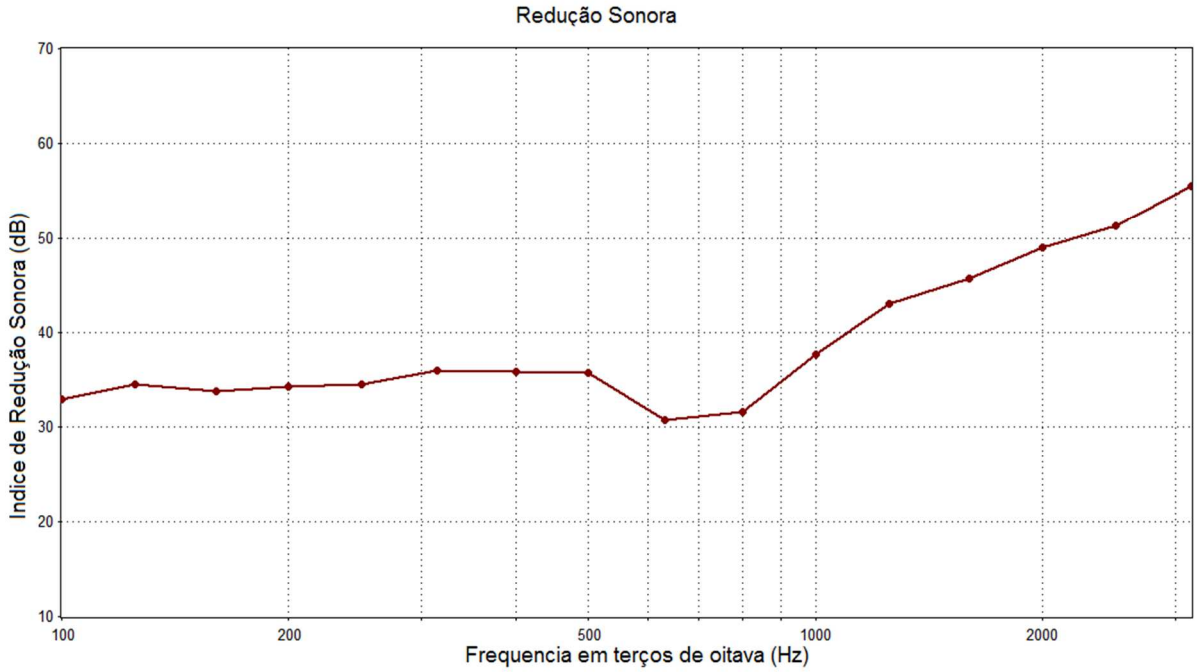


Figura 13 - Representação gráfica de R segundo o método de Moore e Lyon.

O modelo de previsão aplicado resultou num *Rw* de 39 dB.

4.4. CONCLUSÕES

Com a análise dos resultados obtidos utilizando os diferentes métodos supracitados, estima-se que a redução sonora de um elemento com características semelhantes ao elemento de estudo situa-se no intervalo de 39 a 42 dB. A aplicação do método de Sharp conduziu à obtenção do índice de redução sonora padronizado mais elevado. O modelo proposto por Moore e Lyon resultou na obtenção do valor mais baixo para o mesmo indicador.

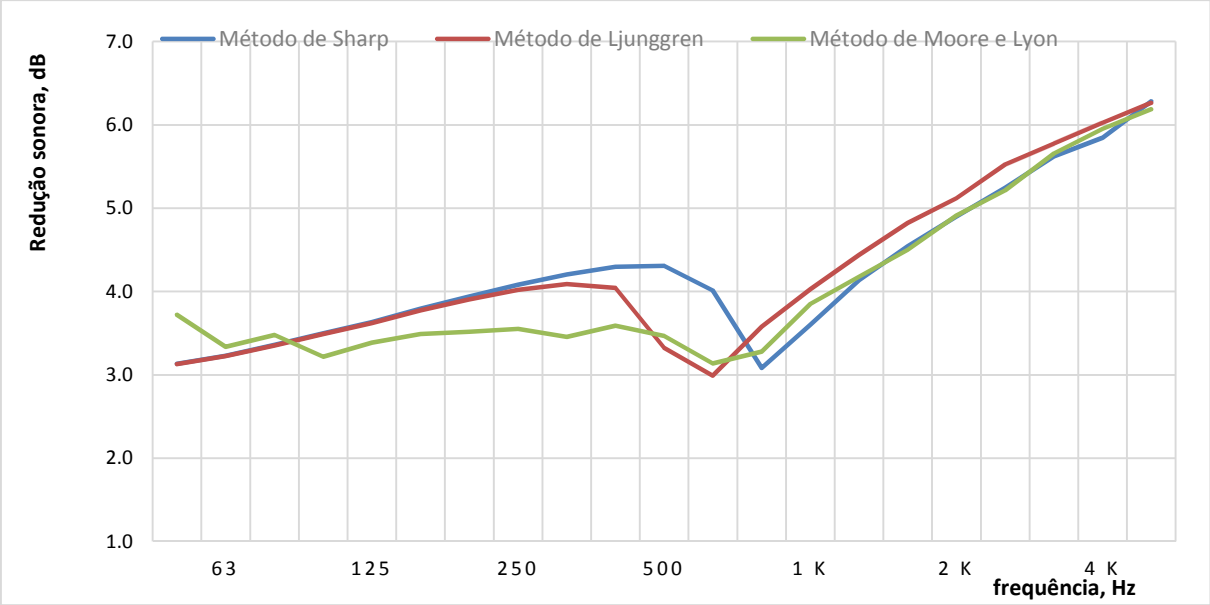


Figura 14 - Representação gráfica de R segundo os diferentes métodos.

A partir da representação gráfica constante na Figura 14 é possível analisar de forma comparativa o comportamento acústico, por bandas de 1/3 oitava, previsto pelos modelos aplicados para o mesmo elemento construtivo. Para frequências baixas o modelo proposto por Sharp prevê um desempenho semelhante ao de Ljunggren e superior ao definido recorrendo ao método de Moore e Lyon. A frequência crítica determinada pelos três modelos é semelhante e localiza-se entre a banda de frequência centrada nos 500 Hz e a centrada nos 1000 Hz. A partir deste ponto, as curvas de comportamento definidas pelo método Sharp e pelo de Moore e Lyon confluem sendo ligeiramente inferiores à previsão determinada a partir do método de Ljunggren.

É importante referir que os modelos não foram desenvolvidos para serem aplicados a elementos de tabique. Assim, os resultados estimados poderão distanciar-se dos valores a determinar experimentalmente. A importância da sua determinação prende-se com a sua utilidade na estimação do comportamento e na definição de uma ordem de grandeza orientadora para os ensaios a realizar.

Por outro lado, para a utilização destes métodos foi necessária a consideração de parâmetros relativos aos materiais constituintes da parede em tabique que não estão ainda bem caracterizados. A determinação exata dos mesmos implicaria a realização de ensaios adicionais.

5
A ANÁLISE EXPERIMENTAL

5.1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de uma metodologia de investigação experimental determina a configuração de um conjunto de ensaios com vista à compreensão e corroboração de uma premissa. Na situação descrita, a inexistência de informação ou investigação decorrente da análise de parâmetros acústicos caracterizadores de elementos de construção tradicional justifica os procedimentos adotados e apresentados em seguida.

O capítulo seguinte pretende apresentar as condições dos ensaios realizados. Para o efeito, é igualmente necessário proceder ao levantamento das soluções de organização dos espaços, à descrição tecnológica das soluções construtivas envolvidas e à caracterização e pormenorização de ligações entre elementos.

5.2. ANÁLISE LABORATORIAL

5.2.1. INSTALAÇÕES LABORATORIAIS

As instalações utilizadas para os ensaios correspondem a três compartimentos pertencentes ao Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, estrutura integrante do Instituto da Construção. Os compartimentos, denominados por câmaras reverberantes, encontram-se dispostos de acordo com a Figura 15.

As câmaras são construídas em betão-armado e encontram-se estabilizadas sobre apoios anti vibráteis. Os mesmos apoios permitem a sua elevação, em caso de necessidade, e garantem a separação física das estruturas das câmaras face à estrutura do edifício onde se encontram integradas. Todos os compartimentos são independentes, minimizando a propagação de transmissões marginais, e solidarizados recorrendo a um elemento elástico disposto nas diferentes juntas de dilatação. As superfícies interiores são em betão-à-vista e não contemplam revestimentos adicionais. Os volumes individuais de cada compartimento são distintos e desenvolvem-se em corpos irregulares, apresentando uma implementação trapezoidal. A estrutura de separação entre salas contém aberturas, com, aproximadamente, $10m^2$, que permitem a instalação de pavimentos ou de paredes de estudo. A Tabela 11 apresenta as características geométricas da câmara recetora 1 (R1) e da câmara emissora 1 (E1), utilizadas na avaliação experimental dos parâmetros acústicos relativos ao elemento em estudo.

Tabela 11 - Características geométricas das câmaras reverberantes R1 e E1.

	R1	**E1**
Comprimento máximo (m)	7,65	6,15
Comprimento mínimo (m)	6,90	5,85
Largura máxima (m)	6,10	4,00
Largura mínima (m)	5,55	3,40
Altura média (m)	4,65	4,65
Volume (m^3)	211	102

5.2.2. EQUIPAMENTOS

A realização dos ensaios de determinação da redução sonora em laboratório requer a utilização de equipamentos técnicos específicos. O registo dos níveis de pressão sonora, ruídos de fundo e/ou tempos de reverberação é realizado através de um microfone ligado a um sonómetro. O calibrador, tal como o nome indica, é concebido para a calibração de sonómetros. Este último deteta a pressão atmosférica e corrige a amplitude do sinal de saída para que o nível sonoro emitido seja constante. O campo sonoro no compartimento de teste é estimulado recorrendo à utilização do amplificador ou fonte sonora.

No domínio dos ensaios realizados recorreu-se à utilização de um medidor de temperatura e humidade relativa e ainda de medidores de humidade superficial e em profundidade.

Tabela 12 - Equipamentos utilizados nos ensaios laboratoriais.

Equipamento	**Marca**	**Modelo**	**Observações**
Sonómetro	01 dB	Solo Premium	
Microfone	01 dB	MCE 212	
Pré-amplificador	01 dB	PRE 21S	Incorporado no sonómetro
Calibrador	Rion	NC-74	
Fonte Sonora	JBL	EON	
Higrómetro digital	Protimeter	Digital Higrometer	
Medidor de humidade superficial	Protimeter	Mini III	
Medidor de humidade em profundidade	PCE	PMI 1	*Pinless moisture meter*
Software			Necessário à transferência de dados

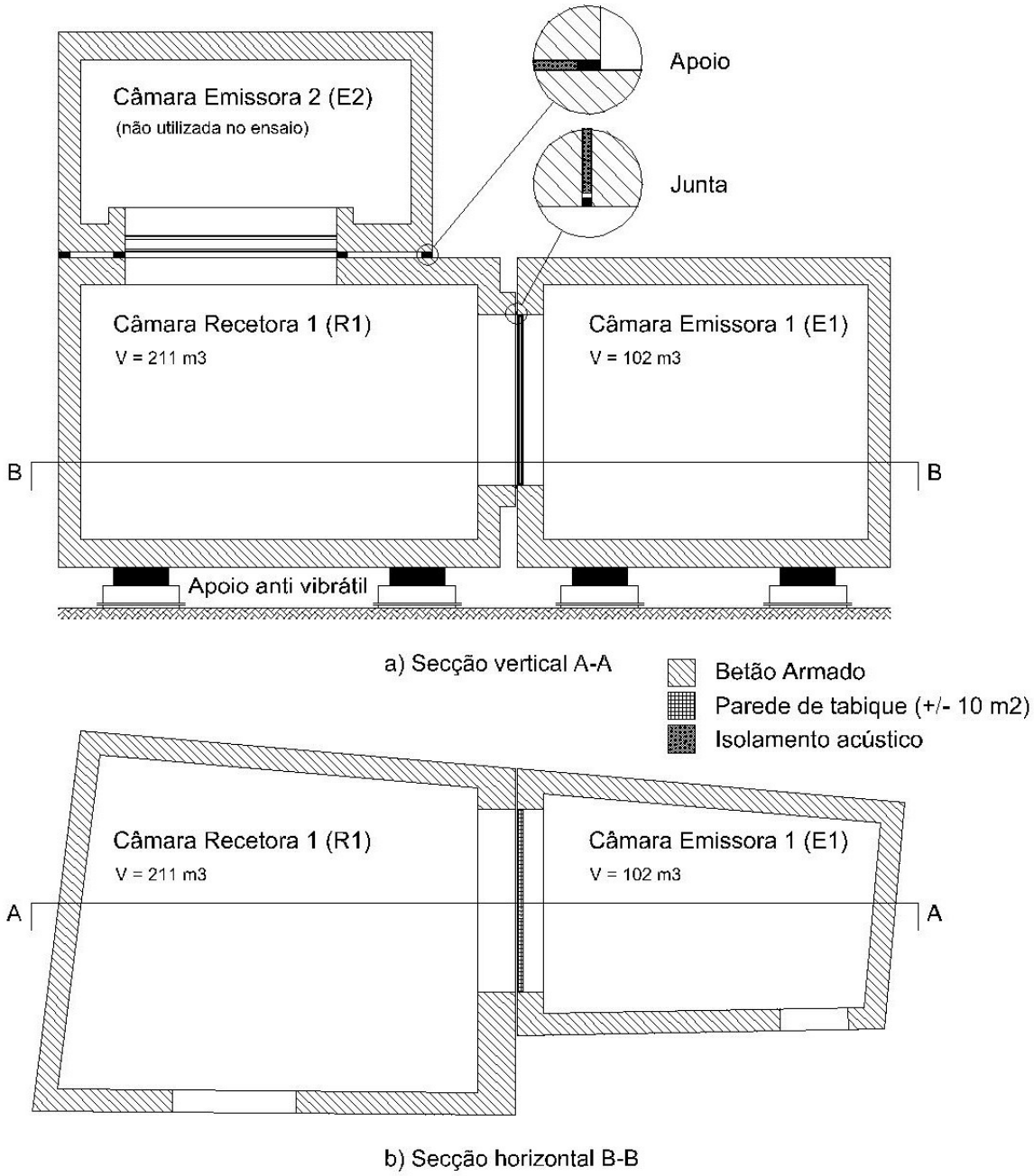


Figura 15 - Representação esquemática das câmaras reverberantes. Secção vertical e horizontal.

5.2.3. CONDIÇÕES DE MONTAGEM DO ELEMENTO EM TABIQUE.

O elemento de tabique detém dimensões tais que permitem a sua instalação e montagem ocupando a totalidade da abertura de teste. A sua construção atendeu à definição cuidada das condições de ligação e selagem de juntas e do perímetro em contacto com a estrutura da câmara. O elemento divisório foi posicionado atendendo à junta existente na gola de montagem.

A amostra ensaiada foi integralmente construída no interior do laboratório. A sua construção teve início na fixação de uma moldura em madeira na gola de montagem, recorrendo a uma fita porosa contínua e aderente. A abertura definida pelo aro em madeira foi preenchida com um duplo tabuado de tábuas costaneiras (Figura 16) com características definidas em capítulo anterior. A solidarização do tabuado vertical com o elemento limítrofe foi conseguida através de elementos metálicos. A estrutura foi posteriormente reforçada com uma segunda camada de tábuas de madeira dispostas na diagonal. Ambas as superfícies foram revestidas com um fasquiado de madeira fino.



Figura 16 - Disposição do tabuado de preenchimento; vertical (esquerda); diagonal (direita).

O revestimento foi finalizado recorrendo a uma argamassa de areia, cal e saibro. A argamassa foi aplicada em duas camadas distintas, correspondentes ao reboco e ao estanhado, e de forma faseada permitindo a redução do tempo de secagem do elemento construtivo. O traço utilizado para as diferentes camadas consta na Tabela 6. O elemento de tabique em estudo foi selado na abertura, entre as câmaras reverberantes R1 e E1, de acordo com o esquematizado na Figura 19.



Figura 17 - Diferentes fases de construção do elemento em tabique.

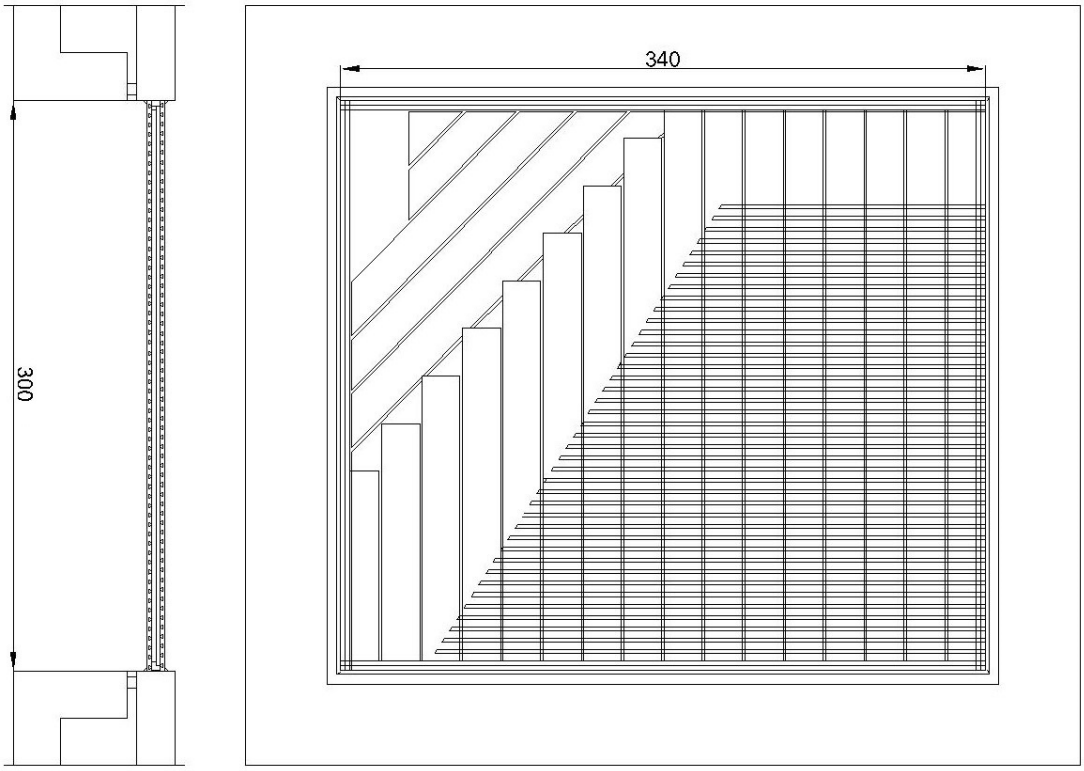


Figura 18 - Esquema representativo da montagem do elemento em tabique (cm); Corte (esquerda); Alçado (direita).

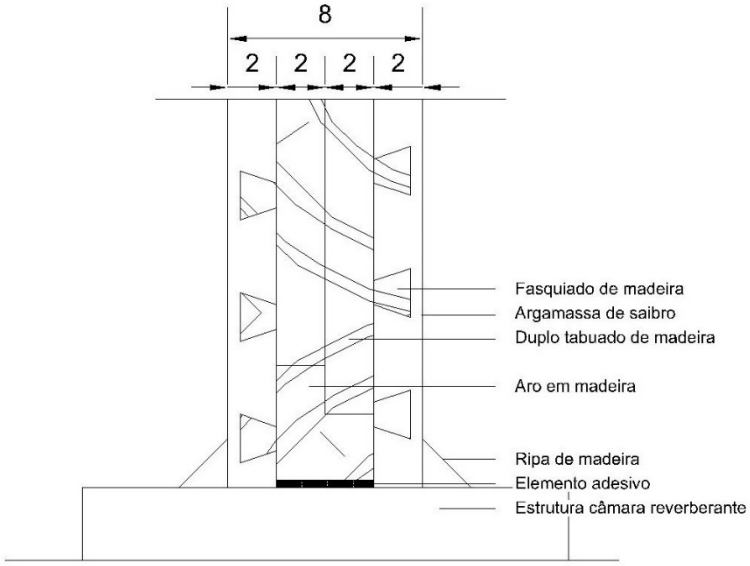


Figura 19 - Esquema representativo da montagem do elemento em tabique; Pormenor da ligação (cm).

5.2.4. CONDIÇÕES DE ENSAIO

As condições de medição em laboratório do isolamento sonoro de qualquer elemento construtivo são definidas na normativa ISO 10140 [46]. As diferentes partes do regulamento simplificam o processo de medição e asseguram a consistência dos ensaios. As mesmas especificam os requisitos de preparação e montagem dos elementos a ensaiar, definem os procedimentos e técnicas para a determinação do isolamento sonoro a sons aéreos e a sons de percussão, e contemplam os requisitos das instalações e equipamentos envolvidos no processo.

A determinação do isolamento sonoro a sons aéreos é realizada em bandas de 1/3 de oitava com as seguintes frequências centrais, em *hertz*: 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 3150, 4000, 5000. Em situações onde é necessário proceder a medições em baixas frequências é possível incluir no intervalo as bandas de 1/3 de oitava de 50, 63 e 80 hz.

A emissão sonora é gerada por uma única fonte posicionada em dois locais distintos no compartimento emissor, câmara E1. A distância entre diferentes pontos de emissão sonora deve ser maior do que 1,4m e a fonte sonora deve estar suficientemente afastada da envolvente do compartimento. O posicionamento referido garante a existência de um campo difuso no compartimento emissor.

A medição e o registo do mesmo campo sonoro são conseguidos recorrendo ao posicionamento de um microfone em cinco pontos fixos em cada compartimento, por cada posição da fonte. O posicionamento do microfone deve atender a uma distribuição irregular e considerar a captação do sinal sonoro em planos distintos. Para isso, deve garantir um distanciamento mínimo de 0,7m entre pontos de medição, face à envolvente da câmara reverberante e relativamente aos difusores existentes no local. O mesmo posicionamento atende ainda à distância mínima de separação de 1m entre o equipamento de registo e o elemento de teste e o equipamento de registo e a fonte sonora.

