

A SINAGOGA DE TOMAR

Caracterização do Efeito Acústico de Ressonadores Embutidos (Bilhas Acústicas)

IRINA MANUELA DA SILVA VIEIRA

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

Orientador: Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

JULHO DE 2020

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2019/2020

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 - 2019/2020 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2020.*

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.

Às minhas pessoas, que sempre me deram estabilidade para seguir o meu caminho.

AGRADECIMENTOS

Agradecer é pouco, quando existem pessoas que se disponibilizam de coração a fazer-nos felizes.

De entre muitos, agradeço profundamente aos meus pais e irmãs, porque têm um amor incondicional que sempre me deu as bases para ser o que sou, por nunca me deixarem sozinha e por terem sempre uma palavra de apoio nos dias menos bons.

A toda a minha família e amigos, sem exceção.

À Marta, por todas as vezes que me equilibrou e me ajudou a seguir no melhor caminho.

Ao meu orientador e mestre, Professor Doutor António P. O. Carvalho, por ser um livro vivo da arte acústica, sempre disponível a ajudar e a fazer o melhor no seu trabalho.

Ao Engenheiro Eduardo Costa por toda a disponibilidade, ajuda e dedicação ao longo de todo o trabalho e ensaios realizados.

Aos responsáveis pela Sinagoga de Tomar por toda a disponibilidade e cooperação.

Quero agradecer a todos os que, direta ou indiretamente, me deram a força e a determinação de viver e conquistar esta grande etapa da minha vida.

RESUMO

A teoria dos ressoadores remota ao tempo de Aristóteles, em meados do séc. IV a.C. O efeito do uso de vasos (atualmente denominados de ressoadores de Helmholtz), colocados estrategicamente em teatros romanos, foi estudado por Vitruvius em 80-25 a.C. para melhorar a qualidade do som. A história narra o uso desta técnica durante muitos anos, em especial nas igrejas (aleadamente no sentido de melhorar a percepção da palavra), muito possivelmente de forma empírica e talvez sem quaisquer evidências científicas da sua eficácia. Existem poucos modelos íntegros do uso desta técnica na Europa e, em Portugal, a Sinagoga de Tomar é caso único.

Este trabalho apresenta um estudo que caracteriza o efeito acústico de bilhas ressoadoras embutidas na Sinagoga de Tomar, nomeadamente na atenuação sonora, no tempo de reverberação e determinação de outros parâmetros acústicos como o *RASTI*. Para isso, determinou-se a frequência de ressonância destes ressoadores e realizaram-se testes acústicos no local com as bilhas *abertas* e com a sua oclusão com o uso de “tampas” em aglomerado negro de cortiça.

Os resultados obtidos (com a sala praticamente vazia), em relação ao tempo de reverberação médio global em todas as frequências, foram de 4,89 s com as bilhas tapadas e de 4,80 s com as bilhas *abertas*, traduzindo-se numa redução de 0,09 s (ou 1,4%). Numa análise por banda de frequências de 1/3 de oitava verifica-se uma redução dos valores de tempo de reverberação em praticamente todas as bandas, exceto para as dos 160, 500, 1250, 2000, 3150 e 5000 Hz. De assinalar as maiores reduções na banda dos 125 Hz (de 0,55 s ou cerca de 9%) e na dos 250 Hz (de 0,46 s ou cerca de 8%).

Num contexto mais realista, em que a sala de culto da Sinagoga de Tomar estivesse com pessoas, a simulação da existência de 20 pessoas tenderia a reduzir o valor do tempo de reverberação, no máximo, em cerca de 2,3 s (aproximadamente 40%) na banda de oitava de frequência dos 500 Hz. A comparação por banda de frequências entre as bilhas *abertas* e *fechadas*, numa sala lotada, demonstra que as bilhas acústicas seriam mais eficazes nas baixas frequências, principalmente até aos 250 Hz (com a exceção da banda dos 160 Hz). De assinalar as reduções na banda dos 125 Hz (de 0,33 s ou cerca de 7%) e na dos 250 Hz (de 0,20 s ou cerca de 4%). Nas altas frequências, as reduções não são significativas.

A comparação entre a eficácia das bilhas acústicas em sala vazia e em sala lotada mostra que a presença de pessoas na sala de culto da Sinagoga de Tomar diminui a eficácia relativa das bilhas acústicas na redução do tempo de reverberação. Com a sala vazia a redução máxima rondaria os 0,55 s (9%) na banda dos 125 Hz enquanto que com a lotação da sala de culto a redução máxima previsível rondaria os 0,33 s (7%) na banda dos 125 Hz.

De forma complementar, foram realizados ensaios de medição do *RASTI* (sem e com a oclusão das bilhas acústicas) e os valores (semelhantes nos dois casos) apontam para uma inteligibilidade *mediocre*, que não satisfazem os valores mínimos ideais (mínimos de 0,45 para uma inteligibilidade *suficiente*) e o efeito acústico das bilhas não é assinalável.

Este estudo apresenta algumas evidências científicas para o uso de bilhas acústicas em sinagogas, fundamentando o seu uso durante séculos.

PALAVRAS-CHAVE: Acústica, Bilhas Acústicas, Ressonadores, Sinagoga, Tempo de Reverberação, *RASTI*

ABSTRACT

The theory of resonators goes back to Aristotle's time, in the middle of the 4th century b.C. The effect of the use of vases (currently called Helmholtz's resonators), strategically placed in Roman theatres, was studied by Vitruvius in 80-25 b.C. allegedly to improve sound quality. History states the use of this technique for many years, especially in churches (in order to improve the perception of the word), very possibly empirically and perhaps without any scientific evidence of its effectiveness. There are few complete models of the use of this technique in Europe and in Portugal the Tomar Synagogue is unique. This work presents a study that characterizes the acoustic effect of resonant vases embedded in the synagogue of Tomar, namely in the reverberation time and determination of other acoustic parameters such as RASTI. For this, the resonance frequency of these resonators was determined and acoustic tests were carried out on site with the jars open and with their occlusion with the use of "lids" in black agglomerated cork.

The results obtained (with the room practically empty), in relation to the average global reverberation time in all frequencies, were 4.89 s with the covered vases and 4.80 s with the opened vases, resulting in a reduction 0.09 s (or 1.4%). An analysis by 1/3 octave frequency band shows a reduction in the reverberation time values in practically all bands, except for those of 160, 500, 1250, 2000, 3150 and 5000 Hz. The biggest reductions are in the 125 Hz band (from 0.55 s or about 9%) and in the 250 Hz band (from 0.46 s or about 8%).

In a more realistic context, in which the cult room of the Tomar Synagogue was with people, the simulation with 20 people would tend to reduce the reverberation time values, at most, by about 2.29 s (approximately 40%) in the 500 Hz frequency octave band. The frequency band comparison between open and closed vases, in an occupied room, shows that acoustic vases would be more effective at low frequencies, especially up to 250 Hz (with the exception of 160 Hz band). Note the reductions in the 125 Hz band (0.33 s or about 7%) and in the 250 Hz band (0.20 s or about 4%). At high frequencies, the reductions are not significant.

The comparison between the effectiveness of acoustic vases in an empty room and in an occupied room shows that the presence of people in the cult room of the Synagogue of Tomar decreases the relative effectiveness of acoustic vases, in reducing the reverberation time. With the empty room the maximum reduction would be around 0.55 s (9%) in the 125 Hz band, while with people in the cult room the maximum predictable reduction would be around 0.33 s (7%) in the 125 Hz band.

RASTI measurements were performed (without and with the occlusion of the acoustic vases) and the values (similar in both cases) point to a *mediocre* speech intelligibility, not satisfying the minimum ideal values (minimum of 0.45 for a *sufficient* intelligibility) and the acoustic effect of the vases is not noted.

This study presents some scientific evidence for the use of acoustic vases in synagogues, basing their use for centuries.

KEYWORDS: Acoustics, Acoustic Vases, Resonators, Synagogue, Reverberation Time, RASTI

ÍNDICE GERAL

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice de Figuras	ix
Índice de Quadros	xiii
Símbolos, Acrónimos e Abreviaturas	xv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento e Objetivos	1
1.2. Organização da Dissertação	2
2 CONCEITOS E DEFINIÇÕES	3
2.1. Introdução	3
2.2. Princípios Básicos	4
2.2.1. Som e ruído	4
2.2.2. Análise da pressão sonora	5
2.2.3. Análise em frequência	9
2.2.4. Análise no tempo	13
2.2.5. Correção acústica	13
2.2.6. Perceção da palavra	16
2.3. Ressonadores	17
2.3.1. Introdução	17
2.3.2. Comportamento acústico de ressonadores na absorção sonora	18
3 REVISÃO HISTÓRICA	21
3.1. Introdução	21
3.2. Abordagem histórica do uso de bilhas acústicas	22
3.3. Forma e disposição dos vasos acústicos	25
3.3.1. Forma dos vasos acústicos	25
3.3.2. Disposição dos vasos acústicos	26
3.3.3. Outras funções de vasos e aberturas	27
3.4. Locais de culto com vasos acústicos	28
Suíça	28
3.5. Ensaios acústicos realizados com bilhas acústicas	36
3.5.1. <i>Echea</i> , ou vasos acústicos, como ressonadores de Helmholtz	36
3.5.2. Estudos científicos realizados em vasos acústicos	37
4 A SINAGOGA DE TOMAR	51
4.1. Judaísmo e Sinagogas	51
4.2. Sinagoga de Tomar: Museu Luso-Hebraico Abraão Zacuto	54
5 CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DA SINAGOGA DE TOMAR	63
5.1. Introdução	63
5.2. Metodologia	63

5.2.1. Tempo de Reverberação	63
5.2.2. RASTI	66
5.3. Resultados	68
5.3.1. Tempo de Reverberação	68
5.3.2. RASTI	79
5.4. Análise dos Resultados Obtidos	81
5.4.1. Análise do tempo de reverberação na Sinagoga de Tomar	81
5.4.2. Análise do RASTI na Sinagoga de Tomar	86
6 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	89
6.1. Conclusões	89
6.2. Desenvolvimentos Futuros	91
Referências Bibliográficas	93
ANEXO 1	A1
Suíça	A1
França	A3
Alemanha	A7
Bélgica	A8
Chipre	A8
Espanha	A9
Grã-Bretanha	A9
Grécia	A9
Creta	A9
Hungria	A9
Irlanda	A9
Itália	A9
Holanda	A10
Polónia	A10
Portugal	A10
Rússia	A10
Escandinávia	A10
Turquia	A11
Jugoslávia	A11
Sérvia	A11

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Planta do teatro de Scythopolis (Beit She'na, Israel), com salas para vasos acústicos (em cinza) que materializam os conceitos de Vitruvius [24].	3
Fig. 2.2 – Onda sonora longitudinal, como uma sucessão periódica de zonas de rarefação e compressão [25].	4
Fig. 2.3 – Variação em frequência da banda auditiva humana, com a representação do limiar da dor, limiar da audição, curva de igual sensação auditiva e zona da palavra (voz humana) [26].	5
Fig. 2.4 – Pressão sonora (P_i) e pressão atmosférica (P_{atm}) [31].	6
Fig. 2.5 – Exemplos de sons complexos (clarinete, violino, flauta e voz) e de som puro (diapasão) [25].	9
Fig. 2.6 – Em (a), propagação de um som puro com periodicidade espacial, onde é possível identificar a amplitude (A) e o comprimento de onda (λ). Em (b), propagação de um som puro com periodicidade temporal, onde se identifica a amplitude (A) e o período (T) [27].	10
Fig. 2.7 – Janela de frequências audíveis, com o agrupamento em uma oitava e terço de oitava [7].	11
Fig. 2.8 – Curvas de igual sensibilidade auditiva (em <i>fone</i>). A linha inferior (verde) representa o limiar de audição normalizado [7].	12
Fig. 2.9 – Diferentes curvas de ponderação: (A) filtro A, a azul; (B) filtro B, a verde; (C) filtro C, a vermelho; (D) filtro D, a preto [30].	12
Fig. 2.10 – Definição de tempo de reverberação (TR) (valor teórico em (a) e valor obtido por extrapolação do declive em (b) [28].	15
Fig. 2.11 – Contornos da emissão de um som, no plano horizontal, para várias frequências [29].	16
Fig. 2.12 – Representação esquemática do modo de funcionamento de um ressonador de cavidade [10].	19
Fig. 2.13 – Efeito da inclusão de um material poroso no volume de ar de um ressonador de cavidade [10].	20
Fig. 3.1 – Modelos de echea, à esquerda de acordo com Perrault em 1673 e à direita por Baudouin em 1938 [11].	22
Fig. 3.2 – Modelo de utilização de echea, de acordo com Floriot em 1964 [11].	23
Fig. 3.3 – Igreja de Gelterkinden (Suíça), onde se podem observar dois vasos acústicos no topo da imagem (à esquerda); Exemplo de vaso acústico da igreja de Villette (Suíça) (à direita) [11].	23
Fig. 3.4 – Vasos acústicos embutidos em blocos de pedra [11].	24
Fig. 3.5 – Vasos acústicos encontrados em St. Victor, Marselha [11].	25
Fig. 3.6 – Vasos acústicos em Cologne, Kyritz e Strasbourg [11].	26
Fig. 3.7 – Vasos acústicos de diversas igrejas [11].	26
Fig. 3.8 – Identificação (apontados com duas setas) de dois dos vasos acústicos da igreja de Villette (Suíça) [11].	27
Fig. 3.9 – Mapa da Europa, com a localização de alguns dos vasos acústicos [11].	28
Fig. 3.10 – Planta da zona mais antiga da igreja de Syens, com a orientação e localização dos vasos acústicos (à esquerda); um dos vasos acústicos existentes na abóbada da igreja de Syens (à direita) [11].	29
Fig. 3.11 – Vaso n.º 1 da igreja de Syens [11].	29
Fig. 3.12 – Vaso n.º 2 da igreja de Syens [11].	29
Fig. 3.13 – Vaso n.º 3 da igreja de Syens [11].	30
Fig. 3.14 – Vaso n.º 4 da igreja de Syens [11].	30
Fig. 3.15 – Planta da igreja de Grandson (Suíça) onde se identifica a localização de 24 vasos acústicos localizados até à data (à esquerda); um dos vasos embutido na abóbada da igreja de Grandson, apontado com uma seta (à direita) [11].	31
Fig. 3.16 – Vaso n.º 6 da igreja de Grandson [11].	31
Fig. 3.17 – Vaso n.º 13 da igreja de Grandson [11].	32
Fig. 3.18 – Vaso n.º 20 da igreja de Grandson [11].	32
Fig. 3.19 – Planta da igreja de Villette (Suíça) onde se identifica a localização de quatro vasos acústicos (à esquerda); um dos vasos embutido na igreja de Villette (à direita) [11].	33
Fig. 3.20 – Vaso n.º 1 da igreja de Villette [11].	33
Fig. 3.21 – Vaso n.º 2 da igreja de Villette [11].	33
Fig. 3.22 – Vaso n.º 3 da igreja de Villette [11].	34

Fig. 3.23 – Vaso n.º 4 da igreja de Villette [11].	34
Fig. 3.24 – Alguns dos vasos acústicos de uma das paredes da igreja de Granges-près-Marnand (Suíça) [11].	34
Fig. 3.25 – Alçados (cortes) e planta da igreja de Granges-près-Marnand (Suíça), com indicação da localização dos vasos acústicos [11].	35
Fig. 3.26 – Vaso n.º 6 da igreja de Granges-près-Marnand [11].	35
Fig. 3.27 – Modelo de um ressoador de Helmholtz [11].	36
Fig. 3.28 – Resultados obtidos por Rschevkin, com e sem a colocação de garrafas numa sala com um tempo de reverberação curto [11].	38
Fig. 3.29 – Planta da igreja de Villette, com a localização da fonte sonora (S), posições dos cinco recetores sonoros e dos quatro vasos acústicos [15].	39
Fig. 3.30 – Resultados obtidos na medição do nível sonoro equivalente (L_{eq}) na igreja de Villette, com os vasos <i>abertos</i> e com os vasos <i>fechados</i> , a uma distância de 10 cm [15].	40
Fig. 3.31 – Resultados obtidos na medição do C_{50} , na posição 1, com os vasos acústicos <i>abertos</i> e <i>fechados</i> , na igreja de Villette [15].	40
Fig. 3.32 – Resultados obtidos para o EDT, com vasos <i>fechados</i> e <i>abertos</i> , na posição 2 da igreja de Villette [15].	41
Fig. 3.33 – Resultados obtidos para o Tempo de Reverberação (TR_{20}), com vasos <i>fechados</i> e <i>abertos</i> , na posição 1 da igreja de Villette (Suíça) [15].	42
Fig. 3.34 – Resultados obtidos para a diferença de nível (L_{eq}), em vasos <i>fechados</i> e <i>abertos</i> , a uma distância de 10 cm, na igreja de Villette (Suíça) [11].	43
Fig. 3.35 – Resultados obtidos para o coeficiente C_{50} , em vasos <i>fechados</i> e <i>abertos</i> , na posição 1, na igreja de Villette (Suíça) [11].	44
Fig. 3.36 – Resultados obtidos para o EDT, com vasos <i>fechados</i> e <i>abertos</i> , com o microfone na posição 2 da igreja de Villette [11].	45
Fig. 3.37 – Resultados obtidos para o TR_{20} , com vasos <i>fechados</i> e <i>abertos</i> , com o microfone na posição 1 da igreja de Villette (Suíça) [11].	45
Fig. 3.38 – Esquematização de alguns dos vasos acústicos da igreja de Syens (Suíça) [15].	46
Fig. 3.39 – Resultados obtidos para as medições do C_{50} , para vasos <i>abertos</i> e <i>fechados</i> , na posição 1 (coro), na igreja de Syens (Suíça) [15].	46
Fig. 3.40 – Resultados obtidos para as medições do C_{50} , para vasos <i>abertos</i> e <i>fechados</i> , na posição 4 (nave), na igreja de Syens (Suíça) [15].	47
Fig. 3.41 – Resultados obtidos para as medições do EDT, para vasos <i>abertos</i> e <i>fechados</i> , no centro do coro ao nível dos vasos, na igreja de Syens (Suíça) [15].	47
Fig. 3.42 – Resultados obtidos para o coeficiente C_{50} , em vasos <i>fechados</i> e <i>abertos</i> , com o microfone na posição 1, na igreja de Syens (Suíça) [11].	48
Fig. 3.43 – Resultados obtidos para o coeficiente C_{50} , em vasos <i>fechados</i> e <i>abertos</i> , com o microfone na posição 4, na igreja de Syens (Suíça) [11].	49
Fig. 3.44 – Resultados obtidos para o EDT, com vasos <i>fechados</i> e <i>abertos</i> , com o microfone colocado no centro do coro, ao nível dos vasos da igreja de Syens (Suíça) [11].	50
Fig. 4.1 – Sinagoga Shaaré Tikvá, Lisboa [17].	52
Fig. 4.2 – Sinagoga Ohel Jacob, Lisboa [17].	52
Fig. 4.3 – Sinagoga Mekor Haim, Porto [17].	53
Fig. 4.4 – Sinagoga Beit Eliahu, Belmonte [17].	53
Fig. 4.5 – Sinagoga Sahar Hassamain, Ponta Delgada [17].	54
Fig. 4.6 – Fachada principal da Sinagoga de Tomar, antes das obras de beneficiação [19].	54
Fig. 4.7 – Planta (quadrada) da Sinagoga de Tomar, com pormenor construtivo dos vasos acústicos, dois em cada canto (com a respetiva numeração adotada neste relatório), embutidos no interior das paredes [32].	56
Fig. 4.8 – Interior da Sinagoga de Tomar, com visualização das abóbadas de arestas assentes nos quatro pilares, as mísulas, os vários elementos interiores decorativos e a disposição dos lugares sentados (antes das obras de beneficiação) [33].	56
Fig. 4.9 – Três dos vasos acústicos da Sinagoga de Tomar, virados para baixo, com os orifícios a apontar para o interior [fotos da autora].	57
Fig. 4.10 – Vasos acústicos da Sinagoga de Tomar: à esquerda o interior de um dos vasos; à direita um dos vasos a descoberto [22].	57

Fig. 4.11 – Esquema dos oito vasos acústicos da Sinagoga de Tomar, com pormenorização em corte das “asas” do vaso [22].	58
Fig. 4.12 – Núcleo Interpretativo da Sinagoga de Tomar, após realização das obras de beneficiação, no piso superior da Sala Anexa [fotos da autora].	59
Fig. 4.13 – Escavações realizadas na Sala Anexa da Sinagoga de Tomar [fotos da autora].	60
Fig. 4.14 – Plantas da Sinagoga de Tomar, onde se evidenciam as salas adossadas ao edifício principal: à esquerda o primeiro pavimento e à direita o segundo pavimento [20].	61
Fig. 4.15 – Planta geral da Sinagoga de Tomar, com apresentação da planta quadrangular da Sinagoga, da sala anexa, dos pátios e de algumas das escavações realizadas [22].	61
Fig. 4.16 – Corte da estrutura arquitetónica da Sinagoga de Tomar, aquando das obras de beneficiação, no qual se pode verificar a assimetria de colocação dos vasos acústicos n.ºs 7 e 8 (assinalados com setas) [35].	62
Fig. 5.1 – Localização da fonte sonora (<i>F</i>) e das diferentes posições do microfone (sonómetro) na sala de culto da Sinagoga de Tomar, para o registo dos valores do <i>TR</i> (<i>A</i> , <i>B</i> , <i>C</i> e <i>D</i> representam os pontos de leitura próximos dos cantos e os pontos 1, 2 e 3 representam os pontos de leitura no centro da sala).	64
Fig. 5.2 – Colocação da fonte sonora e do microfone (sonómetro) na sinagoga de Tomar para a realização das medições do <i>TR</i> [foto da autora].	64
Fig. 5.3 – Oclusão dos vasos acústicos, com recurso a “tampões” de aglomerado negro de cortiça e revestidos exteriormente a folha de alumínio [fotos da autora].	65
Fig. 5.4 – Sonómetro e fonte sonora utilizados na medição do <i>TR</i> , na Sinagoga de Tomar [fotos da autora].	65
Fig. 5.5 – Localização da fonte sonora (<i>F</i>) e dos seis diferentes locais do microfone, para o registo dos valores do <i>RASTI</i> na sala de culto da Sinagoga de Tomar.	66
Fig. 5.6 – Colocação da fonte sonora e do recetor (transportado pelo engenheiro do <i>LAfeup</i>) na sinagoga de Tomar para a realização das medições do <i>RASTI</i> [foto da autora].	67
Fig. 5.7 – Fonte sonora e recetor utilizados na medição do <i>RASTI</i> , na Sinagoga de Tomar [fotos da autora].	67
Fig. 5.8 – Valores dos valores do <i>TR</i> com as bilhas abertas, nos cantos (<i>A</i> , <i>B</i> , <i>C</i> e <i>D</i>) da Sinagoga de Tomar.	70
Fig. 5.9 – Valores dos valores do <i>TR</i> com as bilhas fechadas, nos cantos (<i>A</i> , <i>B</i> , <i>C</i> e <i>D</i>) da Sinagoga de Tomar.	70
Fig. 5.10 – Média dos valores do <i>TR</i> com as bilhas abertas e fechadas, nos quatro cantos (<i>A</i> , <i>B</i> , <i>C</i> e <i>D</i>) da Sinagoga de Tomar.	71
Fig. 5.11 – Diferença média dos valores do <i>TR</i> com as bilhas abertas e fechadas, nos quatro cantos (<i>A</i> , <i>B</i> , <i>C</i> e <i>D</i>) da Sinagoga de Tomar.	71
Fig. 5.12 – Diferenças dos valores de <i>TR</i> com as bilhas abertas (<i>A</i>) e fechadas (<i>F</i>), no canto <i>A</i> da Sinagoga de Tomar.	72
Fig. 5.13 – Diferenças dos valores de <i>TR</i> com as bilhas abertas (<i>A</i>) e fechadas (<i>F</i>), no canto <i>B</i> da Sinagoga de Tomar.	72
Fig. 5.14 – Diferenças dos valores de <i>TR</i> com as bilhas abertas (<i>A</i>) e fechadas (<i>F</i>), no canto <i>C</i> da Sinagoga de Tomar.	72
Fig. 5.15 – Diferenças dos valores de <i>TR</i> com as bilhas abertas (<i>A</i>) e fechadas (<i>F</i>), no canto <i>D</i> da Sinagoga de Tomar.	73
Fig. 5.16 – Valores do <i>TR</i> com as bilhas abertas, nos pontos da sala (1, 2 e 3) da Sinagoga de Tomar.	75
Fig. 5.17 – Valores do <i>TR</i> com as bilhas fechadas, nos pontos da sala (1, 2 e 3) da Sinagoga de Tomar.	75
Fig. 5.18 – Média dos valores do <i>TR</i> com as bilhas abertas e fechadas, nos pontos da sala (1, 2 e 3) da Sinagoga de Tomar.	76
Fig. 5.19 – Diferença média dos valores do <i>TR</i> com as bilhas abertas (<i>A</i>) e fechadas (<i>F</i>), nos pontos da sala (1, 2 e 3) da Sinagoga de Tomar.	76
Fig. 5.20 – Diferenças dos valores de <i>TR</i> com as bilhas abertas (<i>A</i>) e fechadas (<i>F</i>), no ponto 1 da Sinagoga de Tomar.	77
Fig. 5.21 – Diferenças dos valores de <i>TR</i> com as bilhas abertas (<i>F</i>) e fechadas (<i>F</i>), no ponto 2 da Sinagoga de Tomar.	77

Fig. 5.22 – Diferenças dos valores de <i>TR</i> com as bilhas <i>abertas</i> (A) e <i>fechadas</i> (F), no ponto 3 da Sinagoga de Tomar.....	78
Fig. 5.23 – Diferenças médias dos valores de <i>TR</i> com as bilhas <i>abertas</i> (A) e <i>fechadas</i> (F), em todos os pontos da Sinagoga de Tomar.	78
Fig. 5.24 – Valores médios globais (todos os 7 pontos) do <i>TR</i> , com as bilhas <i>abertas</i> e <i>fechadas</i> , na Sinagoga de Tomar.....	79
Fig. 5.25 – Valores médios do <i>RASTI</i> nos seis pontos de leitura (1, 2, 3, 4, 5 e 6) ao longo da sala da Sinagoga de Tomar, assim como a média global das leituras (linha de cor preta a tracejado/ponto). 80	
Fig. 5.26 – Linhas de igual valor de <i>RASTI</i> , na sala de culto da Sinagoga de Tomar (a verde as linhas com inteligibilidade acima de <i>suficiente</i> e a vermelho as linhas com inteligibilidade <i>medíocre</i>).	80
Fig. 5.27 – Coeficiente de absorção sonora médio, a linha azul na situação em que as bilhas se encontravam <i>abertas</i> e a linha tracejado vermelha na situação em que as bilhas se encontravam <i>fechadas</i>	83
Fig. 5.28 – Variação no tempo de reverberação (diferença dos valores do <i>TR</i> aquando das bilhas <i>abertas</i> e <i>fechadas</i>) nas situações em que a medição foi realizada com a sala vazia (barras a azul preenchido) e na estimativa de cálculo para a sala ocupada com 20 pessoas (barras a verde listado).	86
Fig. 5. 29 – Valores médios do <i>RASTI</i> nos seis pontos de leitura (1, 2, 3, 4, 5 e 6) ao longo da sala da Sinagoga de Tomar, assim como a média global das leituras (linha de cor preta a tracejado/ponto) e o limite da inteligibilidade <i>suficiente</i> (linha de cor vermelho a tracejado).	87
Fig. A1.1 – Modelos exemplificativos dos vasos acústicos encontrados em Baden (Suíça) [14].	A1
Fig. A1.2 – Posição e integração nas pinturas dos vasos acústicos nas igrejas de Gelterkinden (Suíça) [14].	A2
Fig. A1.3 – Alguns modelos propostos para alguns dos vasos acústicos da igreja paroquial de Oberkirch (n.º 3 e 4) e de Oberwinterthur (n.º 1 e 2) (Suíça) [14].	A2
Fig. A1.4 – Imagem exemplificativa das características dos vasos acústicos e da sua localização na igreja dominicana de Zurich (Suíça) [14].	A3
Fig. A1.5 – Vasos acústicos esmaltados em verde, com um buraco no fundo, do mosteiro de Mileševa, Sérvia [16].	A12
Fig. A1.6 – Modelo do vaso acústico da igreja da vila de Trg, perto de Žubagubica, Sérvia [16].	A13

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Valores do <i>RASTI</i> numa escala de inteligibilidade [9].	17
Quadro 3.1 – Resultados da medição do <i>STI</i> , para vasos <i>fechados</i> e <i>abertos</i> , na igreja de Villette [15].	41
Quadro 3.2 – Resultados obtidos para as medições da frequência de ressonância e comparação dos valores medidos com os calculados com a fórmula clássica, na igreja de Villette (Suíça) [11].	42
Quadro 3.3 – Características dos vasos acústicos da igreja de Villette (Suíça) [11].	43
Quadro 3.4 – Resultados obtidos para <i>STI</i> e variações entre vasos <i>fechados</i> e <i>abertos</i> , na igreja de Villette (Suíça) [11].	44
Quadro 3.5 – Resultados obtidos para <i>RASTI</i> e variações entre vasos <i>fechados</i> e <i>abertos</i> , na igreja de Villette (Suíça) [11].	44
Quadro 3.6 – Resultados obtidos para as medições do <i>STI</i> , para vasos <i>abertos</i> e <i>fechados</i> , na igreja de Syens [15].	47
Quadro 3.7 – Resultados obtidos para as medições da frequência de ressonância e comparação dos valores medidos com os calculados com a fórmula clássica, na igreja de Syens (Suíça) [11].	48
Quadro 3.8 – Características dos vasos acústicos da igreja de Syens (Suíça) [11].	48
Quadro 3.9 – Resultados obtidos para <i>STI</i> e variações entre vasos <i>fechados</i> e <i>abertos</i> , na igreja de Syens (Suíça) [11].	49
Quadro 3.10 – Resultados obtidos para <i>RASTI</i> e variações entre vasos <i>fechados</i> e <i>abertos</i> , na igreja de Syens (Suíça) [11].	49
Quadro 4.1 – Dados apresentados nos Censos 2011, indicadores da religião da população residente com 15 ou mais anos de idade [34].	51
Quadro 4.2 – Dados referentes aos vasos acústicos (ver numeração da Fig. 4.11) existentes na Sinagoga de Tomar (de acordo com [22], com o cálculo da frequência de eficácia máxima (calculada de acordo com a equação 2.24)).	59
Quadro 5.1 – Valores medidos para o tempo de reverberação (<i>TR</i>) nos cantos <i>A</i> , <i>B</i> , <i>C</i> e <i>D</i> , com a abertura e oclusão das bilhas acústicas, assim como o valor da média e desvio padrão das leituras (<i>assinalados a fundo vermelho e verde os valores máximos e mínimos em cada situação – oclusão ou não das bilhas – e também em relação à média de cada frequência e desvio padrão</i>).	69
Quadro 5.2 – Diferenças entre os valores do tempo de reverberação (<i>TR</i>) com as bilhas <i>abertas</i> (<i>A</i>) e <i>fechadas</i> (<i>F</i>), nos pontos <i>A</i> , <i>B</i> , <i>C</i> e <i>D</i> (<i>valores com fundo verde na média indicam valores negativos, logo benéficos</i>).	69
Quadro 5.3 – Valores registados para o <i>TR</i> na sala, com a abertura e oclusão das bilhas acústicas, assim como o valor da média e desvio padrão das leituras (<i>assinalados a fundo vermelho e verde os valores máximos e mínimos em cada situação – oclusão ou não das bilhas – e também em relação à média de cada frequência e desvio padrão</i>).	74
Quadro 5.4 – Diferenças entre os valores do <i>TR</i> com as bilhas <i>abertas</i> (<i>A</i>) e <i>fechadas</i> (<i>F</i>), nos pontos 1, 2 e 3 (<i>valores com fundo verde na média indicam valores negativos, logo benéficos</i>).	74
Quadro 5.5 – Valores do <i>RASTI</i> nos seis pontos de leitura (1, 2, 3, 4, 5 e 6) ao longo da sala da Sinagoga de Tomar (ver localização dos pontos na Figura 5.5).	79
Quadro 5.6 – Diferenças entre os valores do <i>TR</i> com as bilhas <i>abertas</i> (<i>A</i>) e <i>fechadas</i> (<i>F</i>), em todos os pontos de medição, incluindo a média das diferenças em cada ponto, a média por frequência, a percentagem de variação e também a média global das alterações registadas (<i>valores com fundo verde na média indicam valores negativos, logo benéficos</i>).	81
Quadro 5.7 – Cálculo do coeficiente de absorção médio (de acordo com a equação de Sabine), por frequência, nas situações em que as bilhas se encontram <i>abertas</i> e <i>fechadas</i> , assim como a variação observada no seu valor (tanto em valor absoluto como relativo). A gradação de cor indica a verde os maiores valores (a negrito) e a vermelho os valores mais baixos.	83
Quadro 5.8 – Análise em frequência das alterações estimadas no valor de tempo de reverberação, com as bilhas <i>abertas</i> , pela existência de cerca de 20 pessoas em pé na sala de culto da Sinagoga de Tomar. Valores da absorção localizada de acordo com [1] e cálculos de acordo com a fórmula de Sabine. Gradação de cor para as variações relativas no tempo de reverberação, onde o verde indica as maiores reduções e o amarelo as reduções mais baixas.	84

Quadro 5.9 – Análise em frequência das alterações estimadas no valor de tempo de reverberação, com as bilhas <i>fechadas</i> , pela existência de cerca de 20 pessoas em pé na sala de culto da Sinagoga de Tomar. Valores da absorção localizada de acordo com [1] e cálculos de acordo com a fórmula de Sabine. Gradação de cor para as variações relativas no tempo de reverberação, onde o verde indica as maiores reduções e o amarelo as reduções mais baixas.	85
Quadro 5.10 – Análise em frequência das alterações estimadas no valor de tempo de reverberação, pela diferença obtida entre as bilhas <i>abertas</i> e <i>fechadas</i> , na hipótese da existência de cerca de 20 pessoas em pé na sala de culto da Sinagoga de Tomar. Valores da absorção localizada de acordo com [1] e cálculos de acordo com a fórmula de Sabine. Gradação de cor para as variações relativas no tempo de reverberação, onde o verde indica as maiores reduções, o amarelo as menores reduções e o vermelho indica aumentos no tempo de reverberação.	85

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

A	(m ²)	Absorção sonora
A _j	(m ²)	Absorção sonora localizada
B	(Hz)	Largura de banda
c	(m/s)	Celeridade
C ₈₀	(dB)	Claridade [dB, base 80 ms]
D	(min)	Duração do ruído
D ₅₀	(-)	Definição
f	(Hz)	Frequência
f ₁	(Hz)	Frequência limite inferior
f ₂	(Hz)	Frequência limite superior
H	(m)	Pé-direito
I	(W/m ²)	Intensidade sonora
I ₀	(W/m ²)	Intensidade sonora de referência
L	(m)	Comprimento
L ₅₀	(dB)	Nível de pressão sonora que num dado intervalo de tempo é excedido em 50% da duração temporal desse intervalo
L ₉₅	(dB)	Nível de pressão sonora que num dado intervalo de tempo é excedido em 95% da duração temporal desse intervalo
LA	(dB)	Valor global do nível sonoro ponderado com o filtro A
Leq	(dB)	Nível de pressão sonora contínuo equivalente
L _i	(dB)	Nível de intensidade sonora
L _i	(dB)	Nível de pressão sonora no tempo t _i
L _n	(m)	Comprimento da Nave
L _N	(dB)	Nível de pressão sonora estatístico
L _p	(dB)	Nível de pressão sonora
L _{soma}	(dB)	Nível de pressão sonora resultante
L _w	(dB)	Nível de potência sonora
m	(kg/m ²)	Massa superficial
m'	(m ⁻¹)	Absorção sonora do ar
N	(-)	Número de níveis de pressão sonora
NRC	(-)	Noise reduction coefficient
p	(Pa)	Pressão sonora
P(t)	(Pa)	Pressão instantânea
p ₀	(Pa)	Pressão sonora de referência
p _{at}	(Pa)	Pressão atmosférica normal
P _{max}	(Pa)	Pressão sonora máxima da onda estacionária
P _{min}	(Pa)	Pressão sonora mínima da onda estacionária
r	(m)	Raio
RASTI	(-)	<i>Rapid Speech Transmission Index</i>

S	(m ²)	Área
S _i	(m ²)	Superfície real do material i
SIL	(-)	<i>Speech Interference Level</i>
STI	(-)	<i>Speech Transmission Index</i>
SWR	(-)	<i>Standing Wave Ratio</i>
T	(s)	Período
TR	(s)	Tempo de reverberação
TS	(s)	Tempo central
V	(m ³)	Volume
V _n	(m)	Volume da Nave
W	(W)	Potência sonora
W ₀	(W)	Potência sonora de referência
α	(-)	Coefficiente de absorção sonora
α _i	(-)	Coefficiente de absorção sonora do material i
α _{ig}	(-)	Coefficiente de absorção sonora em altares
α _w	(-)	Coefficiente de absorção sonora ponderado
θ(°C)	(°C)	Temperatura em graus Celsius
θ(K)	(K)	Temperatura em Kelvin
λ	(m)	Comprimento de onda
ρ	(kg/m ³)	Massa volúmica

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

Durante o período da arquitetura românica e gótica, algumas igrejas (e mesquitas) incluíram no seu interior vasos de cerâmica abertos para o interior do espaço, posicionados nas cúpulas e/ou paredes ou que pendiam livremente no espaço [1]. Na Europa, nunca foi descoberto nenhum monumento equipado com vasos acústicos anteriores ao século XI. Pensa-se que os arquitetos desta época foram inspirados pelo conhecimento desenvolvido por Aristóteles, Plínio ou Vitruvius, por exemplo. Estes vasos (atualmente denominados de ressoadores de Helmholtz) eram utilizados alegadamente numa tentativa de melhorar os problemas acústicos do espaço, mas a sua eficácia é ainda pouco conhecida [2]. De acordo com Zakynthinos *et al.* [1], estes ressoadores podem ter sido ineficazes se instalados em igrejas muito pequenas (onde a absorção adicional não se tornou significativa), se as frequências ressonantes eram muito baixas em relação à banda de frequência emitidas ou se existissem poucos ressoadores (não se alcançariam mudanças audíveis na resposta acústica).

A localização dos vasos acústicos nas igrejas não parece ter sido fundamentada numa metodologia muito precisa [2]. No entanto, há sugestões de alguns princípios que podem ter sido respeitados aquando da sua colocação: *“estão espalhados pelo topo da igreja, nos cofres ou no topo dos muros, em particular perto dos cantos ou em torno das janelas, e geralmente em ambientes de tufos. Eles estão alinhados ou dispostos em formas geométricas simples (por exemplo, em zig-zag). Além disso, são frequentemente encontrados em certas partes das igrejas, em direção ao coro, de frente para o púlpito e acima da tribuna. Os vasos acústicos estão sempre embutidos nas paredes ou arcos com o buraco aberto visível (possivelmente integrado para decoração) ou protegidos por um motivo de madeira perfurada e colocados no plano da parede. Em alguns casos, não foram colocados durante a construção, mas adicionado posteriormente. O número de vasos colocados no local de uma igreja é em média vinte, mas pode variar de 5 a 72 e geralmente é proporcional ao volume coberto”* [2].

As bases físicas, sobre as quais assenta o funcionamento dos ressoadores acústicos, permitem analisar a sua ação e medir a sua eficiência. De acordo com Desarnaulds *et al.* [2], as experiências e formulações teóricas permitem afirmar que: os vasos acústicos podem amplificar localmente o som em determinadas frequências; Quando otimizados, também podem absorver e difundir o som e podem ser usados para reduzir as não homogeneidades espaciais devido a efeitos de foco ou de modos próprios; Em alguns casos, podem reduzir a reverberação e regular os transientes (com melhoria da clareza). No entanto, estes resultados ocorrem apenas sob certas condições específicas, resultantes da sintonia dos vasos na sala e de seu posicionamento criterioso (em muitos casos, os vasos acústicos instalados em igrejas na Idade Média não cumprem estas condições ou são em número reduzido, comprometendo a sua eficácia).

No séc. XVII, após seis séculos de uso arquitetónico, os vasos acústicos deixaram de ser utilizados de forma ainda inexplicável [2].

A Sinagoga de Tomar é o único templo hebraico pré-renascentista integralmente conservado que existe em Portugal [3] [4]. Construída em meados do séc. XV, em 1496 foi encerrada e destituída de funções religiosas aquando da expulsão dos judeus de Portugal [3]. No séc. XX foi classificada como Monumento Nacional Samuel Schwarz (judeu polaco investigador da cultura hebraica) e doada ao Estado Português para o Museu Luso-Hebraico de Abraão Zacuto [3]. De arquitetura simples e com influências orientais, esta sinagoga apresenta planta quase quadrangular e está carregada de simbolismos judeus [4]. A unicidade deste monumento português, o qual motivou este estudo, está marcada pela existência de dois orifícios em cada canto superior, que correspondem aos bocais de bilhas de barro colocadas dentro das paredes e viradas para baixo, no alegado propósito de uma melhoria acústica do templo [4].

O estudo apresentado nesta dissertação tem como principais objetivos o estudo do efeito das bilhas acústicas na Sinagoga de Tomar com a determinação de alguns dos parâmetros acústicos que determinam a qualidade acústica de uma sala e a caracterização física destes ressoadores. Pretende-se, assim, analisar a possível eficácia acústica dos ressoadores na Sinagoga de Tomar.

1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em seis capítulos, de acordo com o seguinte:

- 1º Capítulo - INTRODUÇÃO:** faz-se uma abordagem geral e sucinta ao tema desenvolvido neste trabalho, com ênfase no seu enquadramento e pertinência, assim como se apresenta a organização da dissertação;
- 2º Capítulo - CONCEITOS E DEFINIÇÕES:** formulação e definição de alguns dos princípios básicos de acústica que permitem uma melhor interpretação dos ensaios e resultados obtidos;
- 3º Capítulo - REVISÃO HISTÓRICA:** abordagem histórica do uso de ressoadores (bilhas acústicas) em locais de culto;
- 4º Capítulo - A SINAGOGA DE TOMAR:** descrição, pormenorização e caracterização arquitetónica da Sinagoga de Tomar e das bilhas acústicas aí existentes;
- 5º Capítulo - CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DA SINAGOGA DE TOMAR:** explicitação da metodologia usada na realização dos ensaios e medições *in situ*, com os respetivos resultados obtidos e sua análise contextual;
- 6º Capítulo - CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS:** enunciação sucinta das principais conclusões aferidas neste trabalho, assim como algumas idealizações de desenvolvimentos futuros passíveis de se realizar.

2

CONCEITOS E DEFINIÇÕES

2.1. INTRODUÇÃO

O objetivo deste capítulo é fornecer alguns dos conhecimentos básicos e indispensáveis na área da Acústica e que permitem compreender e analisar os fenómenos e as conclusões dos ensaios realizados nesta dissertação.

A Acústica, que é o foco deste trabalho, é definida como o ramo da física no qual se analisam e estudam as ondas sonoras e tem “origem” aproximada entre os séc. VI e III a.C. com os estudos de filósofos como o Pitágoras, Crisipus, entre outros [5]. Existem diversas áreas onde a Acústica é fundamental: bioacústica, psicoacústica, acústica musical, acústica de edifícios, acústica subaquática, eletroacústica, etc.

Esta dissertação é fundamentada pelo ramo da acústica de edifícios, formulado no início do séc. XX pelo físico americano W. C. Sabine (apesar de ter sido Vitruvius, no séc. I a.C., a escrever algumas regras de construção empíricas para a melhoria do som em anfiteatros (Figura 2.1).) [5].

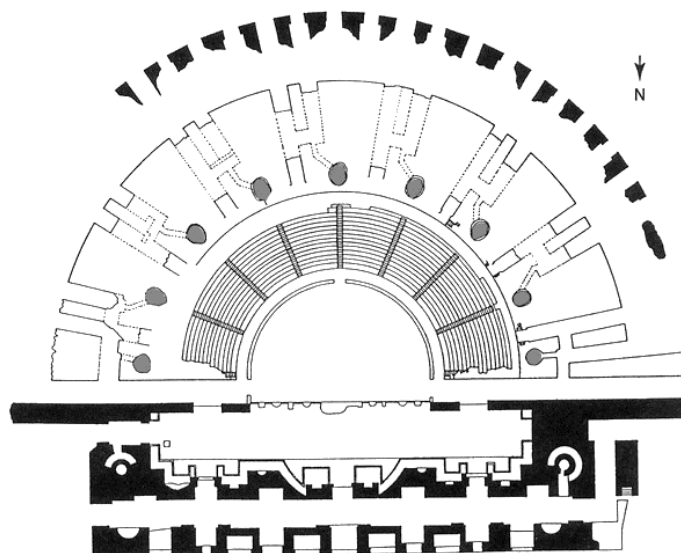


Fig. 2.1 – Planta do teatro de Scythopolis (Beit She'na, Israel), com salas para vasos acústicos (em cinza) que materializam os conceitos de Vitruvius [24].

2.2. PRINCÍPIOS BÁSICOS

2.2.1. SOM E RUÍDO

A onda sonora é uma onda mecânica longitudinal, de densidade das partículas do meio elástico onde se propaga [6]. Ao contrário das ondas eletromagnéticas, as ondas sonoras não se propagam no vazio.

Quando se propaga no ar, criam-se ondas esféricas concêntricas, com a fonte sonora no centro desta perturbação cuja energia altera a pressão das partículas circundantes [5]. As fontes sonoras são muito diversas: cordas vocais, vibração de uma corda de um instrumento musical, colisões, explosões, vibração de membranas, etc. Criam-se, assim, zonas de grande densidade (condensações) e zonas de baixa densidade (rarefações), intercaladas periodicamente ao longo da sua propagação (Figura 2.2).

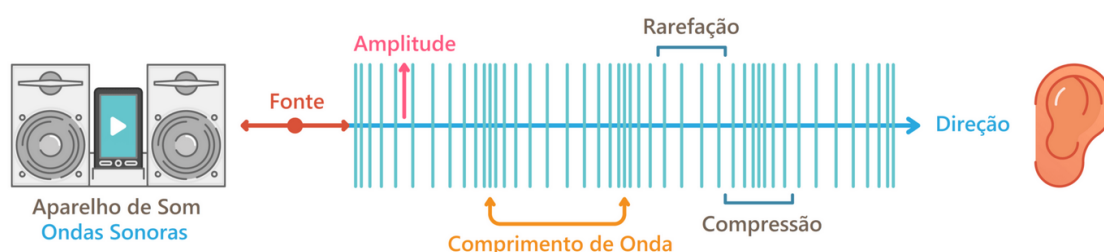


Fig. 2.2 – Onda sonora longitudinal, como uma sucessão periódica de zonas de rarefação e compressão [25].

O estímulo sonoro só existe se a onda interetar um recetor que possua um sistema auditivo capaz de a transmitir ao ouvido e que, por sua vez, envia a vibração ao cérebro sob a forma de neurotransmissores. A banda auditiva humana em frequência varia aproximadamente entre os 20 e os 20k Hz e está limitada inferiormente pelos infra-sons e superiormente pelos ultra-sons. A banda de variação de pressão sonora está limitada pelo limiar da audição e pelo limiar da dor, aos quais equivalem, respetivamente, valores na ordem dos 10^{-5} e os 10^2 Pa [5].

É nesta extensão que se distingue o *som* do *ruído*. São ambos sensações auditivas cujo significado depende do recetor e do cenário onde este se encontra. O som é agradável e/ou com significado para o ouvinte, enquanto que o ruído é desagradável e/ou não tem significado [5].

As ondas sonoras podem ser nocivas para o ouvinte, tanto ao nível físico como psicológico, dependendo do seu nível sonoro. Uma das principais consequências é a perda auditiva resultante de danos no ouvido e provocada por níveis sonoros muito elevados, pertos do limiar da dor. Esta limitação só é perceptível pela pessoa quando o limiar da sua audição atinge a banda de frequências do domínio fundamental da palavra (Figura 2.3). A percentagem de incapacidade ou deficiência auditiva pode ser calculada de acordo, por exemplo, com o método desenvolvido pela academia e pelo conselho americano de otorrinolaringologia, realizando um teste auditivo com um audiograma [5].

Numa outra vertente encontram-se os efeitos prejudiciais de ruídos que ultrapassem os 70 a 75 dB(A), os quais interferem na saúde humana ao ponto de provocar fadiga, desconforto, menor concentração, zumbido, aumento da pressão arterial, taquicardias, ansiedade, problemas do sono, entre muitos outros [5].

O ouvido humano está capacitado com uma ligeira proteção acústica a ruídos intensos, denominada de *reflexo acústico*. Este mecanismo natural é capaz de reduzir até 12 dB os ruídos com nível de pressão

sonora superior a 85 dB e em bandas de frequência até cerca de 2 kHz. O mais prudente será usar protetores de ouvido ou então promover ao isolamento da fonte sonora (por exemplo, atuar no equipamento com apoios antivibráteis, aplicar silenciadores, etc.) ou atuar no caminho de propagação da onda sonora (com o aumento da absorção sonora, colocação de ecrãs ou o isolamento de compartimentos) [5].

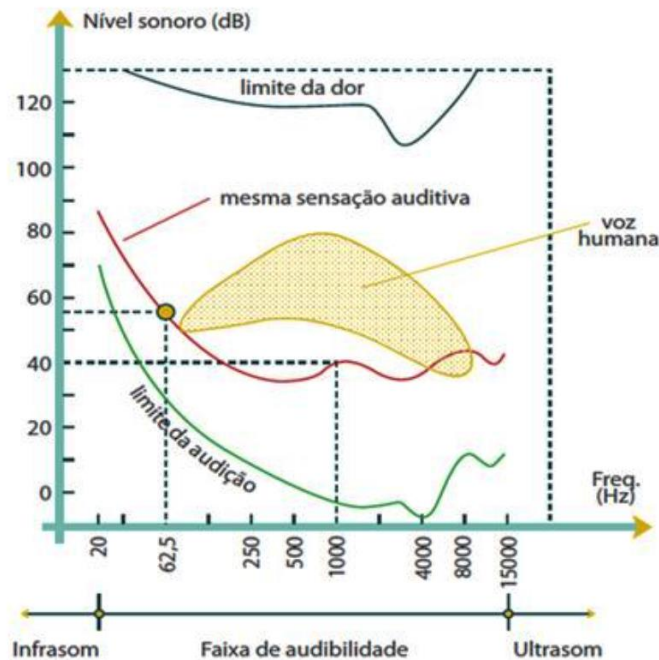


Fig. 2.3 – Variação em frequência da banda auditiva humana, com a representação do limiar da dor, limiar da audição, curva de igual sensação auditiva e zona da palavra (voz humana) [26].

2.2.2. ANÁLISE DA PRESSÃO SONORA

2.2.2.1. Lei geral de propagação das ondas de pressão sonora

Um dos principais domínios de análise dos sons ou ruídos é o da *pressão*. Tal como visto anteriormente, a onda propaga-se por alteração da pressão das partículas, com a criação de sucessivas e intercaladas zonas de condensação e rarefação.

A geração do som ou ruído é, então, uma consequência da variação de pressão ($P(t)$) do meio em relação à pressão atmosférica normal ($P_{atm} \cong 101.400 \text{ Pa}$) [5]. A Figura 2.4 exemplifica a geração de um som/ruído por alteração da pressão, após um determinado tempo de silêncio (no qual a pressão existente é a atmosférica e por isso o ouvido humano interpreta como silêncio).

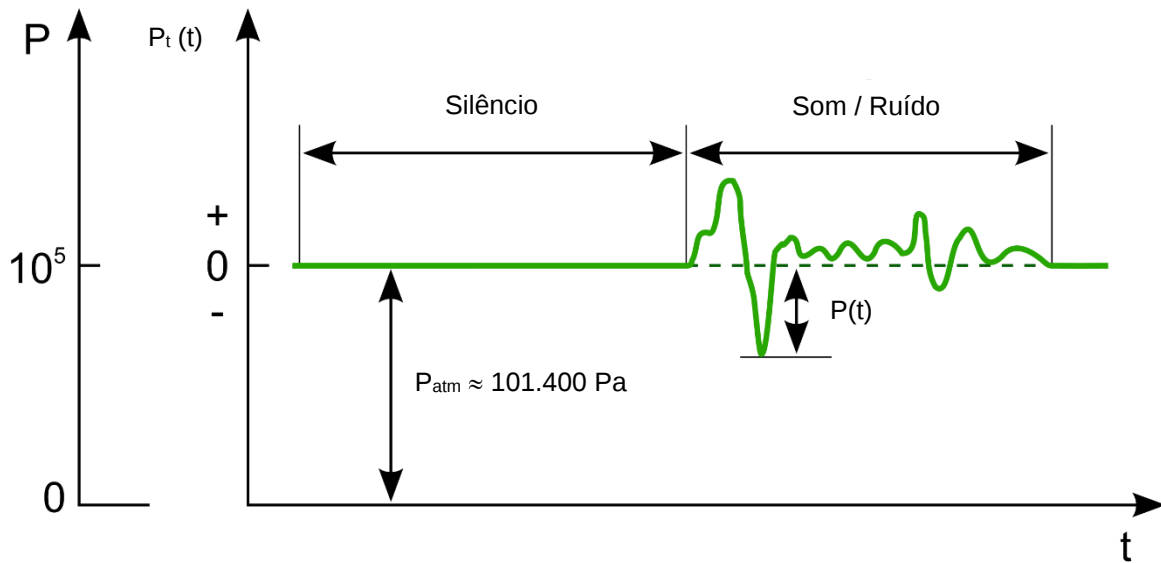


Fig. 2.4 – Pressão sonora (P_t) e pressão atmosférica (P_{atm}) [31].

A lei geral de propagação das ondas de pressão sonora, de acordo com a conjugação da lei das transformações adiabáticas, com o segundo princípio fundamental da mecânica e de acordo com o princípio da continuidade, é expressa por [5]:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

em que c é a celeridade ou velocidade de propagação das ondas no meio. Esta lei é válida em meios homogêneos, isotrópicos, sem viscosidade e em repouso.

A celeridade ou velocidade de propagação das ondas sonoras varia com a temperatura do meio (T [K]) e aumenta com o aumento da temperatura de acordo com [5]:

$$c = 20,045\sqrt{T} \quad (2.2)$$

com

$$T(K) = 273,15 + \theta \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (2.3)$$

2.2.2.2. Intensidade e potência sonora

A intensidade e a potência sonoras de uma onda sonora são grandezas importantes na análise de propagação, caracterizando a direção e a energia respetivamente.

A intensidade sonora (I), é numa dada direção, a quantidade média de energia que atravessa por segundo uma área de 1 m^2 , normal a essa direção e quantifica-se em W/m^2 . Permite a avaliação da componente

direcional do som e, como tal, é uma grandeza vetorial que gera um campo vetorial em torno da fonte [5].

A potência sonora (W) caracteriza a energia total emitida pela fonte, que num segundo atravessa uma esfera fictícia, de raio qualquer, centrada na fonte e quantifica-se em W .

A pressão (p), a intensidade (I) e a potência (W) sonoras relacionam-se de acordo com [5]:

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

onde, I – intensidade sonora (W/m^2);

W – potência sonora (W);

r – distância à fonte (m);

p – pressão sonora (Pa);

ρ – massa volúmica do ar ($\approx 1,2 \text{ kg/m}^3$);

c – celeridade no ar ($\approx 340 \text{ m/s}$).

2.2.2.3. Níveis

O nível de pressão sonora é uma grandeza logarítmica que permite definir, com maior rigor, os fenómenos auditivos e avalia o nível de uma quantidade física mensurável face a um valor de referência. É expresso em decibel (dB) e tem um possível ajuste matemático mais aproximado às respostas do ouvido humano aos estímulos sonoros. Os sonómetros avaliam a variação de pressão, mas apresentam o resultado já convertido em dB [5].

Em Acústica é convencional utilizar os seguintes níveis [5]:

- Nível de pressão sonora (L_p):

$$L_p = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right) = 10 \log \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) \quad (2.5)$$

com, L_p – nível de pressão sonora (dB);

p – pressão sonora (Pa);

p_0 – pressão sonora de referência ($2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$).

- Nível de intensidade sonora (L_I):

$$L_I = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (2.6)$$

com, L_I – nível de intensidade sonora (dB);
 I – intensidade sonora (W/m^2);
 I_0 – intensidade sonora de referência (10^{-12} W/m^2).

- Nível de potência sonora (L_W):

$$L_W = 10 \log \left(\frac{W}{W_0} \right) \quad (2.7)$$

com, L_W – nível de potência sonora (dB);
 W – potência sonora (W);
 W_0 – potência sonora de referência (10^{-12} W).

As operações matemáticas, entre os diferentes níveis sonoros, permitem quantificar o efeito de várias fontes sonoras a emitir num mesmo espaço. Assim, o efeito conjunto de N fontes sonoras, que emitem cada uma um certo nível sonoro (L_i), é caracterizado por [5]:

$$L_{soma} = 10 \log \left(\sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \quad (2.8)$$

Torna-se evidente que a soma logarítmica não é algébrica e, como tal, por exemplo:

$$50 \text{ dB} + 50 \text{ dB} \neq 100 \text{ dB} \quad (2.9)$$

2.2.2.4. Direcionalidade

A *direccionalidade* da emissão de uma fonte sonora depende da fonte, mas também da posição onde é colocada. A maioria não é omnidireccional, ou seja, não emite a mesma energia em todas as direções como se fosse uma esfera de radiação perfeita [5]. Esta característica pode ser avaliada e quantificada por dois parâmetros [5]:

- Coeficiente de direccionalidade, Q : relação entre a intensidade acústica (I) propagada numa dada direcção (φ, ϕ) e a que na mesma direcção se propagaria uma fonte omnidireccional com a mesma potência total;

$$Q(\varphi, \phi) = \frac{I(\varphi, \phi)}{I_{OMNI}} = \frac{p_{RMS}^2(\varphi, \phi)}{p_{OMNI}^2} \quad (2.10)$$

- Índice de direcionalidade, G (dB), segundo uma certa direção (φ, ϕ) :

$$G(\varphi, \phi) = 10 \log Q(\varphi, \phi) = L_p(\varphi, \phi) - L_{pOMNI} \quad (2.11)$$

onde (φ, ϕ) são os ângulos em relação a dois planos de propagação.

O valor do coeficiente de direcionalidade varia de acordo com a localização da fonte (tida como omnidirecional) numa sala:

- $Q=1$, se colocada no centro geométrico da sala;
- $Q=2$, se deslocada para junto de uma parede ou teto;
- $Q=4$, se colocada num canto, a meia altura da interseção de duas paredes;
- $Q=8$, se colocada num duplo canto.

2.2.3. ANÁLISE EM FREQUÊNCIA

2.2.3.1. Tipos de sons

A frequência, f (hertz, Hz), é o número de oscilações completas da onda por segundo. É uma característica aplicável a todas as ondas, sejam elas sonoras, eletromagnéticas ou outras.

A maioria dos sons naturais não é caracterizada apenas por uma frequência, mas sim compostos por uma infinidade de somas de diferentes frequências. São ondas *complexas* (Figura 2.5). Os sons, associados a apenas uma única componente de frequência, são denominados de *puros* ou *simples* (Figura 2.5).

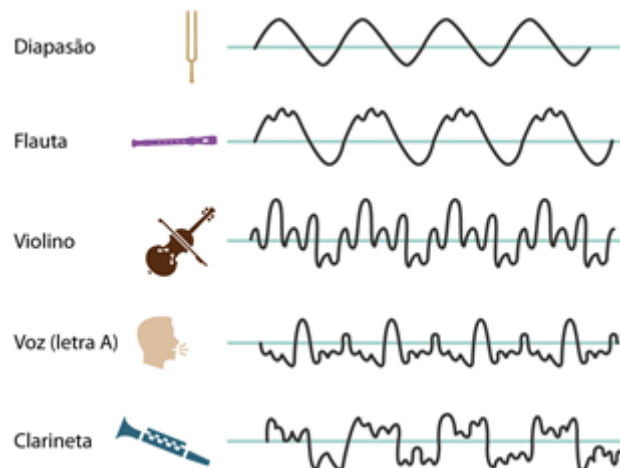


Fig. 2.5 – Exemplos de sons complexos (clarinete, violino, flauta e voz) e de som puro (diapasão) [25].

A análise em frequência permite a diferenciação de vários tipos de sons audíveis pelo ser humano, de acordo com a sua inclusão em três grandes bandas de frequência (de acordo com a acústica de edifícios) [5]:

- Frequências graves: 20 a 355 Hz – sons graves ou baixos;
- Frequências médias: 355 a 1.410 Hz;
- Frequências agudas: 1.410 a 20.000 Hz – sons agudos ou altos.

2.2.3.2. Propriedades físicas complementares das ondas

A frequência, por si só, não caracteriza completamente a onda. Usando como simplificação um som puro (Figura 2.6), é possível identificar outras propriedades físicas como a amplitude da perturbação (A), o período (T , em segundos), o comprimento de onda (λ , em metros) e a celeridade (c , em m/s). Estas grandezas relacionam-se de acordo com as seguintes equações:

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.12)$$

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \times f \quad (2.13)$$

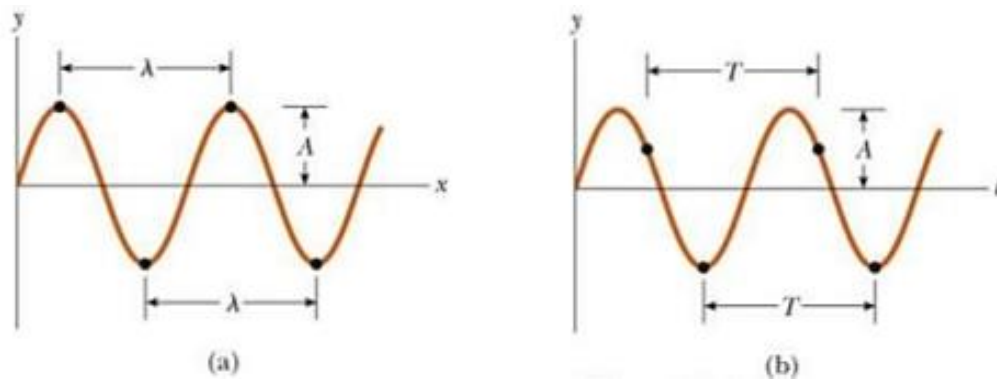


Fig. 2.6 – Em (a), propagação de um som puro com periodicidade espacial, onde é possível identificar a amplitude (A) e o comprimento de onda (λ). Em (b), propagação de um som puro com periodicidade temporal, onde se identifica a amplitude (A) e o período (T) [27].

2.2.3.3. Sobreposição de sons puros

A sobreposição de dois sons puros, p_1 e p_2 , é obtida com base nas equações básicas de ondas sinusoidais [5]:

$$p_1 = P_1 \cos(\omega_1 \times t + \theta_1) \quad (2.14)$$

$$p_2 = P_2 \cos(\omega_2 \times t + \theta_2) \quad (2.15)$$

em que, p – pressão instantânea (no tempo t) (Pa);
 P – pressão máxima (Pa);
 ω – frequência angular ($\omega = 2\pi f$ rad/s);
 $\Delta\theta$ – diferença de fase entre as duas ondas (rad).

A soma dos dois sons puros é:

$$p_{RMS}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (p_1 + p_2)^2 dt = \begin{cases} \frac{P_1^2 + P_2^2}{2}, & \text{se } f_1 \neq f_2 \\ \frac{P_1^2 + P_2^2}{2} + P_1 \times P_2 \cos(\Delta\theta), & \text{se } f_1 = f_2 \end{cases} \quad (2.16)$$

2.2.3.4. Bandas de frequências

Uma *banda* é um agrupamento de frequências, entre um limite inferior (f_1) e um limite superior (f_2) e que permite a simplificação da análise das centenas ou milhares de frequências existentes [5]. Cada banda é definida pela sua frequência central (f_0) que corresponde ao valor médio, de acordo com:

$$f_0 = \sqrt{f_1 f_2} \quad (2.17)$$

A largura de banda (B) é a diferença entre os seus valores numéricos dos limites superior e inferior e permite a identificação de diversas larguras (em acústica ambiental ou de edifícios são usadas habitualmente as de 1/1 oitava e as de 1/3 de oitava (Figura 2.7).) [5].

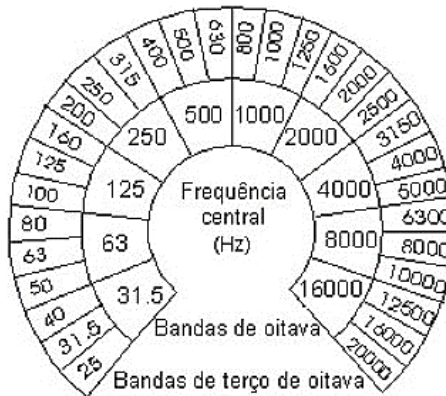


Fig. 2.7 – Janela de frequências audíveis, com o agrupamento em uma oitava e terço de oitava [7].

2.2.3.5. Curvas isófonas e de ponderação

As curvas isófonas são curvas de igual percepção sonora, por meio das quais a relação entre a frequência e a intensidade (em dB) de dois sons é calculada, de forma que estes sejam percebidos como tendo o mesmo nível, pelo ouvido humano (o ouvido humano tem uma sensibilidade auditiva variável em frequência) [5] [7]. Os microfones, e outros equipamentos no geral, registam as pressões sonoras com total fidelidade independentemente da frequência [5].

Tal como se pode analisar na Figura 2.8, o ouvido humano tem uma maior sensibilidade auditiva para frequências na banda dos 2,3 aos 2,8 kHz e é muito pouco sensível para baixas frequências. Esta sensibilidade também depende da intensidade sonora do som. As curvas estão escalonadas por *fone* (uma

unidade que toma o valor numérico do respetivo nível de pressão sonora dos 1000 Hz). A curva mais inferior representa o limiar da audição, a qual tem zero fone [5].