As medições devem ser repetidas garantindo a uniformidade dos ensaios realizados. Após a instalação da fonte na primeira posição, procede-se à medição dos níveis de pressão sonora na câmara recetora e emissora, evitando a sua movimentação. O princípio é repetido para a segunda localização da fonte.

O procedimento adotado contempla a sequenciação das medições do ruído de fundo, do tempo de reverberação e dos níveis de pressão sonora. Assim, a determinação do ruído de fundo considera o registo do ambiente sonoro em cinco pontos distintos, e em planos diferentes, no interior da câmara recetora. O tempo de reverberação da mesma câmara é determinado recorrendo a uma fonte sonora (balão), posicionada em dois pontos distintos, e ao posicionamento do sonómetro em seis locais, repetidos para ambas as posições da fonte. Os resultados obtidos são apresentados no capítulo 6.

Tabela 13 - Sumarização das condições de ensaio em laboratório.

Compartimento Emissor (E1)	Compartimento Recetor (R1)
• 2 Posições de fonte sonora; • 5 Registos de nível de pressão sonora por posição de fonte;	• 5 Registos de nível de pressão sonora por posição de fonte; • 5 Registos de ruído de fundo; • Medição de tempo de reverberação: ▪ 2 Posições de fonte (balão); ▪ 6 Registos de tempo de reverberação por posição de fonte;

5.2.5. SÍNTESE E OUTRAS CONSIDERAÇÕES

A avaliação experimental do comportamento do elemento em tabique foi conduzida em laboratório, de acordo com a norma ISO 10140-2. A parte 5 do mesmo documento regulamentar especifica os requisitos das câmaras de ensaio e dos equipamentos a utilizar.

A parede de tabique foi construída no interior das câmaras de ensaio atendendo às características físicas e geométricas do elemento construtivo-tipo e às propriedades dos materiais naturais que a constituem. Na sua definição foi desenhado um núcleo em madeira de pinho constituído por um duplo tabuado de tábuas costaneiras com dois centímetros de espessura e revestido por fasquios de madeira. O reboco de revestimento foi realizado recorrendo a uma argamassa de saibro, areia e cal e finalizado por um barramento de cal. No entanto, a construção da parede não contemplou a execução de um rodapé.

A secagem do elemento construtivo resultou no aparecimento de fissuras ao longo de toda a parede. No entanto, a análise cuidada do limite do elemento não verificou a existência de fissuras na ligação da parede com a abertura de teste nas câmaras reverberantes.

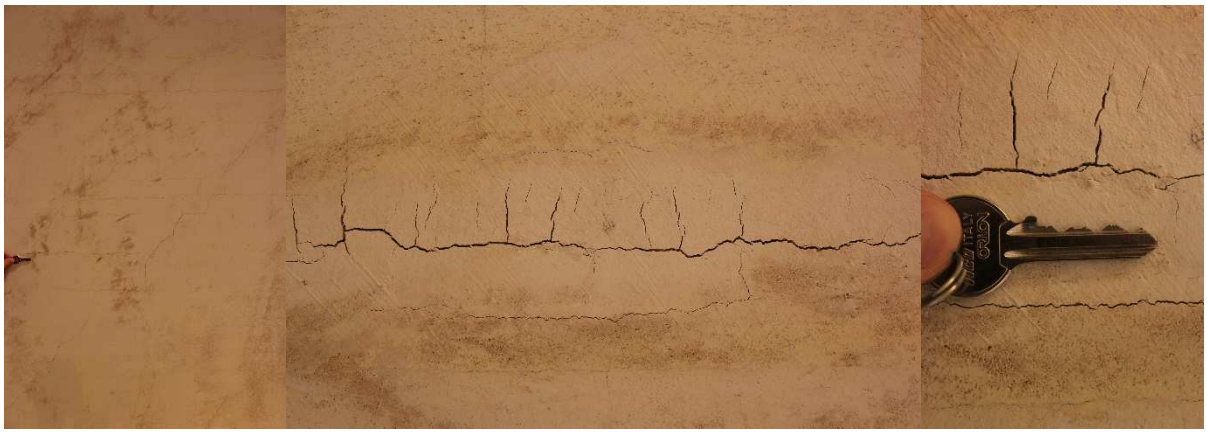


Figura 20 - Fissuração da parede tabique.

A construção do elemento em laboratório não envolveu mão-de-obra especializada, uma vez que a utilização de materiais como a madeira e a aplicação de reboco, não sendo necessariamente igual ao tradicional, é do domínio corrente. Contudo, com a tarefa foi realizada por dois homens num prazo de dezasseis horas, o rendimento associado à construção de 10 m^2 de parede foi, aproximadamente, 3,2 homem*hora/m^2. As condições de trabalho na situação descrita, derivadas de um ambiente controlado, são próximas das condições ideais, sendo, por isso, natural a definição rigorosa do elemento de teste.

O concurso realizado para a construção da parede de tabique, contemplou a recolha de mapas de tarefas e quantidades e de orçamentos. As diferentes propostas analisadas apresentaram preços distintos e variáveis entre os 68,10 €/m^2 e os 159,52 €/m^2. A construção da parede foi entregue à empresa que apresentou o preço mais baixo.

5.3. ANÁLISE *IN SITU*

5.3.1. DESCRIÇÃO TECNOLÓGICA DOS CASOS DE ESTUDO

5.3.1.1. Fração A

O edifício encontra-se localizado na Rua Central de Francos pertencente à freguesia de Ramalde na cidade do Porto. É detentor de propriedades transversais a soluções arquitetónicas e construtivas tradicionais mas não constitui um exemplar da tradicional Casa Burguesa.

A fração em estudo é uma moradia unifamiliar isolada com cerca de 70 m^2 de área de implantação. A sua envolvente é maioritariamente urbana e o acesso é feito a partir do arruamento público proporcionando entrada pelo alçado lateral esquerdo. O seu corpo único, isolado e de implementação regular, funciona em três pisos com piso térreo, um piso elevado e um desvão utilizável. No rés-do-chão localiza-se a cozinha, a sala-de-estar, um compartimento de arrumos, um quarto e um quarto de banho, e o primeiro piso é constituído por quatro compartimentos utilizados como locais de recolha e descanso. A fração conta ainda com um desvão de sótão compartimentado.

Tabela 14 - Caracterização construtiva do edifício onde se insere a fração A.

Elemento construtivo		Descrição
Fundação		Fundação direta através de ensoleiramento geral.
Estrutura		Paredes de meação portantes em alvenaria de blocos.
Panos opacos	Constituição	*Paredes de fachada*: Alvenaria de pedra aparelhada. *Paredes interiores:* panos simples em tabique simples de duplo tabuado (Figura 18).
	Revestimentos	*Zonas húmidas*: Soluções de cerâmico. *Zonas de circulação e zonas correntes:* Soluções rebocadas estanhadas e pintadas.
Cobertura		Constituída por telha de marselha, apoiadas sobre ripas executadas em madeira. Ripas fixadas sobre a estrutura de cobertura em madeira.
Pavimentos	Constituição	Estrutura materializada por vigamento de madeira esquadriada (Figura 18).
	Revestimentos	*Zonas húmidas, zonas de circulação e zonas correntes:* Elementos de madeira (tipo soalho) à vista ou revestidos com linóleo.
Vãos	Portas	*Portas exteriores:* esguias e robustas, constituídas por duas folhas com pequenos postigos, com caixilhos envidraçados e protegidos por grades de ferro *Portas interiores*: em madeira com uma folha e encimadas por bandeira com caixilho de vidro.
	Vãos envidraçados	Janelas de guilhotina com caixilharias em madeira e vidro simples. Peitoris e ombreiras em madeira. Dispositivos de proteção interiores correspondentes a portadas interiores em madeira.

Nota: os dados constantes na tabela foram obtidos através da inspeção visual dos elementos e/ou de informações cedidas pelo proprietário.

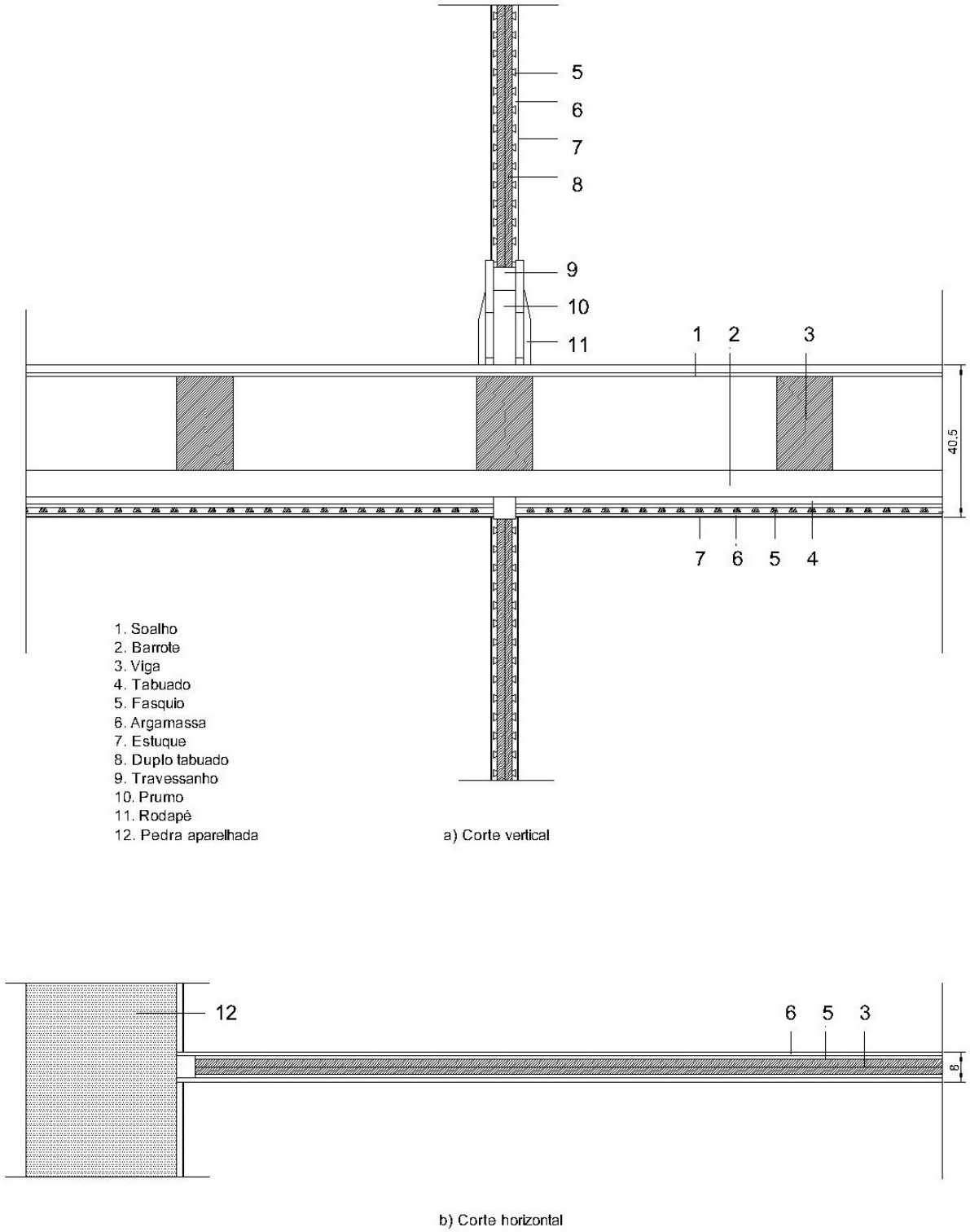


Figura 21 - Pormenorização das ligações do elemento em estudo (cm).

5.3.1.2. Fração B

A fração habitacional encontra-se localizada na Rua de Belomonte pertencente à freguesia de São Nicolau e ao centro histórico cidade do Porto. O edifício onde se insere é detentor de soluções arquitetónicas e construtivas que conferem identidade ao edificado da cidade e constitui um exemplo da tradicional Casa Burguesa.

Ao nível funcional, o edifício onde se insere a fração em estudo constitui uma moradia multifamiliar de carácter multifuncional. O edifício é intramuros, de parcela estreita e o seu corpo, de implementação regular, funciona em 4 pisos. No rés-do-chão, à cota da rua, encontra-se instalado o Teatro de Belomonte.

Os pisos superiores são adaptados à habitação. A fração está localizada no terceiro piso do edifício e contempla um recuado compartimentado que permite a instalação de três quartos. À cota de entrada, a fração incluí um amplo *hall*, uma sala, três quartos, uma cozinha e dois quartos-de-banho.

Tabela 15 - Caracterização construtiva do edifício onde se insere a fração B.

Elemento construtivo		Descrição
Fundação		Fundação direta através de ensoleiramento geral.
Estrutura		Paredes de meação portantes em alvenaria de pedra de aparelho irregular.
Panos opacos	Constituição	*Paredes de fachada*: Alvenaria de pedra aparelhada. *Paredes interiores e paredes exteriores do recuado:* panos simples em tabique simples de duplo tabuado.
	Revestimentos	*Zonas húmidas*: Soluções de cerâmico. *Zonas de circulação e zonas correntes:* Soluções rebocadas estanhadas e pintadas.
Cobertura		Constituída por telha de marselha, apoiadas sobre ripas executadas em madeira. Ripas fixadas sobre a estrutura de cobertura em madeira. Telhado de quatro águas.
Pavimentos	Constituição	Estrutura materializada por um vigamento de madeira de paus rolados.
	Revestimentos	*Zonas húmidas, zonas de circulação e zonas correntes:* Elementos de madeira (tipo soalho) à vista ou revestidos com linóleo.
Vãos	Portas	*Portas exteriores:* esguias e robustas, constituídas por duas folhas com pequenos postigos, com caixilhos envidraçados e protegidos por grades de ferro *Portas interiores*: em madeira com uma folha e encimadas por bandeira com caixilho de vidro.
	Vãos envidraçados	Janelas de guilhotina com caixilharias em madeira e vidro simples. Peitoris e ombreiras em madeira. Dispositivos de proteção interiores correspondentes a portadas interiores em madeira.

Nota: os dados constantes na tabela foram obtidos através da inspeção visual dos elementos, de informações cedidas pelo proprietário e/ou através de informações relativas a edifícios pertencentes à mesma época construtiva.

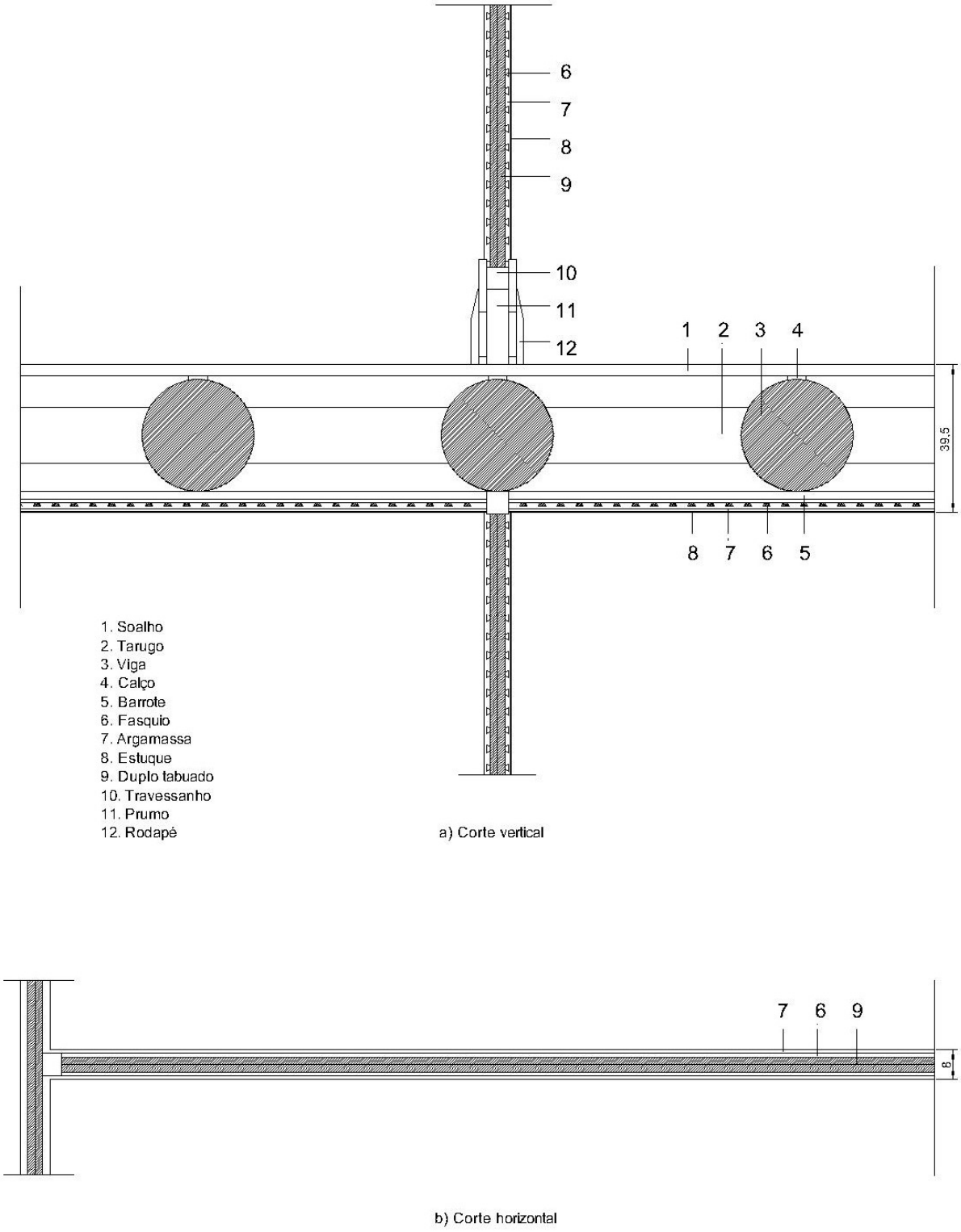


Figura 22 - Pormenorização da ligação entre elementos (cm).

5.3.2. ELEMENTOS A ENSAIAR

5.3.2.1. Fração A

O edifício descrito encontra-se atualmente habitado. Foi alvo de intervenções pontuais ao longo da sua existência mas mantém todas as soluções construtivas originais. No seu interior, é percetível a continuidade das soluções tecnológicas.

As medições foram conduzidas no segundo piso da habitação. Constituído por quatro compartimentos independentes, permitiu o ensaio de três elementos distintos. A figura seguinte representa a disposição geométrica dos elementos ensaiados e dos compartimentos onde se inserem.

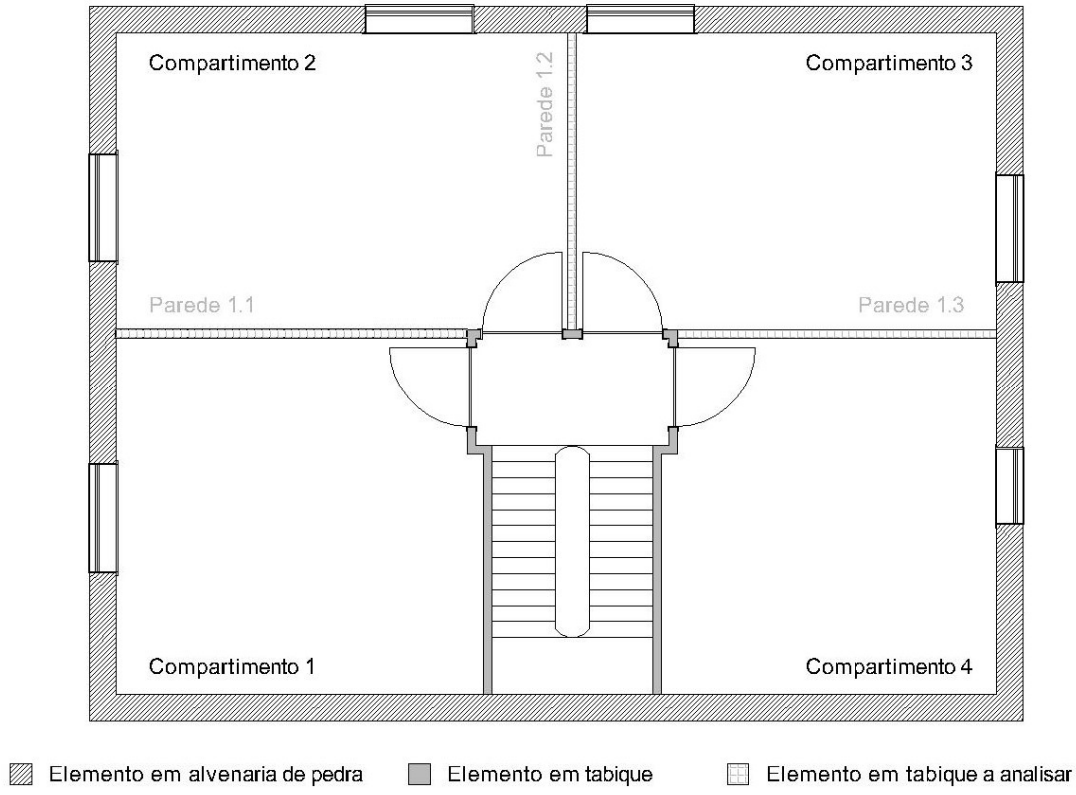


Figura 23 - Representação esquemática do local onde foram realizadas as medições. Fração A.

Os elementos de teste encontram-se em boas condições de conservação. Contemplam a existência pontual de pequenas fissuras no reboco e pintura mas não contêm aberturas de grandes dimensões. A análise da envolvente dos elementos de estudo determinou a observação de vãos envidraçados em mau estado com vidros partidos ou estrutura de janela em madeira danificada no compartimento 3. No entanto, as portadas interiores em madeira de todos os vãos encontram-se robustas e sólidas. As portas interiores contemplam uma bandeira envidraçada e têm uma frincha inferior com 1,5 cm necessária à ventilação dos compartimentos. Os rodapés estão em bom estado de conservação e não se verificou a existência de fissuras no limite de união entre as paredes e os pavimentos ou entre as paredes e o teto.