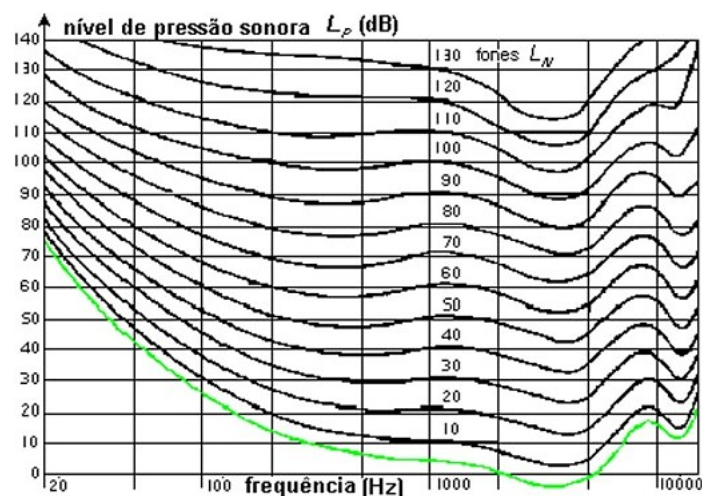


Fig. 2.8 – Curvas de igual sensibilidade auditiva (em fone). A linha inferior (verde) representa o limiar de audição normalizado [7].

Esta particularidade humana de sensibilidade subjetiva dos sons levou a que os equipamentos fossem ajustados, com a implementação de filtros eletrónicos que “corrigem” a sonoridade, através das curvas de ponderação (Figura 2.9). Estas são, pois, as curvas que representam as correções efetuadas em função da frequência do som captado e a mais usada é a denominada curva (ou filtro) A [5].

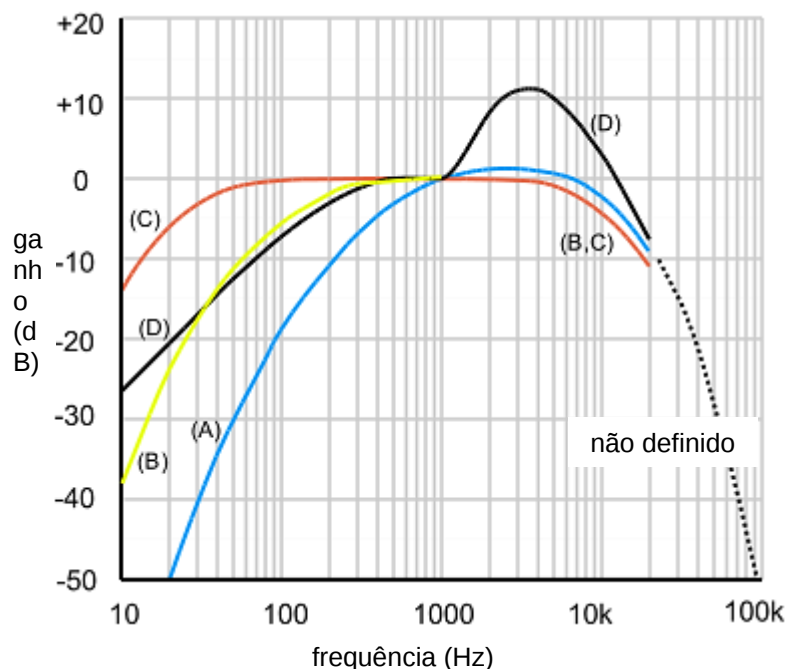


Fig. 2.9 – Diferentes curvas de ponderação: (A) filtro A, a azul; (B) filtro B, a verde; (C) filtro C, a vermelho; (D) filtro D, a preto [30].

2.2.4. ANÁLISE NO TEMPO

Depois de analisadas a pressão e a frequência, a duração do ruído é essencial na sua caracterização e efeitos provocados. A análise temporal permite obter parâmetros em função do tempo e que colmata a instabilidade temporal dos níveis de pressão sonora da generalidade dos ruídos [5].

O nível de pressão sonora contínuo equivalente (L_{eq}) é um parâmetro descritor energético que se define como o nível que, se atuasse constante num dado intervalo de tempo, produziria a mesma energia que o som que se pretende avaliar. É, assim, a média energética num intervalo de tempo de T , de acordo com [5]:

$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt \right] \quad (2.18)$$

em que, L_{eq} – nível de pressão sonora contínuo equivalente (dB);

$p(t)$ – pressão instantânea (Pa);

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

T – duração do ruído.

Os parâmetros estatísticos referem-se aos quantis de densidade de probabilidade e define-se L_N como o nível que, num dado intervalo de tempo, é excedido em N% da duração temporal desse intervalo. Os mais utilizados são o L_{50} e o L_{95} [5].

2.2.5. CORREÇÃO ACÚSTICA

2.2.5.1. Absorção sonora

A *absorção sonora* é uma propriedade que alguns materiais possuem, com a qual transformam parte da energia sonora incidente num outro tipo de energia (que, por norma é térmica) [5].

A quantificação desta propriedade é dada matematicamente pelo coeficiente de absorção sonora (α) que é definido como a razão entre a quantidade de energia sonora absorvida e a que incide no material [5].

$$\alpha = \frac{E_{absorvida}}{E_{incidente}} \quad (2.19)$$

Este coeficiente varia entre 0 e 1. Os materiais muito polidos e refletores têm valores quase nulos enquanto que os mais absorventes têm valores de α superiores a 0,5. No entanto, para o mesmo material, o α varia com o ângulo de incidência e com a frequência do som incidente [5].

A determinação do coeficiente de absorção sonora é efetuada por dois métodos normalizados: método do tubo de ondas estacionárias (ou tubo de Kundt) e método da câmara reverberante [5].

A absorção sonora total de um material (A) é obtida pela equação 2.20 [5].

$$A = \alpha \times S \quad (2.20)$$

Generalizando a um compartimento com vários materiais, a absorção sonora equivalente é [5]:

$$A = \sum_{i=1}^n (\alpha_i \times S_i) \quad (2.21)$$

em que, A – absorção sonora equivalente (m^2);
 α – coeficiente de absorção sonora do material;
 S – superfície real do material (m^2).

Um outro parâmetro de quantificação da absorção sonora dos materiais é dado pela média aritmética dos valores de α nas bandas de uma oitava, dos 250 aos 2000 Hz, denominado por Coeficiente de Redução do Ruído (*Noise Reduction Coefficient - NRC*) [5].

$$NRC = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}}{4} \quad (2.22)$$

O coeficiente de absorção sonora ponderado (α_w) é um parâmetro médio que se obtém por ajuste ponderado de uma curva de referência (com uso das bandas de oitava dos 250 aos 4000 Hz). O método de cálculo é simples: traça-se a curva dos valores de α por banda e determina-se a soma dos desvios positivos entre uma curva de referência móvel e os valores reais – o valor de α_w é o valor lido para os 500 Hz na curva ajustada de modo que a soma dos desvios positivos seja a mais elevada possível sem ultrapassar os 0,10 (em múltiplos de 0,05). Se o valor medido exceder em 0,25 ou mais o valor de referência, acrescenta-se entre parênteses uma letra indicadora da banda de frequências onde foi ultrapassado: *L* se acontecer nos 250 a 500 Hz, *M* se acontecer nos 1 ou 2 kHz e *H* se acontecer nos 4 kHz [5].

O valor de α_w obtido permite classificar os materiais em classes de absorção sonora, sendo [5]:

- Classe A: $\alpha_w \geq 0,90$;
- Classe B: $0,80 \leq \alpha_w \leq 0,85$;
- Classe C: $0,60 \leq \alpha_w \leq 0,75$;
- Classe D: $0,30 \leq \alpha_w \leq 0,55$;
- Classe E: $0,15 \leq \alpha_w \leq 0,25$;
- Não classificado: $\alpha_w \leq 0,10$.

2.2.5.2. Tempo de reverberação

Num compartimento, as ondas sonoras emitidas por uma fonte sonora são recebidas pelo ouvinte por duas vias: direta (propagação em linha reta desde a fonte até ao recetor) e refletida (a onda sofre uma ou várias reflexões nas superfícies do compartimento antes de atingir o recetor). As refletidas ou

reverberadas tendem a ficar cada vez mais fracas por consequências das consecutivas absorções que sofrem em cada reflexão e também devido ao efeito de absorção do ar. Gera-se assim um som mais duradouro do que o emitido, com a sensação (para o ouvinte) de um rasto sonoro [5].

O tempo de reverberação é o intervalo de tempo (em segundos) que um qualquer som demora a extinguir-se por completo, ou seja, no qual o nível de pressão sonora decresce 60 dB (contado a partir do momento em que a fonte sonora termina de emitir o som). Na prática é muito difícil obter um decaimento de 60 dB devido à sobreposição do ruído de fundo e, assim, tenta-se obter 20 dB ou 30 dB e faz-se uma extrapolação do declive de reta obtido para os 60 dB de decaimento obtendo-se TR_{20} ou TR_{30} (Figura 2.10). A medição do tempo de reverberação é regulada pela EN ISO 3382 [5].

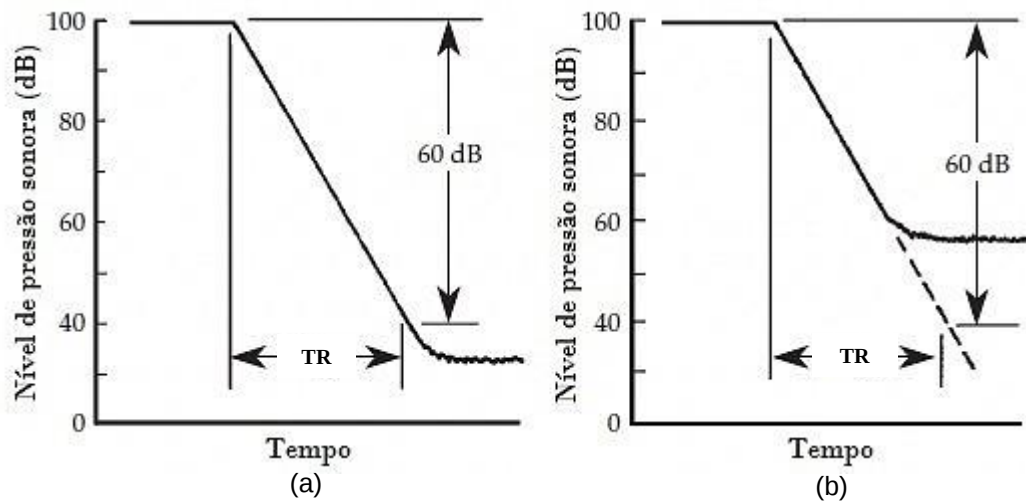


Fig. 2.10 – Definição de tempo de reverberação (TR) (valor teórico em (a) e valor obtido por extrapolação do declive em (b) [28].

Os valores obtidos não ditam a qualidade de uma sala, a não ser que se saiba o propósito da sua utilização. Por exemplo, um tempo de reverberação excessivo reduz a inteligibilidade da palavra (o rasto deixado por vogais pode suplantar totalmente as consoantes imediatamente seguintes de uma palavra) mas dá maior qualidade à generalidade das salas para música (as notas não são entendidas com uma clareza excessiva) [5].

A previsão matemática do tempo de reverberação (sem a exigência da sua medição *in situ*) pode ser obtida por várias equações, das quais se destaca a formulada pelo físico americano Wallace Clement Sabine, em 1898 [5].

A *fórmula de Sabine* (genérica) permite obter valores muito próximos dos reais (para campos sonoros difusos e com um coeficiente de absorção sonora médio inferior a 0,20) [5].

$$TR = \frac{V \times (24 \ln 10)/c}{\sum_{i=1}^N (\alpha_i \times S_i) + \sum_{j=1}^M A_j + m \times V} \quad (2.23)$$

em que, TR – tempo de reverberação (s);
 V – volume do compartimento (m^3);
 c – celeridade (m/s);
 α – coeficiente de absorção sonora do material;
 S – superfície real do material (m^2);
 A_j – absorções sonoras localizadas (m^2);
 m – absorção sonora do ar (m^{-1}).

2.2.6. PERCEÇÃO DA PALAVRA

2.2.6.1. Inteligibilidade da palavra

Ter inteligibilidade é uma qualidade do que é inteligível, é uma condição do que pode ser compreendido ou conhecido pela inteligência, é a qualidade do que é claro e do que é facilmente compreensível e é também uma qualidade do que é distinto e do que se ouve com nitidez [8]. Na comunicação verbal, entre um emissor e um recetor, é essencial que a palavra seja inteligível. A variabilidade da emissão da voz é analisada no domínio da frequência, intensidade, duração e direcionalidade [5].

No domínio da frequência, as vogais tendem a situar-se nas mais baixas frequências (por exemplo, a vogal [u] situa-se de 150 a 300 Hz) e as consoantes nas mais altas frequências (por exemplo, a consoante [s] situa-se de 3500 a 7000 Hz) [5].

Na intensidade, a diferença de nível de pressão sonora de emissão, entre o som de uma consoante (mais débil) e o som de uma vogal (som mais intenso), é cerca de 28 dB. Na duração, as vogais são emitidas com uma duração média de 90 ms e as consoantes com uma média de 20 ms [5].

A voz humana emite maioritariamente para a frente do emissor, mas varia com a frequência (Figura 2.11) (as baixas frequências (como as vogais) não têm uma grande variabilidade no que respeita à direcionalidade, mas as altas (como as consoantes) perdem quase 25 dB com a direção de escuta) [5].

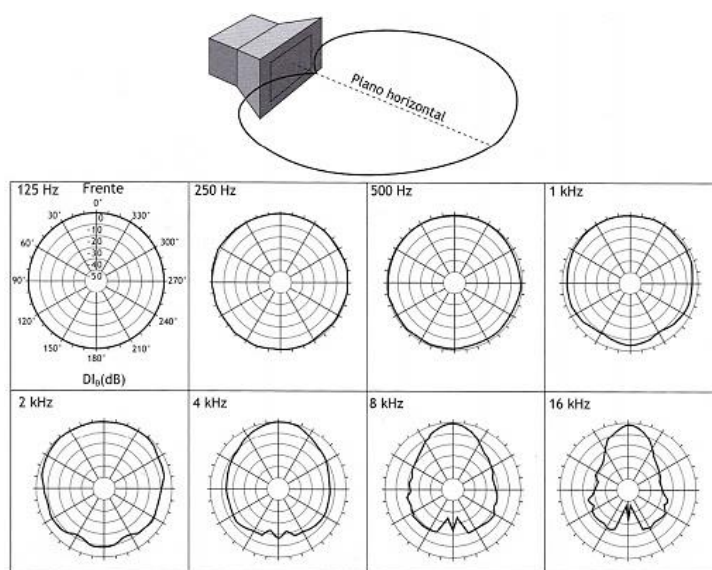


Fig. 2.11 – Contornos da emissão de um som, no plano horizontal, para várias frequências [29].

2.2.6.2. Parâmetros de medida da inteligibilidade

A inteligibilidade pode ser avaliada por dois grandes grupos de parâmetros [5]:

- Subjetivos: implicam a leitura de palavras ou frases, com várias pessoas a ouvir e a escrever o que ouvem, cujo grau de acerto é proporcional à inteligibilidade do local. Distinguem-se os denominados *Phonetically Balanced words (PB)* e o *Modified Rhyming Tests (MRT)*;
- Objetivos: obtidos por leitura de equipamentos eletrónicos. Distinguem-se dos seguintes:
 - › **STI e RASTI:** o *rapid speech transmission index (RASTI)* é o método simplificado de calcular o *speech transmission index (STI)* e varia entre zero (inteligibilidade nula) e um (inteligibilidade ótima). A vantagem em relação a outros métodos é que pode ser avaliado rapidamente, sem oradores ou ouvintes. O *RASTI* inclui automaticamente o efeito da reverberação e do ruído de fundo, porque é derivado da degradação do sinal medido [9]. Os valores de *RASTI* podem ser transformados numa escala de inteligibilidade como se apresenta no Quadro 2.1 [9].

Quadro 2.1 – Valores do *RASTI* numa escala de inteligibilidade [9].

<i>RASTI</i> (%)	Escala subjetiva de inteligibilidade
0 – 30	<i>Má</i>
30 – 45	<i>Medíocre</i>
45 – 60	<i>Suficiente</i>
60 – 75	<i>Boa</i>
75 – 100	<i>Excelente</i>

- › **AI:** o índice de articulação (*AI*) é obtido através da diferença entre o nível de conversação de referência e o ruído de fundo no local, pesada através da importância relativa de cada banda de frequências, e resulta do somatório destas diferenças ponderadas dividido por 10.000;
- › **SIL:** o *speech interference level (SIL)* é a média aritmética dos níveis de pressão sonora dos ruídos de fundo em cada uma das bandas de uma oitava dos 500 aos 2k Hz;
- › **AC:** a *articulation class (AC)* determina-se de forma semelhante à do *AI*, mas a análise é realizada na banda dos 200 aos 5k Hz, por bandas de 1/3 de oitava, com os respetivos 15 pesos.

2.3. RESSOADORES

2.3.1. INTRODUÇÃO

Os ressoadores fazem parte de um vasto conjunto de materiais e sistemas absorventes sonoros classificados de acordo com o modo físico de absorção. Assim, de acordo com as suas características, os materiais e sistemas absorventes sonoros podem ser subdivididos em [5]:

- **Porosos e fibrosos:** também denominados de “texturados”, são mais eficazes nas altas frequências. São exemplos os tecidos e as alcatifas, aglomerados de fibras de madeira, fibras minerais, aglomerados de cortiça, etc. O mecanismo de absorção sonora é possível devido à estrutura aberta de pequenas dimensões que é acessível às ondas sonoras de comprimento de onda reduzido (altas frequências) e que movimentam o ar ao longo dos interstícios existentes no seu interior, entre o conjunto de partículas/fibras que os constituem. A dissipação da energia da onda sonora incidente em energia térmica processa-se fundamentalmente devido ao atrito decorrente da movimentação do ar nos interstícios do material, e em menor proporção por viscosidade e atrito interno aquando da vibração da sua própria estrutura [10];
- **Ressonadores:** são mais eficazes nas frequências médias. Os ressonadores de cavidade também são designados por *ressonadores de Helmholtz* e a sua eficiência está assente no fenómeno da ressonância (tal como as membranas). São exemplos os vasos acústicos e os blocos com ranhuras. O sistema é constituído por uma cavidade com ar confinado (por exemplo uma bilha), que comunica com o ambiente através de uma pequena abertura. Pode ser traduzido, simplificada, como um sistema do tipo massa-mola amortecido, em que o ar na abertura corresponde ao elemento massa e o ar no corpo do ressonador ao elemento mola (o mecanismo de dissipação de energia é feito por atrito dos movimentos do ar aquando do contacto com as paredes da cavidade que são responsáveis pelo amortecimento) [10];
- **Membranas:** são mais eficazes nas baixas frequências e constituídas por um painel flexível (em geral de pequena espessura, por exemplo madeira) apoiado numa estrutura intermédia que está fixa num elemento rígido (por exemplo parede, pavimento ou teto), com um espaço de ar no tardo (que poderá ser ou não total ou parcialmente preenchido por um material absorvente do tipo poroso). A onda sonora incidente provoca a vibração do painel e determina a compressão e tração do ar existente na caixa de ar. Se a frequência da onda sonora for próxima da frequência de ressonância do sistema, a dissipação de energia sonora é máxima (com elevado valor de α) [10].

Na prática, a solução técnica de projeto conjuga as propriedades dos diversos sistemas descritos, o que garante um bom desempenho de absorção sonora para uma banda alargada de frequências. De outro modo, a utilização de um só tipo de sistema absorvente num espaço pode levar à absorção excessiva de uma determinada banda de frequências, com efeitos indesejáveis ao nível da percepção sonora [10].

2.3.2. COMPORTAMENTO ACÚSTICO DE RESSONADORES NA ABSORÇÃO SONORA

Os ressonadores de cavidade (ou de Helmholtz) são sistemas formados por uma cavidade de paredes rígidas com uma única abertura estreita (o gargalo) [5]. A sua representação esquemática é do tipo massa-mola amortecido, em que o ar na abertura corresponde ao elemento massa e o ar no corpo do ressonador ao elemento mola [10] (Figura 2.12). O ar no gargalo vibra como consequência da energia da onda sonora que o atinge, entrando e saindo do gargalo [5]. A sua eficácia é máxima na absorção das médias frequências.

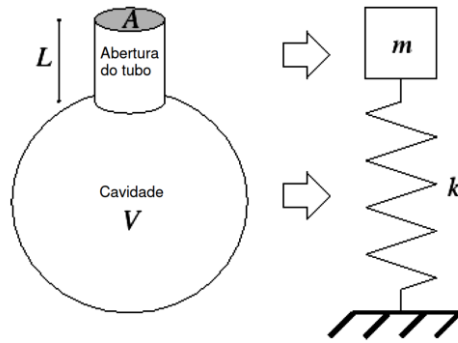


Fig. 2.12 – Representação esquemática do modo de funcionamento de um ressonador de cavidade [10].

A expressão matemática que permite obter a frequência de eficácia máxima (de ressonância) é [5]:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V(L + 1,6r)}} \quad (2.24)$$

em que, f – frequência de ressonância (Hz);
 V – volume do ar interior (m^3);
 c – celeridade (m/s);
 S – área do gargalo (abertura) (m^2);
 L – comprimento do gargalo (m);
 r – raio do gargalo (m).

A frequência de ressonância depende do volume da cavidade interior e das outras dimensões geométricas: é tanto maior quanto maior a abertura do gargalo e decresce com o aumento do volume interior e com o comprimento do gargalo [10].

A banda de frequências de maior desempenho pode ser alargada se for incluído um material absorvente sonoro na caixa-de-ar, como os do tipo poroso, no entanto verifica-se que há perda de amplitude de absorção [5] (Figura 2.13).

Este sistema é, desde há muito tempo (desde o período da arquitetura romana), utilizado em anfiteatros e depois em algumas igrejas, que incluíram no seu interior vasos de cerâmica abertos para o interior numa tentativa de melhorar os problemas acústicos do espaço [1].

Atualmente existem diversas aplicações e melhorias do sistema, tal como os blocos de argamassa *Sonicbloco* da *Previcon*, desenvolvidos em colaboração com o Laboratório de Acústica da FEUP [5].

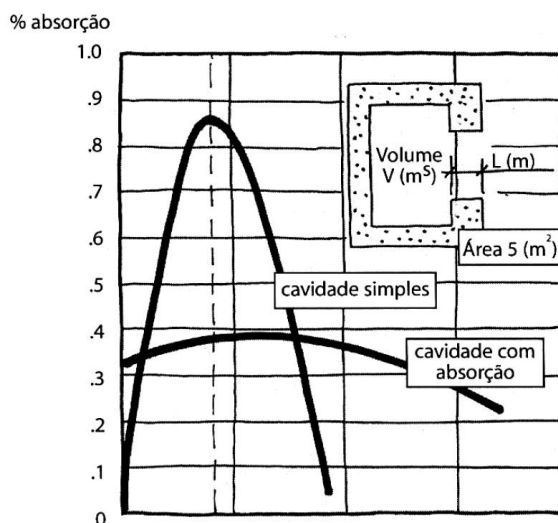


Fig. 2.13 – Efeito da inclusão de um material poroso no volume de ar de um ressonador de cavidade [10].

Uma das mais frequentes utilizações práticas e em projeto de edifícios dos ressonadores “agrupados” a outros materiais absorventes são os painéis perfurados metálicos ou de madeira para tetos falsos [5]. A expressão matemática que permite o cálculo da frequência de ressonância é a descrita na equação 2.25.

$$f = \frac{10 c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{d(e + 1,6r)}} \quad (2.25)$$

em que, f – frequência de ressonância (Hz);
 P – percentagem de área perfurada (%);
 c – celeridade (m/s);
 d – largura da caixa de ar (cm);
 e – espessura da placa perfurada (cm);
 r – raio de cada perfuração (cm).

cuja validade de aplicação é verificada quando:

$$f \cdot d < 3400 \text{ Hz.cm} \quad (2.26)$$

3

REVISÃO HISTÓRICA

3.1. INTRODUÇÃO

Das tradições antigas que a Idade Média preservou e que o Renascimento expôs, destaca-se a preocupação com a acústica em edifícios destinados a ouvir a palavra e a música [11].

A melhoria acústica de grandes espaços, destinados a um “público”, esteve sempre muito relacionada com teatros e salas de espetáculos. Os locais de culto, como as grandes igrejas, não incutiam por si só uma importância neste campo visto que a profecia da sua catequese em latim de pouco ou nada exigia a compreensão da palavra (a maioria dos ouvintes não entendia este idioma). Todavia, mesmo antes que isto tivesse mudado (após o Concílio de Trento, séc. XVI, os sermões passaram a ser na língua nativa de cada país [12]), seja por sorte, intuição ou experiência, os modelos arquitetónicos dos locais de culto foram melhorando constantemente, otimizando os resultados visuais e sonoros dos locais [13]. Muito possivelmente, a sua evolução foi construída com base numa série de exemplos relevantes.

Escreve a História que o uso de vasos acústicos de bronze ou de barro (atualmente denominados de ressoadores de Helmholtz [2]), os *echea*, aconteceu nos tempos antigos (eram colocados no pavimento ou sob as arquibancadas de teatros, com o intuito de melhorar a sua acústica), cujo funcionamento foi descrito por Aristóteles (384-322 a.C.), Vitruvius (80-15 a.C.) e Plínio, o Velho (23-79 d.C.) [14].

Do século XI ao século XVI, mas especialmente durante o período da arquitetura românica e gótica, algumas igrejas foram construídas com vasos embutidos nas paredes ou em compartimentos ocultos. Supõe-se que estes vasos tinham funções acústicas, especialmente na amplificação e na ressonância da voz. No entanto, a sua eficácia é muitas vezes questionada (existem dúvidas relacionadas com o porquê de não terem sido instalados de forma sistemática e com o facto do seu uso ter sido subitamente interrompido) [14].

Estes instrumentos acústicos são vasos e jarros, com ou sem alças, em cerâmica de argila vermelha ou cinza, por vezes vitrificada, muito variável em forma e tamanho (entre diferentes espaços e até no mesmo espaço). A sua localização é mais frequente junto ao altar e coro das igrejas (nas abóbadas ou junto dos cantos superiores das paredes) ou perto das janelas. Estão embutidos de tal forma que o orifício é visível e direcionado para o espaço interior, colocado no plano da parede e muitas vezes integrado na decoração do local [14].

Mais recentemente, o interesse e estudo mais aprofundado do funcionamento destes vasos acústicos foi considerado por Thorschmid em 1725 e, depois, seguindo-se várias publicações em meados do século XIX, em especial por J. R. Rahn, e outros que desencadearam uma série de pesquisas científicas em diversos países [14].

A acústica de igrejas é complexa, dependendo da sua exigência funcional e do seu estilo arquitetónico, cuja antiguidade, complexidade geométrica e os inúmeros espaços existentes são variáveis que dificultam a criação de um bom conforto acústico. A sonoridade está assente na palavra e na música,

que podem ser emitidos em separado ou em conjunto, porém estas têm requisitos acústicos diferentes. A otimização destes espaços, em termos acústicos, exige por isso a sua investigação científica através de ensaios e o seu condicionamento depende do ponto em que os parâmetros se conjugam para se obter uma sonoridade melhor (tanto para a palavra como para a música). Um dos primeiros e mais importantes estudos em igrejas foi realizado por Parkin e Taylor, em 1952, que analisaram a inteligibilidade da palavra na Catedral de S. Paulo em Londres. Seguiram-se muitos outros, principalmente em igrejas de Roma, onde relacionaram a arquitetura e o seu tamanho com o tempo de reverberação (TR). Em Portugal, o Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto iniciou, em 1992, um programa de investigação que tinha por objetivo a identificação das características acústicas das igrejas católicas portuguesas. Destaca-se o trabalho realizado por A. P. O. Carvalho, em 1994, na sua tese de doutoramento *“Influence of Architectural Features and Styles on Various Acoustical Measures in Churches”*, onde caracterizou acusticamente 41 igrejas Portuguesas. Após este feito, seguiram-se inúmeros ensaios (a maioria sob orientação deste autor), que apresentaram comparações entre diversas igrejas, mesquitas, caracterizações objetivas e subjetivas, e dos quais se pode destacar o trabalho realizado para a nova igreja da Santíssima Trindade de Fátima [12].

Neste capítulo serão abordados temas como o uso (histórico e atual) das bilhas acústicas em locais de culto, o tipo, forma e disposição dos vasos. Também serão referenciados alguns dos estudos científicos efetuados em locais cuja arquitetura inclui estes dispositivos acústicos.

3.2. ABORDAGEM HISTÓRICA DO USO DE BILHAS ACÚSTICAS

A utilização de bilhas ou de vasos acústicos remota a tempos antigos, no primeiro século antes de Cristo. A publicação de Vitruvius, *“De Architectura”*, descreveu a existência e uso de vasos de latão ou de barro (mais raros), denominados *“echea”* (cuja origem forma a palavra “eco”, significando aqui “que ecoa”), dispostos nas arquibancadas de alguns teatros e templos (Figura 3.1 e Figura 3.2) [11]. Estes *echea* são normalmente identificados como os ancestrais dos vasos acústicos, usados na Idade Média [11]. A sua utilização teria como principal objetivo a melhoria da qualidade do som e não a sua amplificação [1].



Fig. 3.1 – Modelos de *echea*, à esquerda de acordo com Perrault em 1673 e à direita por Baudouin em 1938 [11].

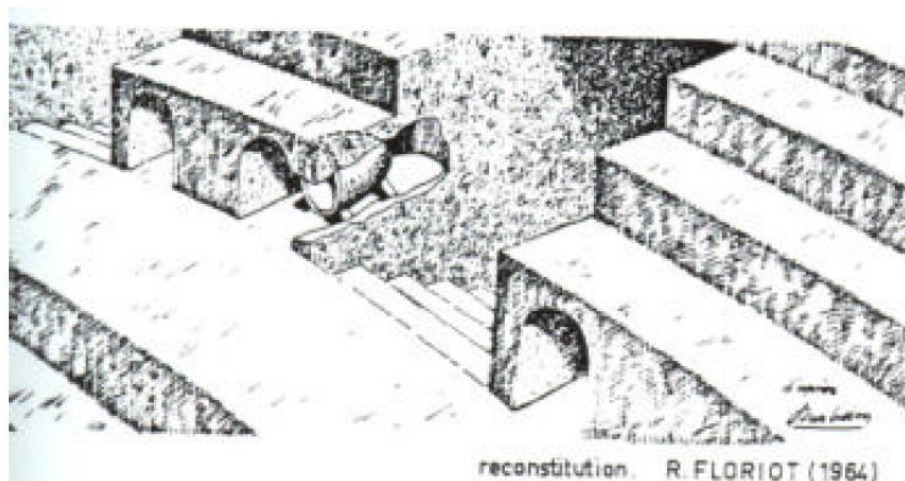


Fig. 3.2 – Modelo de utilização de *echea*, de acordo com Floriot em 1964 [11].

Vitrúvio também referiu que os *echea* eram produzidos e afinados tendo em conta a grandiosidade do teatro e a sua colocação no local era metódica e de acordo com as regras da música (em nichos entre os assentos do teatro, que se pretendia que estes não tocassem nas paredes, não estando embutidos e como tal eram colocados num espaço vazio) [11].

O funcionamento dos *echea* não foi explicado por Vitrúvio, mas a sua publicação induz a que estes atuassem como ressoadores, cujo efeito se pode justificar devido às massas de ar que continham [11].

Antes de Vitrúvio, já Aristóteles tinha descrito na sua obra “*Problemata*” o uso de potes para fins acústicos, os quais eram enterrados para dar mais ressonância à construção. Uma prática também encontrada na Idade Média, comprovada pela descoberta de cerâmica enterradas sob o pavimento do coro de certas igrejas, cuja função teria sido o de ressoar os passos do clero e amplificar o ruído de bastões durante as cerimónias de adoração. Além dos vasos enterrados, também se verifica a existência de vasos acústicos embutidos nas paredes, após o séc. XI (até ao momento não se encontraram monumentos anteriores ao séc. XI com esta prática arquitetónica), de algumas igrejas desta época, como são os exemplos das igrejas de Gelterkinden e de Villette na Suíça (Figura 3.3). Apesar de existir a possibilidade de uma inspiração em conhecimentos mais antigos para o seu uso, não existem evidências desta continuidade [11].



Fig. 3.3 – Igreja de Gelterkinden (Suíça), onde se podem observar dois vasos acústicos no topo da imagem (à esquerda); Exemplo de vaso acústico da igreja de Villette, Suíça (à direita) [11].