5.3.2.2. Fração B

As medições foram conduzidas no primeiro e segundo piso da fração. Na totalidade foi possível avaliar o desempenho de três elementos construtivos, um no primeiro piso e dois no segundo. A figura seguinte representa a disposição física e geométrica dos elementos ensaiados e dos compartimentos onde se inserem.

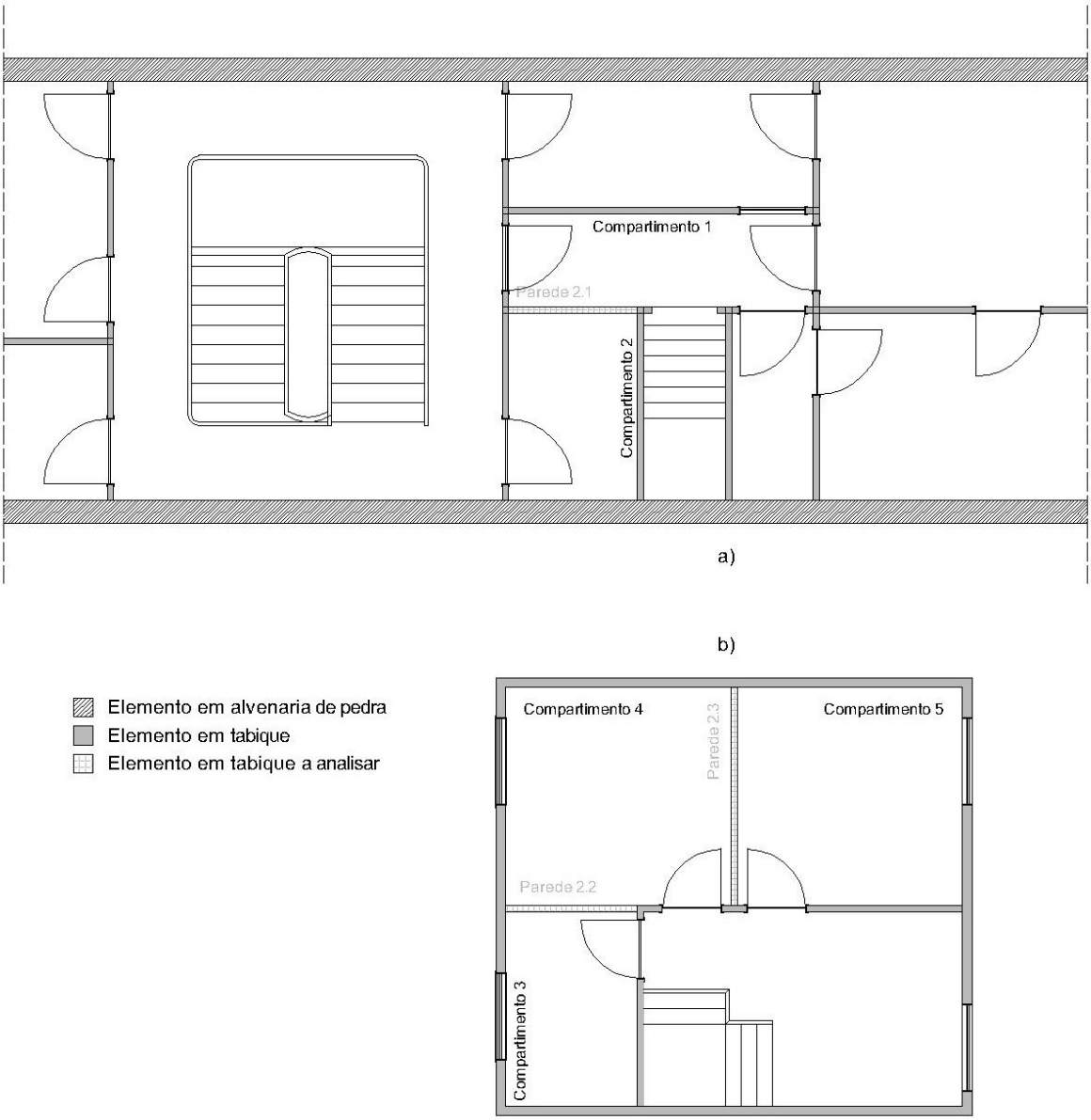


Figura 24 - Representação esquemática do local onde foram realizadas as medições. Fração B.

O edifício foi alvo de intervenções pontuais ao longo da sua existência com o intuito de manter as soluções construtivas originais. A inspeção visual realizada no seu interior revela que, apesar das intervenções realizadas e de pertencer ao mesmo locatário há várias décadas, necessita de intervenções profundas ao nível de diferentes elementos construtivos.

No primeiro piso, a envolvente da parede de teste revela sinais de desgaste decorrente da utilização da habitação. As pinturas e rebocos apresentam fissuras de pequenas dimensões. Os rodapés estão em bom estado de conservação e as ligações entre as paredes pavimentos e paredes e tetos apresentam-se sólidas e sem aberturas. Correspondendo a uma zona corrente de utilização, os elementos de madeira, como as portas e as janelas, constantes neste piso, foram alvos de manutenção periódica.

Não obstante, a inspeção realizada no segundo piso, coincidente com o recuado do edifício, permitiu a observação de sinais contrários. Os elementos construtivos e os compartimentos definidores da sua envolvente apresentam sinais de degradação (Figura 25). O facto de os inquilinos não necessitarem de todo o espaço da fração na sua vivência diária, determinou o abandono dos mesmos compartimentos e a sua progressiva deterioração.



Figura 25 - Sinais de deterioração da fração em estudo.

As paredes e pavimentos interiores encontram-se em razoável estado de conservação. No entanto, toda a envolvente exterior necessita de obras de recuperação. As paredes e tetos contem diversos pontos onde o reboco se encontra destacado. Sendo possível observar o interior dos elementos construtivos, os sinais de envelhecimento dos materiais que os compõe são também visíveis. Neste caso, e relativamente aos elementos referidos, a madeira que compõe a sua estrutura encontrava-se em mau estado comprometendo o seu correto funcionamento. Os compartimentos analisados incluem ainda vãos envidraçados com vidros partidos e madeira de caixilhos e portadas interiores degradadas, e portas interiores empenadas.

5.3.3. CONDIÇÕES DE ENSAIO

As condições de medição *in-situ* do isolamento sonoro a ruídos aéreos de qualquer elemento construtivo são definidas na normativa EN ISO 140-4 [47]. O método permite determinar os valores de isolamento sonoro em função da frequência e obter um índice único caracterizador do comportamento acústico do elemento.

Os ensaios foram realizados em compartimentos de configurações e dimensões idênticas que contêm difusores (mobiliário). A área total dos difusores contidos no compartimento é superior ao mínimo sugerido pela regulamentação.

O campo sonoro produzido no compartimento tem um espectro contínuo e não apresenta diferenças superiores a 6dB entre bandas adjacentes. A potência sonora produzida considera uma diferença de 10dB no compartimento recetor entre o nível de pressão sonora e o nível de ruído de fundo para cada banda de frequências.

As medições, foram efetuadas por bandas de um terço de oitava, utilizando apenas uma fonte sonora posicionada em dois locais. As posições de fonte foram estabelecidas de forma a criar um campo sonoro difuso. Para isso, o posicionamento atendeu ao afastamento da fonte do elemento separador e de elementos marginais que pudessem influenciar a transmissão sonora.

Para determinar o nível médio de pressão sonora nos compartimentos foi utilizado um conjunto de microfones fixos distribuídos uniformemente e em planos distintos. O seu posicionamento atendeu ao distanciamento mínimo de 0,7m entre microfones, de 0,5m entre microfones e a envolvente e de 1m entre microfones e a fonte sonora. Em cada posição, o intervalo médio de tempo de medição foi de 15s. Foram realizadas 10 medições para cada elemento, correspondentes a cinco medições para cada posição do altifalante.

De forma a facilitar o processo de medição e minimizar as movimentações da fonte sonora procedeu-se, em algumas situações, ao seu posicionamento em compartimentos intermédios. Assim, o mesmo compartimento constituiu o local emissor para a determinação da redução sonora de dois elementos construtivos. As medições foram repetidas na direção oposta, trocando o compartimento emissor e o recetor, para um dos elementos de teste.

Ao nível da envolvente externa dos edifícios, o local onde se insere a fração A é caracterizado por um ambiente sonoro estimulado pelo ruído rodoviário e ferroviário, uma vez que o terreno onde o edifício está implementado é confrontante com a via de cintura interna (VCI) e com a linha da rede de metro da cidade do Porto. O local de implantação da fração B é predominante influenciado pelo ruído rodoviário, influenciado pelo ruído produzido pela rua em calçada de granito.

5.3.4. EQUIPAMENTOS

Os equipamentos correspondem, em parte, aos utilizados nos ensaios laboratoriais apresentados no subcapítulo 5.2.2. À exceção dos medidores de humidade superficial e de humidade em profundidade todos os equipamentos foram aplicados na determinação do isolamento sonoro das paredes de tabique.

5.3.5. SÍNTESE E OUTRAS CONSIDERAÇÕES

A escolha dos locais de ensaio para a caracterização acústica *in-situ* do elemento em tabique atendeu à definição de elementos de teste semelhantes aos ensaiados em laboratório. A procura resultou em seis paredes de tabique distribuídas por duas frações distintas.

A fração A permitiu a realização de quatro ensaios e a caracterização de três elementos construtivos. Os elementos construtivos confrontantes com os elementos ensaiados encontravam-se em bom estado de conservação não revelando indícios de desgaste ou saturação. A envolvente aos elementos testados contemplava situações pontuais de vãos envidraçados danificados. A fração B permitiu o ensaio de três paredes em dois pisos distintos. Ao contrário do verificado no primeiro piso, a envolvente dos elementos construtivos do segundo piso estava degradada e com sinais de abandono.

Em suma, apesar dos elementos construtivos serem iguais, as condições de envolvente dos diferentes ensaios diferem entre si; não apenas entre os ensaios *in situ* e em laboratório, mas também entre os ensaios das diversas paredes da mesma fração.

6
OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

6.1. INTRODUÇÃO

A determinação e a quantificação das propriedades acústicas de qualquer elemento pressupõe, no âmbito da metodologia aplicada, a realização de ensaios caracterizadores. A combinação de ensaios laboratoriais com ensaios realizados *in-situ* traduz-se na compilação de informação detalhada e abrangente.

O capítulo seguinte destina-se à apresentação dos resultados obtidos através da análise experimental conduzida, assim como, à explicação do processo de determinação dos índices únicos de avaliação de desempenho dos elementos analisados.

6.2. RESULTADOS LABORATORIAIS

6.2.1. PLANO DE ENSAIOS

O plano de trabalhos associado à construção da parede de tabique permitiu a recolha de dados e a realização de medições nas diferentes fases da sua construção. A tabela seguinte resume as condições de ensaio e organiza os ensaios realizados em laboratório.

Tabela 16 - Plano de ensaios aplicado e respetivas condições de ensaio.

Ensaio	Elemento	Tempo de secagem (h)	T (ºC)	Humidade Relativa (%)	Humidade Superficial (%)	Humidade em profundidade (%)
1	Estrutura madeira		17	65		
2	Estrutura madeira	0	17	65	100	100
3	Reboco com 1cm	12	17	73	96	100
4		0	17	71	100	100
5	Estrutura madeira	12	17	71	80	100
6	Reboco com 2cm	96	17	61	60	94
7		**192**	**17**	**63**	**40**	**78**

Nota: O ensaio 7 é representativo do comportamento do elemento de tabique.

6.2.2. TRATAMENTO DE RESULTADOS RELATIVOS À DETERMINAÇÃO EM LABORATÓRIO DO ÍNDICE DE REDUÇÃO SONORA, R_w.

Os resultados a apresentar pretendem a determinação do índice de redução sonora a ruídos de condução aérea. O processo de cálculo apresentado é aplicado aos valores resultantes do ensaio 7.

A sua obtenção inicia-se com medição do nível médio da pressão sonora L no compartimento emissor e no compartimento recetor. O parâmetro L corresponde à média energética, no espaço e no tempo, dos níveis de pressão sonora L_i medidos para as n diferentes posições de medição no compartimento e é dado pela seguinte expressão:

$$L = 10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} 10^{Li/10}\right)\ (dB) \qquad (6.1)$$

Os resultados da medição foram obtidos por bandas de 1/3 oitava, de acordo com o especificado nas normas NP EN ISO 140-4 [47].

Tabela 17 - Níveis médios de pressão sonora medidos na câmara reverberante emissora (L_1) e recetora (L_2).

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1,0k	1,25	1,6k	2,0k	2,5k	3,15
L_1	77,4	79,8	81,5	82,9	81,8	84,0	82,6	82,5	83,1	80,8	77,7	76,6	79,5	78,2	74,8	79,8
L_2	50,8	49,5	49,5	49,7	49,8	51,2	49,1	48,1	46,5	41,7	36,2	32,6	33,4	31,6	27,8	29,5

6.2.2.1. Correção do ruído de fundo

O registo do ruído de fundo no compartimento recetor é realizado para identificar possíveis perturbações, exteriores ao local de ensaio ou associadas aos equipamentos de medição e recolha de dados, no seu campo sonoro.

A diferença entre o nível sonoro medido e o ruído de fundo deve ser superior a 6 dB. Para além do mínimo exigido, a norma recomenda também uma diferença mínima de 10 dB para que não seja necessária a aplicação de qualquer tipo de correção. Se o nível de ruído de fundo estiver abaixo do nível de sinal, no intervalo de valores referido, as correções a aplicar devem ser calculadas de acordo com:

$$L = 10\log\left(10^{Lsb/10} - 10^{Lb/10}\right)\ (dB) \qquad (6.2)$$

em que L (dB) é o nível de sinal corrigido, L_{sb} (dB) o nível de sinal e do ruído de fundo combinados e L_b (dB) o nível de ruído de fundo. No caso em que a diferença especificada é inferior a 6 dB, o nível de pressão sonora medido deve contemplar uma correção de 1,3 dB.

Tabela 18 - Níveis de pressão sonora corrigidos, obtidos na câmara recetora.

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1,0k	1,25	1,6k	2,0k	2,5k	3,15
L_{sb}	50,8	49,5	49,5	49,7	49,8	51,2	49,1	48,1	46,5	41,7	36,2	32,6	33,4	31,6	27,8	29,5
L_b	17,6	14,4	8,7	5,5	6,8	8,1	2,1	1,2	0,7	0,9	1,3	2,3	2,3	2,5	3,0	3,5
L_{sb} - L_b	33,2	35,1	40,8	44,2	43,0	43,1	47,0	46,9	45,8	40,8	34,9	30,3	31,2	29,1	24,8	26,0
L_2	50,8	49,5	49,5	49,7	49,8	51,2	49,1	48,1	46,5	41,7	36,2	32,6	33,4	31,6	27,8	29,5

6.2.2.2. Determinação do tempo de reverberação

A medição do tempo de reverberação foi realizada no compartimento recetor. Por definição, o tempo de reverberação é o tempo em segundos, *s*, que o nível de pressão sonora demora a decair 60 dB (T_{60}). No entanto, a medição de um decaimento de 60 dB é por vezes difícil sendo que o ruído de fundo pode sobrepor-se ao estímulo sonoro. A excitação do campo sonoro é conseguida através de uma fonte (balão) que consiga emitir em todas as frequências do espectro sonoro e com uma potência que garanta um decaimento mínimo de 60dB.

Tabela 19 - Tempo de reverberação na câmara recetora.

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1,0k	1,25	1,6k	2,0k	2,5k	3,15
T_{60}	19,3	14,2	13,8	11,1	11,1	11,3	11,2	10,6	9,6	8,3	7,5	6,6	6,0	5,4	4,7	4,1

6.2.2.3. Determinação do índice único de avaliação, R_w.

Em laboratório, a determinação da redução sonora *R* (dB) para campos sonoros difusos não considera a existência de caminhos marginais. Assim, depende exclusivamente dos níveis médios de pressão sonora no compartimento emissor e recetor, L_1 e L_2, respetivamente, da área *S* da abertura onde o elemento a testar é inserido e da área de absorção equivalente *A* da camara recetora (m^2). As variáveis envolvidas são relacionadas através da seguinte expressão de cálculo:

$$R = L_1 - L_2 + 10\log\left(\frac{S}{A}\right) \ (dB) \qquad (6.3)$$

O termo correspondente à área de absorção sonora equivalente é determinado atendendo ao tempo de reverberação *T* medido e ao volume da camara recetora *V* (m^3), recorrendo à expressão de Sabine:

$$A = \frac{0{,}16 * V}{T} \ (m^2) \qquad (6.4)$$

Tabela 20 - Redução sonora do elemento em laboratório, por bandas de 1/3 oitava.

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1,0k	1,25	1,6k	2,0k	2,5k	3,15
L_2-L_b	33,2	35,1	40,8	44,2	43,0	43,1	47,0	46,9	45,8	40,8	34,9	30,3	31,2	29,1	24,8	26,0
A	1,75	2,38	2,45	3,04	3,03	2,99	3,03	3,20	3,52	4,06	4,50	5,14	5,63	6,31	7,20	8,31
R	34,3	36,6	38,2	38,5	37,3	38,1	38,8	39,5	41,2	43,1	45,0	47,0	48,6	48,7	48,5	51,2

A partir dos valores de *R* e após comparação dos mesmos com os valores de referência, nas bandas de frequências de medição e de acordo com o especificado na EN ISO 717-1 [14], é possível determinar o índice único de avaliação do desempenho do elemento.

A comparação constitui um ajuste da curva real, produzida através dos resultados anteriores arredondados às décimas, à curva de referência *CR*. Quando o valor medido *R*, numa determinada banda de frequência, é inferior ao valor de referência a diferença obtida é, por definição, um desvio desfavorável.

$$\Delta_1 = CR_1 - R \tag{6.5}$$

Assim, as curvas encontram-se ajustadas quando o somatório dos desvios desfavoráveis de todas as bandas de frequência é o maior possível mas inferior a 32,0 dB. O ajuste é conseguido por iterações sucessivas nas quais os valores da curva de referência são ajustado por patamares de 1 dB. A tabela 21 apresenta apenas os valores correspondentes à última iteração.

Tabela 21 - Procedimento para a determinação índice de redução sonora, R_w.

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1,0k	1,25	1,6k	2,0k	2,5k	3,15
R	34,3	36,6	38,2	38,5	37,3	38,1	38,8	39,5	41,2	43,1	45,0	47,0	48,6	48,7	48,5	51,2
CR	33	36	39	42	45	48	51	52	53	54	55	56	56	56	56	56
ΔCR	0	3	6	9	12	15	18	19	20	21	22	23	23	23	23	23
CR1	26	29	32	35	38	41	44	**45**	46	47	48	49	49	49	49	49
Δ1					0,7	2,9	5,2	5,5	4,8	3,9	3,0	2,0	0,4	0,3	0,5	
$\sum \Delta 1_i$		29,2														

O valor, em decibel, da ordenada da curva de referência *Rw*, na banda de frequências de 500 Hz, após ter sido ajustada de acordo com o método descrito, é igual a 45 dB.

O método descrito pode também ser aplicado sob a forma gráfica, como demonstrado na Figura 26.

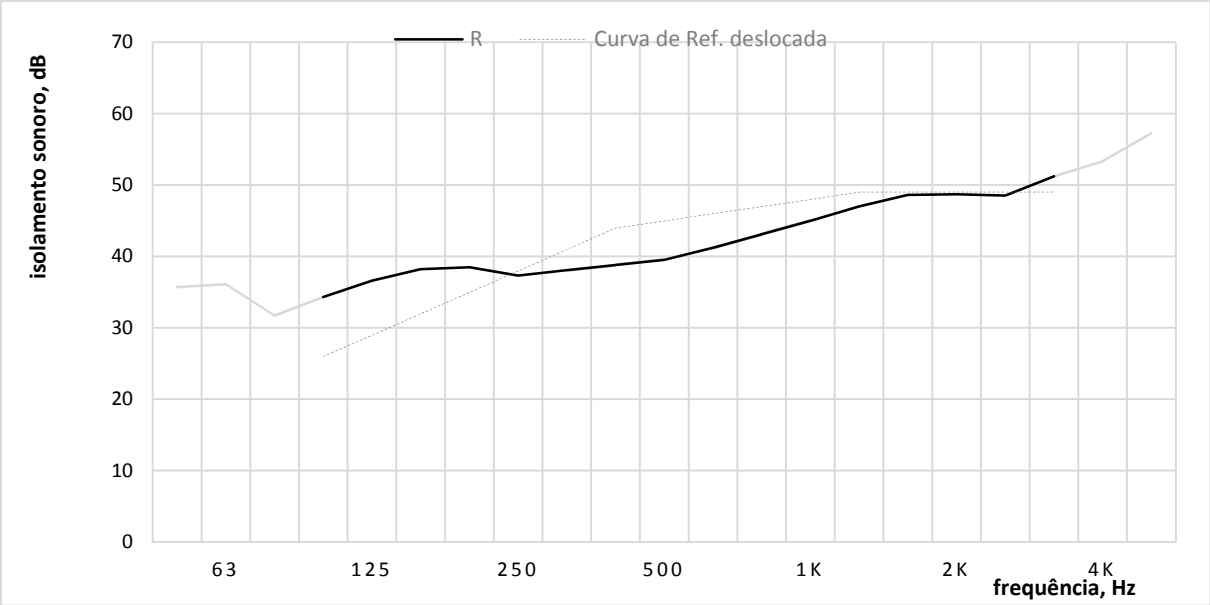


Figura 26 - Representação gráfica do ajuste da curva real, *R*, à curva de referência.

6.2.3. SÍNTESE DE RESULTADOS

De acordo com o descrito, os resultados apresentados anteriormente referem-se apenas a um dos ensaios realizados. Neste sentido, a informação seguinte sumariza e compila sob a forma de tabela os dados referentes a todos os ensaios realizados em laboratório. Os mesmos são também apresentados graficamente facilitando a sua compreensão.