A maioria destes vasos pode ser encontrada em igrejas do estilo românico e gótico, mas em nenhuma que tenha sido construída depois do século XVII. Historicamente, o início da arquitetura românica acontece no século XI e assume-se como uma mistura de arquiteturas antigas, assim como as Europeias, as do império Grego e da Ásia. Os *echea* foram também encontrados em mesquitas na Hungria e em banhos turcos, levando a supor que a transmissão do seu conhecimento se tenha dado através da arquitetura Bizantina [11]. Os arquitetos bizantinos usavam estes vasos de cerâmica em igrejas e mesquitas, provavelmente para melhorar a sua acústica [1]. Koumanoudis descobriu que 147 das 2500 igrejas bizantinas na Grécia têm potes acústicos nas paredes e afirma que a aplicação dos vasos foi bastante empírica, sem qualquer prova científica de sua eficácia [1].

As rotas comerciais da vida bizantina com origem em Veneza dispersam em direção ao norte para o Reno (as províncias do Reno são muito ricas em vasos acústicos) e na direção sul para o oceano. Da Ásia, pelo norte, as linhas comerciais seguem os rios afluentes do mar Negro até às fronteiras das regiões escandinavas. O rio Ródano também poderá ter sido uma via possível de transmissão de conhecimento dos *echea*. Contraditoriamente e deixando em causa estas teorias, as pesquisas mostram que a Normandia é uma região onde se encontram vários vasos acústicos, apesar de se localizar fora das rotas principais e com insignificantes influências do Oriente. Existe a possibilidade de que tenha sido o trabalho de Vitrúvio a inspirar os arquitetos da Idade Média [11].

É importante ter em atenção que os vasos romanos e gregos se distinguem dos da Idade Média, no seu modo de operação e nos efeitos que provocam: os *echea* foram encontrados em teatros “abertos” onde a reverberação era muito baixa ou até mesmo agrupados ao ar livre, enquanto que os vasos acústicos medievais se encontram incorporados nas paredes de igrejas com longos tempos de reverberação Figura 3.4) [11].



Fig. 3.4 – Vasos acústicos embutidos em blocos de pedra [11].

Só em meados do século XIX se “redescobrem” os vasos acústicos, em França, despertando o interesse de vários países como os da Escandinávia, Rússia, Suíça e até Portugal [11]. Mijick *et al.* encontraram vasos acústicos em 24 igrejas e capelas ortodoxas sérvias, assim como também foram encontrados na Itália e em alguns outros países como Síria, Argélia, Tunísia e Índia [1].

No capítulo 3.4. *Locais de culto com vasos acústicos* e também no Anexo 1 apresenta-se uma lista de alguns locais onde se encontraram vasos acústicos.

3.3. FORMA E DISPOSIÇÃO DOS VASOS ACÚSTICOS

3.3.1. FORMA DOS VASOS ACÚSTICOS

As pesquisas realizadas por Loerincik [11] identificam a existência de vasos acústicos com diferentes formas, mesmo que com uso da mesma cerâmica e no mesmo local. A grande maioria apresenta dimensões de cerca de 25 cm de altura, embora existam alguns maiores (com cerca de 1 m). Na sua investigação, Loerincik identificou uma dependência na forma dos vasos de acordo com a região, com o exemplo de que os encontrados na Suíça eram diferentes dos da Alemanha, Inglaterra ou França. A grande semelhança com as bilhas utilizadas a nível domiciliário tende a prever que este era, inicialmente, o seu destino e que foram aproveitados para fins de acústica arquitetónica.

Da vasta pesquisa que realizou, Loerincik [11] esquematizou as principais formas dos vasos acústicos encontrados, das quais algumas se apresentam nas Figuras 3.5 a 3.7.

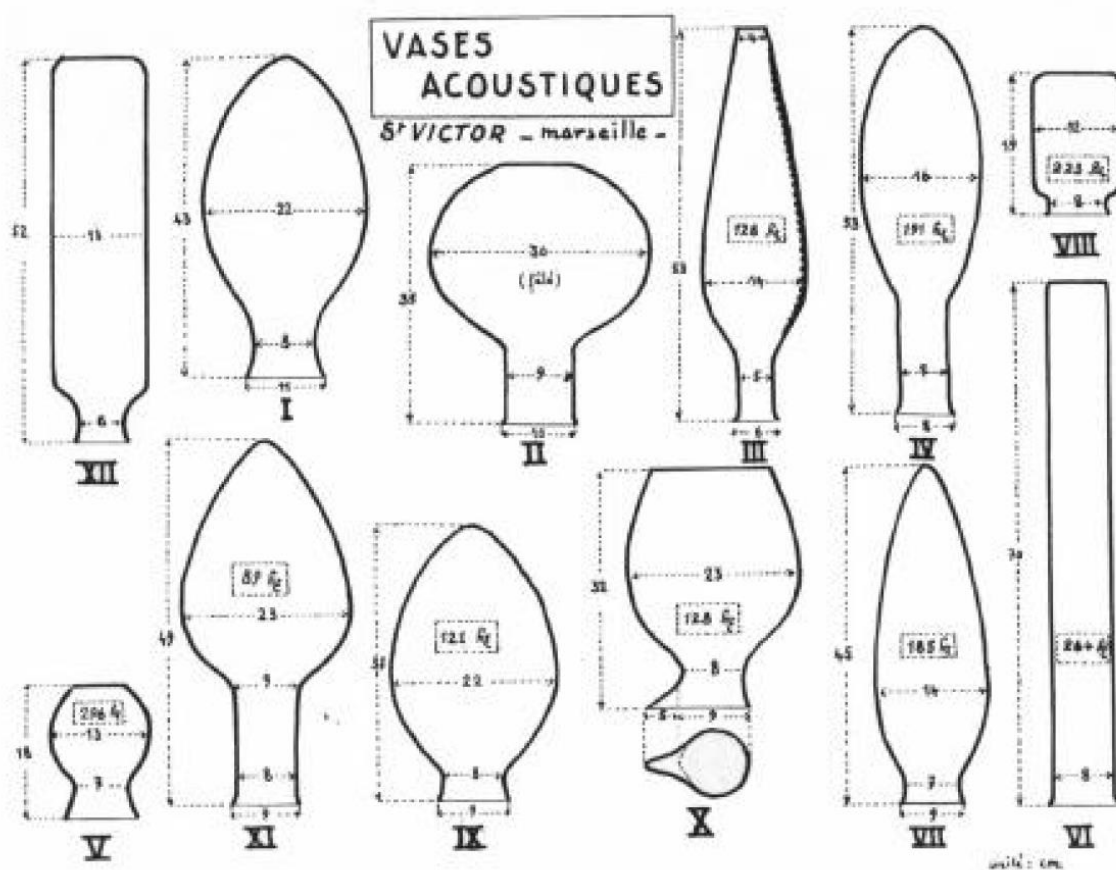


Fig. 3.5 – Vasos acústicos encontrados em St. Victor, Marselha [11].

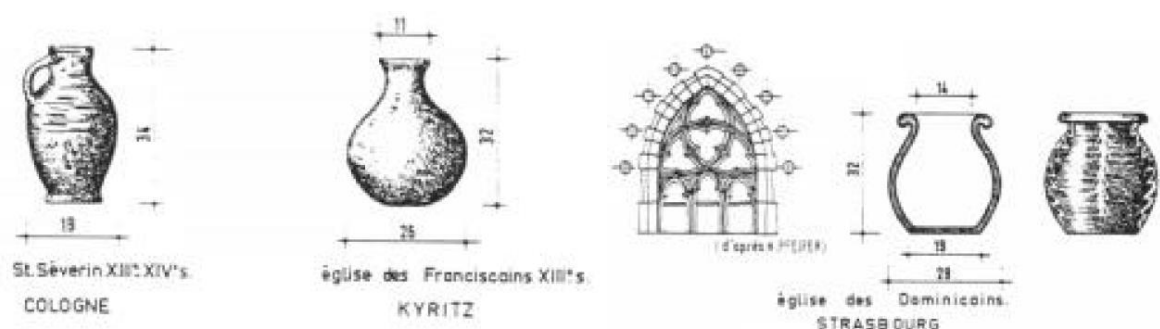


Fig. 3.6 – Vasos acústicos em Cologne, Kyritz e Strasbourg [11].

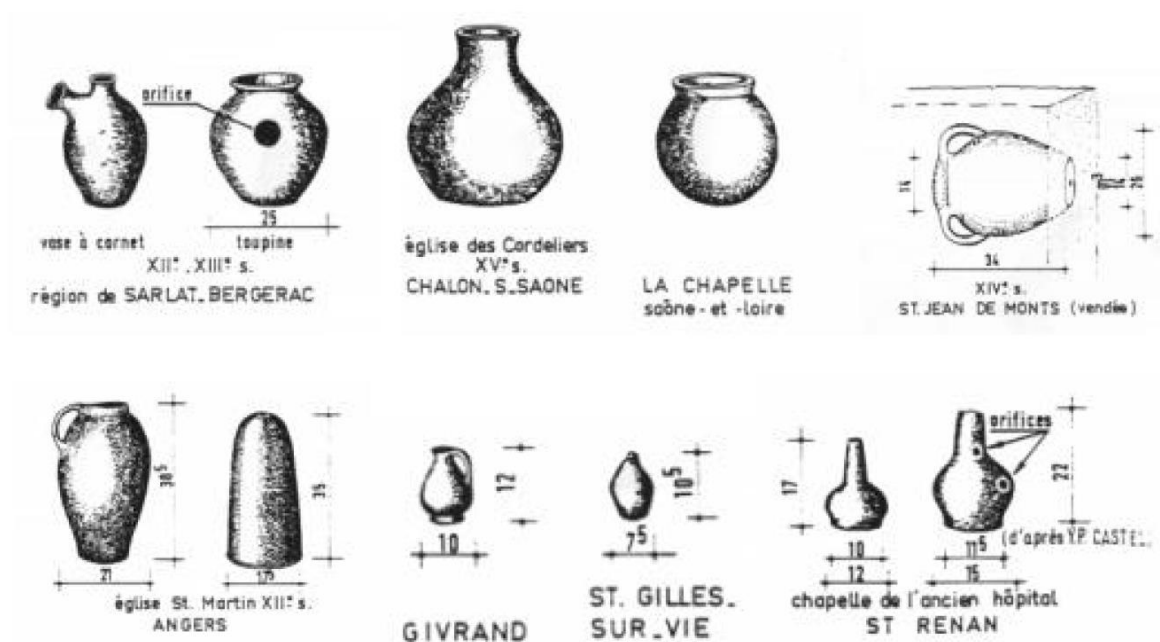


Fig. 3.7 – Vasos acústicos de diversas igrejas [11].

No estudo apresentado por Zakinthinos e Skarlatos [1], afirma-se que em relação à forma dos vasos, nas antigas igrejas bizantinas gregas e num total de 1057 ressonadores encontrados, 94% são vasos de formas diferentes e 2% são ressonadores de quarto de onda.

3.3.2. DISPOSIÇÃO DOS VASOS ACÚSTICOS

Apesar de não existirem provas que comprovem a existência de uma metodologia utilizada pelos arquitetos da Idade Média na localização de implantação dos vasos nos edifícios, verificam-se algumas tendências, como o facto de se encontrarem mais frequentemente em partes específicas da igreja como na direção do coro, de frente para o público e sobre a tribuna [11].

Os vasos acústicos encontram-se, tipicamente, embutidos nas paredes, junto do altar e coro das igrejas (nas abóbadas ou junto dos cantos superiores das paredes), perto dos cantos ou perto das janelas (Figura

3.8). Estão embutidos de tal forma que o orifício é visível e direcionado para o espaço interior, colocado no plano da parede e muitas vezes integrado na decoração do local [14].

Por norma, uma igreja grande possui um maior número de vasos acústicos, mas ainda não se encontrou uma proporcionalidade de ajuste satisfatório que o represente [11].

É possível que a sua colocação tenha ocorrido após a construção da igreja [11].

É importante referir que, em alguns casos, os vasos não são hoje visíveis porque estão cobertos com argamassa decorada com pinturas [1].

Apesar de pouco frequente, foram construídas cavidades sem vasos acústicos, por vezes cobertas com ladrilhos e aberturas decorativas; ou então, foram utilizados ressonadores de um quarto de comprimento de onda (em formato cilíndrico com paredes maciças, fechados de um lado) ou até mesmo uma combinação de vasos e cavidades [1].



Fig. 3.8 – Dois dos vasos acústicos da igreja de Villetle, Suíça (apontados com duas setas) [11].

3.3.3. OUTRAS FUNÇÕES DE VASOS E ABERTURAS

Nem todas as aberturas observadas nas paredes das igrejas são vasos acústicos. Estes podem estar relacionados com a ventilação, luzes de fixação, passagem de cordas para os sinos ou para suporte de objetos, entre outros [11].

Os vasos cerâmicos encontrados nas igrejas da Idade Média poderiam ter vários propósitos, como, por exemplo, para aligeirar as abóbadas ou para absorver a humidade, quando se encontravam totalmente embutidos na alvenaria (uma técnica com origens Romanas e sem impacto na acústica) [11]. Para além destas formulações, propuseram-se muitas outras hipóteses, como por exemplo [11]:

- Vasos perfurados usados para evitar o atrito das cordas do sino;
- Juntas de expansão;
- Sistemas de suspensão;
- Vasos do sistema de aquecimento.

Apesar de existirem poucos textos históricos que mencionem os vasos acústicos, a sua função em nada se equipara ao que acima se apresentou e, sim, parece convergir para a melhoria acústica e para amplificar as músicas e o sermão [11]. Há, no entanto, ainda muita controvérsia sobre a sua real eficácia.

3.4. LOCAIS DE CULTO COM VASOS ACÚSTICOS

Os vasos acústicos encontram-se dispersos por vários locais na Europa, com especial incidência na Normandia, na região do baixo Reno e no centro da Suíça (Figura 3.9) [11].

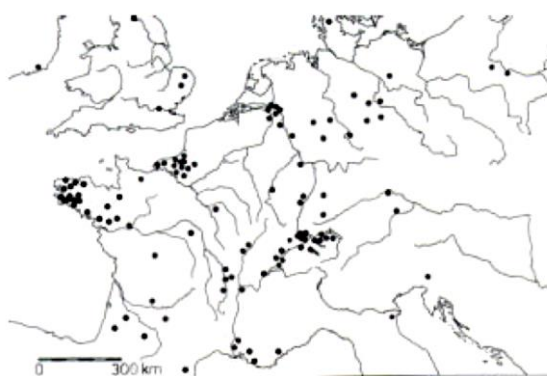


Fig. 3.9 – Mapa parcial da Europa, com a localização de alguns dos vasos acústicos [11].

Na Suíça existem cerca de 21 monumentos com vasos acústicos. As igrejas de Emmerich e de Burgenfelden, por exemplo, são das mais antigas com estes embutidos nas paredes. A igreja de Lucerna, construída em meados do séc. XVII, é um dos exemplos mais recentes. Em Vaud faz-se referência a quatro igrejas com vasos acústicos, cuja construção data o mesmo período (entre os séculos XIII e XIV): igrejas de Syens, de Grandson, de Villette e de Granges-près-Marnand [11].

Suíça

Igreja de Syens

A igreja de Syens foi parcialmente construída no séc. XIII e depois concluída apenas em 1787. Na parte mais antiga existem três vasos acústicos a norte e um a sul; foram descobertos cinco vasos em 1897 durante a restauração da igreja, mas alguns foram tapados e outros, retirados da alvenaria, desapareceram (Figura 3.10) [11].

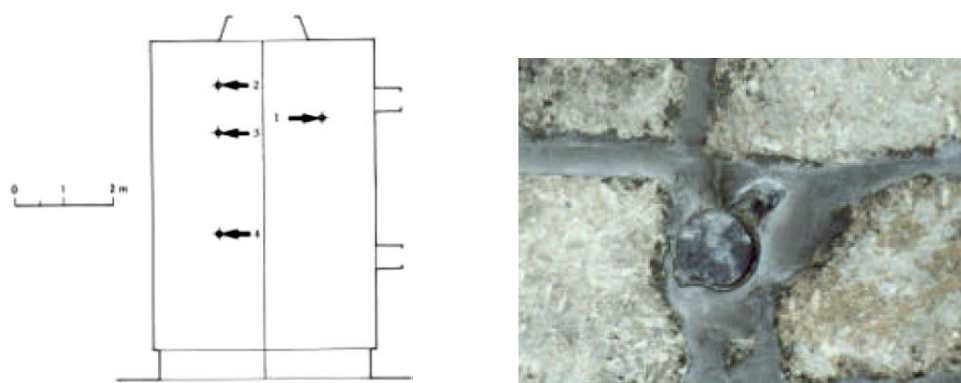


Fig. 3.10 – Planta da zona mais antiga da igreja de Syens, com a orientação e localização dos vasos acústicos (à esquerda); um dos vasos acústicos existentes na abóbada da igreja de Syens (à direita) [11].

Os estudos efetuados por Loerincik [11] foram bastante exaustivos em relação aos vasos acústicos mais antigos encontrados em Syens. De seguida, apresentam-se os modelos (Figuras 3.11 a 3.14) e dados obtidos no seu trabalho.

Vaso n.º 1:

- Gargalo: aberto;
- Cavidade: esférica;
- Volume (V): $0,00189 \text{ m}^3$;
- Superfície interior (S): $0,00503 \text{ m}^2$;
- Largura (L): $0,06 \text{ m}$;
- Altura (h): $0,192 \text{ m}$.

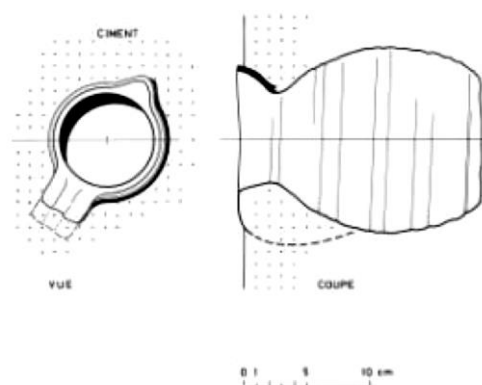


Fig. 3.11 – Vaso n.º 1 da igreja de Syens [11].

Vaso n.º 2:

- Gargalo: curto;
- Cavidade: esférica;
- Volume (V): $0,00288 \text{ m}^3$;
- Superfície interior (S): $0,00595 \text{ m}^2$;
- Largura (L): $0,015 \text{ m}$;
- Altura (h): $0,178 \text{ m}$.

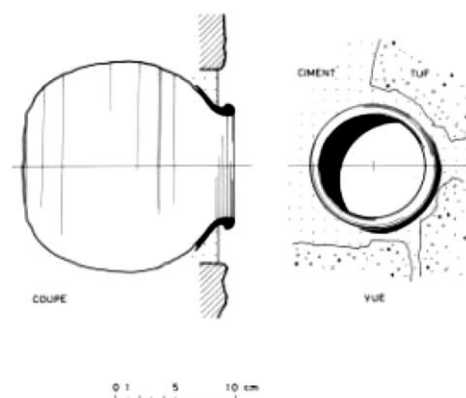


Fig. 3.12 – Vaso n.º 2 da igreja de Syens [11].

Vaso n.º 3:

- Gargalo: reto;
- Cavidade: esférica;
- Volume (V): $0,0021 \text{ m}^3$;
- Superfície interior (S): $0,00833 \text{ m}^2$;
- Largura (L): $0,033 \text{ m}$;
- Altura (h): $0,144 \text{ m}$.

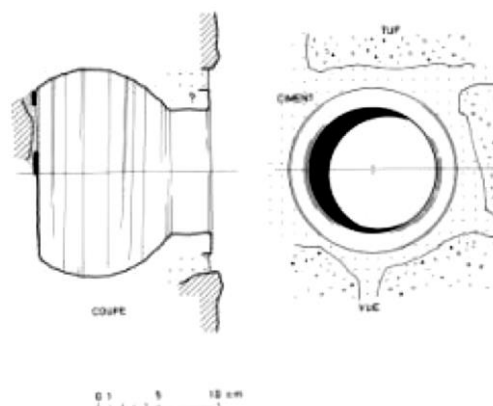


Fig. 3.13 – Vaso n.º 3 da igreja de Syens [11].

Vaso n.º 4:

- Gargalo: aberto;
- Cavidade: esférica;
- Volume (V): $0,0016 \text{ m}^3$;
- Superfície interior (S): $0,0095 \text{ m}^2$;
- Largura (L): $0,038 \text{ m}$;
- Altura (h): $0,144 \text{ m}$.

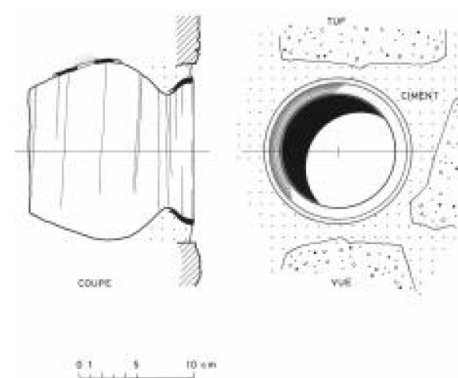


Fig. 3.14 – Vaso n.º 4 da igreja de Syens [11].

Igreja de Grandson

A igreja paroquial de Saint-Jean de Grandson foi construída em várias etapas, do século XI ao XIV. Neste local existem 27 vasos acústicos de barro vermelho, não envernizados, alguns dos quais aparentemente originais e outros podem ter sido colocados posteriormente na alvenaria mais antiga da nave (Figura 3.15) [11].

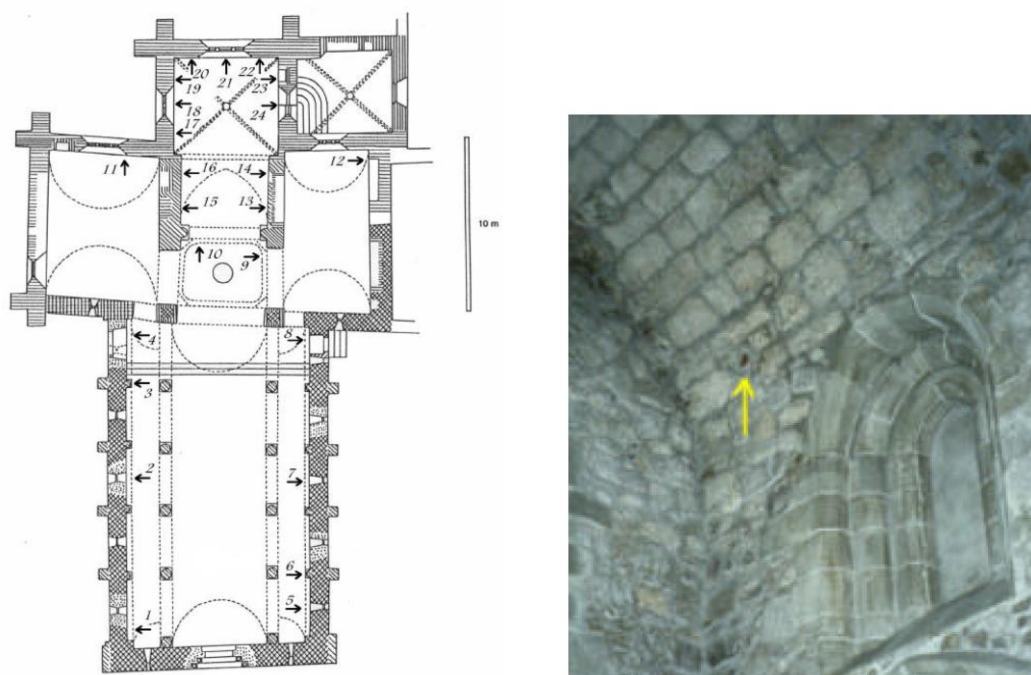


Fig. 3.15 – Planta da igreja de Grandson (Suíça) onde se identifica a localização de 24 vasos acústicos localizados até à data (à esquerda); um dos vasos embutido na abóbada da igreja de Grandson, apontado com uma seta (à direita) [11].

Dos 24 vasos encontrados na igreja de Grandson, Loerincik [11] apresentou os modelos e dados obtidos no seu trabalho para os vasos n.ºs 6, 13 e 20, que se descrevem de seguida (Figuras 3.16 a 3.18).

Vaso n.º 6:

- Gargalo: reto;
- Cavidade: esférica;
- Volume (V): $0,00264 \text{ m}^3$;
- Superfície interior (S): $0,00554 \text{ m}^2$;
- Largura (L): $0,022 \text{ m}$;
- Altura (h): $0,15 \text{ m}$.

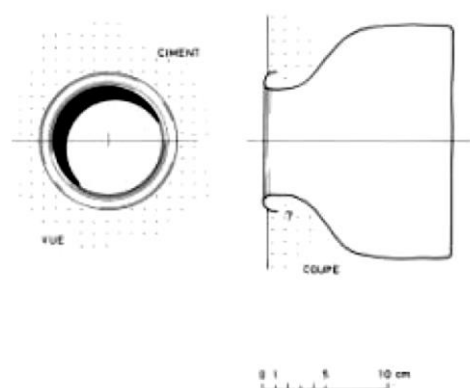


Fig. 3.16 – Vaso n.º 6 da igreja de Grandson [11].

Vaso n.º 13:

- Gargalo: aberto;
- Caverna: padrão/*standard*;
- Volume (V): 0,00156 m³;
- Superfície interior (S): 0,00478 m²;
- Largura (L): 0,028 m;
- Altura (h): 0,16 m.

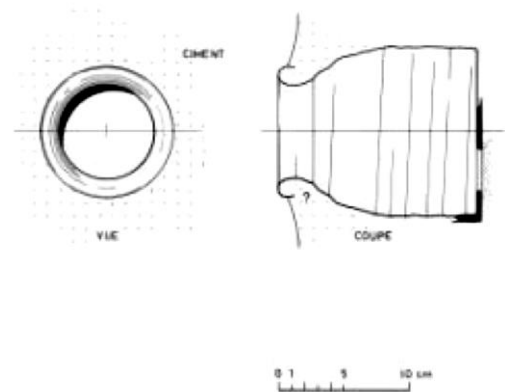


Fig. 3.17 – Vaso n.º 13 da igreja de Grandson [11].

Vaso n.º 20:

- Gargalo: reto;
- Caverna: esférica;
- Volume (V): 0,00203 m³;
- Superfície interior (S): 0,00467 m²;
- Largura (L): 0,022 m;
- Altura (h): 0,148 m.

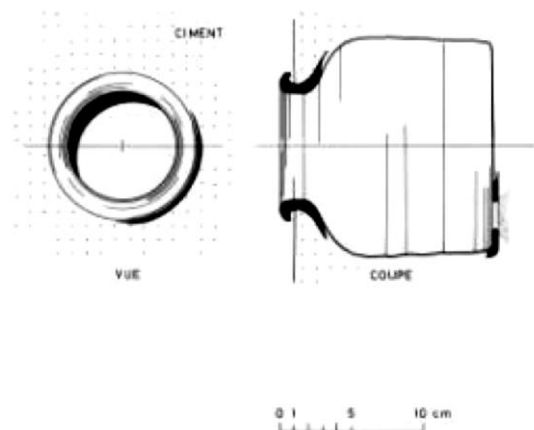


Fig. 3.18 – Vaso n.º 20 da igreja de Grandson [11].

Igreja de Villette

A igreja de Villette data de meados dos séculos XIII-XIV e os cinco vasos acústicos aí existentes foram descobertos durante uma restauração em 1927 (um deles foi retirado e encontra-se no Museu Cantonal de História e Arqueologia) (Figura 3.19) [11].

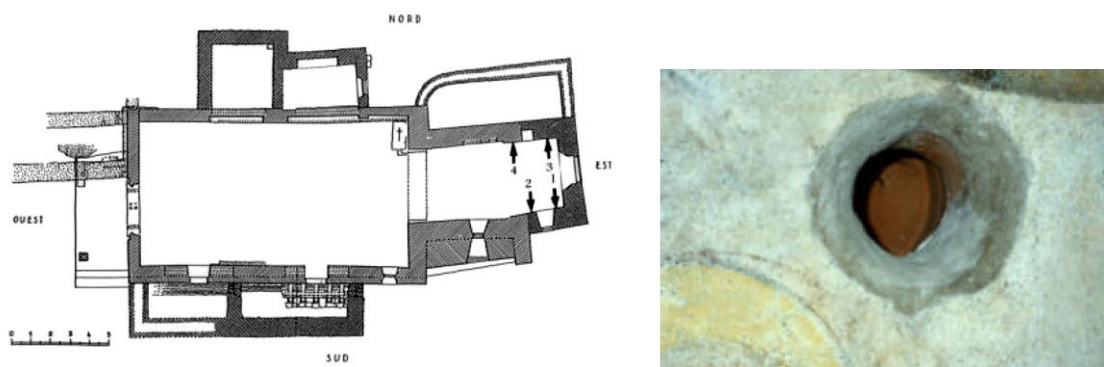


Fig. 3.19 – Planta da igreja de Villette (Suíça) onde se identifica a localização de quatro vasos acústicos (à esquerda); um dos vasos embutido da igreja de Villette (à direita) [11].

Loerincik [11] apresentou os modelos e dados obtidos no seu trabalho para os quatro vasos da igreja de Villette, que se descrevem de seguida (Figuras 3.20 a 3.23).

Vaso n.º 1:

- Gargalo: aberto;
- Cavidade: cilíndrica;
- Volume (V): $0,00233 \text{ m}^3$;
- Superfície interior (S): $0,00636 \text{ m}^2$;
- Largura (L): $0,048 \text{ m}$;
- Altura (h): $0,24 \text{ m}$.

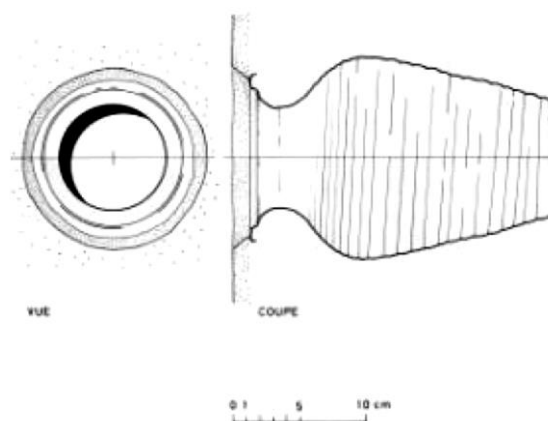


Fig. 3.20 – Vaso n.º 1 da igreja de Villette [11].

Vaso n.º 2:

- Gargalo: aberto;
- Cavidade: cilíndrica;
- Volume (V): $0,00198 \text{ m}^3$;
- Superfície interior (S): $0,0065 \text{ m}^2$;
- Largura (L): $0,052 \text{ m}$;
- Altura (h): $0,226 \text{ m}$.

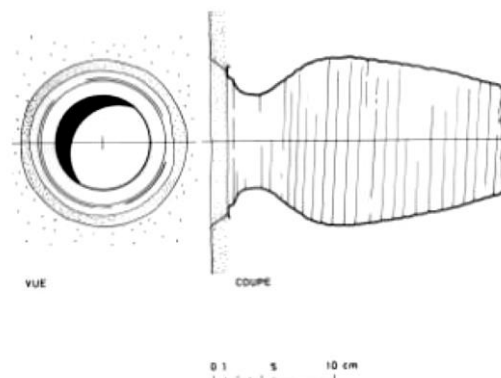


Fig. 3.21 – Vaso n.º 2 da igreja de Villette [11].

Vaso n.º 3:

- Gargalo: curto;
- Caverna: padrão/standard;
- Volume (V): 0,00633 m³;
- Superfície interior (S): 0,00385 m²;
- Largura (L): 0 m;
- Altura (h): 0,272 m.

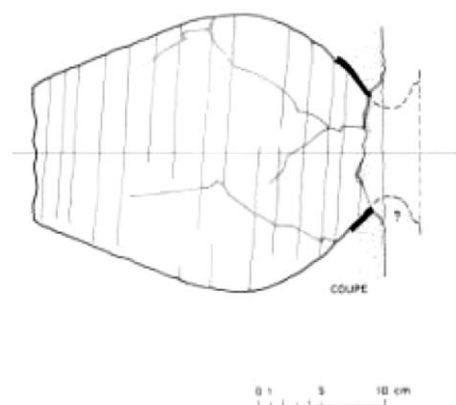


Fig. 3.22 – Vaso n.º 3 da igreja de Villette [11].

Vaso n.º 4:

- Gargalo: reto;
- Caverna: cilíndrica;
- Volume (V): 0,00186 m³;
- Superfície interior (S): 0,00353 m²;
- Largura (L): 0,045 m;
- Altura (h): 0,256 m.

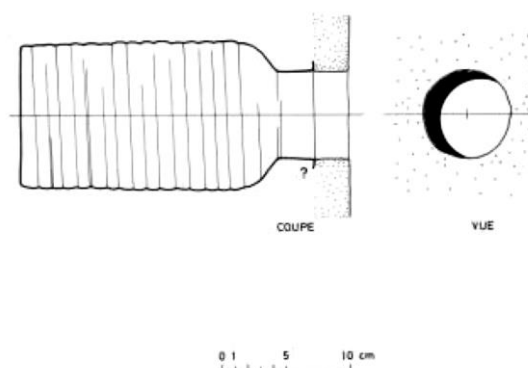


Fig. 3.23 – Vaso n.º 4 da igreja de Villette [11].