A tabela seguinte contém os resultados relativos às medições de ruído de fundo conduzidas na câmara reverberante recetora do laboratório de acústica.

Tabela 22 - Registo do ruído de fundo dos ensaios laboratoriais.

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1,0k	1,25	1,6k	2,0k	2,5k	3,15
E.1	17,0	13,2	12,2	9,7	10,6	11,2	6,7	4,8	5,1	5,1	6,5	7,1	6,8	4,7	4,4	4,8
E.2	17,7	18,1	21,8	11,6	14,9	13,7	7,6	4,6	3,2	2,6	5,0	3,8	3,5	3,7	4,2	4,7
E.3	27,3	20,6	17,7	15,3	17,8	19,0	10,4	8,0	7,6	7,5	8,8	9,7	10,3	9,4	9,9	10,5
E.4	18,8	19,3	11,8	6,6	9,9	12,0	3,7	4,3	3,1	5,2	12,6	15,1	11,8	7,7	8,0	7,3
E.5	16,1	11,5	11,5	8,3	10,1	10,5	5,6	4,0	1,6	1,0	1,6	1,6	2,4	2,9	3,7	4,6
E.6	18,3	14,4	13,3	9,2	13,6	14,7	5,3	2,7	0,9	0,5	1,4	2,8	4,1	3,5	3,8	4,2
E.7	17,6	14,4	8,7	5,5	6,8	8,1	2,1	1,2	0,7	0,9	1,3	2,3	2,3	2,5	3,0	3,5

O comportamento do ruído de fundo para as diferentes frequências do espectro sonoro analisado é representado na Figura 27.

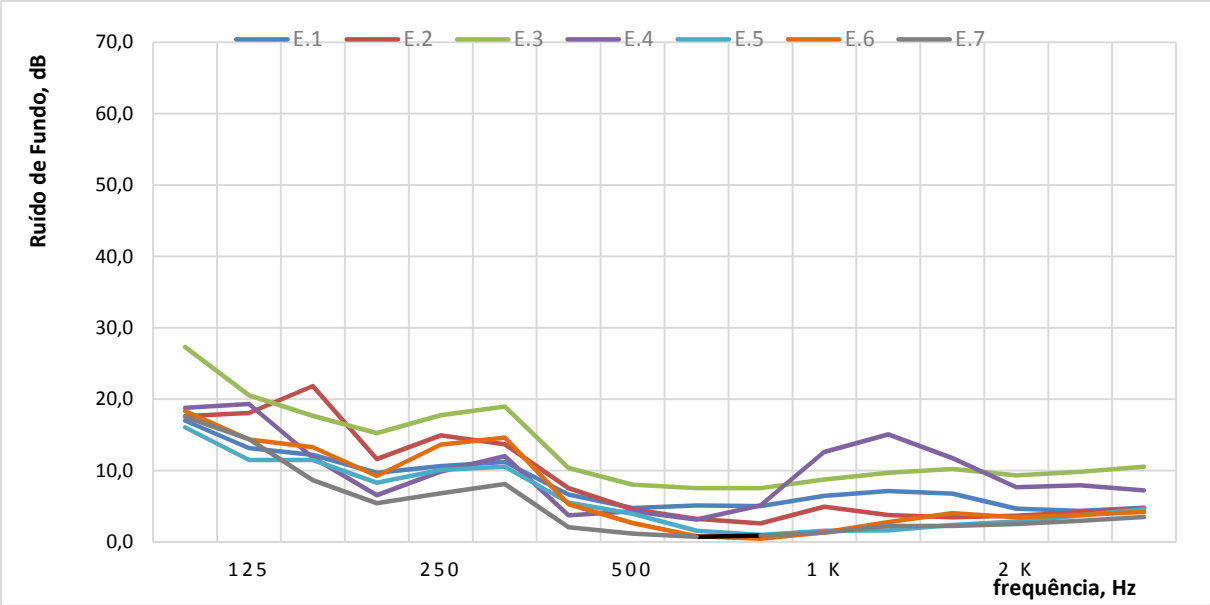


Figura 27 - Representação gráfica do ruído de fundo registado nos ensaios laboratoriais.

A realização dos ensaios de caracterização acústica da parede de tabique contemplou também a medição do tempo de reverberação no interior da câmara reverberante recetora. A Tabela 23 contém os resultados de todas as medições relativas ao parâmetro referido.

Tabela 23 - Tempo de reverberação registado nos ensaios laboratoriais.

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1,0k	1,25	1,6k	2,0k	2,5k	3,15
E.1	13,9	11,6	10,9	9,7	9,7	9,6	9,5	8,9	8,0	6,8	5,7	4,9	4,2	3,9	3,7	3,3
E.2	14,8	13,8	11,6	9,9	10,0	9,9	9,3	8,8	8,2	7,3	6,6	5,9	5,4	4,9	4,4	3,8
E.3	13,8	11,0	11,8	9,4	9,5	10,1	9,6	8,9	8,1	7,6	6,9	6,3	5,8	5,3	4,7	4,1
E.4	15,9	10,3	13,4	11,4	10,5	11,0	11,1	10,9	10,0	8,7	7,7	7,0	6,3	5,7	5,1	4,4
E.5	21,2	12,3	14,1	11,9	10,9	11,8	11,8	11,3	10,5	8,9	7,9	7,0	6,3	5,6	5,0	4,2
E.6	18,8	13,2	13,5	11,4	11,4	11,4	11,3	11,3	10,3	9,0	7,9	7,2	6,4	5,6	4,8	4,1
E.7	19,3	14,2	13,8	11,1	11,1	11,3	11,2	10,6	9,6	8,3	7,5	6,6	6,0	5,4	4,7	4,1

A informação obtida por bandas de frequência de 1/3 oitava é traduzida graficamente pela figura 28.

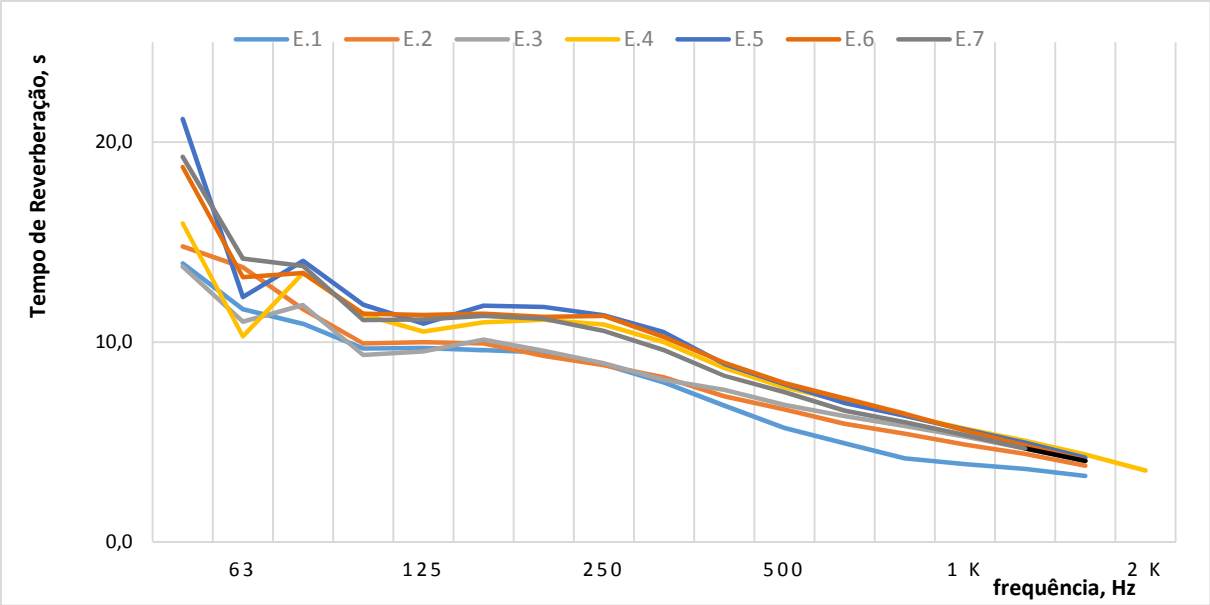


Figura 28 - Representação gráfica do tempo de reverberação registado nos ensaios laboratoriais.

Através do ruido de fundo e do tempo de reverberação é possível determinar a redução sonora do elemento de tabique. O processo de cálculo encontra-se explicitado no subcapítulo anterior e resulta na informação disposta na tabela seguinte.

Tabela 24 - Redução sonora do elemento de tabique nas diferentes fases de construção.

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1,0k	1,25	1,6k	2,0k	2,5k	3,15
E.1	10,8	12,2	13,9	12,4	13,3	14,2	13,8	14,0	14,8	15,4	15,4	15,0	13,6	13,5	15,0	17,1
E.2	27,3	29,3	30,3	29,5	29,7	30,4	29,7	30,5	31,9	34,7	36,8	40,5	43,7	46,5	50,0	54,6
E.3	29,2	28,3	30,6	29,7	30,3	31,1	30,4	30,8	31,3	34,6	36,6	40,0	43,4	45,8	48,6	53,2
E.4	34,3	33,0	35,8	34,9	34,3	36,7	39,2	42,3	44,8	48,3	50,9	53,6	56,0	58,9	61,4	63,7
E.5	37,1	36,8	40,0	39,4	38,2	38,8	39,8	42,1	44,1	47,6	50,3	53,5	57,0	59,7	62,1	65,0
E.6	38,9	37,6	38,6	38,0	38,2	39,1	39,5	41,0	42,8	45,5	47,7	50,2	52,7	53,9	53,8	54,5
E.7	**34,3**	**36,6**	**38,2**	**38,5**	**37,3**	**38,1**	**38,8**	**39,5**	**41,2**	**43,1**	**45,0**	**47,0**	**48,6**	**48,7**	**48,5**	**51,2**

Nota: O ensaio 7 é representativo do comportamento do elemento de tabique.

Com a avaliação do comportamento acústico do elemento construtivo nas diferentes fases da sua construção, pretende-se a análise da influência das propriedades dos materiais que o constituem na definição da sua redução sonora. No gráfico constante na Figura 29 é possível observar, por bandas de frequência de 1/3 oitava, a evolução da redução sonora, em função da frequência, para cada ensaio realizado.

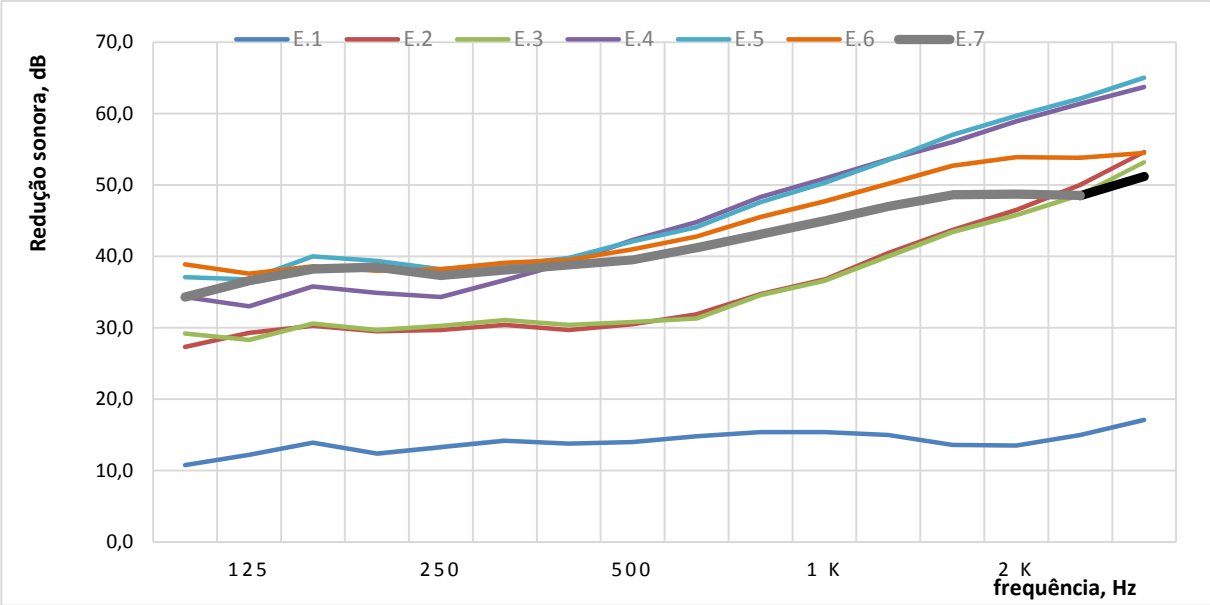


Figura 29 - Representação gráfica da redução sonora registada nos ensaios laboratoriais

A tabela 25 contém os índices de redução sonora padronizados, indicadores de avaliação de desempenho acústico obtidos a partir dos valores de *R* para cada banda de frequência, do elemento de tabique em todos os ensaios realizados.

Tabela 25 - Índices de redução sonora, R_w, determinados nos ensaios laboratoriais

f (Hz)	E.1	E.2	E.3	E.4	E.5	E.6	**E.7**
R_w (dB)	15	37	37	47	48	47	**45**

Nota: O ensaio 7 é representativo do comportamento do elemento de tabique.

6.3. RESULTADOS *IN-SITU*

6.3.1. PLANO DE MEDIÇÕES

A realização da campanha de medições *in-situ* determinou a recolha de dados em duas frações habitacionais. As frações, localizadas em edifícios distintos, permitiram a realização de sete ensaios e a análise de seis paredes em tabique. A Tabela 26 organiza as informações relativas aos ensaios, numerando-os e relacionando-os com as frações onde foram realizados, e define as posições dos compartimentos emissores e recetores. Recomenda-se a consulta da Figura 23 e Figura 24, no capítulo 5, para a compreensão da nomenclatura atribuída.

Tabela 26 - Plano de medições aplicado na realização dos ensaios *in-situ*.

Medição	Fração	Elemento	Compartimento Emissor	Compartimento Recetor
1	A	Parede 1.1	2	1
2		Parede 1.2	2	3
3		Parede 1.2	3	2
4		Parede 1.3	3	4
5	B	Parede 2.1	1	2
6		Parede 2.2	4	3
7		Parede 2.3	4	5

6.3.2. TRATAMENTO DE RESULTADOS RELATIVOS AO ISOLAMENTO SONORO A SONS AÉREOS ENTRE COMPARTIMENTOS, $D_{NT,w}$.

Os resultados a apresentar pretendem encontrar o índice de isolamento sonoro a ruídos de condução aérea do primeiro elemento construtivo ensaiado na campanha de medições realizada.

O cálculo do índice inicia-se com a determinação do nível médio da pressão sonora L no compartimento emissor e no compartimento recetor. O parâmetro L corresponde à média energética, no espaço e no tempo, dos níveis de pressão sonora L_i medidos para as n diferentes posições de medição no compartimento e é determinado através da expressão 6.1. Os resultados da medição foram obtidos por bandas de 1/3 oitava, de acordo com o especificado na norma EN ISO 140-4 [47].

Tabela 27 - Níveis médios de pressão sonora medidos no compartimento emissor (L_1) e recetor (L_2)

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1,0k	1,25	1,6k	2,0k	2,5k	3,15
L1	70,3	76,0	76,0	76,1	77,3	79,7	80,1	80,1	81,3	80,1	78,2	77,0	80,4	79,9	78,3	83,2
L2	48,9	55,3	53,4	48,9	48,4	48,8	45,6	44,1	44,4	41,2	40,0	37,8	39,8	38,5	38,0	45,8

6.3.2.1. Correção do ruído de fundo

O registo do ruído de fundo no compartimento recetor é realizado para identificar possíveis perturbações, exteriores ao local de ensaio ou associadas aos equipamentos de medição, no seu campo sonoro. As correções a aplicar, dependentes das diferenças entre o nível sonoro medido e o parâmetro a determinar, encontram-se descritas em 6.2.2.1.

Tabela 28 - Níveis de pressão sonora, obtidos no compartimento recetor, corrigidos.

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1,0k	1,25	1,6k	2,0k	2,5k	3,15
L_{sb}	48,9	55,3	53,4	48,9	48,4	48,8	45,6	44,1	44,4	41,2	40,0	37,8	39,8	38,5	38,0	45,8
L_b	43,9	34,0	30,4	30,3	30,5	24,2	23,8	21,8	23,2	24,7	23,3	21,0	18,6	17,0	16,3	16,8
$L_{sb} - L_b$	5,0	21,2	23,0	18,6	17,9	24,7	21,8	22,3	21,2	16,5	16,6	16,8	21,2	21,6	21,8	29,0
L_2	47,6	35,1	40,8	44,2	43,0	43,1	47,0	46,9	45,8	40,8	34,9	30,3	31,2	29,1	24,8	26,0

6.3.2.2. Determinação do tempo de reverberação

A medição do tempo de reverberação é realizada no compartimento recetor e de acordo com o especificado em 6.2.2.2.

Tabela 29 - Tempo de reverberação no compartimento recetor.

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1,0k	1,25	1,6k	2,0k	2,5k	3,15
T_{60}	0,58	0,50	0,48	0,56	0,60	0,67	0,66	0,72	0,81	0,80	0,82	0,79	0,79	0,72	0,59	0,61

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

Quando os ensaios são conduzidos *in-situ* é possível, através dos níveis médios de pressão sonora no compartimento emissor e recetor, L_1 e L_2, respetivamente, determinar o isolamento sonoro bruto D do elemento separador. Este parâmetro representa o isolamento sonoro sem qualquer correção.

$$D = L_1 - L_2 \ (dB) \tag{6.6}$$

Tabela 30 – Isolamento sonoro bruto do elemento, por bandas de 1/3 oitava.

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1,0k	1,25	1,6k	2,0k	2,5k	3,15
D	22,7	20,7	22,6	27,2	28,9	30,9	34,5	36,0	36,9	38,9	38,2	39,2	40,7	41,4	40,3	37,4

Os valores calculados são posteriormente corrigidos com o tempo de reverberação do compartimento face a um valor de referência T_0, obtendo o isolamento sonoro padronizado para cada banda de frequência.

$$D_{nT} = D + 10 \log\left(\frac{T}{T_0}\right) (dB) \tag{6.7}$$

Tabela 31 – Isolamento sonoro padronizado do elemento, por bandas de 1/3 oitava.

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1,0k	1,25	1,6k	2,0k	2,5k	3,15
D_{nT}	23,3	20,7	22,4	27,6	29,8	32,2	35,7	37,6	39,0	41,0	40,3	41,2	42,7	43,0	41,0	38,2

A partir dos valores de D_{nT} e após comparação dos mesmos com os valores de referência, nas bandas de frequências de medição e de acordo com o especificado na NP EN ISO 717-1 [14], é possível determinar o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado $D_{nT,w}$.

A comparação constitui um ajuste da curva real, produzida através dos resultados anteriores arredondados à décima, à curva de referência *CR*, de acordo com o especificado em 6.2.2.3.

Tabela 32 - Procedimento para a determinação do índice de isolamento sonoro padronizado, $D_{nT,w}$.

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1,0k	1,25	1,6k	2,0k	2,5k	3,15
D_{nT}	23,3	20,7	22,4	27,6	29,8	32,2	35,7	37,6	39,0	41,0	40,3	41,2	42,7	43,0	41,0	38,2
CR	33	36	39	42	45	48	51	52	53	54	55	56	56	56	56	56
ΔCR	0	3	6	9	12	15	18	19	20	21	22	23	23	23	23	23
CR1	20	23	26	29	32	35	38	39	40	41	42	43	43	43	43	43
Δ1		2,3	3,6	1,4	2,2	2,8	2,3	1,4	1,0	0,0	1,7	1,8	0,3	0,0	2,0	4,8
$\sum \Delta 1_i$		27,7														

Depois de ter sido ajustada de acordo com o método supracitado, o valor da ordenada da curva de referência, na banda de frequências de 500 Hz, é igual a 39 dB. Na Figura 30 apresenta-se a forma gráfica do mesmo método.

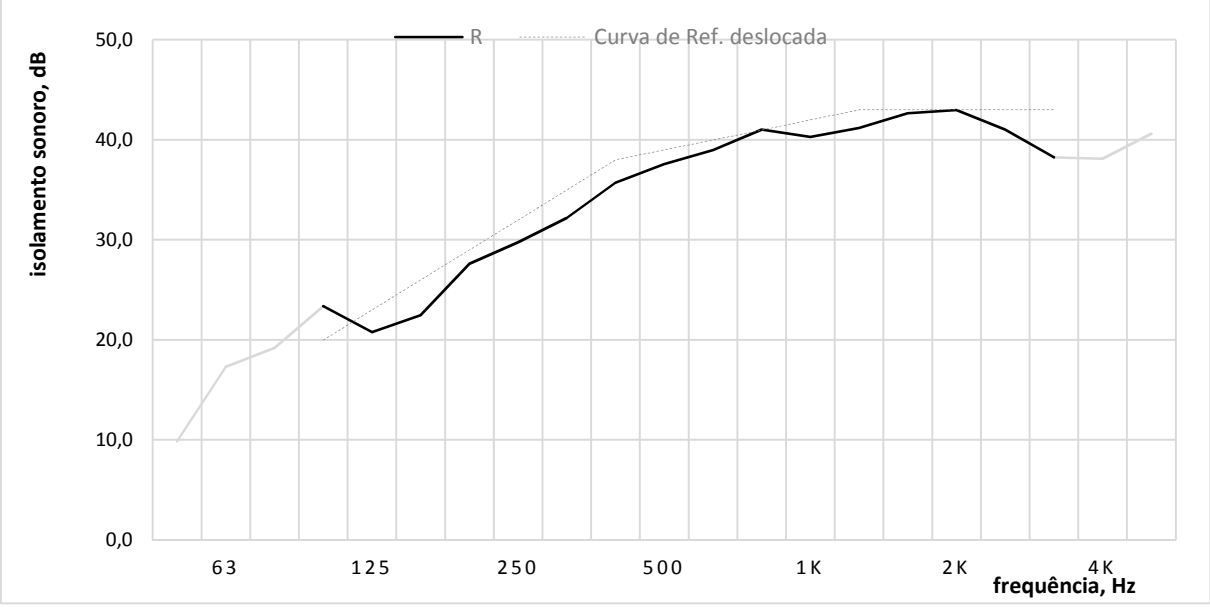


Figura 30 - Representação gráfica do ajuste da curva real, D_{nT}, à curva de referência.