Igreja de Granges-près-Marnand

A nave da igreja de Granges-près-Marnand é do estilo arquitetónico românico, do século XII, e o restante do estilo gótico, do século XIV. Existem sete vasos do século XIV embutidos na alvenaria original de paredes verticais (e também um oitavo buraco que não tem fins acústicos) (Figuras 3.24 e 3.25) [11].

Loerincik [11] apresentou, no seu trabalho, as plantas e alçados da igreja com a localização dos vasos acústicos e os modelos e dados obtidos da sua investigação para um dos vasos da igreja de Granges-près-Marnand, que se descrevem de seguida (Figura 3.26).



Fig. 3.24 – Alguns dos vasos acústicos de uma das paredes da igreja de Granges-près-Marnand (Suíça) [11].

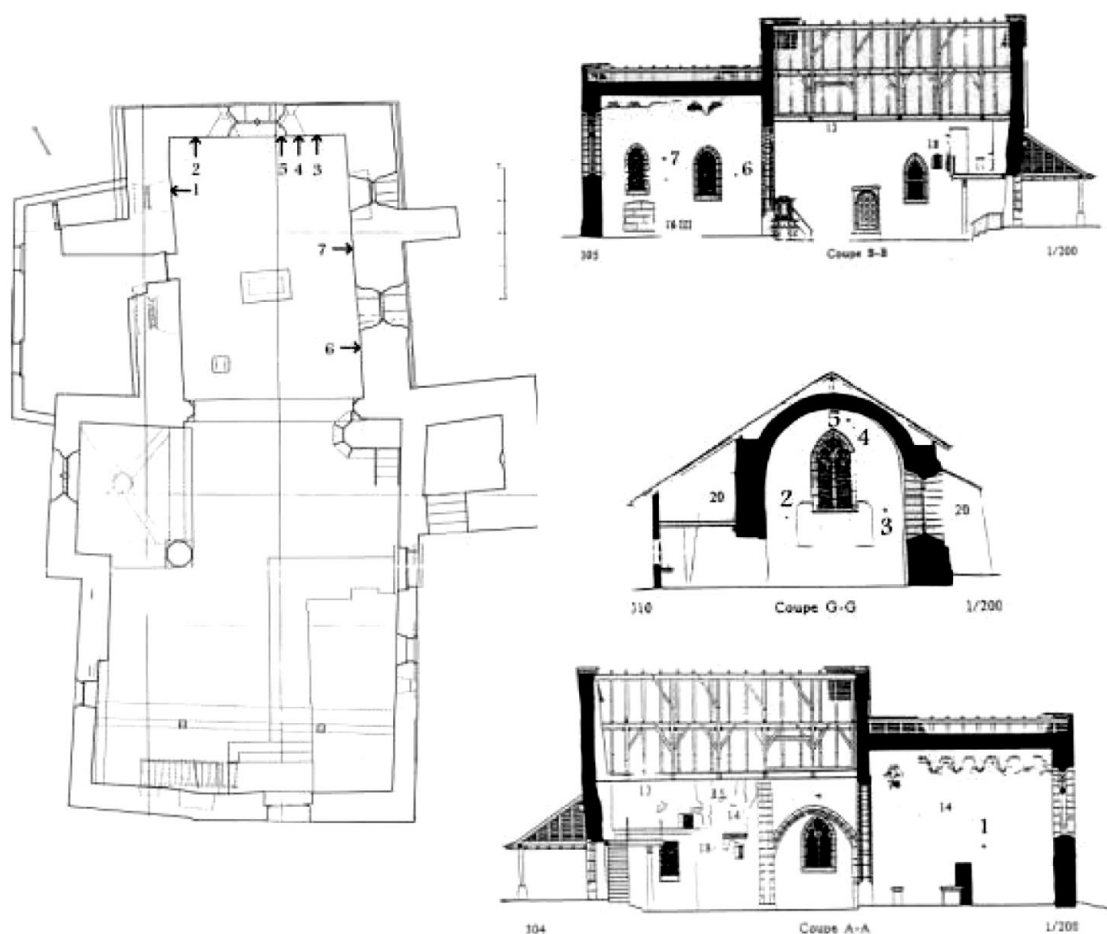


Fig. 3.25 – Alçados (cortes) e planta da igreja de Granges-près-Marnand (Suíça), com indicação da localização dos vasos acústicos [11].

Vaso n.º 6:

- Gargalo: reto;
- Cavidade: cilíndrica;
- Volume (V): $0,00147 \text{ m}^3$;
- Superfície interior (S): $0,00503 \text{ m}^2$;
- Largura (L): $0,068 \text{ m}$;
- Altura (h): $0,266 \text{ m}$.

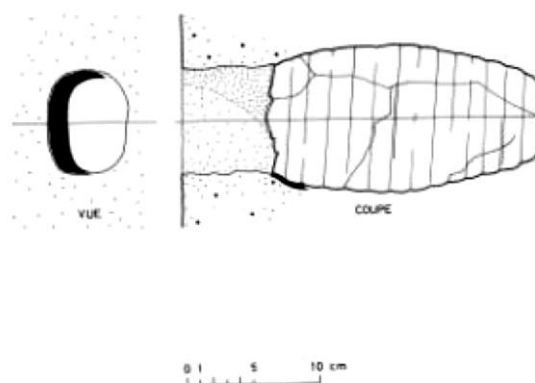


Fig. 3.26 – Vaso n.º 6 da igreja de Granges-près-Marnand [11].

3.5. ENSAIOS ACÚSTICOS REALIZADOS COM BILHAS ACÚSTICAS

3.5.1. ECHEA, OU VASOS ACÚSTICOS, COMO RESSOADORES DE HELMHOLTZ

Como já foi referido anteriormente, os *echea* ou vasos acústicos são atualmente denominados de ressonadores de Helmholtz (Figura 3.27).



Fig. 3.27 – Modelo de um ressonador de Helmholtz [11].

De uma forma simplificada, a ação de um ressonador é, primariamente, caracterizada pela transmissão de “ondas de retorno” em fase de oposição em relação à onda incidente. Se existirem condições transitórias, quando o sinal de excitação termina, ocorre uma mudança repentina de fase e gera-se uma onda reemitida de grande amplitude, gerando um “contra ruído” na frequência de ressonância ou em frequências que sejam 8 a 20 vezes a da frequência de ressonância fundamental (com envolvimento dos modos próprios de ressonância da cavidade ou do gargalo). A geometria do ressonador e a sua posição em relação ao espaço do local condicionam a amplitude e o decaimento [11].

O efeito dos ressonadores depende dos valores dos tempos de reverberação do ressonador e da sala: se o tempo de reverberação do ressonador for maior que o da sala, ocorre uma amplificação natural do som com uma excelente percepção dos transitórios; caso contrário, o acoplamento da sala e os vasos diminuem o *EDT* (*Early Decay Time* ou Tempo de Decaimento Curto, similar a um *TR* com um decaimento de 10 dB) da sala, o que permite uma boa inteligibilidade e possibilita um tempo de reverberação com duas inclinações [11].

Por outro lado, verifica-se que quando incorporados na abóbada, os ressonadores ajudam a atenuar ou a compensar os efeitos de focalização produzidos, com difração da energia acústica, por interferência da onda reemitida [11].

Estes efeitos de melhoria acústica verificam-se em ressonadores de Helmholtz produzidos especificamente para o local, ou seja, feitos por medida de acordo com as características, uso e condicionantes do local. Os vasos acústicos que foram incorporados nos locais de culto e em antigos teatros romanos, por exemplo, foram possivelmente modelados para outros fins (com uso empírico, por cópia de utilização em outros locais e com utilização de vasos destinados a outros propósitos com formas e tamanhos diversos, muito possivelmente sem qualquer fundamento científico) o que pode ter influenciado a sua eficácia. Os vasos acústicos são um tipo especial de ressonador, nos quais a forma da jarra não é perfeitamente esférica e o seu gargalo, por norma, não é estritamente reto, nem é bem definido [11].

3.5.2. ESTUDOS CIENTÍFICOS REALIZADOS EM VASOS ACÚSTICOS

3.5.2.1. Tese de René Floriot

O padre R. Floriot desenvolveu um método de medição (de teoria e técnicas pouco desenvolvidas em relação às do final do século XX) que consiste em estudar o campo sonoro de uma sala com vasos acústicos, que podem ser interligados e abertos durante a mesma medição. Os ensaios implicavam a medição do nível sonoro em diferentes locais, com variação de determinados parâmetros: abrir ou fechar os vasos, diferentes posições do microfone e do alto-falante, com análise de sons puros, sons complexos e palavra, salas com diferentes características acústicas, em várias igrejas e em modelos construídos [11].

Destes estudos, podem-se resumir os seguintes pontos importantes [11]:

- Conclusões das medições laboratoriais:
 - › Na frequência de ressonância, os vasos acústicos criam uma amplificação de alguns decibéis, em locais circundantes (até 1 a 2 m);
 - › Em locais mais afastados ocorre absorção sonora;
 - › Se o campo sonoro for produzido por um som complexo, o efeito é menor, mas permanece qualitativamente dentro dos limites anteriores;
 - › Se a frequência dos vasos acústicos for ajustada com as frequências naturais da sala, nota-se uma regularização, ou seja, uma atenuação de irregularidades repentinas (picos) da onda após a extinção do som;
 - › Os sons transitórios (percussão, final da transmissão) são, em geral, muito mais regularizados que os sons permanentes.
- Conclusões das medições *in situ*:
 - › A regularização do sinal é certa;
 - › Os vasos acústicos medievais podem desempenhar uma dupla função: absorver ecos e reduzir o tempo de reverberação;
 - › Os locais com efeito cúpula (enorme reverberação numa ampla banda de frequências) alteram as suas propriedades acústicas na presença de vasos com características bem definidas.
- Em suma, os principais resultados são:
 - › Quando o local é mais reverberante que os vasos, a sua utilização tem um efeito duplo: amplificação numa área próxima e absorção numa área distante;
 - › Supressão de ecos da sala;
 - › O campo sonoro dos sons transitórios é regularizado;
 - › O arranjo dos vasos, uns em relação aos outros, parece influenciar no efeito geral, com interferências, principalmente se os vasos estiverem próximos uns dos outros;

Em modo de conclusão, os ensaios de Floriot comprovaram que o uso de vasos de cerâmica melhorou a qualidade do som dos edifícios (apesar de os achados apontarem para que os construtores medievais das igrejas românicas às vezes chegavam a um conhecimento puramente experimental de certas leis da acústica) [11].

3.5.2.2. Tese de J. M. Fontaine

Fontaine dedica grande parte do seu trabalho ao desenvolvimento da teoria dos ressonadores e, apesar de não ter apresentado muitos elementos novos em relação a Floriot e com experiências práticas menos significativas, foram obtidas várias conclusões quando realizou estudos com o tubo de Kundt em modelos em escala de vasos acústicos [11].

Os principais resultados foram [11]:

- Boa correlação entre teoria e medidas práticas para a frequência de ressonância;
- Valores importantes do fator de qualidade;
- Influência praticamente inexistente do estado da superfície do gargalo (envernizado ou não) na taxa de absorção sonora;
- Modificação do tempo de reverberação, às vezes marcada para uma grande variedade de espectros;
- Baixos valores da resistência sonora total do sistema, o que implica possibilidades de absorção muito limitadas;
- Fontaine não observa a "suavização" ou regularização da curva dos sons transitórios mencionada por Floriot.

3.5.2.3. Experiência de Rschevkin

Rschevkin realizou ensaios que pretendiam estudar o efeito de garrafas de leite, colocadas numa sala com um tempo de reverberação curto e conseguiu destacar um aumento considerável no tempo de reverberação na frequência ressonante das garrafas [11].

Numa sala com um tempo de reverberação longo, as garrafas aí distribuídas provocam uma absorção sonora alta e muito seletiva em torno da frequência de ressonância, ou seja, uma diminuição no tempo de reverberação em torno da frequência de ressonância (Figura 3.28) [11].

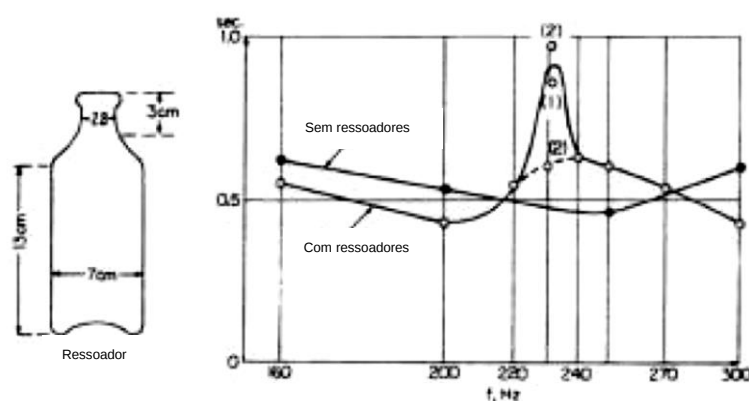


Fig. 3.28 – Resultados obtidos por Rschevkin, com e sem a colocação de garrafas numa sala com um tempo de reverberação curto [11].

3.5.2.4. - Ensaios acústicos na igreja de Villette

A igreja de Villette (Suíça) dos séc. XIII e XIV, tem um volume aproximado de 830 m³ e contém quatro vasos acústicos integrados na alvenaria original com um mural do séc. XV (um outro foi retirado e recuperado e encontra-se num museu). Na parede orientada a norte (a 3,8 m de altura) existem dois vasos de barro vermelho, com verniz castanho amarelado e na parede orientada a sul existem os outros dois vasos, do mesmo material e colocadas à mesma altura (Figura 3.29) [15].

Os ensaios acústicos realizados por Desarnaulds *et al.* [15], na igreja de Villette, incluíram a medição de diversos parâmetros acústicos, como o nível sonoro, C_{50} , STI e tempo de reverberação. As medições em sistema *MLSSA* foram realizadas a 1,5 m de altura (exceto a posição 1, que estava a 4 m de altura, ao nível dos vasos).

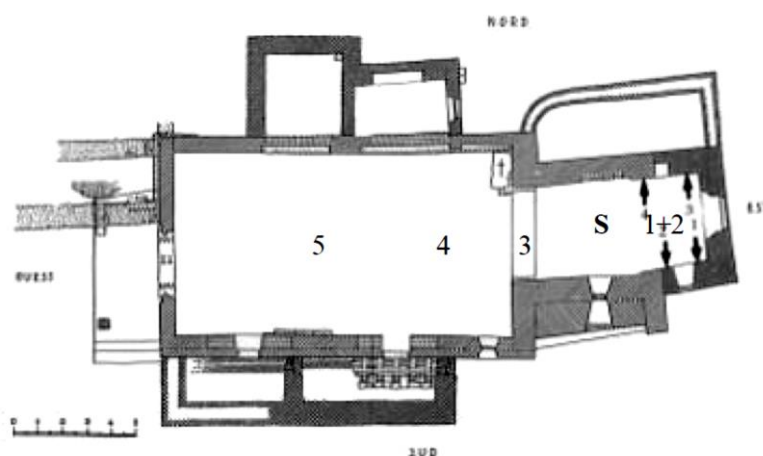


Fig. 3.29 – Planta da igreja de Villette, com a localização da fonte sonora (S), posições dos cinco recetores sonoros e dos quatro vasos acústicos [15].

Os resultados obtidos foram [15]:

- **Nível sonoro:** as medições *in situ* não apresentam diferenças significativas na intensidade do som, para a frequência de ressonância do vaso, a qualquer distância de medição (apesar de se verificar laboratorialmente um aumento de intensidade do som específico nesta frequência). Este resultado pode ser explicado pela seletividade na frequência dos vasos (apenas as frequências de ressonância dos vasos são amplificadas) e pelo dispositivo de medição de banda larga usado (emissão do sinal *MLS* e análise por 1/3 de oitava), onde seria necessária uma análise em banda fina, principalmente em torno da frequência fundamental do vaso, para destacar o fenómeno da amplificação localizada (Figura 3.30).

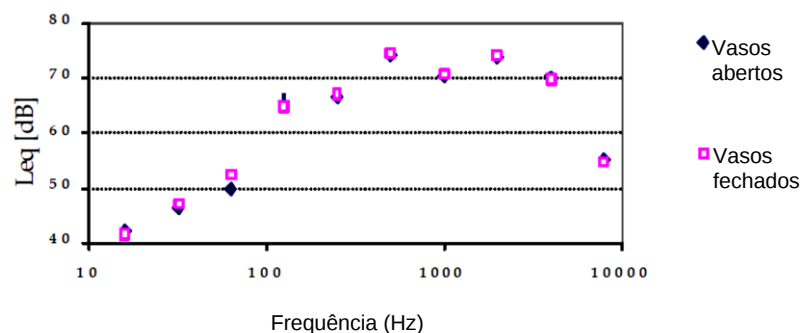


Fig. 3.30 – Resultados obtidos na medição do nível sonoro equivalente (L_{eq}) na igreja de Villette, com os vasos *abertos* e com os vasos *fechados*, a uma distância de 10 cm [15].

- **C_{50} :** os valores obtidos do C_{50} para as bandas de frequência de 250 e 500 Hz foram mais baixos para os vasos *abertos*, especialmente na posição 1. Nas outras posições do coro, registou-se uma diminuição menos acentuada. Na nave, pelo contrário, não se verificaram diferenças. A diminuição dos valores de C_{50} poderá ser explicada pela influência das fontes secundárias e dos difusores que os vasos desempenham. A introdução de fontes secundárias pode gerar um atraso na energia que chega ao microfone e diminuir o valor de C_{50} . No entanto, a redução deste parâmetro não provocou um melhoramento da inteligibilidade da palavra e, por assim, uma fraca redução nos valores do STI (Figura 3.31).

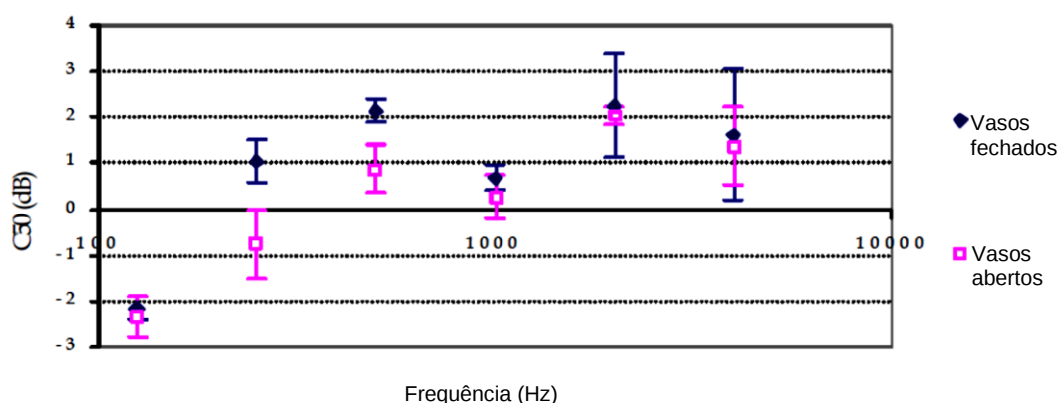


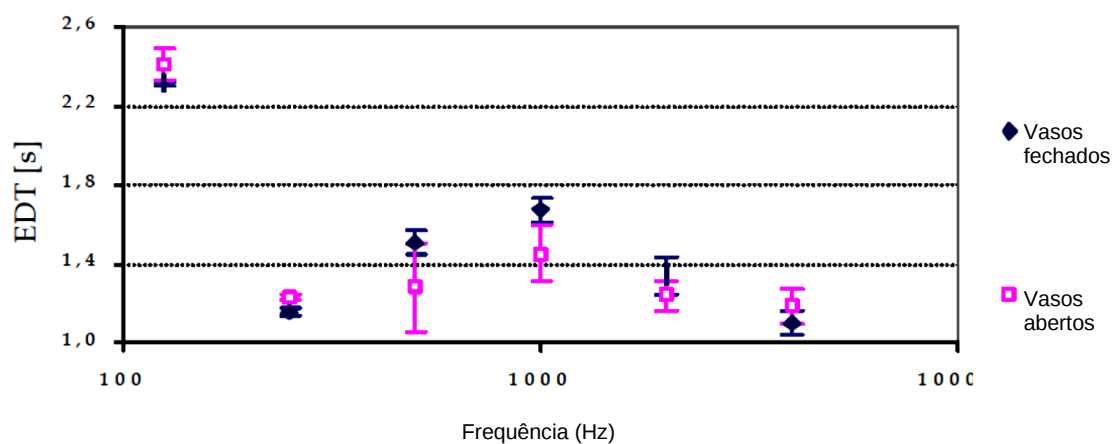
Fig. 3.31 – Resultados obtidos na medição do C_{50} , na posição 1, com os vasos acústicos *abertos* e *fechados*, na igreja de Villette [15].

- **STI (Speech Transmission Index):** registou-se uma diminuição muito fraca do STI com os vasos *abertos*, mais proeminente nas posições 1 e 5 do que nas restantes (variação incluída no domínio da incerteza) (Quadro 3.1).

Quadro 3.1 – Resultados da medição do *STI*, para vasos *fechados* e *abertos*, na igreja de Villette [15].

Posição	STI (vasos fechados)	$\pm$	STI (vasos Abertos)	$\pm$	Variação do STI (Abertos - Fechados)
1	0,56	0,03	0,54	0,01	-0,02
2	0,54	0,02	0,53	0,06	-0,01
3	0,46	0,01	0,45	0,02	-0,01
4	0,37	0,03	0,36	0,02	-0,01
5	0,35	0,00	0,32	0,04	-0,03
Média					-0,02
Desvio Padrão					0,01

- **Tempo de reverberação:** para os valores de *EDT* (Tempo de Decaimento Curto), as medições realizadas indicam que, para vasos *abertos*, dificilmente se observou uma redução na posição 2 nas faixas de frequências de 500 e 1000 Hz e está no limite da audibilidade, enquanto que nas outras posições esta redução quase não se verifica (talvez devido a um insuficiente número de vasos). Nas medições do *TR*₂₀ (tempo de reverberação com base no decaimento de 20 dB), não se verificou nenhum efeito. Relativamente ao efeito de regularização ou alisamento temporal do sinal transitório, observado por Floriot [11], também não se confirmou nestes ensaios (Figuras 3.32 e 3.33).

Fig. 3.32 – Resultados obtidos para o *EDT*, com vasos *fechados* e *abertos*, na posição 2 da igreja de Villette [15].

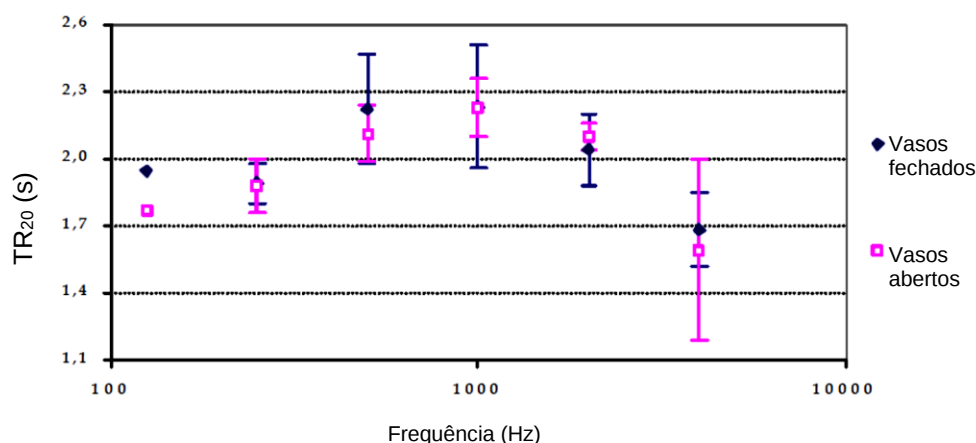


Fig. 3.33 – Resultados obtidos para o Tempo de Reverberação (TR_{20}), com vasos *fechados* e *abertos*, na posição 1 da igreja de Villette (Suíça) [15].

Também Loerincik [11] realizou ensaios acústicos na igreja de Villette, que incluíram a medição de diversos parâmetros acústicos, em sistema *MLSSA* que usa a sequência *MLS* (*Maximum Length Sequence*) e que permite a determinação do tempo de reverberação, *EDT*, *STI*, *C₅₀*, etc. Para os ensaios utilizou dois gravadores *DAT* e um microfone, com tratamento de dados e sua análise em laboratório. Os vasos acústicos foram tapados com rolhas de cortiça. As medições em sistema *MLSSA* também foram realizadas a 1,5 m de altura (exceto a posição 1, que estava a 4 m de altura, ao nível dos vasos) e a localização da fonte sonora e recetores foram os mesmo que o apresentado por Desarnaulds *et al.*, [15]. Os resultados obtidos foram [11]:

- **Frequência de ressonância:** a medição *MLSSA* não permitiu a determinação precisa da frequência de ressonância, quando se colocou o microfone próximo ou dentro do vaso acústico. Em alguns casos, o segundo modo foi muito mais fácil de determinar e, por isso, foi utilizado para determinar o valor da frequência de ressonância (assumindo-se que a relação entre o modo fundamental e o primeiro harmónico é a mesma que a determinada em laboratório) (Quadro 3.2).

Quadro 3.2 – Resultados obtidos para as medições da frequência de ressonância e comparação dos valores medidos com os calculados com a fórmula clássica, na igreja de Villette (Suíça) [11].

Vaso	Gargalo	Cavidade	Freq. Ressonância medida (Hz)	±	Freq. Ressonância (form. clássica) (Hz)	±	Diferença (Hz)	Diferença (%)
1	aberto	standard	268	10	258	20	-10	-4
2	aberto	cilíndrica	261	10	275	21	14	5
3	curto	standard	207	10	177	15	-30	-17
4	reto	cilíndrica	253	10	237	18	-16	-7
Média							-10	-6
Desvio Padrão							18	9

Loerincik [11] chegou à conclusão de que o método usado para a medição da ressonância não foi muito eficiente pois não conseguiu verificar os valores teóricos calculados visto que as medidas práticas não deram bons resultados (a má condição de alguns vasos poderia justificar a dificuldade da medição).

Ponderou o uso de um método alternativo, com medição das frequências ressonantes no laboratório, ou seja, colocar um pequeno microfone no fundo de um vaso e estimulá-lo com som puro.

A caracterização teórica dos vasos foi conseguida através da obtenção da secção transversal de absorção (A), do fator de qualidade (Q) e do tempo de reverberação (T_r) para cada vaso (Quadro 3.3).

Quadro 3.3 – Características dos vasos acústicos da igreja de Villette (Suíça) [11].

Vaso	Gargalo	Cavidade	$A \text{ (m}^2\text{)}$	$\pm$	Q	$\pm$	$T_r \text{ (s)}$	$\pm$
1	aberto	standard	0,080	0,001	3,7	1,0	0,20	0,01
2	aberto	cilíndrica	0,066	0,001	3,6	1,0	0,18	0,01
3	curto	standard	0,281	0,003	4,0	2,8	0,31	0,04
4	reto	cilíndrica	0,176	0,002	5,5	2,3	0,32	0,02

A análise destes valores permitiu afirmar que os valores do fator de qualidade e do tempo de reverberação foram semelhantes aos calculados para vasos utilizados em laboratório e que a secção de absorção efetiva foi maior.

- **Nível sonoro:** as medições *in situ* do nível sonoro, em vasos *abertos* e *fechados*, foram feitas a diferentes distâncias (entre 10 e 70 cm) da posição 2 (Figura 3.34).

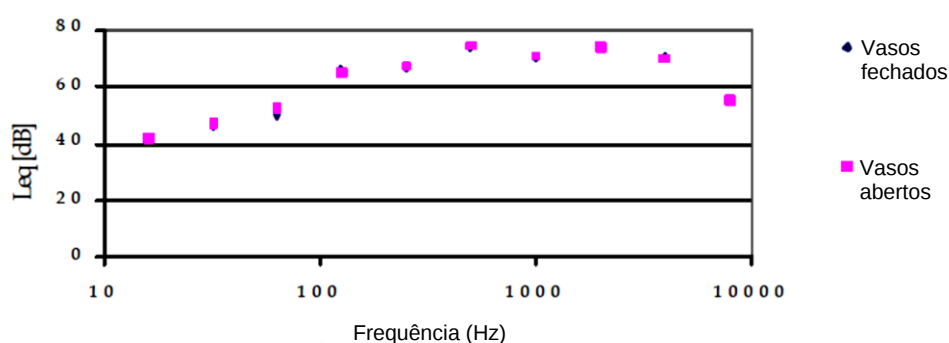


Fig. 3.34 – Resultados obtidos para a diferença de nível (L_{eq}), em vasos *fechados* e *abertos*, a uma distância de 10 cm, na igreja de Villette (Suíça) [11].

Foi deduzido que não existia nenhuma diferença significativa, em nenhuma das distâncias de medição. No laboratório, o aumento da intensidade poderia ter sido demonstrado para a frequência de ressonância do vaso. Como o vaso foi seletivo e as demais frequências não foram amplificadas, não se registou nenhuma diferença entre as leituras comparativas de vasos *abertos* e *fechados*.

- C_{50} : Os resultados aprontaram para um fraco efeito dos vasos, pois os valores do parâmetro C_{50} para os filtros de 250 e 500 Hz são mais baixos quando os vasos estão *abertos* (Figura 3.35).

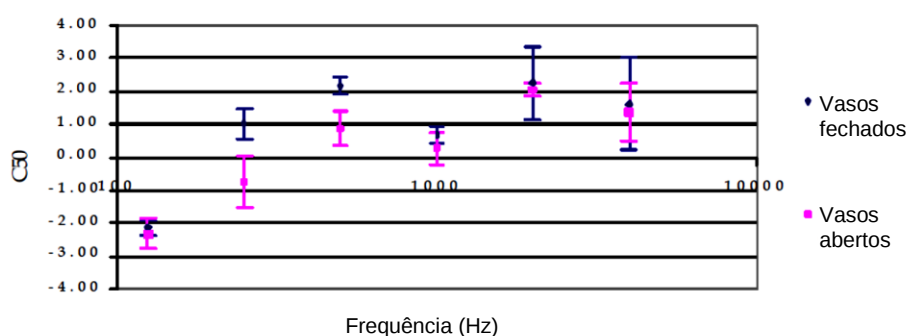


Fig. 3.35 – Resultados obtidos para o coeficiente C_{50} , em vasos *fechados* e *abertos*, na posição 1, na igreja de Villette (Suíça) [11].

Os resultados apresentados na Figura 3.35 foram realizados no coro da igreja (posição 1), mas nas outras posições do coro observou-se uma diminuição ligeiramente menos acentuada. Esta diminuição não apontou para uma melhoria na inteligibilidade. Na nave, por outro lado, não se destacou nenhuma diferença. A redução do parâmetro C_{50} foi explicada pelo papel de fontes secundárias e difusores desempenhados pelos vasos (a introdução de fontes secundárias tende a gerar um atraso na energia que chega ao microfone e reduz a magnitude C_{50}).

- **STI:** a medição *MLSSA* permitiu o cálculo dos valores de *STI* e *RASTI* (possível e exatável redução, visto que se verificou uma diminuição do C_{50}) (Quadros 3.4 e 3.5).

Quadro 3.4 – Resultados obtidos para *STI* e variações entre vasos *fechados* e *abertos*, na igreja de Villette (Suíça) [11].

Posição	STI (vasos fechados)	±	STI (vasos Abertos)	±	Variação do STI (Abertos - Fechados)
1	0,56	0,032	0,54	0,014	-0,02
2	0,54	0,018	0,53	0,056	-0,01
3	0,46	0,013	0,45	0,021	-0,01
4	0,37	0,028	0,36	0,020	-0,01
5	0,35	0,004	0,32	0,038	-0,03
Média					-0,02
Desvio Padrão					0,01

Quadro 3.5 – Resultados obtidos para *RASTI* e variações entre vasos *fechados* e *abertos*, na igreja de Villette (Suíça) [11].

Posição	RASTI (vasos fechados)	±	RASTI (vasos Abertos)	±	Variação do RASTI (Abertos - Fechados)
1	0,59	0,028	0,56	0,009	-0,03
2	0,55	0,011	0,56	0,040	0,01
3	0,47	0,013	0,46	0,013	-0,01
4	0,37	0,020	0,35	0,011	-0,02
5	0,33	0,012	0,31	0,017	-0,02
Média					-0,01
Desvio Padrão					0,02

Observou-se uma pequena diminuição dos dois parâmetros quando os vasos estão abertos, sendo mais significativa no coro.

- **Tempo de reverberação:** as medições do EDT e do TR_{20} não mostraram nenhuma diferença entre vasos *abertos* e *fechados*, possivelmente porque o número de vasos seria insuficiente para que o efeito de salas acopladas fosse visível (Figuras 3.36 e 3.37).