6.3.3. SÍNTESE DE RESULTADOS

A tabela seguinte reúne os valores das medições relativas ao ruído de fundo nos diferentes compartimentos recetores.

Tabela 33 - Registo do ruído de fundo das medições realizadas *in-situ*.

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1,0k	1,25	1,6k	2,0k	2,5k	3,15
M.1	43,9	34,0	30,4	30,3	30,5	24,2	23,8	21,8	23,2	24,7	23,3	21,0	18,6	17,0	16,3	16,8
M.2	48,0	42,9	34,3	31,6	33,8	30,0	29,9	27,8	28,2	29,9	29,3	27,1	24,2	22,2	20,8	18,2
M.3	47,0	39,2	30,4	30,4	30,7	23,7	24,6	20,8	23,6	26,2	23,3	21,0	19,3	17,1	16,7	14,5
M.4	34,3	34,2	28,5	25,3	23,7	21,9	21,6	20,2	19,8	20,3	20,9	21,7	21,3	18,5	12,2	11,4
M.5	24,7	21,8	19,7	17,8	15,6	12,5	12,1	13,9	12,2	10,9	11,6	9,7	10,9	10,4	9,5	9,9
M.6	42,4	36,9	35,3	32,2	30,6	24,0	22,5	21,8	22,2	20,8	15,1	13,2	10,3	9,3	10,8	14,1
M.7	37,5	40,5	38,2	32,8	28,6	24,3	20,1	17,3	14,1	15,8	12,8	13,3	11,2	9,5	6,3	6,0

A mesma informação, relativa ao ruído de fundo, é explicitada graficamente na Figura 31.

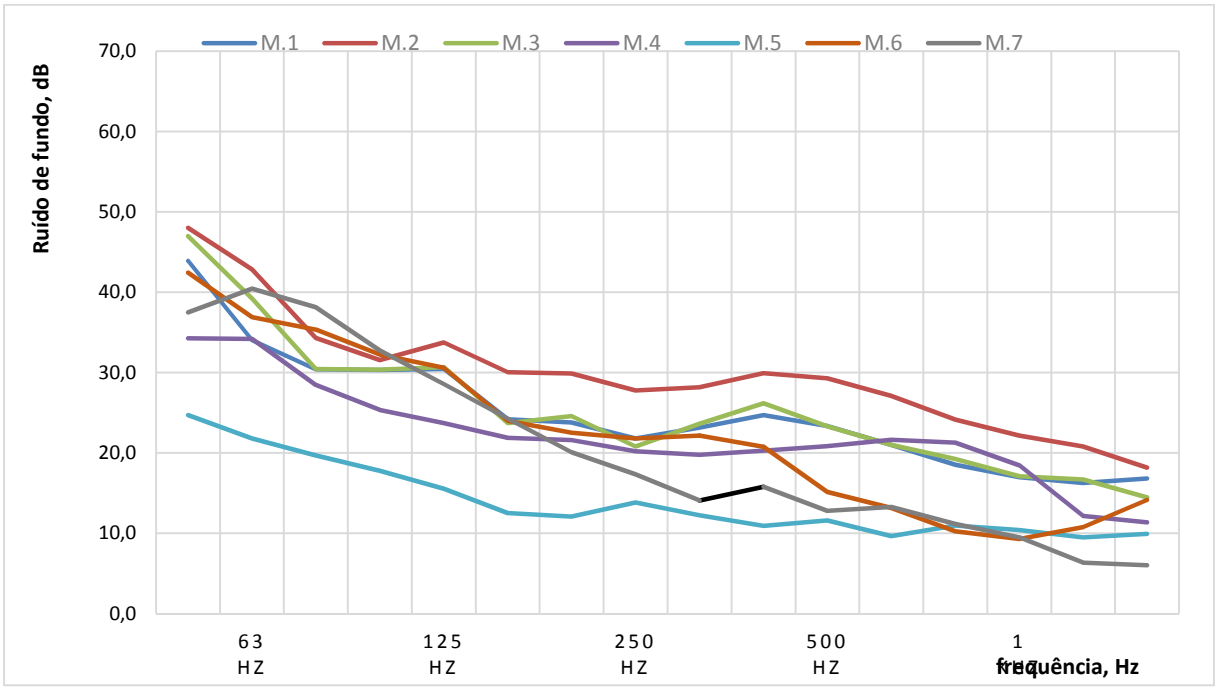


Figura 31 - Representação gráfica do ruído de fundo registado nas medições realizadas *in-situ*.

De acordo com o descrito, a determinação do índice de isolamento sonoro implica a definição do tempo de reverberação nos compartimentos recetores. Os valores relativos a T_{60} encontram-se compilados na tabela 34.

Tabela 34 - Tempo de reverberação registado nas medições realizadas *in-situ.*

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1,0k	1,25	1,6k	2,0k	2,5k	3,15
M.1	0,58	0,50	0,48	0,56	0,60	0,67	0,66	0,72	0,81	0,80	0,82	0,79	0,79	0,72	0,59	0,61
M.2	0,52	0,43	0,37	0,42	0,50	0,58	0,54	0,61	0,64	0,61	0,62	0,70	0,64	0,60	0,53	0,51
M.3	0,49	0,54	0,33	0,43	0,47	0,56	0,52	0,49	0,52	0,45	0,48	0,46	0,42	0,42	0,39	0,40
M.4	0,50	0,39	0,57	0,54	0,53	0,55	0,61	0,75	0,67	0,65	0,66	0,61	0,59	0,57	0,52	0,55
M.5	0,60	0,58	0,72	0,46	0,40	0,36	0,29	0,34	0,27	0,28	0,25	0,23	0,22	0,20	0,19	0,19
M.6	0,32	0,30	0,33	0,39	0,33	0,34	0,39	0,41	0,38	0,41	0,39	0,42	0,40	0,40	0,40	0,36
M.7	0,49	0,45	0,46	0,39	0,33	0,34	0,42	0,38	0,41	0,40	0,40	0,42	0,43	0,46	0,45	0,43

A Figura 32 traduz graficamente os tempos de reverberação para cada medição realizada, obtidos por bandas de frequência de 1/3 oitava.

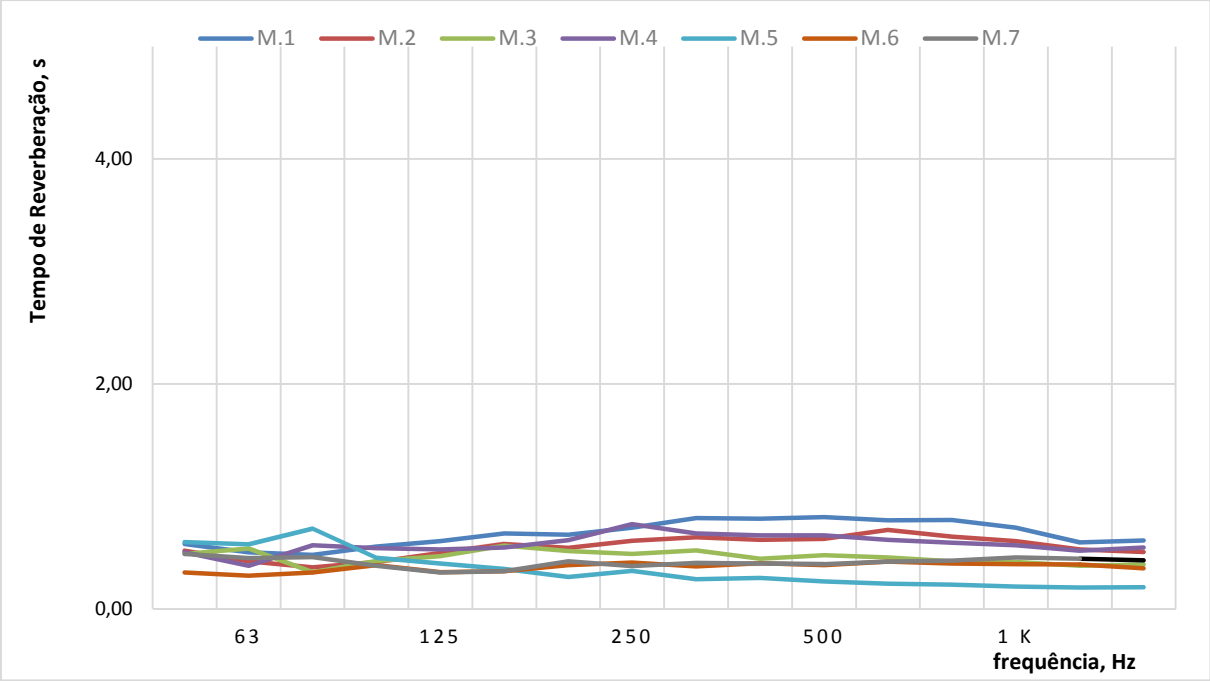


Figura 32 - Representação gráfica do tempo de reverberação registado nas medições realizadas *in-situ*.

Partindo dos níveis médios de pressão sonora determinados para os diferentes compartimetos recetores e emissores, obtém-se o isolamento sonoro bruto dos elementos construtivos, disponibilizados na tabela seguinte.

Tabela 35 – Isolamento sonoro bruto do elemento de tabique para as diferentes medições realizadas *in-situ*.

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1,0k	1,25	1,6k	2,0k	2,5k	3,15
M.1	22,7	20,7	22,6	27,2	28,9	30,9	34,5	36,0	36,9	38,9	38,2	39,2	40,7	41,4	40,3	37,4
M.2	22,0	25,9	28,4	30,7	31,8	32,6	36,3	39,0	42,5	42,4	42,5	43,7	44,0	45,3	44,1	44,6
M.3	23,6	26,0	29,4	29,7	32,2	34,0	38,4	39,4	41,7	44,3	44,4	45,7	46,3	47,5	46,3	44,4
M.4	22,5	21,9	26,3	24,4	28,6	30,2	32,7	36,7	37,6	39,0	41,1	41,3	41,6	42,2	41,3	39,5
M.5	24,4	28,2	26,6	26,9	29,4	35,2	36,8	37,2	39,8	41,4	41,7	43,8	44,1	44,3	43,6	41,4
M.6	16,3	19,6	22,2	23,3	25,8	26,8	29,8	31,5	33,0	33,5	33,7	34,3	35,2	35,9	35,5	34,8
M.7	24,3	23,0	20,6	21,7	24,0	27,4	30,2	31,2	32,1	33,6	33,1	32,1	36,0	38,1	39,7	39,7

Os valores determinados são apresentados sob a forma de gráfico na Figura 32.

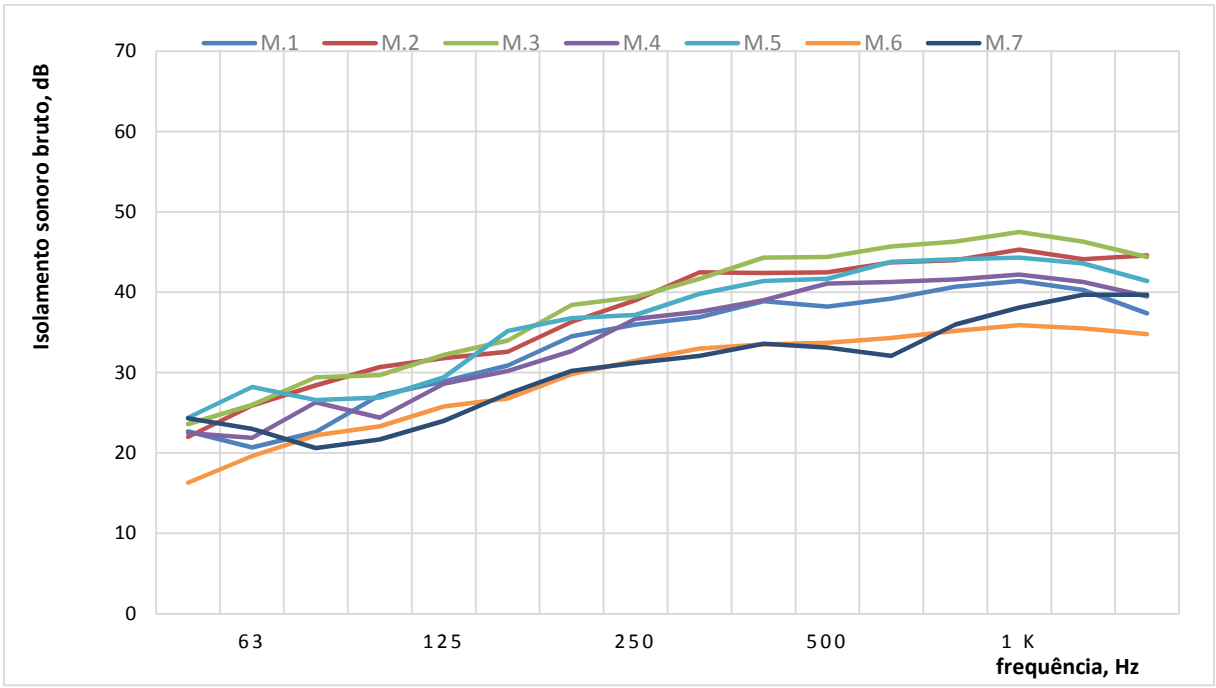


Figura 33 - Representação gráfica do isolamento sonoro bruto registado nas medições realizadas *in-situ.*

Partindo dos resultados obtidos para o isolamento sonoro bruto *D*, corrigidos com um tempo de reverberação de referência é possivel obter o isolamento sonoro padronizado, valores apresentados na tabela 36 e na figura 34.

Tabela 36 – Isolamento sonoro bruto padronizado dos elementos ensaiados *in-situ*.

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1,0k	1,25	1,6k	2,0k	2,5k	3,15
M.1	23,3	20,7	22,4	27,6	29,8	32,2	35,7	37,6	39,0	41,0	40,3	41,2	42,7	43,0	41,0	38,2
M.2	22,1	25,2	27,1	29,9	31,8	33,3	36,7	39,8	43,5	43,3	43,4	45,2	45,1	46,1	44,3	44,6
M.3	23,5	26,3	27,5	29,0	31,9	34,5	38,5	39,3	41,8	43,8	44,2	45,4	45,6	46,7	45,1	43,4
M.4	22,5	21,9	26,3	24,4	28,6	30,2	32,7	36,7	37,6	39,0	41,1	41,3	41,6	42,2	41,3	39,5
M.5	25,2	28,8	28,2	26,5	28,4	33,7	34,4	35,5	37,1	38,8	38,7	40,3	40,4	40,3	39,4	37,3
M.6	14,4	17,4	20,4	22,2	24,0	25,0	28,7	30,7	31,8	32,6	32,6	33,6	34,3	35,0	34,5	33,4
M.7	24,2	22,6	20,2	20,6	22,1	25,7	29,5	30,0	31,3	32,6	32,1	31,4	35,3	37,7	39,2	39,0

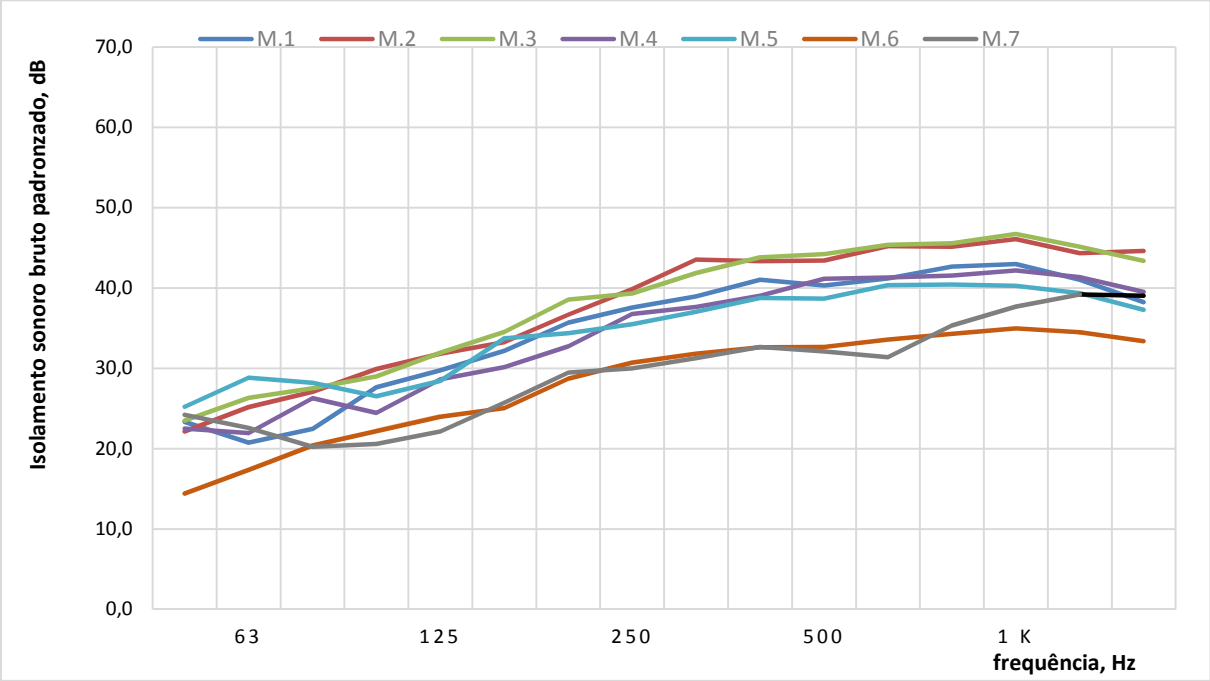


Figura 34 - Representação gráfica do isolamento sonoro bruto padronizado dos elementos ensaiados *in-situ*.

Os índices de isolamento sonoro *DnT,w* determinados nos ensaios realizados *in-situ* encontram-se descritos na tabela 37.

Tabela 37 - Índices de isolamento sonoro, $D_{nT,w}$, determinados nas medições realizadas *in-situ.*

f (Hz)	M.1	M.2	M.3	M.4	M.5	M.6	M.7
$D_{nT,w}$ (dB)	39	42	42	38	38	32	33

6.4. MÉTODO DAS TRANSMISSÕES MARGINAIS

A norma EN 12354 [5] define um modelo de cálculo que permite a medição do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea. Tratando-se de um modelo de cálculo teórico, a sua aplicação no presente capítulo pretende a previsão do isolamento sonoro padronizado a ruídos de condução aérea em compartimentos interiores, $D_{nT,w}$, partindo dos resultados obtidos em laboratório relativos à redução sonora R_w do elemento em estudo.

A realização de ensaios acústicos em laboratório caracterizadores do índice de redução de qualquer elemento não contempla a existência de caminhos marginais. A simplificação determina que a transmissão sonora é realizada exclusivamente através do elemento de teste. No entanto, a realização de ensaios *in-situ* configura a existência de ligações rígidas entre o elemento de teste e a sua envolvente e considera a transmissão sonora através da mesma envolvente. Assim, em projeto e no âmbito da legislação em vigor, é importante estabelecer uma relação entre redução sonora e o isolamento sonoro.

O modelo preconizado na norma quantifica a transmissão sonora direta e marginal. Os diferentes caminhos de transmissão encontram-se representados na Figura 2 e atendendo a que constituem caminhos independentes, os mesmos são trabalhados separadamente. O índice de redução sonora aparente é determinado recorrendo à expressão:

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

Onde $R_{Dd,w}$ é o índice de redução sonora relativo à transmissão direta e $R_{Ff,w}$, $R_{Df,w}$ *e* $R_{Fd,w}$ correspondem, respetivamente, aos índices de redução sonora relativos aos caminhos de transmissão *Ff, Df* e *Fd* em decibéis.

Os caminhos de transmissão marginais são constituídos por diferentes elementos. Assim, a determinação da sua redução sonora, através das expressões apresentadas em seguida, atende à definição do índice de redução sonora individual dos elementos que o constituem. O cálculo destes índices individuais foi conseguido recorrendo à aplicação das rotinas informáticas aplicadas no capítulo 4.

$$R_{Ff,w} = \frac{R_{F,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Ff,w} + K_{Ff} + 10\log\left(\frac{S_S}{l}\right) \qquad (6.9)$$

$$R_{Fd,w} = \frac{R_{F,w} + R_{d,w}}{2} + \Delta R_{Fd,w} + K_{Fd} + 10\log\left(\frac{S_S}{l}\right) \quad (6.10)$$

$$R_{Df,w} = \frac{R_{D,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Df,w} + K_{Df} + 10\log\left(\frac{S_S}{l}\right) \quad (6.11)$$

Sendo R_i e R_j os índices de redução sonora (dB) para os diferentes elementos construtivos que constituem os caminhos marginais, $\Delta R_{ij,w}$ o acréscimo de isolamento sonoro (dB) no caminho *ij*, K_{ij} o índice de redução de transmissão de vibrações (dB) pelo caminho marginal, S_s a superfície do elemento de separação (m^2) e l o comprimento comum entre o elemento de separação e o marginal (m).

Os diferentes índices de redução de transmissão de vibrações K_{ij} são estabelecidos em função da massa superficial dos elementos que partilham o caminho marginal. As relações para a determinação dos índices são obtidas para uma quantidade M definida como:

$$M = \log\left(\frac{m_s}{m_f}\right) \quad (6.12)$$

Em que m_s é a massa superficial do elemento através do qual a transmissão ocorre de forma direta e m_f a massa superficial do elemento que contempla a transmissão marginal. No entanto, e de acordo com a EN12354-1, é indiferente a consideração de m_s e m_f enquanto divisor ou dividendo.

Para elementos, separados por um elemento de separação *S*, definidos no mesmo plano e com a mesma massa superficial, a norma estipula um conjunto de ligações tipificadas que permite a determinação dos mesmos índices.

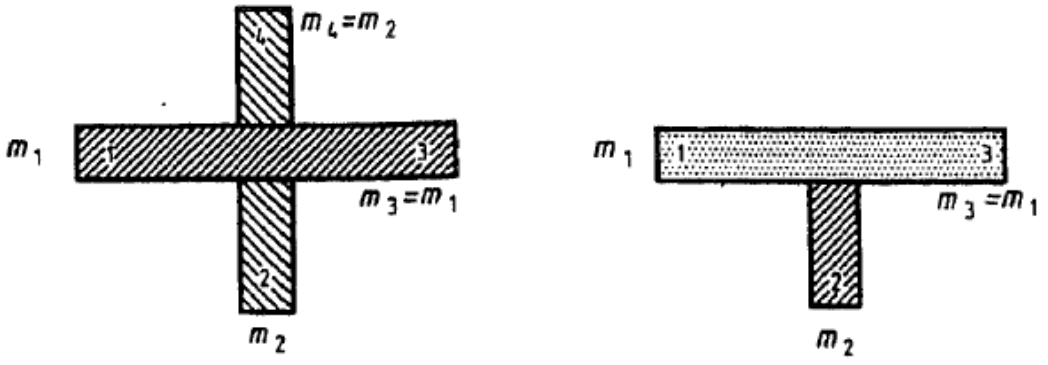


Figura 35 - Ligação rígida entre elementos construtivos; Esquerda: Ligação cruzada; Direita: Ligação em T. [5]

Assim, procurou-se estabelecer uma relação com os elementos observados nos ensaios realizados *in-situ*. A solução apresentada (Figura 35) corresponde à existência de ligações rígidas entre elementos

construtivos, sendo das soluções contempladas na norma aquela que se aproxima das ligações reais observadas. O tipo de ligação apontado permite a determinação dos K_{ij} através das expressões apresentadas em seguida. Para ligações cruzadas são utilizadas as expressões 6.12 e 6.13 e para as ligações em T são utilizadas as expressões 6.14 e 6.15.

$$K_{13} = 8{,}7 + 17{,}1 * M + 5{,}7 * M^2 \ (dB) \quad (6.13)$$

$$K_{12} = K_{23} = 8{,}7 + 5{,}7 * M^2 \ (dB) \quad (6.14)$$

$$K_{13} = 5{,}7 + 14{,}1 * M + 5{,}7 * M^2 \ (dB) \quad (6.15)$$

$$K_{12} = K_{23} = 5{,}7 + 5{,}7 * M^2 \ (dB) \quad (6.16)$$

Considerando a parede de separação relativa aos ensaios *in-situ* 2 e 3, cujos resultados foram apresentados no subcapítulo 6.2., o conteúdo das tabelas seguintes resume as características dos elementos construtivos envolventes ao elemento de separação e determina os índices de redução de transmissão de vibrações.

Tabela 38 - Massa superficial dos elementos construtivos.

Ensaio	Fração	Elemento	Área (m^2)	Massa superficial (kg/m^2)
2	A	Parede de separação	8,4	100
		Parede interior	12,6	100
		Parede de fachada	12,6	1000
		Laje de teto	11,8	185
		Laje de pavimento	11,8	185

Tabela 39 - Índices de redução de transmissão de vibrações.

Elemento	m (kg/m^2)	Rw (dB)	m_s/m_f	M = log (m_s/m_f)	K_{Ff}	K_{Fd}	K_{Df}
Parede separação (s)	100	45					
Pavimento (*F=f=1*)	185	42	1,85	0,27	9,87	6,11	6,11
Teto (*F=f=2*)	185	42	1,85	0,27	9,87	6,11	6,11
Parede exterior (*F=f=3*)	1000	63	10,00	1,00	25,50	11,40	11,40
Parede interior (*F=f=4*)	100	45	1,00	0,00	5,70	5,70	5,70

Na tabela 39 é também estabelecida uma relação entre as diferentes notações passíveis de serem atribuídas aos caminhos marginais. A mesma informação é completada através da Figura 36. Através de representações esquemáticas do elemento em teste e da sua envolvente é possível a compreensão do sistema de transmissão.

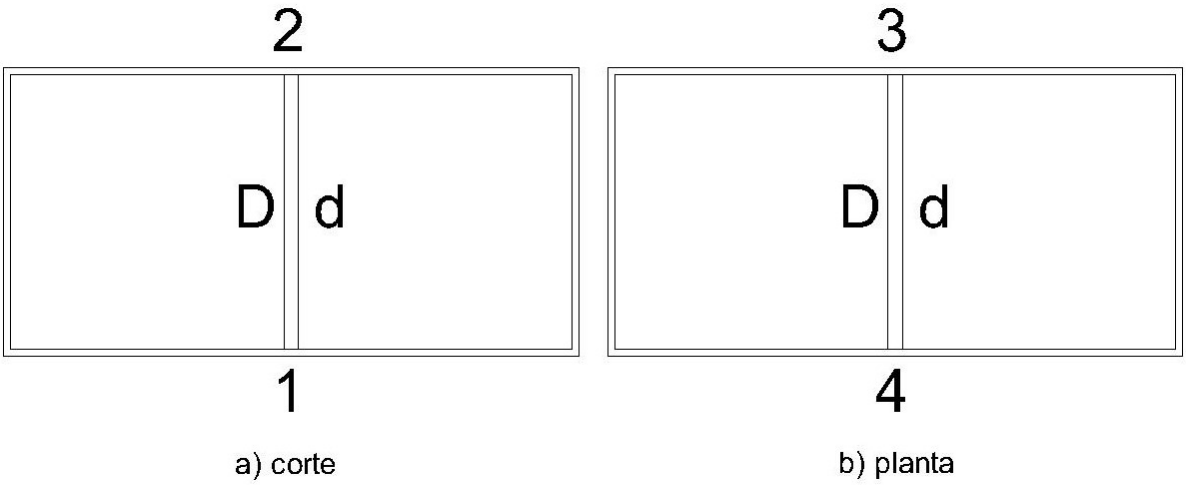


Figura 36 - Nomenclatura e representação esquemática dos caminhos marginais.

As configurações de transmissão possíveis totalizam 13 caminhos distintos. Os diferentes caminhos e respetivos resultados são apresentados na tabela 40.

Tabela 40 - Índices de redução sonora de cada caminho de transmissão.

Elemento	$R_{ij,w}$	Resultado (dB)
Parede separação (s)	R_{Dd}	45,0
	R_{1d}	54,4
	R_{2d}	54,4
	R_{3d}	69,9
	R_{4d}	55,2
Pavimento (*F=f=1*)	R_{D1}	54,4
	R_{11}	56,6
Teto (*F=f=2*)	R_{D2}	54,4
	R_{22}	56,6
Parede exterior (*F=f=3*)	R_{D3}	69,9
	R_{33}	93,0
Parede interior (*F=f=4*)	R_{D4}	55,2
	R_{44}	55,2

Os índices são calculados em bandas de frequência de 1/3 oitava entre os 100 *Hz* e os 3150 *Hz*. Reunindo os resultados apresentados e aplicando a expressão de cálculo 6.8 obteve-se um valor relativo ao índice de redução sonora aparente padronizado igual a 42 dB.

Partindo de R'_w e atendendo ao volume do compartimento recetor V (m3), à área do elemento de separação S (m2) e ao tempo de reverberação de referência T_0 (s), é possível obter o valor do índice de isolamento sonoro $D_{nT,w}$.

$$D_{nT,w} = R'_w + 10log\left(\frac{0,16*V}{S*T_0}\right)(dB) \quad (6.17)$$

O resultado decorrente da aplicação do modelo descrito é 43 dB.

7
CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1. DISCUSSÃO DE RESULTADOS E SÍNTESE DE CONCLUSÕES

7.1.1. ENSAIOS LABORATORIAIS

O plano de medições aplicado na realização dos ensaios laboratoriais permitiu a recolha de informação ao longo do processo de construção do elemento. A realização de ensaios nas diferentes fases de construção, correspondentes à estrutura de madeira, ao conjunto da estrutura com a primeira camada de reboco e ao conjunto do núcleo de madeira e a espessura de reboco final, permitiu conhecer a influência das diferentes camadas no comportamento acústico do elemento de tabique.

O desempenho acústico da estrutura de madeira *per se* é desprezável. As irregularidades geométricas do tabuado de madeira e a sua influência na disposição das tábuas implicam a existência de aberturas de grande dimensão no painel de suporte. Ora, a existência de aberturas condiciona a proteção sonora que o painel oferece. A aplicação de uma camada de recobrimento de argamassa que possibilite a uniformização da superfície do elemento colmata a deficiência gerada pela existência de aberturas. Se a mesma camada de recobrimento for duplicada renuem-se condições para a melhoria gradual da capacidade de redução sonora do painel em teste.

O disposto é corroborado pelos ensaios realizados. A utilização de uma camada de revestimento de argamassa de saibro estabilizou o índice de redução sonora (R_w) definido pela parede de tabique em torno do 37 dB, correspondente a um aumento de 22 dB face ao obtido através do ensaio da estrutura de madeira simples. A aplicação de uma nova camada com 1cm, duplicando a existente, permitiu um ganho de 10 dB, redefinindo o índice de redução sonora do elemento em torno dos 47 dB.

O plano de medições definido permitiu também a recolha de informação coincidente com o processo de secagem do elemento. De acordo com o descrito anteriormente, o processo de secagem no interior das câmaras acústicas foi processado de forma constante e gradual num ambiente onde a temperatura e a humidade relativa do ar foram controladas. Apesar do disposto, não foi possível a realização de um ensaio caracterizador do elemento construtivo seco antes do término da campanha de medições. A secagem da parede, dada a quantidade de água contida nos materiais de construção, é um processo moroso. Aquando da realização do último ensaio de caracterização, 192 horas após a conclusão da construção da parede, o elemento contava com 40% de humidade à superfície e 80% de humidade no seu interior. A Tabela 16 apresenta a evolução dos diferentes teores de humidade em função do tempo de secagem do elemento.

A análise da evolução da redução sonora por banda de frequência para os diferentes ensaios realizados em laboratório determina que a diminuição do teor de água no interior do elemento construtivo reduz o

seu desempenho para altas frequências. O comportamento para o mesmo elemento, constituído pela estrutura de madeira e dois centímetros de argamassa de saibro, é caracterizado por uma diferença de 2dB no índice de redução sonora padronizado, entre o ensaio realizado imediatamente após a conclusão dos trabalhos e aquele efetuado 192h depois. A análise da representação gráfica da variação da redução sonora (Figura 26) revela que a perturbação surge no domínio das altas frequências.

Uma outra explicação para o facto observado surge associada à fissuração do elemento de teste. A abertura de fissuras de pequena espessura no plano horizontal em toda a largura da parede pode ter contribuído para a diminuição registada. Para minimizar a fissuração da parede teria sido conveniente embeber a estrutura de madeira em água para que o processo de secagem se processasse de forma continua no sentido da camada superficial. Como tal não aconteceu, o tabuado de madeira absorveu, numa fase inicial, a água em fase líquida existente na argamassa de saibro promovendo a retração da parede de tabique.

Neste mesmo domínio, é também comum o aparecimento de fissuras nos limites de ligação entre os elementos a testar e a abertura de ensaio das câmaras reverberantes. Se a solidarização dos mesmos elementos não for assegurada na fase inicial de construção, a sobrecarga associada à argamassa, depois da estrutura de madeira ser rebocada, pode promover a sua separação. No caso ensaiado, a ligação referida foi conseguida recorrendo apenas a uma fita aderente, a um elemento siliconado e ao travamento proporcionado pelo próprio tabuado de madeira. No entanto, a inspeção visual conduzida depois da campanha de medições ter terminado não verificou a existência de aberturas, tendo a ligação permanecido unida.

O registo do ruído de fundo na câmara recetora, condição imposta pela regulamentação aplicável, pretende verificar a existência de possíveis perturbações no campo sonoro incidente. A partir dos resultados das diferentes medições executadas é possível perceber que o mesmo não se mantem constante. As pequenas variações verificadas decorrem da utilização partilhada do laboratório. A execução de tarefas em simultâneo à realização de ensaios no espaço onde as câmaras reverberantes se integram influenciam os resultados obtidos. Fatores como a ventilação da nave, exterior aos compartimentos de ensaios, provocam um aumento no ruído em todas as gamas de frequência. Ou a utilização pontual de um equipamento de corte pode provocar um pico inesperado na gama das altas frequências. Contudo, a realização dos ensaios atendeu à sua compatibilização com as ações externas a decorrer.

7.1.2. MODELOS DE CÁLCULO TEÓRICOS

Os modelos teóricos de previsão de comportamento acústico aplicados permitiram a determinação de um intervalo de valores de comparação para os quais seria expectável que os resultados obtidos em laboratório coincidissem. Não se tratando de modelos desenvolvidos especificamente para o elemento investigado a discrepância verificada era esperada e não causa surpresa. O índice de redução sonora determinado através do método de Sharp é, dos indicadores obtidos através dos diferentes modelos, aquele que se aproxima do resultado obtido para a última medição realizada em laboratório. Contudo, o valor de R_w de 42 dB contempla uma diferença de -3dB face ao resultado laboratorial de 45 dB.

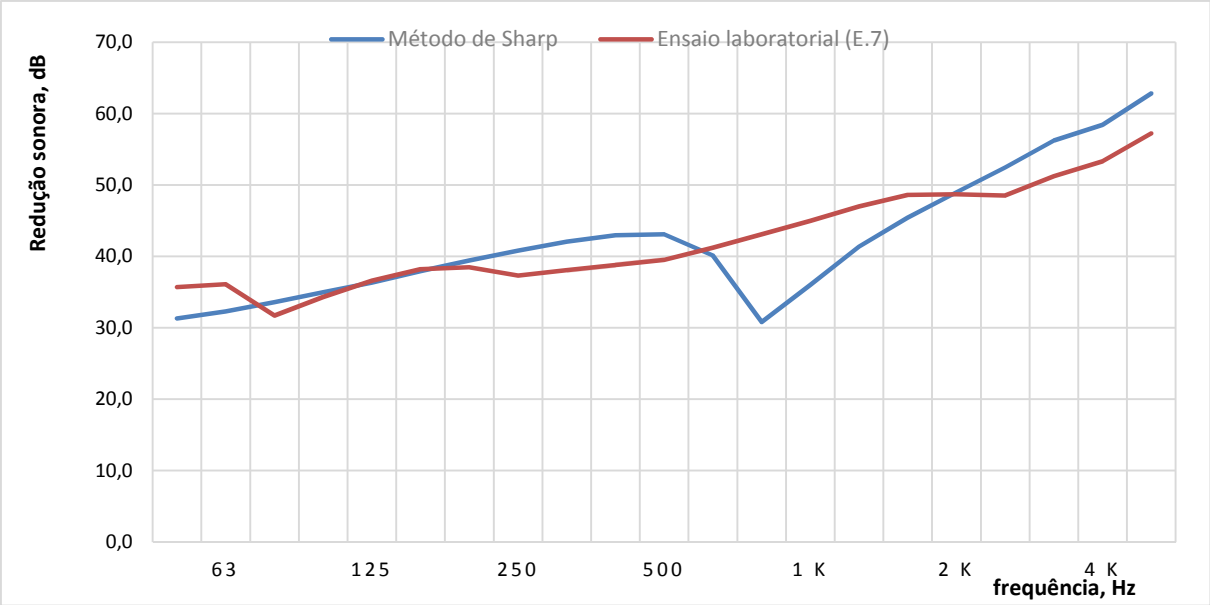


Figura 37 - Representação gráfica do índice de redução sonora obtido através do ensaio laboratorial e do método de Sharp.

A Figura 37 traduz a relação entre o índice de redução sonora, por bandas de 1/3 oitava, do elemento em tabique, obtido em laboratório e o determinado através do modelo teórico de Sharp. De acordo com o modelo, em painéis ortotrópicos, a redução sonora é subvalorizada para as baixas frequências sendo que o erro é inversamente proporcional à diminuição da frequência. No entanto, e ao contrário do esperado, os resultados obtidos são superiores ou, no limite, iguais aos determinados através do ensaio laboratorial. No campo oposto, o modelo define para frequências elevadas e painéis com amortecimento interno elevado uma redução sonora ligeiramente superior à estimada. O pressuposto é identificável após a ocorrência da frequência crítica no caso do modelo teórico. O ensaio conduzido em laboratório não define de forma inequívoca a existência de uma frequência crítica no elemento construtivo.

O modelo proposto por Ljunggren previa melhorias face à aplicação do método de Sharp e aos valores determinados experimentalmente em laboratório. No entanto, o resultado derivado da sua aplicação conduziu a um valor inferior, revelando que o comportamento da parede de tabique se aproxima do de um painel com espessura inferior a 1/6 do comprimento de onda da onda incidente.

7.1.3. MEDIÇÕES *IN-SITU*

A realização de ensaios *in-situ* do elemento de estudo é determinante para a sua caracterização. Para que os resultados dos ensaios fossem precisos e relativos ao mesmo elemento de teste foi necessário localizar paredes de tabique que fossem construtivamente semelhantes à construída em laboratório. Assim, foram analisados seis elementos construtivos distintos cujos valores, relativos ao índice de isolamento sonoro padronizado $D_{nT,w}$, ficaram estabelecidos no intervalo entre os 32 dB e os 42 dB.

As diferenças verificadas derivam das condições de conservação e da arquitetura dos edifícios onde os elementos de estudo se inserem. Os ensaios conduzidos *in-situ* contemplam a existência de caminhos marginais de transmissão. Assim, as características e condições dos elementos construtivos que confrontam os elementos a ensaiar influenciam a propagação das ondas sonoras. A própria disposição

geométrica dos compartimentos onde são conduzidos os ensaios têm influência nos índices de isolamento sonoro $D_{nT,w}$. Os ensaios realizados onde a envolvente se encontrava degradada conduziram à obtenção de valores próximos dos 32 dB. Os restantes, para diferentes condições de ensaio, resultaram em valores delimitados num intervalo entre 38 dB e 42 dB, tendo o limite superior sido atingido para apenas um elemento de teste.

Os elementos construtivos analisados exibem um comportamento eficaz para frequências que rondam os 1000 Hz. Contudo, o seu desempenho não é linear, não é constante e é diretamente proporcional à banda de frequência analisada. Á medida que a frequência da onda sonora diminui o isolamento sonoro bruto do elemento é tendencialmente menor.

O ruído de fundo registado nos diferentes compartimentos apresenta variações associadas ao ambiente sonoro da envolvente do edifício. O registo do tempo de reverberação resultou na obtenção de valores constantes para todos os compartimentos.

7.1.4. MÉTODO DAS TRANSMISSÕES MARGINAIS

Da aplicação do método das transmissões marginais, constante na EN12354-1, foi possível determinar o isolamento sonoro padronizado a ruídos de condução aérea em compartimentos interiores, $D_{nT,w}$, a partir da redução sonora padronizada R_w do elemento ensaiado em laboratório. A aplicação do método proveniente da norma resultou na obtenção de um valor para o parâmetro $D_{nT,w}$ igual a 43 dB. Atendendo a que o resultado máximo resultante da campanha de ensaios *in-situ* obtido para o mesmo indicador foi de 42 dB a consideração de que o método aplicado é fiável, apesar de expectável, pode não corresponder à realidade.

Os valores experimentais obtidos diferem ligeiramente do valor calculado através da norma. Contudo, os resultados não são suficientes para determinar a aplicabilidade do método normalizado de cálculo dos índices de redução de transmissão de vibrações (k_{ij}) ao elemento de tabique.

A determinação do índice de isolamento sonoro parte da definição da massa superficial dos elementos que constituem os diferentes caminhos de transmissão. Assim, e de acordo com o explicado, a sua consideração deveria atender à determinação rigorosa das propriedades dos elementos construtivos. No entanto, não foram realizados ensaios adicionais de caracterização das propriedades dos elementos referidos. Os valores apresentados na Tabela 38 correspondem a valores característicos de materiais com propriedades semelhantes podendo introduzir imprecisões no processo de cálculo.

O cálculo referido implica também a análise do tipo de ligações envolvidas no processo de transmissão sonora. A consideração de que os elementos se encontram unidos através de ligações rígidas permitiu a determinação dos índices de redução de transmissão de vibrações. Contudo, quer as soluções de ligação tipificadas quer a disposição geométrica dos elementos (em cruz ou em T) apresentadas na norma não são suficientes para atender às especificidades das soluções encontradas *in-situ*. As mesmas foram estabelecidas atendendo às condicionantes dos edifícios observados.

A determinação da redução sonora dos elementos construtivos diferentes do de separação atende à definição genérica das propriedades dos materiais que os constituem. Neste sentido, à semelhança dos resultados obtidos após aplicação dos métodos teóricos, o disposto pode implicar a existência de pequenos desvios nos resultados. Contemplando também no cálculo das transmissões marginais a consideração de que os elementos de envolvente são homogéneos reúnem-se condições para a acumulação de desvios face aos resultados reais obtidos.

7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Numa atualidade em que a reabilitação surge com uma importância crescente, a compreensão do sistema construtivo tradicional torna-se necessária, assim como a criação de uma plataforma que reúna informações relativas a este sistema, aos elementos e aos materiais que o constituem.

No âmbito da reabilitação acústica de edifícios tradicionais, o presente trabalho prevê-se pioneiro na caracterização de um elemento construtivo - a parede de tabique. Não obstante, este trabalho focou-se no estudo da parede de tabique simples de duplo tabuado, tornando-se igualmente importante e interessante a caracterização de outras configurações construtivas. Por outro lado, é conveniente aumentar a amostragem de elementos ensaiados *in-situ* e catalogar os resultados em função de planos caracterizadores da envolvente dos elementos, de modo a eliminar o enviesamento produzido pelos elementos degradados.

A caracterização das propriedades dos materiais que constituem a parede de tabique é igualmente interessante, já que pode influenciar os resultados. Assim, a realização de ensaios laboratoriais caracterizadores de parâmetros como, por exemplo, a velocidade de propagação das ondas longitudinais e do fator de perdas, ou mesmo de propriedades não acústicas como o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, revela-se útil para uma definição mais fidedigna do comportamento acústico do elemento.