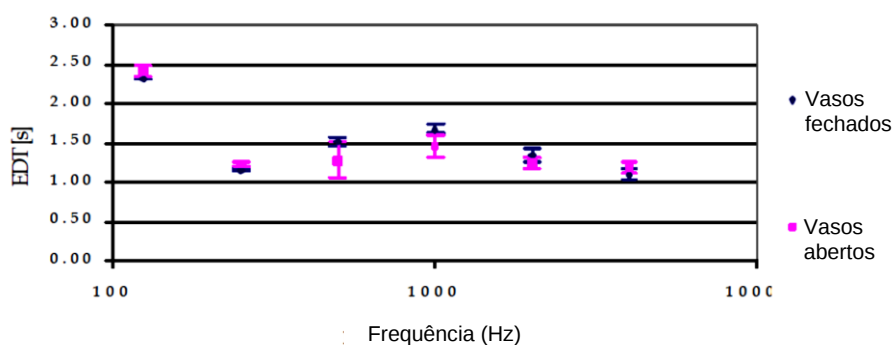


Fig. 3.36 – Resultados obtidos para o EDT , com vasos *fechados* e *abertos*, com o microfone na posição 2 da igreja de Villette [11].

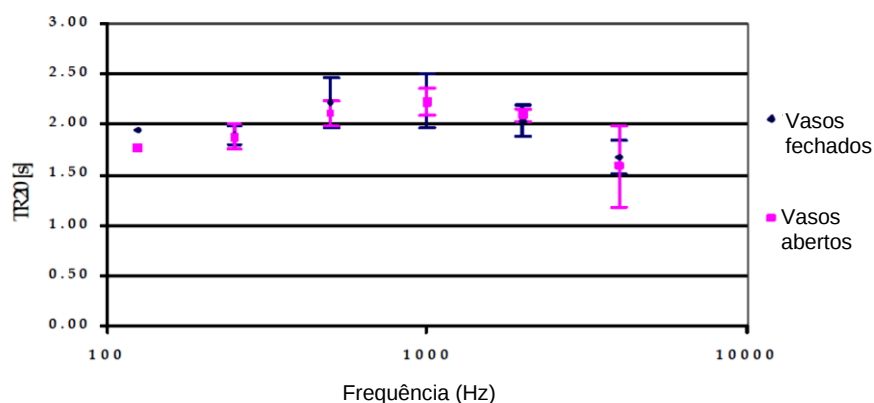


Fig. 3.37 – Resultados obtidos para o TR_{20} , com vasos *fechados* e *abertos*, com o microfone na posição 1 da igreja de Villette (Suíça) [11].

Os estudos realizados nesta experiência também incidiram sobre o efeito de regularização ou suavização temporal observado por Floriot, mas não foi observado, com diferenças muito pequenas entre os registros em vasos *abertos* e *fechados*.

3.5.2.5. - Ensaios acústicos na igreja de Syens

A igreja de Syens (Suíça), do séc. XIII, com volume de cerca de 990 m^3 , conta com cinco vasos acústicos (Figura 3.38) descobertos aquando da sua restauração em 1897, dos quais restam apenas quatro: três vasos de cerâmica no lado norte (alturas de 14,2 a 17,6 cm, com aberturas de 8,6 a 10,2 cm) e um vaso no lado sul (Figura 3.10).

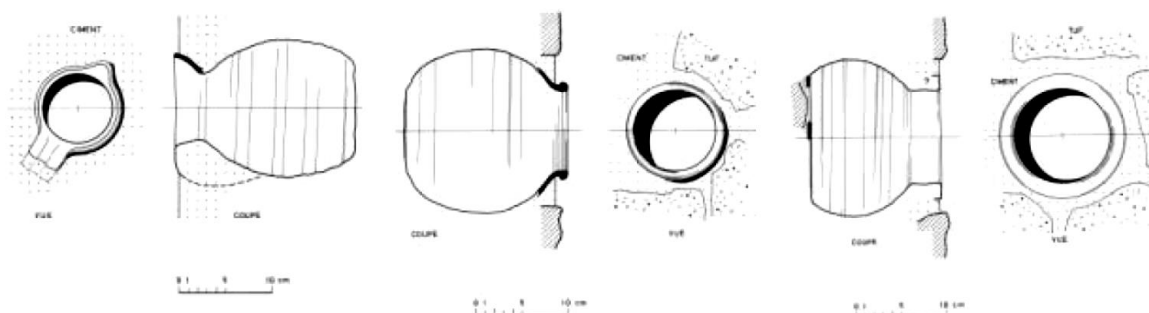


Fig. 3.38 – Esquematização de alguns dos vasos acústicos da igreja de Syens (Suíça) [15].

Os ensaios acústicos realizados por Desarnaulds *et al.* [15], na igreja de Syens, incluíram a medição de diversos parâmetros acústicos, em sistema *MLSSA* que usa a sequência *MLS* (*Maximum Length Sequence*) e que permite a determinação do tempo de reverberação, *EDT*, *STI*, *C₅₀*, etc.

As medições foram realizadas em cinco locais diferentes da igreja [15]:

- 1 - No meio do coro, ao nível dos vasos acústicos (≈ 4 m);
- 2 - No meio do coro no chão;
- 3 - Entre o coro e a nave;
- 4 - Na nave, no nível do primeiro banco;
- 5 - Na nave, no nível do quinto banco.

Os resultados obtidos foram [15]:

- *C₅₀*: os valores registados para o *C₅₀* indicaram que a abertura dos vasos do coro não tem qualquer efeito neste parâmetro. Na nave, ocorreu um aumento muito fraco, em especial na banda de frequência dos 250 Hz (ao contrário do observado na igreja de Villette) (Figuras 3.39 e 3.40).

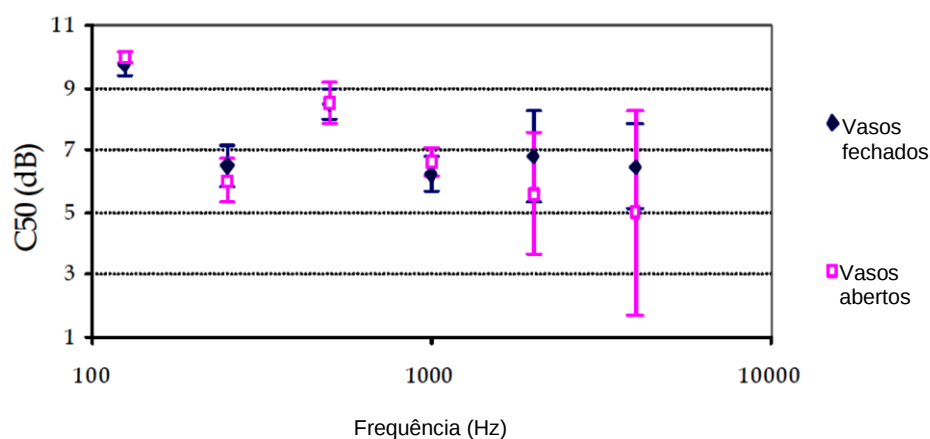


Fig. 3.39 – Resultados obtidos para as medições do *C₅₀*, para vasos abertos e fechados, na posição 1 (coro), na igreja de Syens (Suíça) [15].

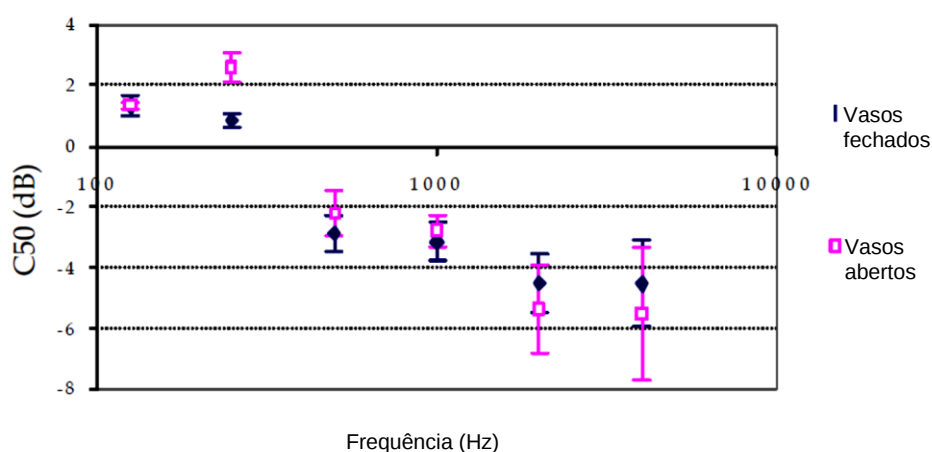


Fig. 3.40 – Resultados obtidos para as medições do C_{50} , para vasos *abertos* e *fechados*, na posição 4 (nave), na igreja de Syens (Suíça) [15].

- **STI, EDT e TR_{20} :** não se registaram praticamente nenhuma alteração nos valores do STI quando os vasos foram *fechados*. Também não se observou nenhum efeito significativo nos valores do EDT nem do TR_{20} (Quadro 3.6 e Figura 3.41).

Quadro 3.6 – Resultados obtidos para as medições do STI , para vasos *abertos* e *fechados*, na igreja de Syens [15].

Posição	STI (vasos fechados)	±	STI (vasos Abertos)	±	Variação do STI (Abertos - Fechados)
1	0,61	0,03	0,61	0,01	0
2	0,65	0,02	0,64	0,06	-0,01
3	0,54	0,01	0,54	0,02	0
4	0,43	0,03	0,41	0,02	-0,02
5	0,44	0,00	0,42	0,04	-0,02
Média					-0,01
Desvio Padrão					0,01

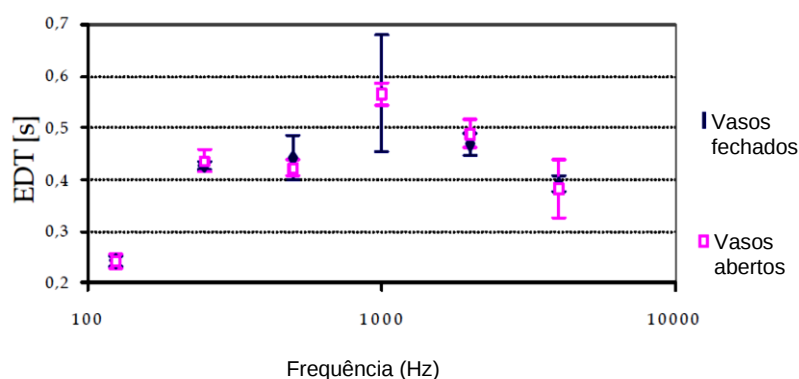


Fig. 3.41 – Resultados obtidos para as medições do EDT , para vasos *abertos* e *fechados*, no centro do coro ao nível dos vasos, na igreja de Syens (Suíça) [15].

Também Loerincik [11] realizou ensaios acústicos na igreja de Syens, seguindo o mesmo método do que realizou em Villette.

Os resultados obtidos foram [11]:

- **Frequência de ressonância:** a medição *MLSSA* permitiu a determinação da frequência de ressonância, muito possivelmente devido ao material de construção do coro (tufo) ser mais absorvente. Só não foi possível determinar a frequência de ressonância do vaso n.º 3 (Quadro 3.7).

Quadro 3.7– Resultados obtidos para as medições da frequência de ressonância e comparação dos valores medidos com os calculados com a fórmula clássica, na igreja de Syens (Suíça) [11].

Vaso	Gargalo	Cavidade	Freq. Ressonância medida (Hz)	±	Freq. Ressonância (form. clássica) (Hz)	±	Diferença (Hz)	Diferença (%)
1	aberto	esférica	256	10	251	19	-5	-2,0
2	curto	esférica	270	10	266	21	-4	-1,5
3	reto	esférica	nd	nd	316	24	nd	nd
4	aberto	esférica	365	10	371	28	6	1,6
nd: não definido							Média	-1
							Desvio Padrão	2,0

A caracterização teórica dos vasos foi conseguida através da obtenção da secção transversal de absorção, do fator de qualidade e do tempo de reverberação para cada vaso (Quadro 3.8).

Quadro 3.8 – Características dos vasos acústicos da igreja de Syens (Suíça) [11].

Vaso	Gargalo	Cavidade	A (m ²)	±	Q	±	T _r (s)	±
1	aberto	standard	0,120	0,0012	4,8	1,3	0,27	0,011
2	aberto	cilíndrica	0,06	0,0005	2,8	1,2	0,15	0,010
3	curto	standard	0,03	0,0002	2,3	0,7	0,10	0,005
4	reto	cilíndrica	0,01	0,0001	1,9	0,7	0,07	0,004

As frequências de ressonância foram, em média, mais altas na igreja de Syens do que na de Villette, o que resultou numa diminuição da absorção dos vasos.

- *C₅₀*: Os resultados indicam que no coro (posição 1, Figura 3.42) o efeito da abertura dos vasos não altera o *C₅₀* e que há um aumento muito pequeno nas medições na nave (posição 4, Figura 3.43).

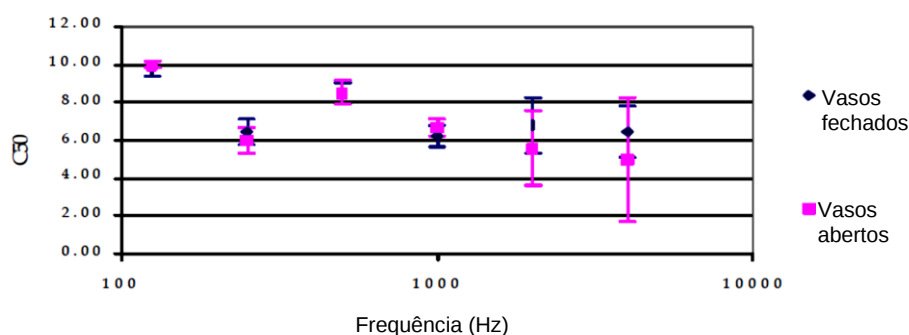


Fig. 3.42 – Resultados obtidos para o coeficiente *C₅₀*, em vasos fechados e abertos, com o microfone na posição 1, na igreja de Syens (Suíça) [11].

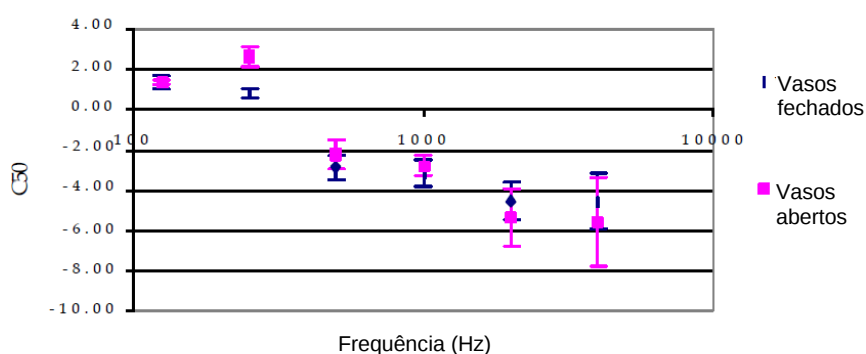


Fig. 3.43 – Resultados obtidos para o coeficiente C_{50} , em vasos fechados e abertos, com o microfone na posição 4, na igreja de Syens (Suíça) [11].

Repare-se que a redução do C_{50} observada na Igreja de Villette não ocorre na igreja de Syens.

- **STI:** a medição *MLSSA* permitiu o cálculo dos valores de *STI* e *RASTI*, com os resultados traduzidos na média de seis medições (Quadros 3.9 e 3.10).

Quadro 3.9 – Resultados obtidos para *STI* e variações entre vasos fechados e abertos, na igreja de Syens (Suíça) [11].

Posição	STI (vasos fechados)	±	STI (vasos Abertos)	±	Variação do STI (Abertos - Fechados)
1	0,61	0,032	0,61	0,014	0
2	0,65	0,018	0,64	0,056	-0,01
3	0,54	0,013	0,54	0,021	0
4	0,43	0,028	0,41	0,020	-0,02
5	0,44	0,004	0,42	0,038	-0,02
Média					-0,01
Desvio Padrão					0,01

Quadro 3.10 – Resultados obtidos para *RASTI* e variações entre vasos fechados e abertos, na igreja de Syens (Suíça) [11].

Posição	RASTI (vasos fechados)	±	RASTI (vasos Abertos)	±	Variação do RASTI (Abertos - Fechados)
1	0,72	0,028	0,71	0,009	-0,01
2	0,77	0,011	0,77	0,040	0
3	0,61	0,013	0,62	0,013	0,01
4	0,46	0,020	0,44	0,011	-0,02
5	0,49	0,012	0,47	0,017	-0,02
Média					-0,01
Desvio Padrão					0,01

Os valores de *STI* e *RASTI* não sofreram quase nenhuma alteração em vasos *fechados*.

- **Tempo de reverberação:** as medições do EDT e do TR_{20} não mostraram nenhuma diferença entre vasos *abertos* e *fechados* (Figura 3.44).

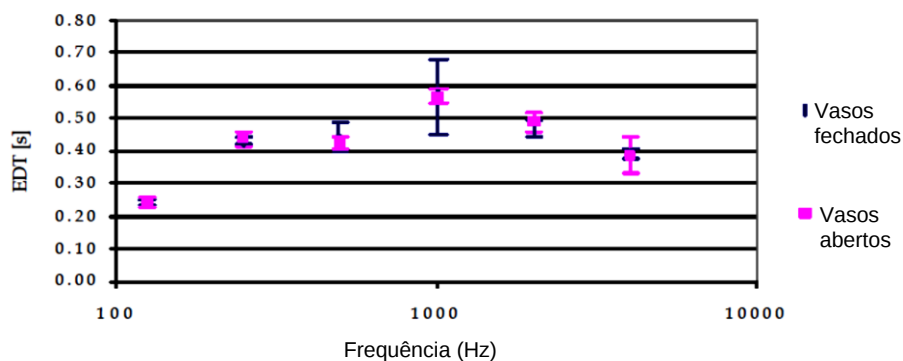


Fig. 3. 44 – Resultados obtidos para o EDT , com vasos *fechados* e *abertos*, com o microfone colocado no centro do coro, ao nível dos vasos da igreja de Syens (Suíça) [11].

3.5.2.6. - Ensaios acústicos em locais de culto da Sérvia

A primeira pesquisa de vasos acústicos de cerâmica medievais da Sérvia, com base nos cálculos dos parâmetros acústicos e nos desenhos disponíveis dos vasos, foi publicada em 1984, referente a dois vasos acústicos encontrados na igreja da vila de Komarane (séc. XIV). Os ensaios em laboratório destes vasos registaram frequências de ressonância significativamente mais baixas (124 e 131 Hz), em comparação com os cálculos (166 Hz), cuja divergência pode estar associada à espessura da camada final de argamassa (que não fazia parte dos cálculos, mas foi adicionada à abertura do gargalo do ressonador nas medições de laboratório de forma a simular o estado original do ressonador embutido). Conseguiu-se comprovar o efeito do alongamento do gargalo do ressonador Helmholtz, com obtenção de frequências de ressonância mais baixas [16].

Com base nos resultados, argumentou-se que os vasos acústicos nas igrejas medievais na Sérvia não contribuíram para a qualidade acústica do espaço interior, porque possuíam pequenos volumes e, portanto, a absorção adicional, ou seja, a diminuição da já pouco tempo de reverberação (2 a 3 segundos), não teve importância. Verificou-se que número de vasos embutidos por igreja era pequeno e que, portanto, não poderiam fazer uma diferença significativa no campo sonoro da igreja. Além disto, a frequência de ressonância dos vasos era muito baixa e a banda de frequências muito estreita, para ser estimulada pela voz humana nos serviços ortodoxos [16].

Concluíram, então, que os vasos acústicos eram usados como parte de uma tradição transmitida oralmente, sem qualquer compreensão de sua função acústica [16].

4

A SINAGOGA DE TOMAR

4.1. JUDAÍSMO E SINAGOGAS

O Judaísmo é a religião mais antiga, das três principais monoteístas existentes no mundo: Judaísmo, Cristianismo e Islamismo. O número de judeus é hoje de cerca de 15 milhões em todo o mundo, residentes principalmente nos Estados Unidos (cerca de 7 milhões) e em Israel (cerca de 4,5 milhões) [17].

Os princípios básicos do Judaísmo estão assinalados na bíblia Hebraica, que também conta a história dos Judeus: povo proveniente da Judeia e que tinha sido escolhido por Deus para fazer com que o mundo alcançasse a harmonia perfeita. É uma religião monoteísta assente na unicidade de Deus cujos ensinamentos têm por base o amor a Deus: “Amarás ao Senhor teu Deus, com todo o teu coração, com toda a tua alma e com todas as tuas forças” [17].

A história deste povo é extensa e remonta a cerca de 1000 a.C. Os escritos sagrados ainda são lidos ao sétimo dia da semana (*Shabat*), que se tornou um dia especial de prática devota, com leituras, comentários e orações [17].

A deslocação dos judeus para a península Ibérica deu-se por volta do séc. III a.C., sendo que os principais registos encontrados em Portugal datam do séc. VI (apesar de existir, em Mértola, uma lápide com inscrições em hebraico datada de 4 de Outubro de 482). Os judeus viveram passivamente em Portugal, desde a formação da nacionalidade no séc. XII e aumentaram as suas comunidades até finais do século XV (cerca de 10% dos cerca de 1.500.000 habitantes do país). Depois desta fase, após o Édito de Expulsão de D. Manuel I em Dezembro de 1496, desencadeou-se a progressiva destruição do Judaísmo em Portugal, que só terminaria com a ação do Marquês de Pombal nos finais do séc. XVIII. No início do séc. XIX, começam a reconstituir-se as primeiras comunidades judaicas contemporâneas, no interior de Portugal (nas Beiras e em Trás-os-Montes) e, depois, dispersos por todo o país [17].

Em 2011, o censo indicou que o número de pessoas que afirmaram praticar o Judaísmo em Portugal foi de 3061 (Quadro 4.1).

Quadro 4.1 – Dados apresentados nos Censos 2011, indicadores da religião da população residente com 15 ou mais anos de idade [34].

Local de residência (à data dos Censos 2011)	População residente com 15 e mais anos de idade (N.º) por Local de residência (à data dos Censos 2011) e Religião; Decenal									
	Período de referência dos dados									
	2011									
	Religião									
	Total	Católica	Ortodoxa	Protestante	Outra cristã	Judaica	Muçulmana	Outra não cristã	Sem religião	Não resposta
	N.º	N.º	N.º	N.º	N.º	N.º	N.º	N.º	N.º	N.º
Portugal	8 989 849	7 281 887	56 550	75 571	163 338	3 061	20 640	28 596	615 332	744 874
Continente	8 563 501	6 893 708	55 665	73 731	158 768	2 886	20 337	27 844	604 851	725 711
Região Autónoma dos Açores	202 575	184 696	225	823	1 959	129	136	332	4 893	9 382
Região Autónoma da Madeira	223 773	203 483	660	1 017	2 611	46	167	420	5 588	9 781

População residente com 15 e mais anos de idade (N.º) por Local de residência (à data dos Censos 2011) e Religião; Decenal - INE, Recenseamento da população e habitação - Censos 2011

Sinagoga é o termo grego que denomina “a casa de assembleia” (*beth keneseh*) e que representa um edifício especial para a prática devota da religião [17]. Em Portugal existem algumas sinagogas, para além da Sinagoga de Tomar. Tendo em conta a descrição efetuada por J. Amado [17], podem-se enumerar:

- **Sinagoga Shaaré Tikvá** (“Portas de Esperança”): situada em Lisboa, é a principal sinagoga da comunidade judaica de Portugal e foi a primeira construída de raiz desde o decreto de expulsão. O projeto foi elaborado em 1897 pelo arquiteto Miguel Ventura Terra, com inauguração em 1904. A Direção Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais classificou-a como imóvel de interesse público em 1997, tornando-se o primeiro templo não católico com esta distinção (Figura 4.1);



Fig. 4.1 – Sinagoga Shaaré Tikvá, Lisboa [17].

- **Sinagoga Ohel Jacob**: localizada em Lisboa, é a única sinagoga Ashkenazi em Portugal, de tradição ortodoxa. Acolheu os primeiros Bnei-anussim (marranos) que regressaram à tradição dos seus ancestrais e que tinham sido forçados à conversão cristã durante a Inquisição (Figura 4.2);



Fig. 4.2 – Sinagoga Ohel Jacob, Lisboa [17].

- **Sinagoga Mekor Haim** (“Fonte de Vida”): localizada no Porto, é a maior sinagoga da Península Ibérica. Foi construída pelo esforço impulsor do capitão Barros Basto e inaugurada em 1938 (Figura 4.3);



Fig. 4.3 – Sinagoga Mekor Haim, Porto [17].

- **Sinagoga Beit Eliahu** (“Filho de Elias”): inaugurada em 1996, está localizada em Belmonte na zona da antiga judiaria (Rua da Fonte da Rosa). A Comunidade Judaica de Belmonte foi oficialmente reconhecida em 1989 e também detêm um cemitério Judaico (Fortune Azoulay) inaugurado em 2001 (Figura 4.4);



Fig. 4.4 – Sinagoga Beit Eliahu, Belmonte [17].

- **Sinagoga Sahar Hassamain:** construída em 1836 em Ponta Delgada, é uma das sinagogas mais antigas de Portugal e um dos únicos vestígios da cultura hebraica no arquipélago dos Açores (Figura 4.5).



Fig. 4.5 – Sinagoga Sahar Hassamain, Ponta Delgada [17].

4.2. SINAGOGA DE TOMAR: MUSEU LUSO-HEBRAICO ABRAÃO ZACUTO

A Sinagoga de Tomar, situada na Rua Dr. Joaquim Jacinto em Tomar, é o único templo hebraico pré-renascentista integralmente conservado que existe em Portugal (Figura 4.6) [18] [4].



Fig. 4.6 – Fachada principal da Sinagoga de Tomar, antes das obras de beneficiação [19].

Foi construída nos finais do séc. XIV ou inícios do séc. XV propositadamente para a função religiosa, indicando a boa disponibilidade financeira da comunidade judaica portuguesa e também o seu sentido

de prosperidade [4]. A referência mais antiga desta comunidade data de 1315, sendo indelével o seu contributo para o crescimento de Tomar nos séculos XIV a XVI [18]. O seu rápido crescimento demográfico (calcula-se que a população judaica de Tomar fosse, em meados do século XV, composta por cerca de 150 a 200 indivíduos, constituindo uma proporção de 30 a 40% do total de habitantes da vila, na sequência da chegada dos judeus espanhóis, expulsos em 1492), ao longo do século XV, incentivou a construção de uma judiaria, com o encerramento de portas entre o pôr e o nascer do sol (estas portas situar-se-iam nas extremidades ocidental e oriental desta rua, que passou a ser designada de Rua da Judiaria, mais especificamente nos cruzamentos com as Ruas do Moinho e Direita, respetivamente) [19]. A Judiaria, situada próxima do centro económico e social da vila, demonstrava a importância que a comunidade assumiu na sociedade nabitina [19]. A construção da Sinagoga deu-se por ordem do Infante D. Henrique, que possivelmente protegia a comunidade hebraica da vila [19].

Para além da sua função original, também foi usada como escola, assembleia e tribunal da comunidade judaica tomarense e em 1496 foi encerrada e destituída de funções religiosas aquando do édito Manuelino de expulsão dos judeus de Portugal e foi, assim, convertida em prisão [4] [18]. Nesta altura, o nome da rua foi mudado para Rua Nova e muitos dos cristãos-novos (judeus convertidos ao cristianismo) tiveram de se mudar para outros arruamentos, enquanto os cristãos-velhos se instalaram nas casas deixadas devolutas [19]. Entre os finais do século XVI e os inícios do XVII, depois das necessárias obras, o edifício passou a local de culto cristão, como Ermida de São Bartolomeu [19] e, no século XIX, foi palheiro, celeiro, armazém de mercearias, adegas e arrecadação [4].

Em 1921 foi classificada como Monumento Nacional (“Samuel Schwarz”), na sequência de uma visita realizada em 1920 pelos membros da Associação de Arqueólogos Portugueses. Em 1923, Samuel Schwarz (judeu polaco engenheiro de minas chegado a Portugal seis anos antes e que dá nome ao monumento), adquiriu a Sinagoga de Tomar, recuperou-a do estado de abandono em que se encontrava e doou-a ao Estado Português em 1939, para a tornar num museu: o Museu Luso-Hebraico de Abraão Zacuto. O patrono do museu, Abraão Ben Samuel Zacuto (1450-1515), era natural de Salamanca e foi astrónomo, matemático, médico e rabi. Por ter origem judaica, em 1492 foi obrigado a refugiar-se em Portugal e esteve ao serviço dos reis D. João II e D. Manuel I, até que se deu a expulsão dos Judeus em 1496 [4].

De arquitetura simples e com influências orientais, esta sinagoga apresenta uma sala dedicada ao culto de planta quase quadrangular (Figura 4.7) (altura interior máxima de cerca de 6,50 m, área piso com 80 m², volume interior de 473 m³ e superfície interior de 400 m²), dividido em três naves de três tramos (tipologia semelhante à de outras sinagogas sefarditas quatrocentistas, por exemplo, a sinagoga de Safed, em Israel, construída pelo judeu sefardita de Toledo, Joseph Caro, que em peregrinação a Jerusalém, repetiu uma tipologia peninsular [20]) [19], com as abóbadas de arestas assentes em quatro colunas, capitéis decorados com motivos geométricos e vegetalistas e com doze mísulas adossadas às paredes (Figura 4.8) [4]. A porta virada para nascente, em arco quebrado lanceolado do lado de fora, era a porta principal do templo [19]. Atualmente, a entrada é uma porta de vão retangular, com sentido para norte [19]. A arquitetura está repleta de simbolismos, onde as mísulas representam as doze tribos de Israel, as colunas destacam as quatro matriarcas de Israel (Sara a mulher de Abraão, a sua sobrinha Rebeca esposa de Isaac, Lea e Raquel irmãs e filhas de Labão) e os capitéis indicam os parentescos das matriarcas (dois iguais para as irmãs e os restantes são diferentes para a tia e sobrinha) [4].

A unicidade deste monumento português, o qual motivou este estudo, está marcada pela existência de dois orifícios em cada canto superior, que correspondem aos bocais de bilhas de barro colocadas dentro das paredes e viradas para baixo, no propósito de uma melhoria acústica do templo (Figura 4.9 a 4.11 e Quadro 4.2) [4]. Há a possibilidade de que a amplificação provocada pelos vasos acústicos tivesse a intenção de transmitir os sons para as galerias de outros espaços, onde se encontravam as mulheres e

que, através daquele sistema acústico, podiam ouvir e acompanhar o culto a que só os homens podiam assistir [21].

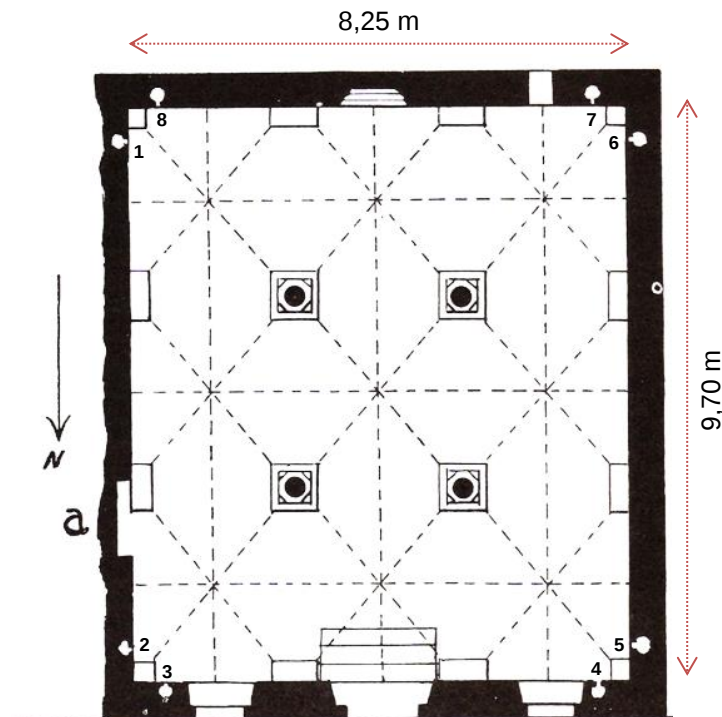


Fig. 4. 7 – Planta (quadrada) da Sinagoga de Tomar, com pormenor construtivo dos vasos acústicos, dois em cada canto (com a respetiva numeração adotada neste relatório), embutidos no interior das paredes [32].



Fig. 4.8 – Interior da Sinagoga de Tomar, com visualização das abóbadas de arestas assentes nos quatro pilares, as mísulas, os vários elementos interiores decorativos e a disposição dos lugares sentados (antes das obras de beneficiação) [33].



Fig. 4.9 – Três dos vasos acústicos da Sinagoga de Tomar, virados para baixo, com os orifícios a apontar para o interior [fotos da autora].



Fig. 4.10 – Vasos acústicos da Sinagoga de Tomar: à esquerda o interior de um dos vasos; à direita um dos vasos a descoberto [22].