Poderá ser igualmente interessante o desenvolvimento de modelos teóricos de cálculo aplicados especificamente a elementos de tabique.

Por último, propõe-se a realização de estudos de viabilidade económica, com o objetivo último de perceber a rentabilidade da conservação de uma parede de tabique face à sua reconstrução ou à construção de uma nova parede recorrendo a outros métodos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] *Manual de Apoio ao Projecto de Recuperação de Edifícios Antigos*. Faculdade de Arquitectura da Universidade do Porto, Porto.

[2] Freitas, V. (2000). *Manual de apoio ao projecto de reabilitação de edifícios antigos*. Ordem dos Engenheiros, Região Norte, Porto.

[3] Howard, K., Peters, J. Sharp, J (1983). *The Management of a Student Research Project*. Editor, Cidade de publicação.

[4] Bell, J. (2005). *Doing your Research Project*. McGraw Hill Education, Berksgire, England.

[5] EN 12354-1. Building acoustics – estimation of acoustic performance of buildings from de permformance of elements – part 1: airborne sound insulation between rooms; 2000 (ISO 15712-1 since 2005)

[6] EN 12354-2. Building acoustics – estimation of acoustic performance of buildings from de permformance of elements – part 1: impact sound insulation between rooms; 2000 (ISO 15712-2 since 2005)

[7] Queirós, D. (2010). *Caracterização do Comportamento Acústico de Edifícios Reabilitados*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

[8] Gerrestsen, E. *Calculation of the sound transmission between dwellings by partitions and flanking structures.* Applied Acoustics 12, 1979, 413-432.

[9] Hongisto, V. (2000). *Airborne sound insulation of wall structures – measurment and prediction methods.* Dissertação de Doutoramento, Universidade Técnica de Helsínquia.

[10] Trevathan, J. Pearse, J. (2006). *The effect of workmanship on the transmission of airborne sound trough light framed walls.* Applied Acoustics 69, 2008, 127-131.

[11] Galbrun, L. (2007). *The prediction of airborne sound transmission between two rooms using first-order flanking paths*. Applied Acoustics 69, 2008, 1332-1342.

[12] Pedersen, D.. *Evaluation of EN12354 Part 1 and 2 for Nordic Dwelling Houses.* Building Acoustics, 1999, 259-268.

[13] Metzen, H., Shumacher, R.. *Prediction of Sound Insulation in Timber Frame Buildings,* Procedings of Forum Acousticum, Budapeste, Hungary, 2005, 2347-2352.

[14] EN ISO 717-1:1996. Acoustics – Rating of Sound Insulation in Buildings and Building Elements – Part 1: Airborne Sound Insulation;

[15] Craik, R. Smith, R. *Sound transmission trough double leaf lightwight partitions – part 1: airborne sound,* Applied Acoustics 61, 200, 223-245.

[16] Elmallawny, A. *Criticism of statistical energy analyses for the calculation of sound insulation – part 1: Single partitions.* Applied Acoustics 11, 1978, 305-312.

[17] Nightingale, T. *Application of the CEN draft building acoustics prediction model to a lightweight double leaf construction.* Applied Acoustics 46, 1995, 265-284

[18] Craik, R. *Sound transmission through builidngs using statistical energy analyses.* Gower Publishing Ltd, Hampshire, England, 1996.

[19] Fahy, F.. *Sound and structural vibration – Radiation, transmission and response.* Academic Press Ltd., London, England, 1985.

[20] Carvalho, A.. *Texto de Apoio à Disciplina de Acústica Ambiental e de Edifícios.* Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2013.

[21] Bernarek, L.L., Vér, I.L. (1992). *Noise and vibration control engineering: principles and applications,* John Wiley & Sons, EUA.

[22] Warnock, A., *Some effects of multiple sources in reverberation room tests.* Procedings of Internoise 82, San Francisco, USA, 17-19 May 1982, 833-836.

[23] Warnock, A., *Influence of specimen frame and reveals on sound transmission loss measurment.* Applied Acoustics 15, 1982, 307-314.

[24] Mulholland, K., Lyon R.. *Sound Insulation at low frequencies.* Journal of Acoustical Society of America 54, 1973, 867-878.

[25] Kihlman, T., Nilsson, A.. *The effects of some laboratory designs and mounting conditions on reduction índex measurments.* Journal of Sound and Vibration 24, 1972, 349-364.

[26] Craik, R. *The influence of the laboratory on measurments of wall performance.* Applied Acoustics 35, 1992, 25-46.

[27] Kruppa, P., Olesen, H.. *Intercomparison of laboratory sound insulation measurements in window panes.* Report EUR 11576 EN, The commission of the European Communities, BCR Information, Applied Metrology, 1988.

[28] Olesen, H., Pedersen, D.. *The development of guidelines for the choice of loudspeaker positions for building acoustic laboratory measurements.* Report EUR 13380 EN, The commission of the European Communities, BCR Information, Applied Metrology, 1991.

[29] Hopkins, C., Turner, P. (2005). *Field measurment of airborne sound insulation between rooms with non-difuse sound fields at low frequencies.* Applied Acoustics 66, 2005, 1339-1382.

[30] Osipov, A., Mees, P., Vermeir, G.. *Low-Frequency Airborne Sound Transmission through Single Partitions in Buildings.* Applied Acoustics 52, 1997, 273-288.

[31] Rasmussen, B., Rindel, J.. *Sound insulation between dwellings – Descriptors applied in building regulations in Europe.* Appliead Acoustics 71, 2010, 171-180.

[32] Rasmussen, B.. *Sound insulation between dwellings – Requirements in building regulations in Europe.* Appliead Acoustics 71, 2010, 373-385.

[33] RRAE: *Regulamento dos Requisitos Acústicos de Edifícios,* Decreto-Lei nº 129/2002, de 11 de Maio, Diário da Republica, 1ª Série.

[34] RGEU: *Regulamento Geral da Edificações urbanas,* Decreto-Lei nº 38382, de 7 de Agosto de 1951.

[35] Teixeira, J. *Descrição do sistema construtivo da casa burguesa do Porto entre os séculos XVII e XIX*. Provas de aptidão pedagógica e capacidade científica.

[36] Flórido, F. (2010). *Tipificação de Soluções de Reabilitação de Paredes de Madeira em Edifícios Antigos*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

[37] Pinho, F. (2000). *Paredes de edifícios antigos em Portugal*. Colecção Edificios, n.8, LNEC, Lisboa.

[38] Pinto, J. *et al* (2010). *Characterization of Traditional Tabique Constructions in Douro North Valley Region*, WSEAS Transactions on Enviroment and Development, Issue 2, volume 6, Feb, 2010.

[39] Pinto, J. *et al* (2010). *Tabique Constructions Characterization in Douro North Valley, Portugal: A First Step to Preserve this Architectural Heritage.* Civil Engineering Department, University of Aveiro.

[40] Bies, D., Hansen, C. *Engineering Noise Control. Theory and Practice. Fourth Edition.* Spon Press. Abingdon. 2009.

[41] Ljunggren, S. *Airborne sound insulation of thick walls*, J.Acoust.Soc.Am. 89, 1991, 2338-2345.

[42] Folds, D., Loggins, C. *Transmission and reflection of ultrasonic waves in layered media.* J.Acoust.Soc.Am. 62, 1977, 1102-1109.

[43] Moore, J., Lyon, R. *Sound transmission loss characteristics of sandwich panel constructions.* J.Acoust.Soc.Am. 89, 1991, 777-791.

[44] Rodrigues, Romana (2004). *Construções antigas de madeira: Experiência de obra e reforço estrutural*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho.

[45] http://www.acoustique-materiaux.net. 29/04/2014.

[46] EN ISO 10140:2010. Acoustics – Laboratory measurments of sound insulation of building elements.

[47] EN ISO 140-4:1998. Acústica – Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção – Parte 4: Medição, *in-situ*, do isolamento sonoro a sons aéreos entre compartimentos.

ANEXO A – BOLETINS LABORATORIAIS

MEDIÇÃO EM LABORATÓRIO DO ISOLAMENTO SONORO A SONS DE CONDUÇÃO AÉREA.

Índice de redução, *R* , de acordo com a norma EN ISO 10140-2

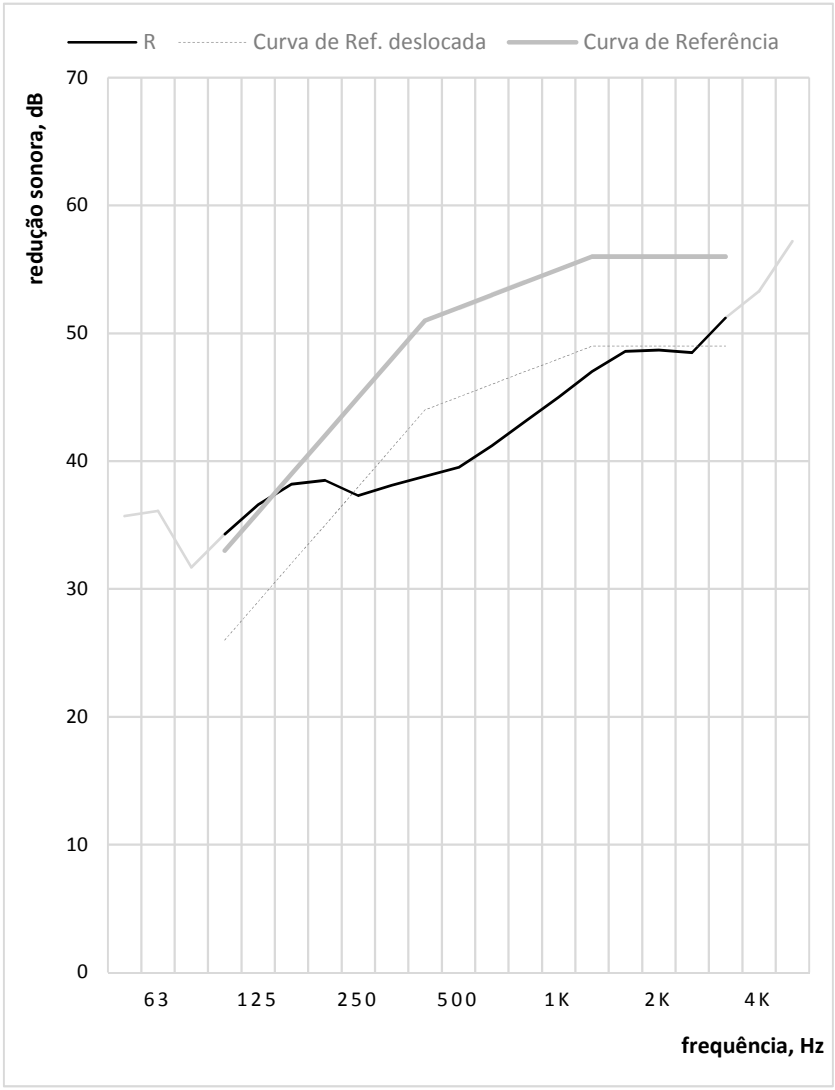
Data de realização do ensaio: 02.05.2014
Compartimento emssior **E1**
Compartimento recetor: **R1**
Observações:

Parede de tabique simples de duplo tabuado de tábuas costaneiras com 2cm de expessura. Rebocada em ambas as faces com 2cm de argamassa tradicional de saibro.

Área do elemento a ensaiar:	10	m^2	Massa por unidade de área	-	Kg/m^2
Temperatura do ar, nas câmaras de ensaio:	17	ºC	Humidade do ar nos compartimentos	63	%
Volume do compartimento emissor:	102	m^3	Volume do compartimento recetor	211	m^3

Frequênica (Hz)	R dB (1/3 oitava)
50	
63	
80	
100*	34,3
125	36,6
160	38,2
200	38,5
250	37,3
315	38,1
400	38,8
500	39,5
630	41,2
800	43,1
1 000	45,0
1 250	47,0
1 600	48,6
2 000	48,7
2 500	48,5
3 150	51,2
4 000	
5 000	

*correção relativa ao ruído de fundo



CÁLCULO DE ACORDO COM A NORMA ISO 717-1

R_w = **45** dB

Avaliação baseada em resultados laboratoriais obtidos por método de engenharia

Boletim n.º: **B.1**
Data: **02.06.2014**

Laboratório de ensaio: **FEUP**
Responsável: **Kevin Moreira**

MEDIÇÃO *IN-SITU* DO ISOLAMENTO SONORO A SONS DE CONDUÇÃO AÉREA.

Isolamento sonoro padronizado de acordo com a norma EN ISO 140-4

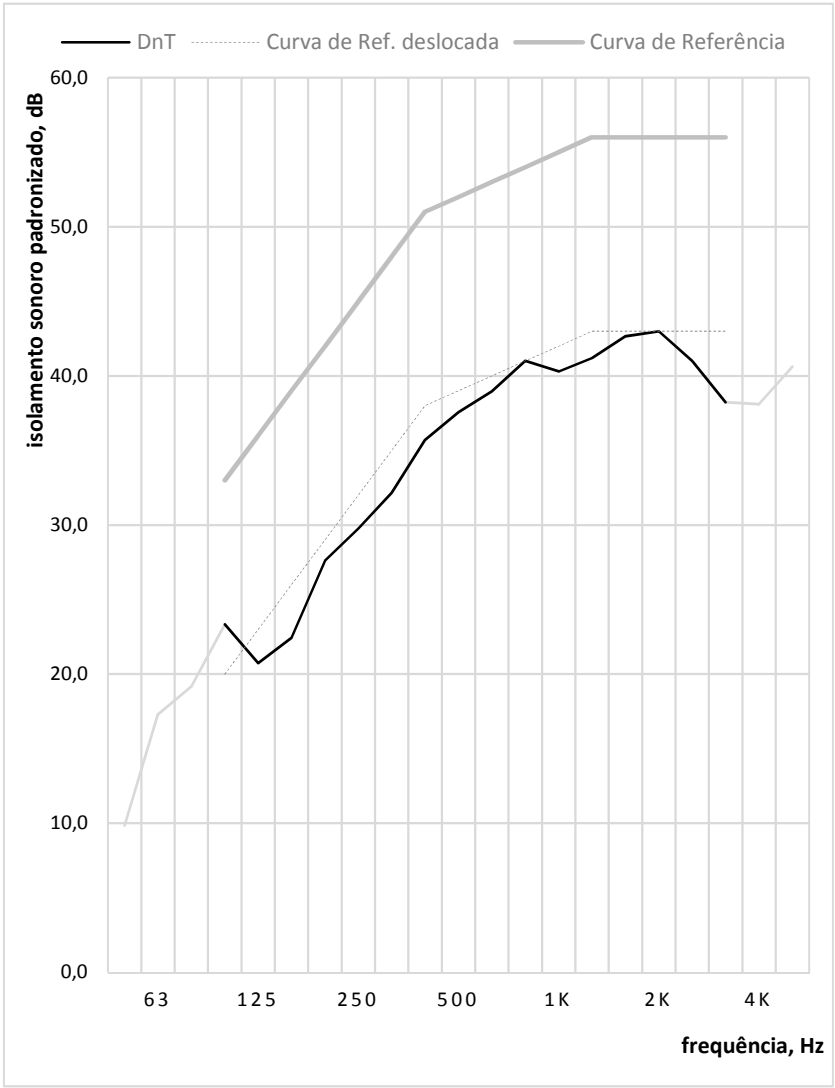
Data de realização do ensaio: 20.05.2014
Compartimento emssior 2 (fração A)
Compartimento recetor: 1 (fração A)
Observações:

O ensaio pretende caracterizar o isolamento sonoro a sons de condução aérea de parede divisória de tabique simples. O edificio encontra-se habitado e o compartimento contém mobiliario. O ensaio foi realizado por um operador e foram respeitadas, sempre que possivel, as condições de ensaio definidas.

Área do elemento a ensaiar:	10	m^2	Massa por unidade de área	-	Kg/m^2
Temperatura do ar, nas câmaras de ensaio:	17	ºC	Humidade do ar nos compartimentos	53	%
Volume do compartimento emissor:	33,5	m^3	Volume do compartimento recetor	35	m^3

Frequênica (Hz)	DnT dB (1/3 oitava)
50	
63	
80	
100*	23,3
125	20,7
160	22,4
200	27,6
250	29,8
315	32,2
400	35,7
500	37,6
630	39,0
800	41,0
1 000	40,3
1 250	41,2
1 600	42,7
2 000	43,0
2 500	41,0
3 150	38,2
4 000	
5 000	

*correção relativa ao ruido de fundo



CÁLCULO DE ACORDO COM A NORMA ISO 717-1

DnT,w = 39 dB

Avaliação baseada em resultados laboratoriais obtidos por método de engenharia

Boletim n.º: B.2
Data: 02.06.2014

Laboratório de ensaio: FEUP
Responsável: Kevin Moreira

MEDIÇÃO *IN-SITU* DO ISOLAMENTO SONORO A SONS DE CONDUÇÃO AÉREA.

Isolamento sonoro padronizado de acordo com a norma EN ISO 140-4

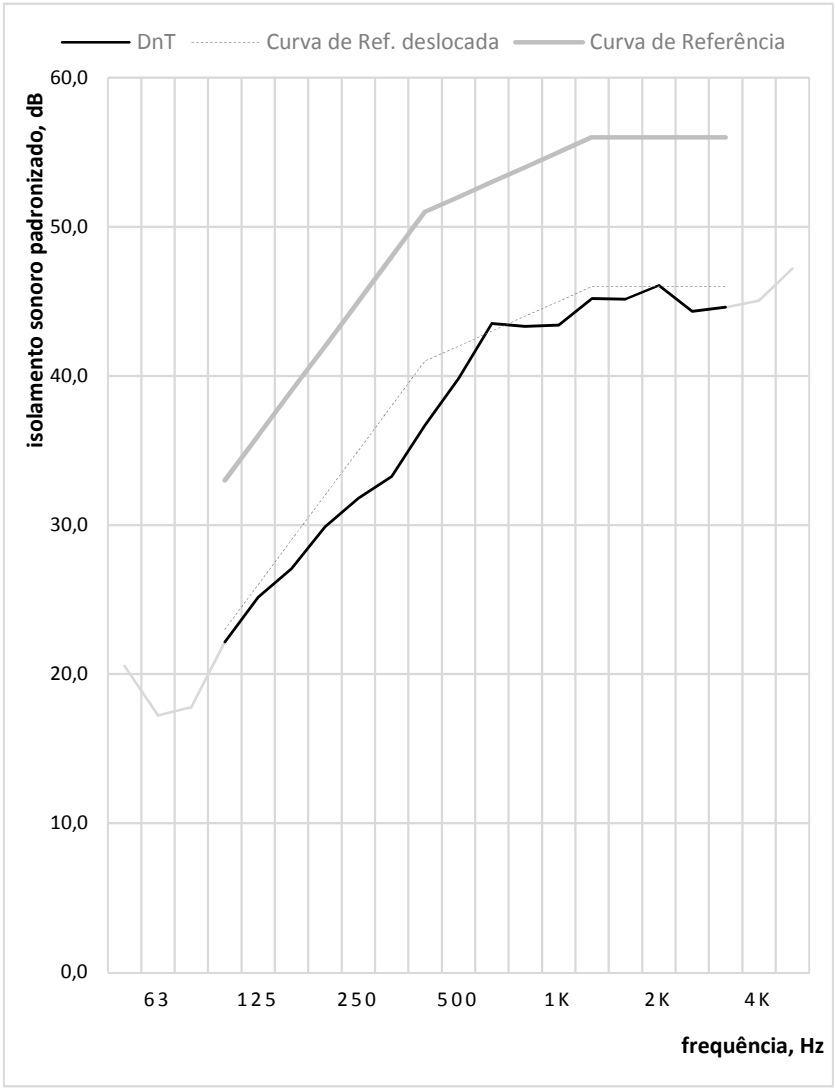
Data de realização do ensaio: 20.05.2014
Compartimento emssior **2 (fração A)**
Compartimento recetor: **3 (fração A)**
Observações:

O ensaio pretende caracterizar o isolamento sonoro a sons de condução aérea de parede divisória de tabique simples. O edifício encontra-se habitado e o compartimento contém mobiliário. A envolvente do elemento contém envidraçados danificados.

Área do elemento a ensaiar:	**8,4**	m^2	Massa por unidade de área	**-**	Kg/m^2
Temperatura do ar, nas câmaras de ensaio:	**18**	ºC	Humidade do ar nos compartimentos	**52**	%
Volume do compartimento emissor:	**33,5**	m^3	Volume do compartimento recetor	**35**	m^3

Frequênica (Hz)	DnT dB (1/3 oitava)
50	
63	
80	
100*	22,1
125*	25,2
160	27,1
200	29,9
250	31,8
315	33,3
400	36,7
500	39,8
630	43,5
800*	43,3
1000*	43,4
1250*	45,2
1 600	45,1
2 000	46,1
2 500	44,3
3 150	44,6
4 000	
5 000	

*correção relativa ao ruído de fundo



CÁLCULO DE ACORDO COM A NORMA ISO 717-1

DnT,w = **42** dB

Avaliação baseada em resultados laboratoriais obtidos por método de engenharia

Boletim n.º: **B.3**
Data: **02.06.2014**

Laboratório de ensaio: **FEUP**
Responsável: **Kevin Moreira**

MEDIÇÃO *IN-SITU* DO ISOLAMENTO SONORO A SONS DE CONDUÇÃO AÉREA.

Isolamento sonoro padronizado de acordo com a norma EN ISO 140-4

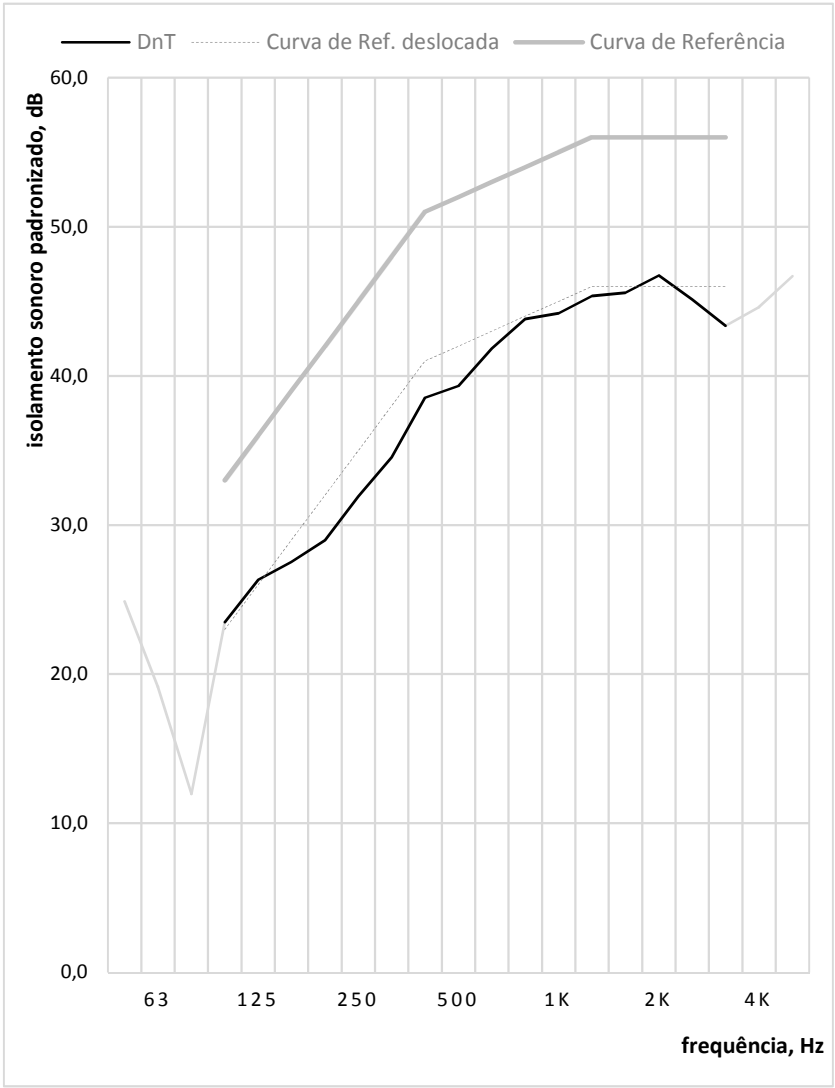
Data de realização do ensaio: 20.05.2014
Compartimento emssior **3 (fração A)**
Compartimento recetor: **2 (fração A)**
Observações:

O ensaio pretende caracterizar o isolamento sonoro a sons de condução aérea de parede divisória de tabique simples. O edificio encontra-se habitado e o compartimento contém mobiliário. A envolvente do elemento contém envidraçados danificados.

Área do elemento a ensaiar:	**8,4**	m^2	Massa por unidade de área	**-**	Kg/m^2
Temperatura do ar, nas câmaras de ensaio:	**17**	ºC	Humidade do ar nos compartimentos	**52**	%
Volume do compartimento emissor:	**35**	m^3	Volume do compartimento recetor	**33,5**	m^3

Frequênica (Hz)	DnT dB (1/3 oitava)
50	
63	
80	
100*	23,5
125*	26,3
160	27,5
200	29,0
250	31,9
315	34,5
400	38,5
500	39,3
630	41,8
800	43,8
1 000	44,2
1 250	45,4
1 600	45,6
2 000	46,7
2 500	45,1
3 150	43,4
4 000	
5 000	

*correção relativa ao ruído de fundo



CÁLCULO DE ACORDO COM A NORMA ISO 717-1

DnT,w = **42** dB

Avaliação baseada em resultados laboratoriais obtidos por método de engenharia

Boletim n.º: **B.4**
Data: **02.06.2014**

Laboratório de ensaio: **FEUP**
Responsável: **Kevin Moreira**

MEDIÇÃO *IN-SITU* DO ISOLAMENTO SONORO A SONS DE CONDUÇÃO AÉREA.

Isolamento sonoro padronizado de acordo com a norma EN ISO 140-4

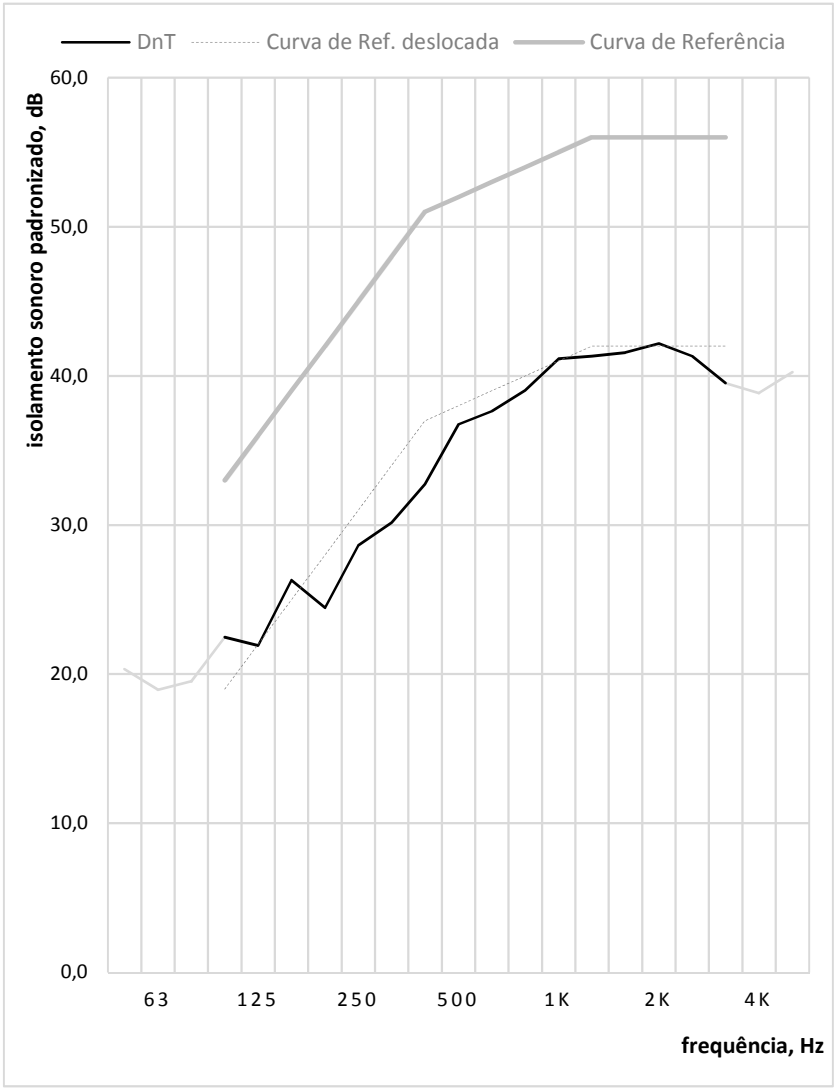
Data de realização do ensaio: 20.05.2014
Compartimento emssior **3 (fração A)**
Compartimento recetor: **4 (fração A)**
Observações:

O ensaio pretende caracterizar o isolamento sonoro a sons de condução aérea de parede divisória de tabique simples. O edificio encontra-se habitado. O compartimento emissor contém vãos envidraçados em mau estado de conservação.

Área do elemento a ensaiar:	**8,7**	m^2	Massa por unidade de área	**-**	Kg/m^2
Temperatura do ar, nas câmaras de ensaio:	**17**	ºC	Humidade do ar nos compartimentos	**55**	%
Volume do compartimento emissor:	**35**	m^3	Volume do compartimento recetor	**31,5**	m^3

Frequênica (Hz)	DnT dB (1/3 oitava)
50	
63	
80	
100	22,5
125	21,9
160	26,3
200	24,4
250	28,6
315	30,2
400	32,7
500	36,7
630	37,6
800	39,0
1 000	41,1
1 250	41,3
1 600	41,6
2 000	42,2
2 500	41,3
3 150	39,5
4 000	
5 000	

*correção relativa ao ruído de fundo



CÁLCULO DE ACORDO COM A NORMA ISO 717-1

DnT,w = **38** dB

Avaliação baseada em resultados laboratoriais obtidos por método de engenharia

Boletim n.º: **B.5**
Data: **02.06.2014**

Laboratório de ensaio: **FEUP**
Responsável: **Kevin Moreira**

MEDIÇÃO *IN-SITU* DO ISOLAMENTO SONORO A SONS DE CONDUÇÃO AÉREA.

Isolamento sonoro padronizado de acordo com a norma EN ISO 140-4

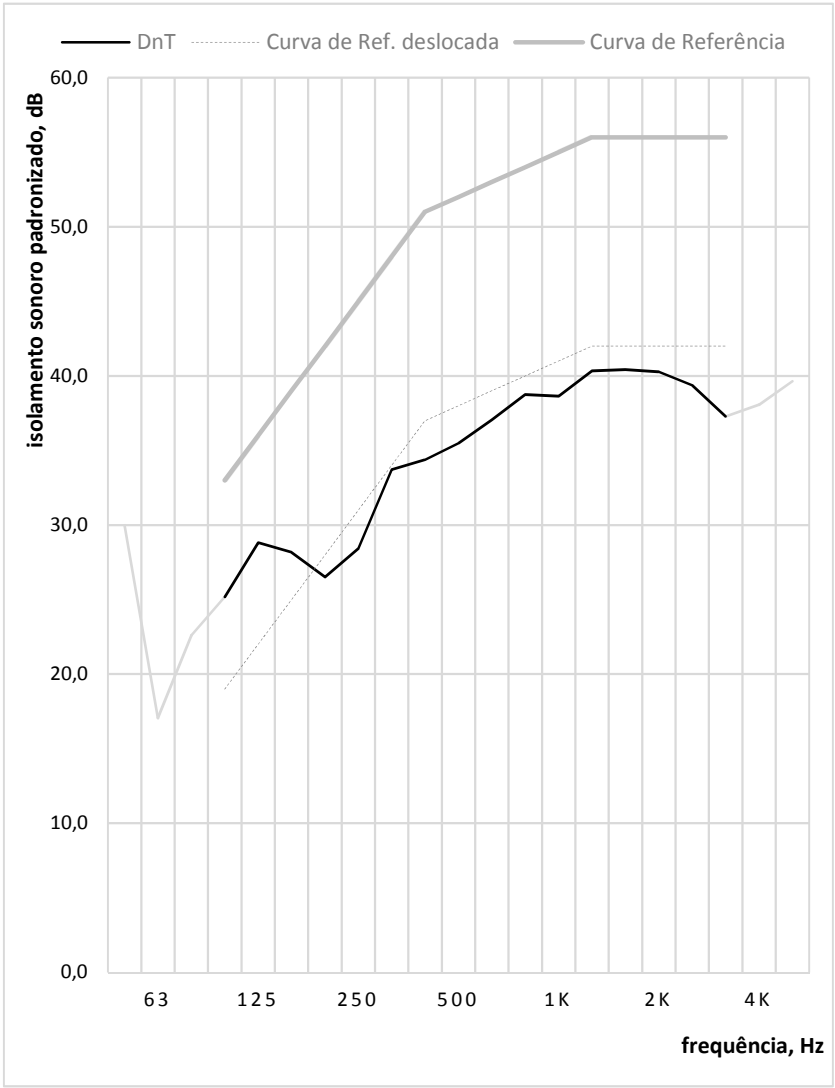
Data de realização do ensaio: 25.05.2014
Compartimento emssior **1 (fração B)**
Compartimento recetor: **2 (fração B)**
Observações:

O ensaio pretende caracterizar o isolamento sonoro a sons de condução aérea de parede divisória de tabique simples. O edificio encontra-se habitado e o piso de ensaio foi alvo de manutenção. A envolvente do elemento ensaiado encontra-se em bom estado de conservação.

Área do elemento a ensaiar:	**5**	m^2	Massa por unidade de área	**-**	Kg/m^2
Temperatura do ar, nas câmaras de ensaio:	**19**	ºC	Humidade do ar nos compartimentos	**45**	%
Volume do compartimento emissor:	**12,5**	m^3	Volume do compartimento recetor	**11,8**	m^3

Frequênica (Hz)	DnT dB (1/3 oitava)
50	
63	
80	
100	25,2
125	28,8
160	28,2
200	26,5
250	28,4
315	33,7
400	34,4
500	35,5
630	37,1
800	38,8
1 000	38,7
1 250	40,3
1 600	40,4
2 000	40,3
2 500	39,4
3 150	37,3
4 000	
5 000	

*correção relativa ao ruído de fundo



CÁLCULO DE ACORDO COM A NORMA ISO 717-1

DnT ,w = **38** dB

Avaliação baseada em resultados laboratoriais obtidos por método de engenharia

Boletim n.º: **B.6**
Data: **02.06.2014**

Laboratório de ensaio: **FEUP**
Responsável: **Kevin Moreira**

MEDIÇÃO *IN-SITU* DO ISOLAMENTO SONORO A SONS DE CONDUÇÃO AÉREA.

Isolamento sonoro padronizado de acordo com a norma EN ISO 140-4

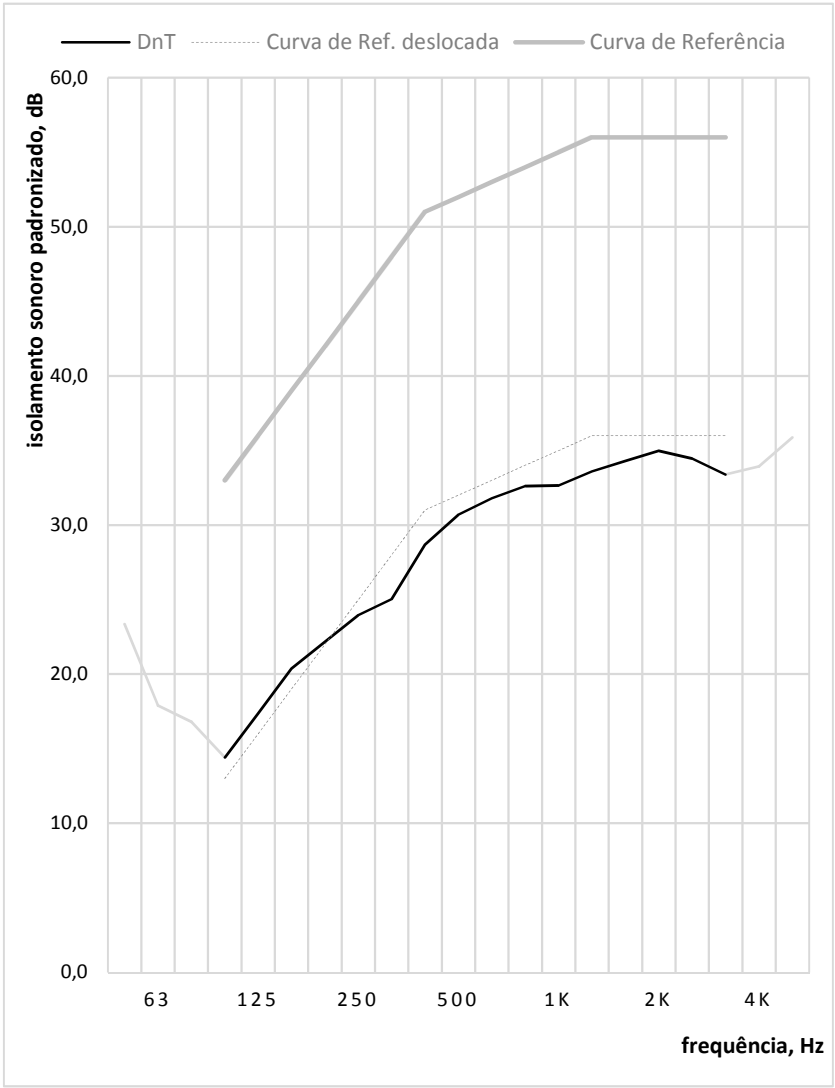
Data de realização do ensaio: 25.05.2014
Compartimento emssior **4 (fração B)**
Compartimento recetor: **3 (fração B)**
Observações:

O ensaio pretende caracterizar o isolamento sonoro a sons de condução aérea de parede divisória de tabique simples. O edificio encontra-se habitado mas o piso de ensaio não é utilizado. A envolvente do elemento ensaiado encontra-se degradada. Os compartimentos de ensaio contêm mobiliário.

Área do elemento a ensaiar:	**4,5**	m^2	Massa por unidade de área	**-**	Kg/m^2
Temperatura do ar, nas câmaras de ensaio:	**22**	ºC	Humidade do ar nos compartimentos	**41**	%
Volume do compartimento emissor:	**21**	m^3	Volume do compartimento recetor	**11**	m^3

Frequênica (Hz)	DnT dB (1/3 oitava)
50	
63	
80	
100	14,4
125	17,4
160	20,4
200	22,2
250	24,0
315	25,0
400	28,7
500	30,7
630	31,8
800	32,6
1 000	32,6
1 250	33,6
1 600	34,3
2 000	35,0
2 500	34,5
3 150	33,4
4 000	
5 000	

*correção relativa ao ruído de fundo



CÁLCULO DE ACORDO COM A NORMA ISO 717-1

DnT ,w = **32** dB

Avaliação baseada em resultados laboratoriais obtidos por método de engenharia

Boletim n.º: **B.7**
Data: **02.06.2014**

Laboratório de ensaio: **FEUP**
Responsável: **Kevin Moreira**

MEDIÇÃO *IN-SITU* DO ISOLAMENTO SONORO A SONS DE CONDUÇÃO AÉREA.

Isolamento sonoro padronizado de acordo com a norma EN ISO 140-4

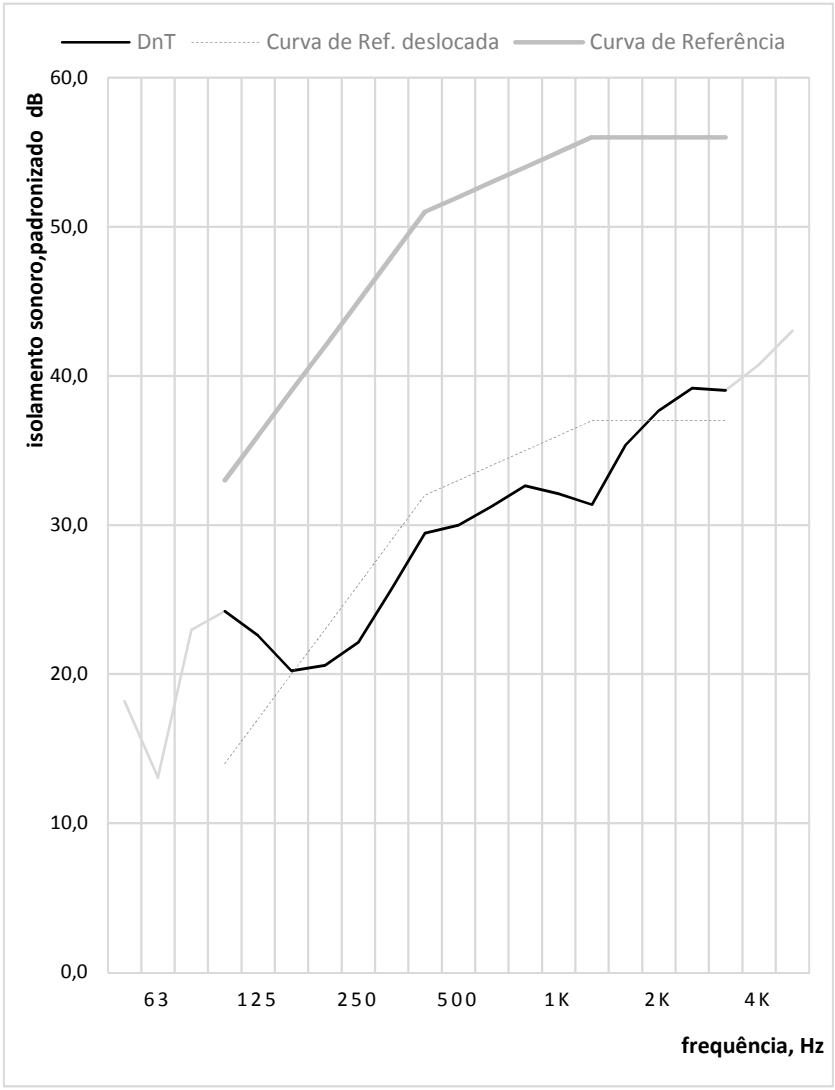
Data de realização do ensaio: 25.05.2014
Compartimento emssior **4 (fração B)**
Compartimento recetor: **5 (fração B)**
Observações:

O ensaio pretende caracterizar o isolamento sonoro a sons de condução aérea de uma parede divisória de tabique simples. O edificio encontra-se habitado mas o piso de ensaio não é utilizado. A envolvente do elemento ensaiado encontra-se degradada. Os compartimentos de ensaio contêm mobiliário.

Área do elemento a ensaiar:	**7,3**	m^2	Massa por unidade de área	**-**	Kg/m^2
Temperatura do ar, nas câmaras de ensaio:	**22**	ºC	Humidade do ar nos compartimentos	**41**	%
Volume do compartimento emissor:	**21**	m^3	Volume do compartimento recetor	**21**	m^3

Frequênica (Hz)	DnT dB (1/3 oitava)
50	
63	
80	
100	24,2
125*	22,6
160	20,2
200	20,6
250	22,1
315	25,7
400	29,5
500	30,0
630	31,3
800	32,6
1 000	32,1
1 250	31,4
1 600	35,3
2 000	37,7
2 500	39,2
3 150	39,0
4 000	
5 000	

*correção relativa ao ruído de fundo



CÁLCULO DE ACORDO COM A NORMA ISO 717-1

DnT,w = **33** dB

Avaliação baseada em resultados laboratoriais obtidos por método de engenharia

Boletim n.º: **B.8**
Data: **02.06.2014**

Laboratório de ensaio: **FEUP**
Responsável: **Kevin Moreira**