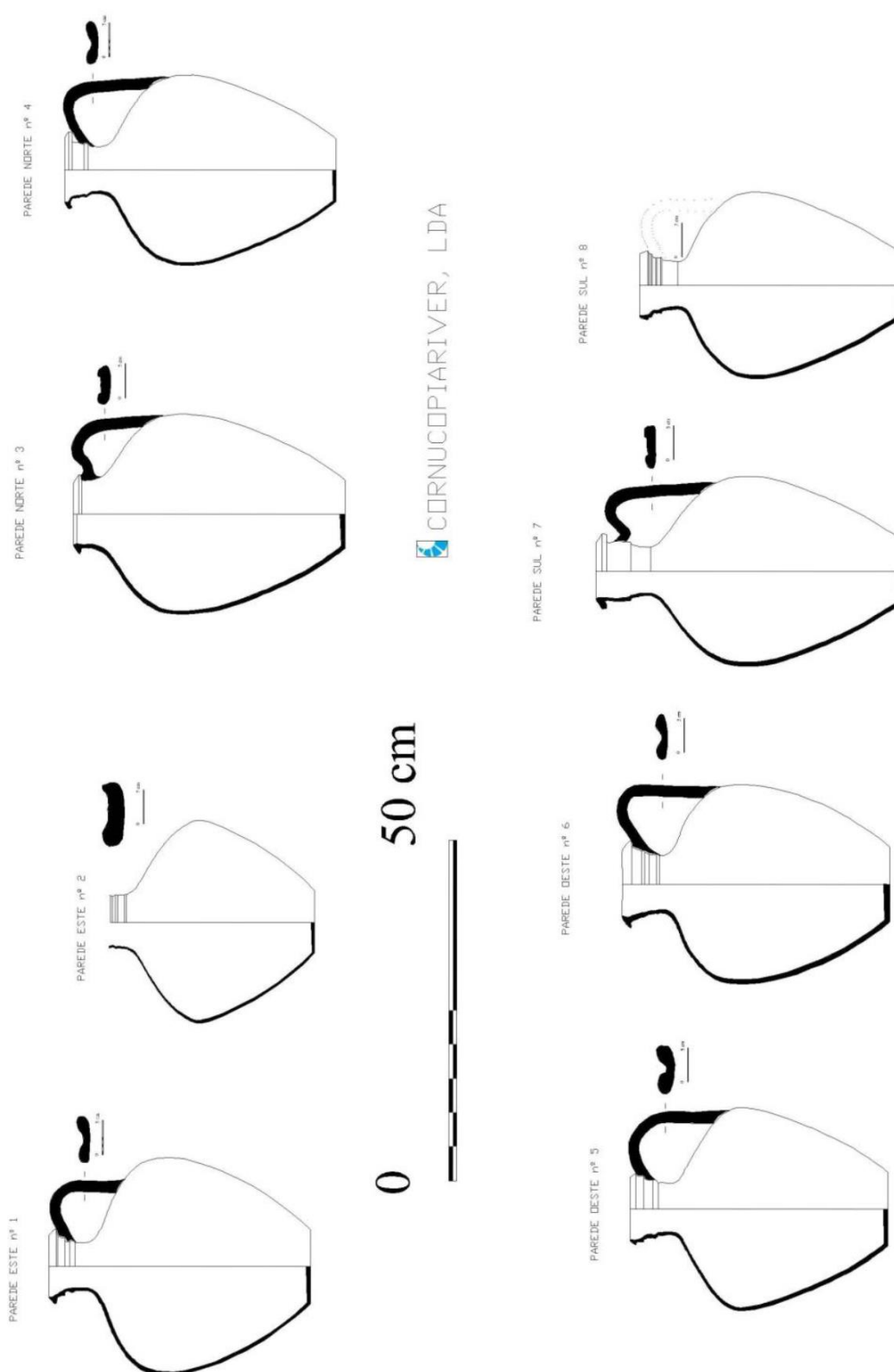


Fig. 4.11 – Esquema dos oito vasos acústicos da Sinagoga de Tomar, com pormenorização em corte das "asas" do vaso [22].

Quadro 4.2 – Dados referentes aos vasos acústicos (ver numeração da Fig. 4.11) existentes na Sinagoga de Tomar (de acordo com [22], com o cálculo da frequência de eficácia máxima (calculada de acordo com a equação 2.24).

Vaso	Área do gargalo (S) [mm ²]	Volume do ar interior (V) [dm ³]	Comprimento do gargalo (L) [mm]	Raio do gargalo (r) [mm]	Frequência de ressonância (f) [Hz]
1	8215,3	11,8	62,5	51,2	120
2	6486,3	4,5	34,0	45,5	200
3	8199,2	10,6	45,5	51,1	134
4	8215,3	9,1	68,2	51,2	134
5	6486,3	10,1	68,2	45,5	116
6	8215,3	9,9	68,2	51,2	128
7	6486,3	9,9	79,5	45,5	113
8	6486,3	8,9	68,2	45,5	124

O acervo do pequeno museu aí instalado é constituído por lápides funerárias provenientes de vários locais de Portugal [4] que atestam a importância da cultura hebraica em Portugal (das quais se destacam uma estela funerária proveniente de Faro, alusiva ao falecimento em 1315 do Rabi Ioseph (judeu nabantino) e a lápide de 1308, que assinala a fundação da segunda sinagoga de Lisboa) e também livros e objetos da tradição e culto judaicos (Figura 4.12) [19].



Fig. 4.12 – Núcleo Interpretativo da Sinagoga de Tomar, após realização das obras de beneficiação, no piso superior da Sala Anexa [fotos da autora].

As escavações arqueológicas numa sala adossada ao edifício principal, realizadas em 1985, deram-se na sequência do aparecimento de uma boca de talha intacta (datada do séc. XVIII a XIX) enquanto se removia o piso em argamassa, as quais revelaram a existência de um forno e um esgoto (também datado do séc. XVIII a XIX). Nestes mesmos estudos, foram descobertos alicerces de compartimentos do séc. XV, do reinado de D. Afonso V (contemporâneos da Sinagoga de Tomar), os quais se pensam

corresponder a um *mikveh* judeu (balneário para banhos rituais). Durante os anos seguintes, também se explorou o quintal e fizeram-se escavações que recuperaram telhas, tijoleiras e moedas datadas do séc. XV a XVI. Pressupõe-se que o anexo oriental da Sinagoga se destinava aos homens e o do lado oeste para as mulheres (*mikveh*), no qual o forno descoberto tinha como propósito o aquecimento da água [22].

Já em 2017, os estudos arqueológicos da responsabilidade do Dr. Nelson Borges, permitiram o conhecimento estratigráfico dos vestígios anteriormente identificados na década de 1980, com estabelecimento de uma correlação entre algumas estruturas anteriormente encontradas, verificação do seu prolongamento e balizaram cronologicamente no séc. XVIII algumas das edificações existentes. Desta forma, construiu-se o edifício conhecido como *Edifício Adjacente* ou *Sala Anexa*, com vários compartimentos e pórticos muito bem estruturado. Imediatamente abaixo de um dos pavimentos (em argamassa esbranquiçada, muito frequentes em ambientes tardo-medievais), foi identificada uma moeda de D. João I, com uma cunhagem precisa entre 1385-1409. Também se registou a existência de um edifício datado do final do século XIII, composto por vários pavimentos associados a duas bases quadrangulares de colunas [22].

Muito se poderia reportar sobre os achados arqueológicos aqui encontrados, sublinhando-se a importância do facto de se estimar que a ocupação humana se reporta ao período Medieval Pleno com a existência de covas ou fossas escavadas no substrato local, em especial um silo (em posição estratigráfica, imediatamente abaixo dos pilares dos séculos XIII/XIV) datados, pelo menos, dos séculos XII/XIII (Figuras 4.13 e 4.14) [22].



Fig. 4.13 – Escavações realizadas na Sala Anexa da Sinagoga de Tomar [fotos da autora].

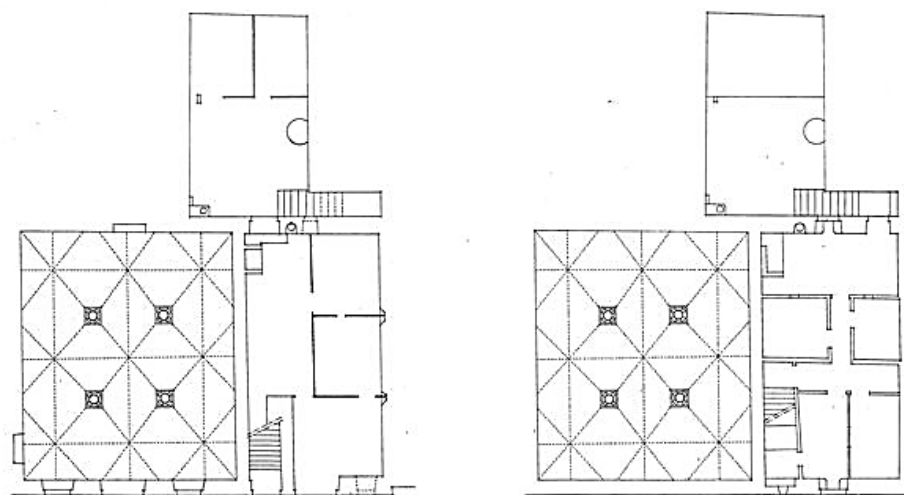


Fig. 4.14 – Plantas da Sinagoga de Tomar, onde se evidenciam as salas adossadas ao edifício principal: à esquerda o primeiro pavimento e à direita o segundo pavimento [20].

A planta global do edifício é retangular, formada por dois lotes de casas adossadas que comunicam entre si por galerias: a do lado esquerdo correspondente ao templo e a do lado direito de habitação (de volumes articulados em dois pisos, com coberturas em telhados de duas águas, rematadas em beirada dupla) [20]. De acordo com a informação de Trincão [23], a sinagoga atual é metade da primitiva, pois existiam duas salas: uma para homens e outra para mulheres, e tudo indica que a sala desaparecida (para permitir a construção de outro edifício no final do século XVIII) era a sala destinada às mulheres (Figura 4.15).



Fig. 4.15 – Planta geral da Sinagoga de Tomar, com apresentação da planta quadrangular da Sinagoga, da sala anexa, dos pátios e de algumas das escavações realizadas [22].

A Sinagoga de Tomar sofreu obras de beneficiação e, depois, o Núcleo Interpretativo da Sinagoga de Tomar e do Museu Luso-Hebraico Abraão Zacuto abriu ao público em 15 de outubro de 2019. A sua visita permite conhecer as origens do judaísmo e obter informações acerca da sua presença em Tomar [18]. Destas obras foi possível concluir, através da picagem das paredes, que a argamassa é uniforme em todas as paredes, composta de cal e areão e de cor branca (compatível com níveis arqueológicos e muros encontrados em diversos espaços do Centro Histórico de Tomar, associado ao séc. XV e em estruturas arqueológicas da Sala Anexa, Logradouro e Pátio do Poço). A argamassa da abóbada parece ser diferente da utilizada nas paredes. Verificou-se que o alinhamento e distância das portas entre si e entre estas e as paredes se encontra perfeitamente axializada com as arestas da abóbada, mas não com as janelas de fresta, o que aponta para dois momentos de construção. Verificou-se que, o primeiro edifício foi construído inicialmente no tempo do Infante D. Henrique para sinagoga, com apenas janelas de fresta (que seriam todas de arco redondo) situadas no topo do edifício (três na parede este, três na parede sul e dois na parede oeste) e a porta (de arco apontado, feito em cantaria, ao estilo gótico). Depois, numa segunda fase, construiu-se a abóbada, talvez no reinado de D. João II, com a construção das portas em tijolo do lado interior, a colocação dos vasos acústicos e as mísulas da sinagoga (iguais às da cripta da Antiga Colegiada da Igreja Matriz de Ourém) [22].

De entre muitos outros aspetos construtivos delineados, salienta-se o facto de que os vasos acústicos se encontram em posições dissemelhantes (os vasos n.ºs 1 e 8 encontram-se a uma altura média aproximada de 4,40 m, os n.ºs 2 e 3 a 4,15 m, os n.ºs 4 e 5 a 4,25 m e os n.ºs 6 e 7 a 5,30 m), contrariando a tendência geral da arquitetura para a uniformização (Figura 4.16) [22].

Na atualidade e desde 1946, é um edifício protegido na categoria de Monumento Nacional [20].

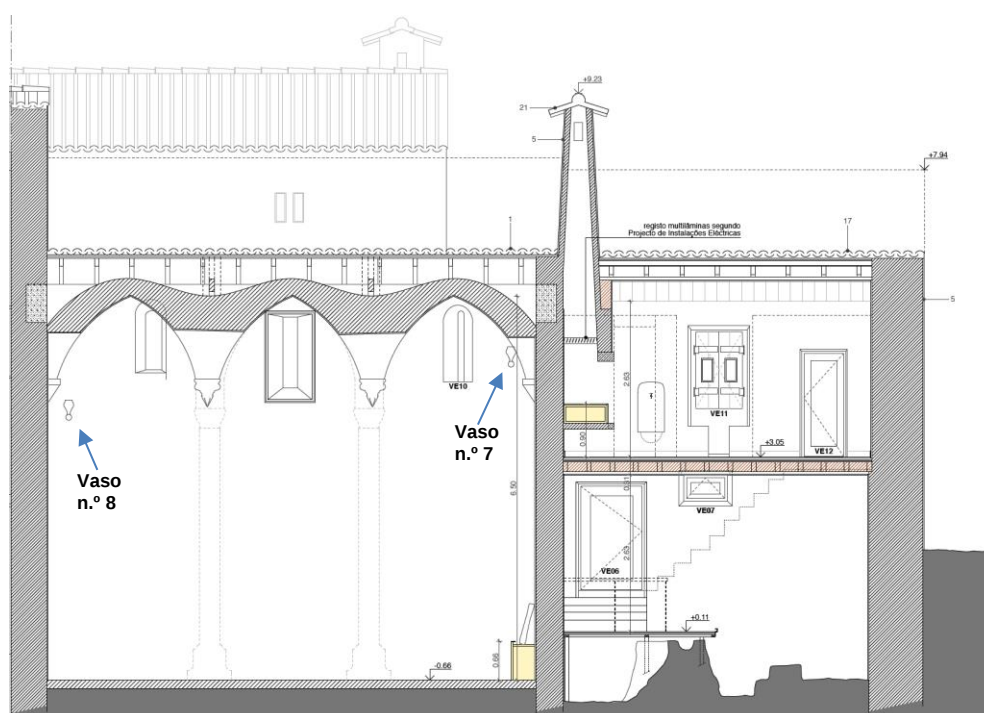


Fig. 4.16 – Corte da estrutura arquitetónica da Sinagoga de Tomar, aquando das obras de beneficiação, no qual se pode verificar a assimetria de colocação dos vasos acústicos n.ºs 7 e 8 (assinalados com setas) [35].

5

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DA SINAGOGA DE TOMAR

5.1. INTRODUÇÃO

A caracterização acústica da sala de culto da Sinagoga de Tomar, apresentada neste estudo, passa por uma análise objetiva com base em ensaios acústicos realizados *in situ*.

Os ensaios foram realizados com os equipamentos do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e incluem a medição e análise de dois parâmetros acústicos, com e sem a oclusão dos orifícios que comunicam com as bilhas acústicas, nomeadamente o *tempo de reverberação* e o *RASTI*. Os valores obtidos permitem a caracterização do espaço interior da sinagoga, nomeadamente em relação à inteligibilidade da palavra, e quantificar a ação das bilhas acústicas na possível melhoria do som na sala.

As medições foram realizadas com as portas de acesso ao exterior fechadas e com apenas o técnico no local (sala vazia, sem ocupação dos lugares existentes). Os pontos de medição e a posição do operador foram exatamente os mesmos nas duas situações em que os ensaios se fizeram: *com* ou *sem* oclusão das aberturas dos orifícios. Apesar de ser uma zona histórica da cidade de Tomar, passaram alguns veículos no arruamento exterior e também existiam moradores no exterior.

A oclusão dos orifícios de acesso às bilhas acústicas foi conseguida com o uso de “tampas” em aglomerado negro de cortiça, cortados na medida certa, encrustados e revestidos pelo exterior a folha de alumínio no sentido de minimizar ou neutralizar a absorção das ondas sonoras produzidas.

5.2. METODOLOGIA

5.2.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

A medição *in situ* dos valores do tempo de reverberação (*TR*) foi realizada com o máximo rigor possível, pois eram expectáveis diferenças muito pequenas entre os valores obtidos *com* e *sem* oclusão das aberturas das bilhas acústicas.

O ensaio consistiu na colocação de uma fonte sonora (num local onde se pressupõe que seria o do orador da sinagoga) e no registo do decaimento do som emitido em vários locais da sinagoga onde estariam as outras pessoas (ouvintes), numa altura aproximada ao dos ouvintes (a cerca de 1,40 m do pavimento). Assumiu-se o princípio da simetria de valores no espaço (planta quadrangular) e fizeram-se medições em metade da sala em sete pontos de referência (Figuras 5.1 e 5.2).



Fig. 5.1 – Localização da fonte sonora (F) e das diferentes posições do microfone (sonómetro) na sala de culto da Sinagoga de Tomar, para o registo dos valores do *TR* (A, B, C e D representam os pontos de leitura próximos dos cantos e os pontos 1, 2 e 3 representam os pontos de leitura no centro da sala).



Fig. 5.2 – Colocação da fonte sonora e do microfone (sonómetro) na sinagoga de Tomar para a realização das medições do *TR* [foto da autora].

A fonte sonora emitiu um ruído branco (suficientemente intenso para que se consiga registar um decaimento acima do ruído de fundo) nas bandas de terços de oitava entre os 100 e os 5k Hz, durante 10 segundos, pousada no piso e posicionada de forma inclinada com cerca de 35 graus na direção do centro do espaço. O sonómetro (recetor) registou o nível de pressão sonora ao longo dos dez segundos de emissão e depois calculou automaticamente o tempo de decaimento de 20 ou 30 dB do ruído. Estes dados permitem o cálculo do TR_{20} e TR_{30} (valores do TR por extrapolação do decaimento dos primeiros 20 ou 30 dB).

Todo este processo foi repetido para as bilhas acústicas *com* e *sem* oclusão dos seus orifícios (Figura 5.3).



Fig. 5.3 – Oclusão dos vasos acústicos, com recurso a "tampões" de aglomerado negro de cortiça e revestidos exteriormente a folha de alumínio [fotos da autora].

Os ensaios foram efetuados no dia 7 de Maio de 2020, entre as 10 e as 12 horas com humidade relativa de 88%, temperatura de 18,5 °C e com os seguintes equipamentos (Figura 5.4):

- Sonómetro *Brüel & Kjær*, modelo 2260;
- Fonte sonora *Brüel & Kjær*, modelo 4224.



Fig. 5.4 – Sonómetro e fonte sonora utilizados na medição do TR , na Sinagoga de Tomar [fotos da autora].

5.2.2. RASTI

O parâmetro *RASTI* (*R*apid *S*peech *T*ransmission *I*ndex) mede de forma objetiva a inteligibilidade da palavra.

Os ensaios consistiram na medição do ruído recebido em pontos estratégicos da sinagoga (só em metade da sinagoga, de acordo com o princípio da simetria, em planta, dos valores), nos locais onde poderiam estar as pessoas sentadas (ouvintes) (Figura 5.5).



Fig. 5.5 – Localização da fonte sonora (F) e dos seis diferentes locais do microfone, para o registo dos valores do *RASTI* na sala de culto da Sinagoga de Tomar.

A medição do *RASTI* consistiu na emissão de um sinal sonoro contínuo, através de um emissor de *RASTI* colocado num tripé com uma altura aproximadamente de um ser humano (1,6 m), no local onde se pressupõe que seria o do orador. O ruído emitido é uma simulação com as mesmas flutuações de intensidade sonora da voz humana, modelado em duas bandas de oitava, em frequências dos 500 aos 2000 Hz.

O recetor de *RASTI* possui um microfone omnidirecional e foi colocado em vários pontos da sinagoga a uma altura de aproximadamente 0,95 m (que representa a altura aproximada de uma pessoa sentada). O aparelho recetor regista as diferenças entre o som emitido e o recebido pelo microfone, e calcula o *RASTI* (valor numérico entre 0 e 1), o qual avalia o nível de degradação do sinal entre a fonte sonora e os vários pontos medidos. Em cada ponto foram registados vários valores, cujo *RASTI* é um valor único que traduz a média aritmética das leituras.

Os ensaios foram efetuados no dia 7 de Maio de 2020, entre as 10 e as 12 horas, humidade relativa de 88%, temperatura de 18,5 °C e com os seguintes equipamentos (Figuras 5.6 e 5.7):

- Fonte sonora (emissor) de *RASTI* Brüel & Kjær, modelo 4225;
- Recetor de *RASTI* Brüel & Kjær, modelo 4419.



Fig. 5.6 – Colocação da fonte sonora e do recetor (transportado pelo engenheiro do *LAFEUP*) na sinagoga de Tomar para a realização das medições do *RASTI* [foto da autora].



Fig. 5.7 – Fonte sonora e recetor utilizados na medição do *RASTI*, na Sinagoga de Tomar [fotos da autora].

5.3. RESULTADOS

5.3.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Os resultados do tempo de reverberação (TR), tanto para a situação em que as bilhas acústicas ficaram *abertas* como quando foram *fechadas* com aglomerado negro de cortiça revestidas superficialmente com folha de alumínio, estão apresentados de acordo com as medições realizadas para o TR_{20} e TR_{30} , nas localizações anteriormente assinaladas (Figura 5.1), como sendo os quatro cantos (A , B , C e D) da Sinagoga de Tomar e também dos pontos (1, 2 e 3) ao longo da sala (considerando a simetria da planta).

5.3.1.1. TR nos cantos da sala da Sinagoga de Tomar: localizações A , B , C e D .

A eficácia acústica, relativamente aos valores do tempo de reverberação, é aqui apresentada como a diferença entre o valor de TR obtido sem a oclusão da abertura das bilhas e o valor obtido com a oclusão das bilhas. Seria, por isso, considerado acusticamente benéfico que esta diferença seja negativa, apontando assim para uma diminuição nos valores de TR provocada pela ação das bilhas acústicas.

Os valores do TR tendem a ser maiores nas baixas frequências e mais baixos nas altas frequências. O valor máximo do TR foi de 7,00 s para a banda de frequência dos 250 Hz, obtido no canto A com as bilhas *fechadas*. O valor mínimo do TR foi de 2,46 s para a banda de frequência dos 5 kHz obtido no canto A com as bilhas *abertas* (Quadro 5.1).

Os valores médios do TR tendem a decrescer após a banda de frequência dos 250 Hz, iniciando com valores próximos dos 6 s e atingindo os valores mínimos nas altas frequências (Figura 5.10).

Com as bilhas *fechadas*, em bandas de frequência acima dos 315 Hz, o TR assume valores muito semelhantes em todos os quatro cantos, de valores tendencialmente decrescentes desde os aproximadamente 5,5 s (Figura 5.9). Com as bilhas *destapadas*, em frequências acima dos 630 Hz, o TR assume valores muito semelhantes em todos os cantos, de valores tendencialmente decrescentes desde os aproximadamente 5 s (Figura 5.8).

A variabilidade dos valores obtidos para cada frequência, entre os diferentes pontos de medição nos cantos, pode ser quantificada pelo valor do desvio padrão das medições. Sem a oclusão das bilhas, a menor variabilidade dos valores entre as leituras nos cantos (valores muito aproximados do TR) ocorre na banda de frequência dos 5 kHz com um desvio padrão de 0,04 e a maior variabilidade ocorre, como seria expectável, na banda de frequência dos 100 Hz com um desvio padrão de 0,79. Com a oclusão das bilhas, a menor variabilidade dos valores entre as leituras nos cantos (valores muito aproximados do TR) ocorre na banda de frequência dos 3,15 kHz com um desvio padrão de 0,04 e a maior variabilidade ocorre na banda de frequência dos 160 Hz com um desvio padrão de 0,54 (Quadro 5.1).

O efeito mais “benéfico” obtido pela abertura das bilhas (diferença negativa) encontra-se nas bandas de frequência dos 125 e 250 Hz, com uma diminuição média de 0,59 s e 0,55 s, respetivamente, nos valores de TR (Figura 5.11).

O efeito mais “prejudicial” obtido pela abertura das bilhas (diferença positiva) encontra-se na banda de frequência dos 500 Hz, com um ligeiro aumento médio de 0,14 s no valor de TR (Figura 5.11).

Os pontos A e D são os que apresentam os “melhores” resultados médios dos valores do TR pela abertura das bilhas acústicas, cujos benefícios médios são de uma descida em 0,17 e 0,13 segundos, respetivamente, no TR . O ponto B apresenta um resultado médio “prejudicial”, com uma ligeira subida média de 0,06 s no TR . No ponto C as diferenças são “benéficas” mas apenas com uma ligeira diminuição média de 0,05 s no TR (Quadro 5.2).

As diferenças encontradas nos valores do *TR*, em cada ponto, no que respeita à influência da abertura das bilhas (Figuras 5.12 a 5.15), demonstram que:

- No ponto *A* as maiores diminuições nos valores de *TR* estão concentradas nas baixas frequências até aos 315 Hz, com reduções de quase 1 s, exceto na banda dos 160 Hz que apresenta uma subida de 0,44 s. Entre os 400 e os 630 Hz registaram-se subidas no valor do *TR*, que chegam a ser superiores a 0,50 s na banda dos 400 Hz;
- No ponto *B* verifica-se um aumento de 0,80 s no valor de *TR* na banda dos 160 Hz e as reduções mais expressivas apenas rondam os 0,50 s nas baixas frequências;
- No ponto *C* observam-se algumas diminuições do valor de *TR* nas baixas frequências, nunca superiores a 0,65 s. Os aumentos são sempre inferiores a 0,25 s;
- No ponto *D*, os registos demonstram que na grande maioria das bandas de baixa frequência o efeito da abertura das bilhas é “benéfico”, com reduções não superiores a 0,86 s.

Quadro 5.1 – Valores medidos para o tempo de reverberação (*TR*) nos cantos *A*, *B*, *C* e *D*, com a abertura e oclusão das bilhas acústicas, assim como o valor da média e desvio padrão das leituras (assinalados a fundo vermelho e verde os valores máximos e mínimos em cada situação – oclusão ou não das bilhas – e também em relação à média de cada frequência e desvio padrão).

Freq. (Hz)	TR - Bilhas Abertas (s)						TR - Bilhas Fechadas (s)					
	A	B	C	D	Média (s)	Desvio Padrão (s)	A	B	C	D	Média (s)	Desvio Padrão (s)
100	4,25	5,99	5,58	5,79	5,40	0,79	5,14	5,86	5,33	5,81	5,54	0,36
125	5,69	6,08	5,06	5,78	5,65	0,43	6,61	6,02	5,71	6,64	6,25	0,46
160	6,73	5,98	5,27	5,75	5,93	0,61	6,29	5,18	5,82	6,35	5,91	0,54
200	5,60	6,07	5,76	6,20	5,91	0,28	6,48	5,93	5,95	6,52	6,22	0,32
250	6,08	5,68	5,88	5,68	5,83	0,19	7,00	6,26	5,92	6,33	6,38	0,45
315	5,39	5,87	5,41	5,41	5,52	0,23	5,91	5,59	5,48	5,31	5,57	0,25
400	6,09	5,45	5,61	5,54	5,67	0,29	5,57	5,95	5,59	5,46	5,64	0,21
500	5,66	5,54	5,66	5,09	5,49	0,27	5,51	5,29	5,46	5,12	5,35	0,18
630	5,32	5,20	5,00	5,08	5,15	0,14	4,98	5,20	5,16	5,03	5,09	0,10
800	5,05	5,41	5,14	5,06	5,17	0,17	5,21	4,87	5,40	5,10	5,15	0,22
1k	4,83	4,82	4,62	5,05	4,83	0,18	4,84	4,91	4,73	4,86	4,84	0,08
1,25k	4,81	4,52	4,64	4,61	4,65	0,12	4,70	4,50	4,46	4,75	4,60	0,14
1,6k	4,38	4,12	4,34	4,39	4,31	0,13	4,45	4,22	4,30	4,37	4,34	0,10
2k	4,11	4,04	4,20	4,15	4,13	0,07	4,08	4,01	4,10	3,99	4,05	0,05
2,5k	3,70	3,91	3,82	3,79	3,81	0,09	3,78	3,88	3,69	3,82	3,79	0,08
3,15k	3,53	3,56	3,53	3,44	3,52	0,05	3,53	3,49	3,48	3,57	3,52	0,04
4k	2,94	3,05	3,01	3,04	3,01	0,05	3,00	3,10	2,91	3,10	3,03	0,09
5k	2,46	2,50	2,54	2,53	2,51	0,04	2,56	2,47	2,46	2,63	2,53	0,08

Quadro 5.2 – Diferenças entre os valores do tempo de reverberação (*TR*) com as bilhas abertas (*A*) e fechadas (*F*), nos pontos *A*, *B*, *C* e *D* (valores com fundo verde na média indicam valores negativos, logo

TR: Diferenças (A-F)					
Freq. (Hz)	A	B	C	D	Média (s)
100	-0,89	0,13	0,25	-0,02	-0,13
125	-0,92	0,06	-0,65	-0,86	-0,59
160	0,44	0,80	-0,55	-0,60	0,02
200	-0,88	0,14	-0,19	-0,32	-0,31
250	-0,92	-0,58	-0,04	-0,65	-0,55
315	-0,52	0,28	-0,07	0,10	-0,05
400	0,52	-0,50	0,02	0,08	0,03
500	0,15	0,25	0,20	-0,03	0,14
630	0,34	0,00	-0,16	0,05	0,06
800	-0,16	0,54	-0,26	-0,04	0,02
1k	-0,01	-0,09	-0,11	0,19	0,00
1,25k	0,11	0,02	0,18	-0,14	0,04
1,6k	-0,07	-0,10	0,04	0,02	-0,03
2k	0,03	0,03	0,10	0,16	0,08
2,5k	-0,08	0,03	0,13	-0,03	0,01
3,15k	0,00	0,07	0,05	-0,13	0,00
4k	-0,06	-0,05	0,10	-0,06	-0,02
5k	-0,10	0,03	0,08	-0,10	-0,02
Média das diferenças em cada ponto					

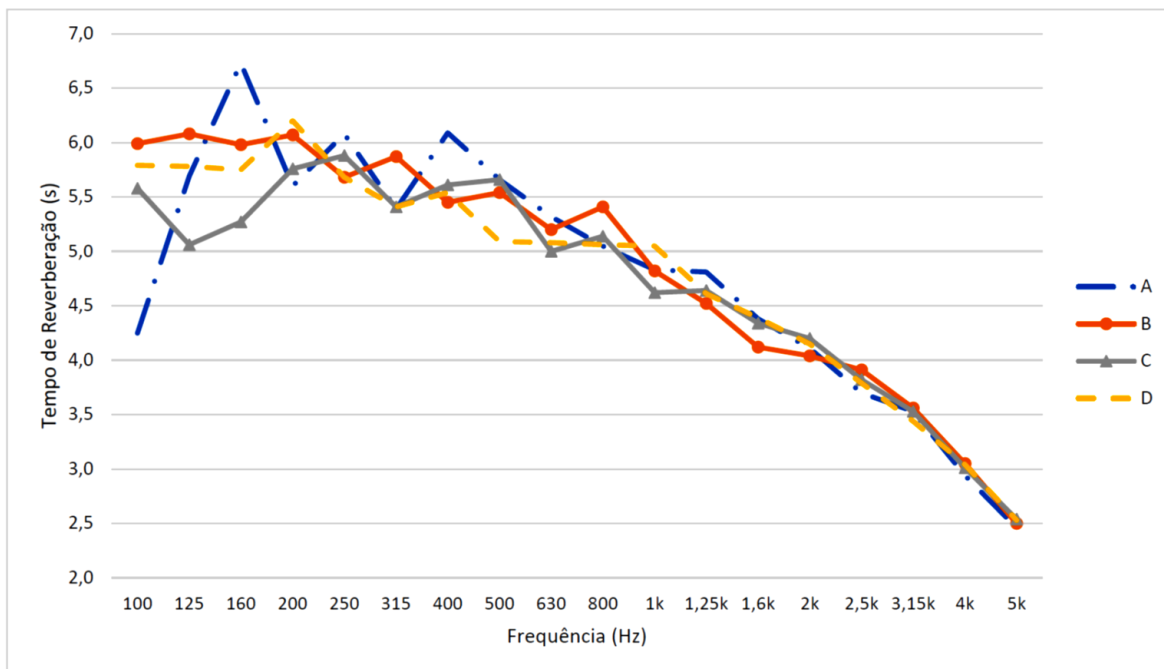


Fig. 5.8 – Valores dos valores do *TR* com as bilhas *abertas*, nos cantos (A, B, C e D) da Sinagoga de Tomar.

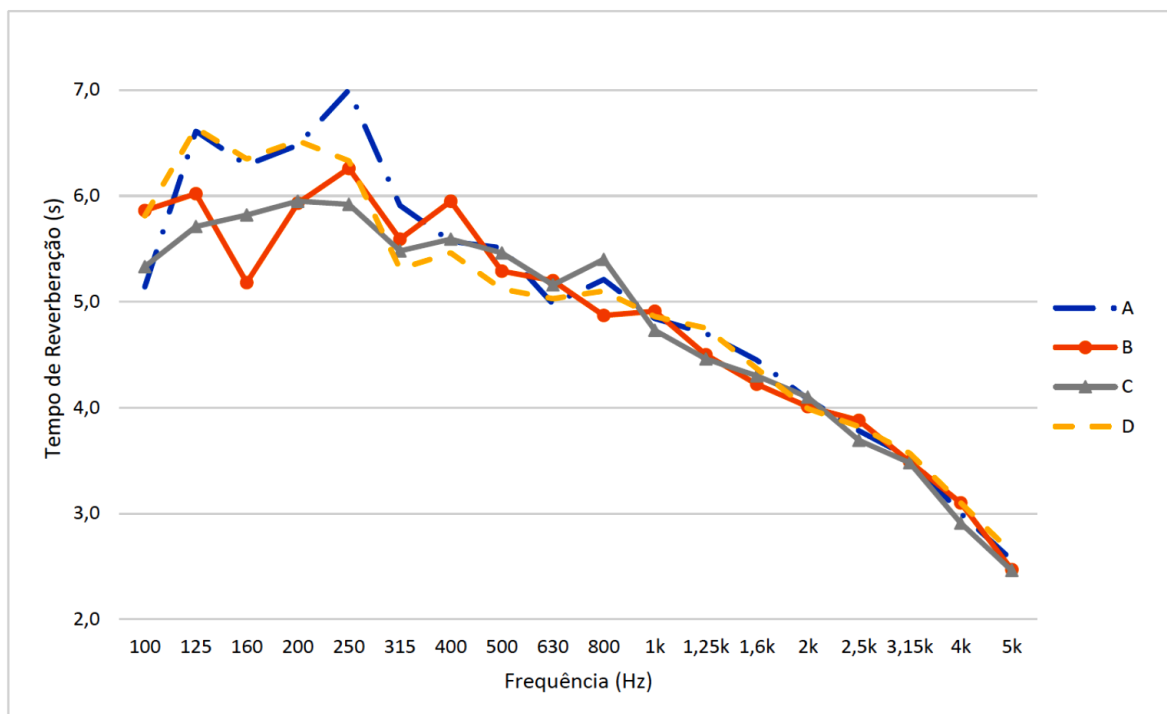


Fig. 5.9 – Valores dos valores do *TR* com as bilhas *fechadas*, nos cantos (A, B, C e D) da Sinagoga de Tomar.

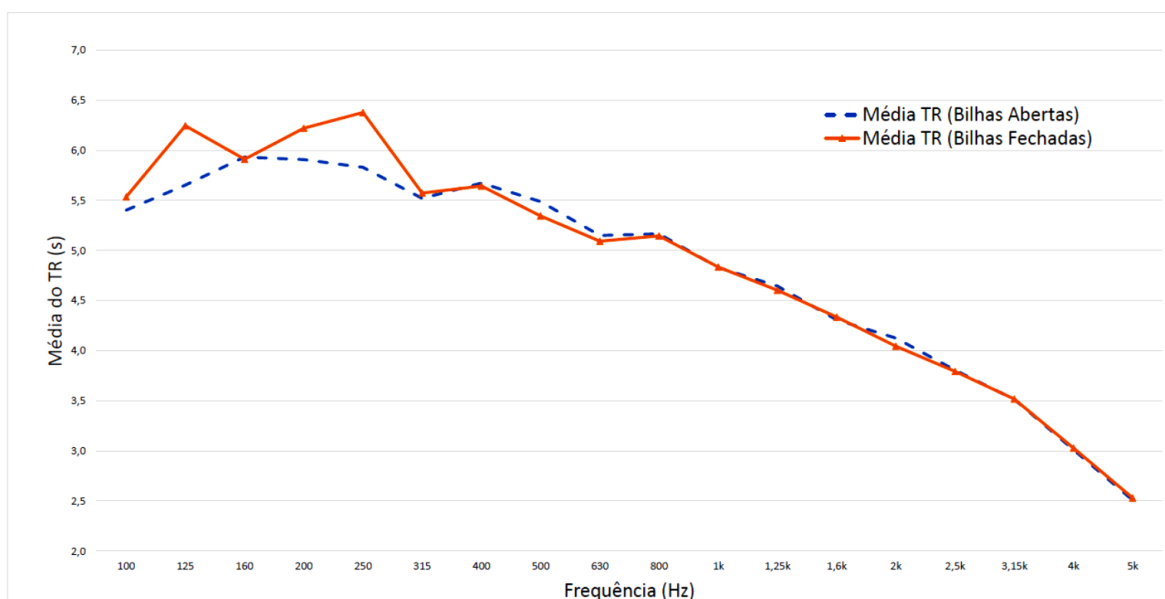


Fig. 5.10 – Média dos valores do *TR* com as bilhas *abertas* e *fechadas*, nos quatro cantos (A, B, C e D) da Sinagoga de Tomar.

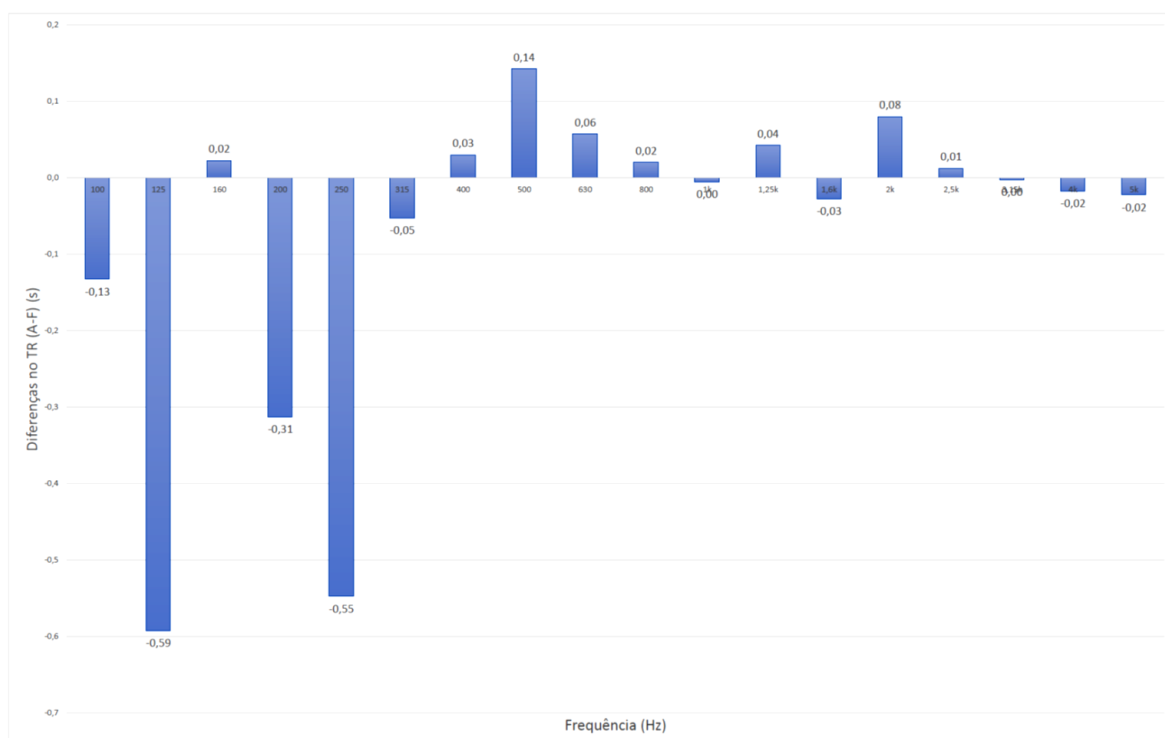


Fig. 5.11 – Diferença média dos valores do *TR* com as bilhas *abertas* e *fechadas*, nos quatro cantos (A, B, C e D) da Sinagoga de Tomar.

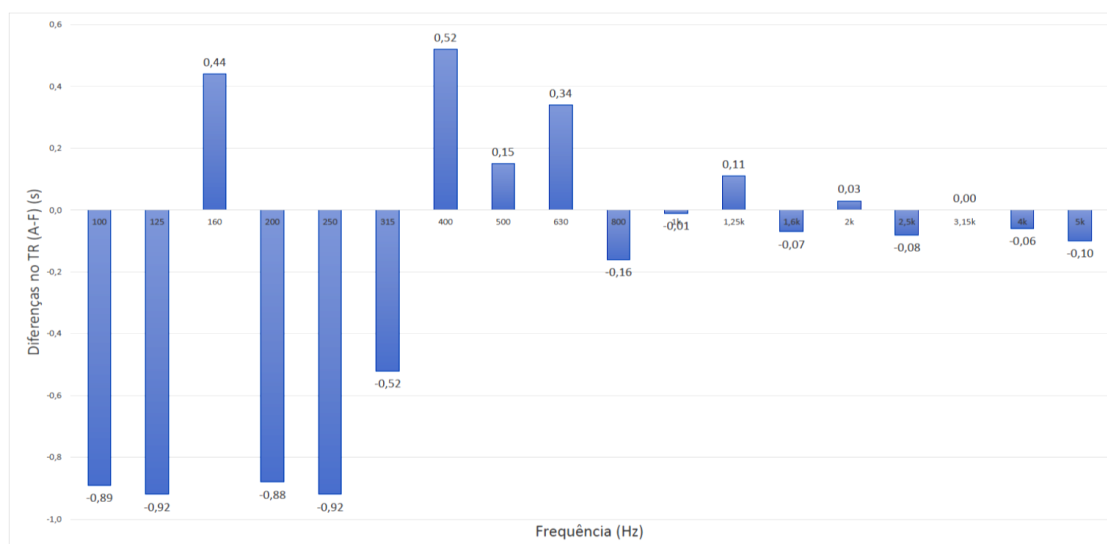


Fig. 5.12 – Diferenças dos valores de TR com as bilhas *abertas* (A) e *fechadas* (F), no canto A da Sinagoga de Tomar.

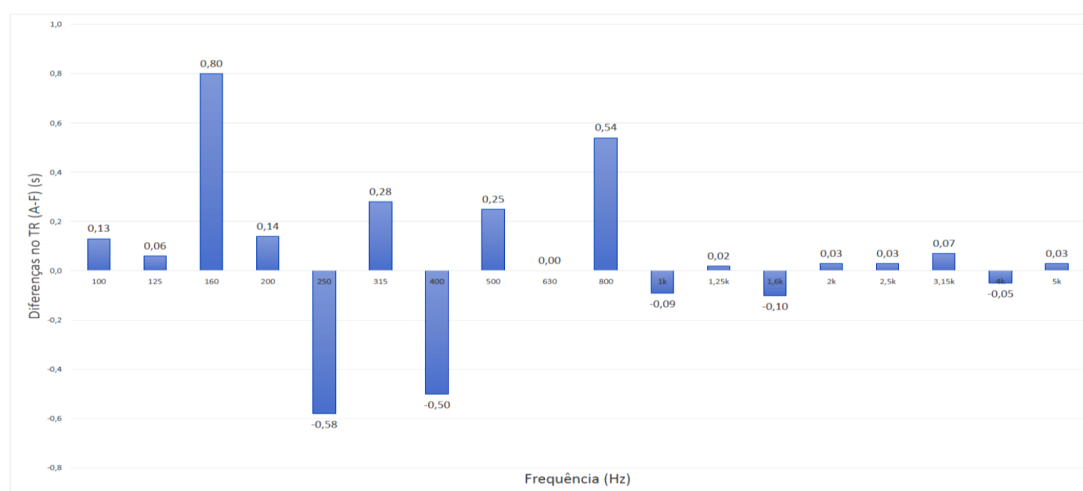


Fig. 5.13 – Diferenças dos valores de TR com as bilhas *abertas* (A) e *fechadas* (F), no canto B da Sinagoga de Tomar.

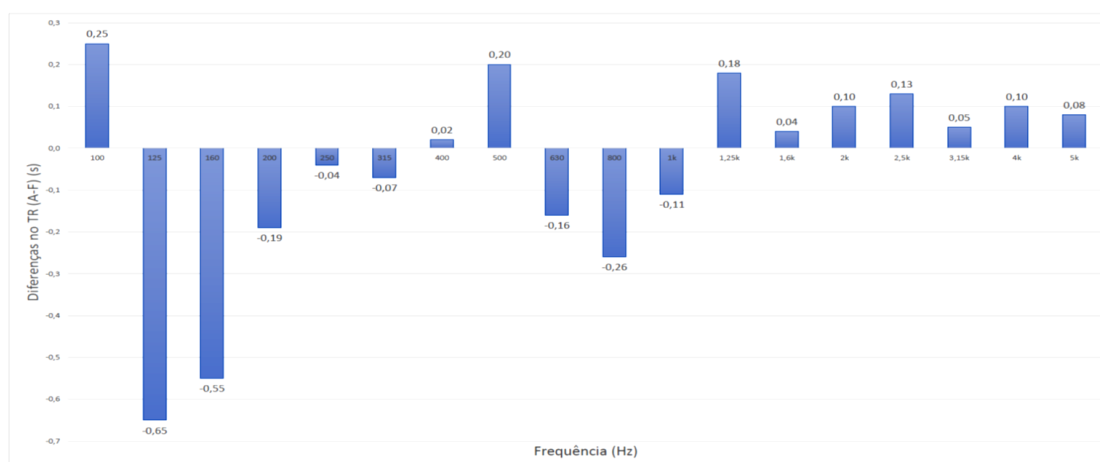


Fig. 5.14 – Diferenças dos valores de TR com as bilhas *abertas* (A) e *fechadas* (F), no canto C da Sinagoga de Tomar.

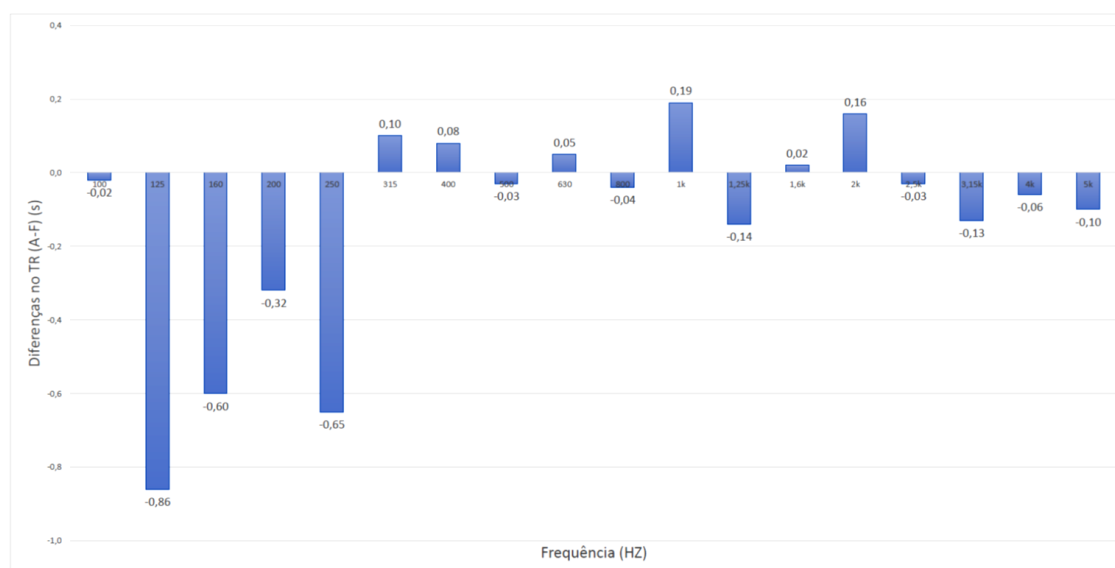


Fig. 5.15 – Diferenças dos valores de *TR* com as bilhas *abertas* (A) e *fechadas* (F), no canto D da Sinagoga de Tomar.

5.3.1.2. *TR* no interior da sala da Sinagoga de Tomar: pontos 1, 2 e 3.

Entre as localizações 1, 2 e 3 os valores do *TR* tendem a ser maiores nas baixas frequências e mais baixos nas altas frequências. O valor máximo do *TR* foi de 7,09 s para a banda de frequências dos 125 Hz obtido no ponto 3 com as bilhas *fechadas*. O valor mínimo do *TR* foi de 2,46 s para a banda de frequências dos 5 kHz obtido no ponto 3 com as bilhas *fechadas* (Quadro 5.3).

Os valores médios do *TR* tendem a decrescer após a banda de frequências dos 400 Hz, iniciando com valores próximos dos 6 s e atingindo os valores mínimos nas altas frequências (Figura 5.18).

Com as bilhas *fechadas*, em bandas de frequência acima dos 250 Hz, o *TR* assume valores semelhantes em todos os pontos da sala, de valores tendencialmente decrescentes desde os aproximadamente 6 s (Figura 5.17). Com as bilhas *destapadas*, em frequências acima dos 200 Hz, o *TR* assume valores semelhantes em todos os pontos da sala, de valores tendencialmente decrescentes desde os aproximadamente 6 s (Figura 5.16).

A variabilidade dos valores obtidos para cada banda de frequência, entre os diferentes pontos de medição na sala, pode ser quantificada pelo valor do desvio padrão das medições. Sem a oclusão das bilhas, a menor variabilidade dos valores entre as leituras na sala (valores muito aproximados do *TR*) ocorre na banda de frequência dos 5 kHz com um desvio padrão de 0,02 e a maior variabilidade ocorre na banda de frequência dos 160 Hz com um desvio padrão de 0,97. Com a oclusão das bilhas, a menor variabilidade dos valores entre as leituras na sala (valores muito aproximados do *TR*) ocorre na banda de frequências dos 3,15 kHz com um desvio padrão de 0,01 e a maior variabilidade ocorre na banda de frequências dos 100 Hz com um desvio padrão de 0,94 (Quadro 5.3).

O efeito mais “benéfico” obtido pela abertura das bilhas (diferença negativa) encontra-se na banda de frequência dos 100 e 125 Hz, com uma diminuição média de 0,57 e 0,50 s, respetivamente, no *TR* (Figura 5.19). O efeito mais “prejudicial” obtido pela abertura das bilhas (diferença positiva) encontra-se na banda de frequências dos 160 Hz, com um aumento médio de 0,28 s, no *TR* (Figura 5.19).

Todos os pontos 1, 2 e 3 da sala apresentam resultados médios “benéficos” dos valores do *TR* pela abertura das bilhas acústicas, com uma descida em 0,20 s, 0,02 s e 0,12 s, respetivamente (Quadro 5.4).

Quadro 5.3 – Valores registados para o *TR* na sala, com a abertura e oclusão das bilhas acústicas, assim como o valor da média e desvio padrão das leituras (assinalados a fundo vermelho e verde os valores máximos e mínimos em cada situação – oclusão ou não das bilhas – e também em relação à média de cada frequência e desvio padrão).

Freq. (Hz)	TR - Bilhas Abertas (s)					TR - Bilhas Fechadas (s)				
	1	2	3	Média (s)	Desvio Padrão (s)	1	2	3	Média (s)	Desvio Padrão (s)
100	5,68	5,11	5,28	5,36	0,29	5,93	4,99	6,87	5,93	0,94
125	5,12	5,79	6,27	5,73	0,58	5,49	6,11	7,09	6,23	0,81
160	4,98	5,89	6,91	5,93	0,97	5,79	5,11	6,04	5,65	0,48
200	5,72	6,10	5,90	5,91	0,19	6,99	6,09	5,78	6,29	0,63
250	5,54	5,75	5,64	5,64	0,11	5,89	6,12	5,98	6,00	0,12
315	5,45	5,47	5,85	5,59	0,23	5,53	5,86	5,75	5,71	0,17
400	5,92	5,76	5,72	5,80	0,11	5,90	5,76	5,89	5,85	0,08
500	5,63	5,66	5,42	5,57	0,13	5,63	5,61	5,58	5,61	0,03
630	4,83	5,29	5,25	5,12	0,25	5,09	5,44	5,22	5,25	0,18
800	4,94	5,00	4,93	4,96	0,04	5,01	5,25	4,98	5,08	0,15
1k	4,79	4,77	4,69	4,75	0,05	4,83	4,86	4,80	4,83	0,03
1,25k	4,48	4,63	4,54	4,55	0,08	4,53	4,47	4,73	4,58	0,14
1,6k	4,28	4,39	4,17	4,28	0,11	4,25	4,38	4,27	4,30	0,07
2k	4,06	4,12	4,05	4,08	0,04	4,12	4,07	3,93	4,04	0,10
2,5k	3,76	3,80	3,75	3,77	0,03	3,89	3,85	3,77	3,84	0,06
3,15k	3,41	3,54	3,53	3,49	0,07	3,44	3,44	3,43	3,44	0,01
4k	3,05	2,98	2,97	3,00	0,04	2,97	3,07	3,01	3,02	0,05
5k	2,58	2,61	2,58	2,59	0,02	2,55	2,54	2,46	2,52	0,05

Quadro 5.4 – Diferenças entre os valores do *TR* com as bilhas abertas (A) e fechadas (F), nos pontos 1, 2 e 3 (valores com fundo verde na média indicam valores negativos, logo benéficos).

TR: Diferenças (A-F)				
Freq. (Hz)	1	2	3	Média (s)
100	-0,25	0,12	-1,59	-0,57
125	-0,37	-0,32	-0,82	-0,50
160	-0,81	0,78	0,87	0,28
200	-1,27	0,01	0,12	-0,38
250	-0,35	-0,37	-0,34	-0,35
315	-0,08	-0,39	0,10	-0,12
400	0,02	0,00	-0,17	-0,05
500	0,00	0,05	-0,16	-0,04
630	-0,26	-0,15	0,03	-0,13
800	-0,07	-0,25	-0,05	-0,12
1k	-0,04	-0,09	-0,11	-0,08
1,25k	-0,05	0,16	-0,19	-0,03
1,6k	0,03	0,01	-0,10	-0,02
2k	-0,06	0,05	0,12	0,04
2,5k	-0,13	-0,05	-0,02	-0,07
3,15k	-0,03	0,10	0,10	0,06
4k	0,08	-0,09	-0,04	-0,02
5k	0,03	0,07	0,12	0,07
Média das diferenças em cada ponto				
	-0,20	-0,02	-0,12	

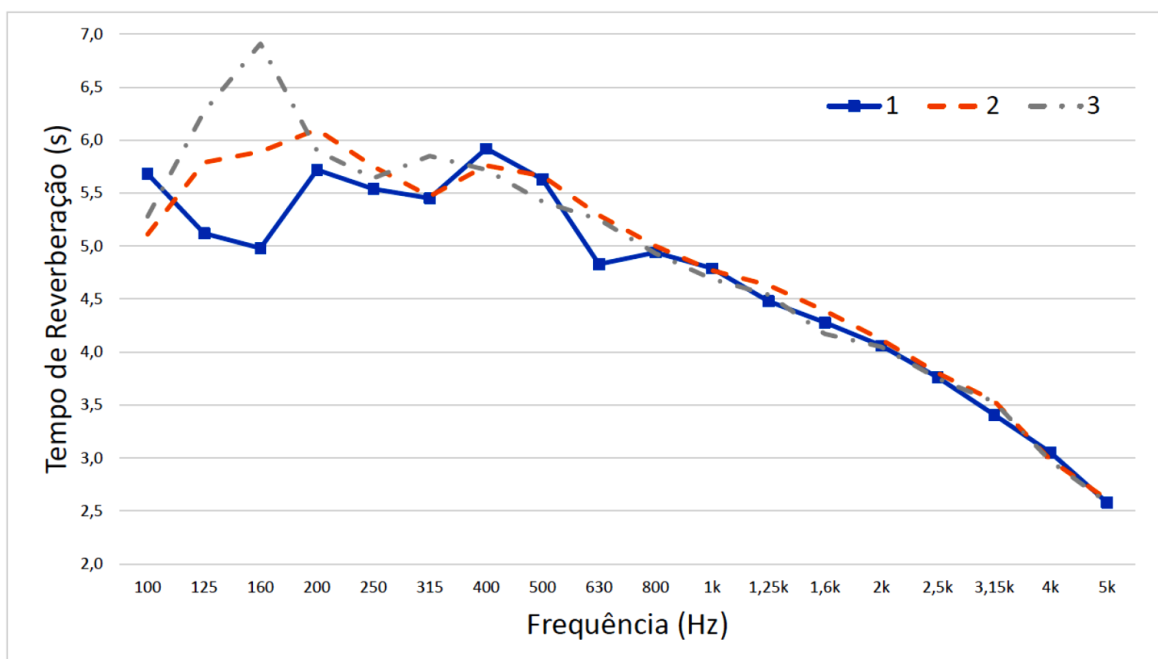


Fig. 5.16 – Valores do TR com as bilhas *abertas*, nos pontos da sala (1, 2 e 3) da Sinagoga de Tomar.

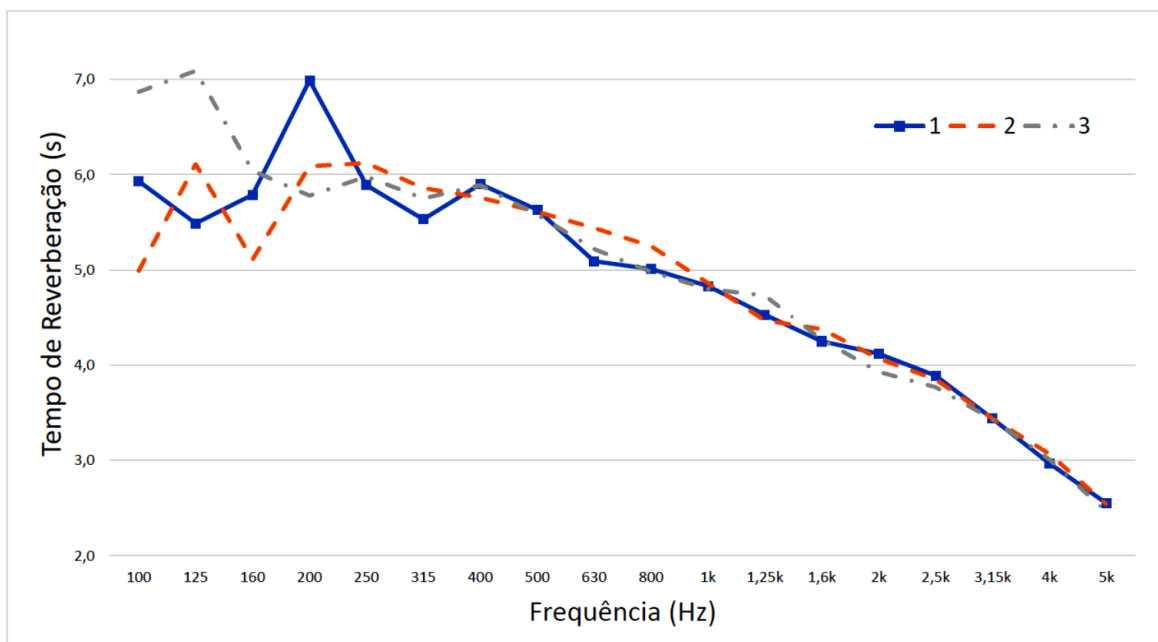


Fig. 5.17 – Valores do TR com as bilhas *fechadas*, nos pontos da sala (1, 2 e 3) da Sinagoga de Tomar.

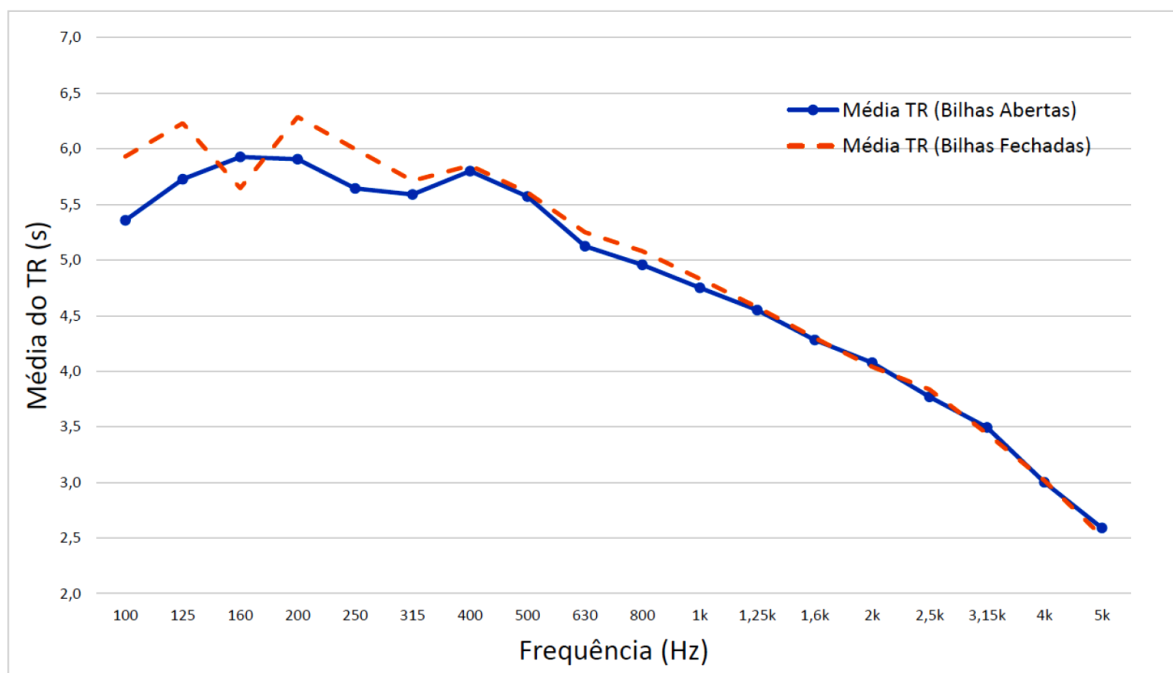


Fig. 5.18 – Média dos valores do *TR* com as bilhas *abertas* e *fechadas*, nos pontos da sala (1, 2 e 3) da Sinagoga de Tomar.

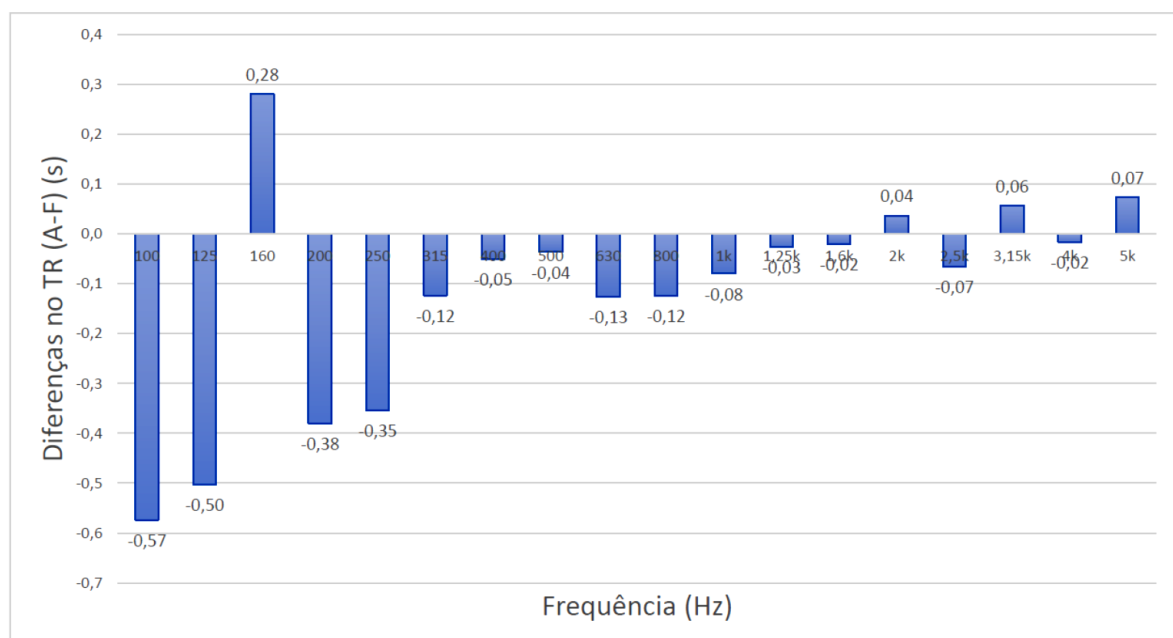


Fig. 5.19 – Diferença média dos valores do *TR* com as bilhas *abertas* (A) e *fechadas* (F), nos pontos da sala (1, 2 e 3) da Sinagoga de Tomar.

As diferenças encontradas nos valores do TR , em cada ponto da sala, no que respeita à influência da abertura das bilhas (Figuras 5.20 a 5.22), demonstram que:

- No ponto 1 a maioria dos registos aponta para uma diminuição do valor de TR , cujo maior valor ocorre na banda dos 200 Hz, numa redução de 1,27 s;
- No ponto 2 observa-se um destacamento para o aumento de 0,78 s do valor do TR na banda dos 160 Hz. As reduções são ligeiras com valores nunca superiores a 0,39 s;
- No ponto 3 observa-se uma expressiva diminuição do TR , na banda dos 100 Hz em 1,59 s, mas na banda dos 160 Hz registou-se um aumento de 0,87 s.

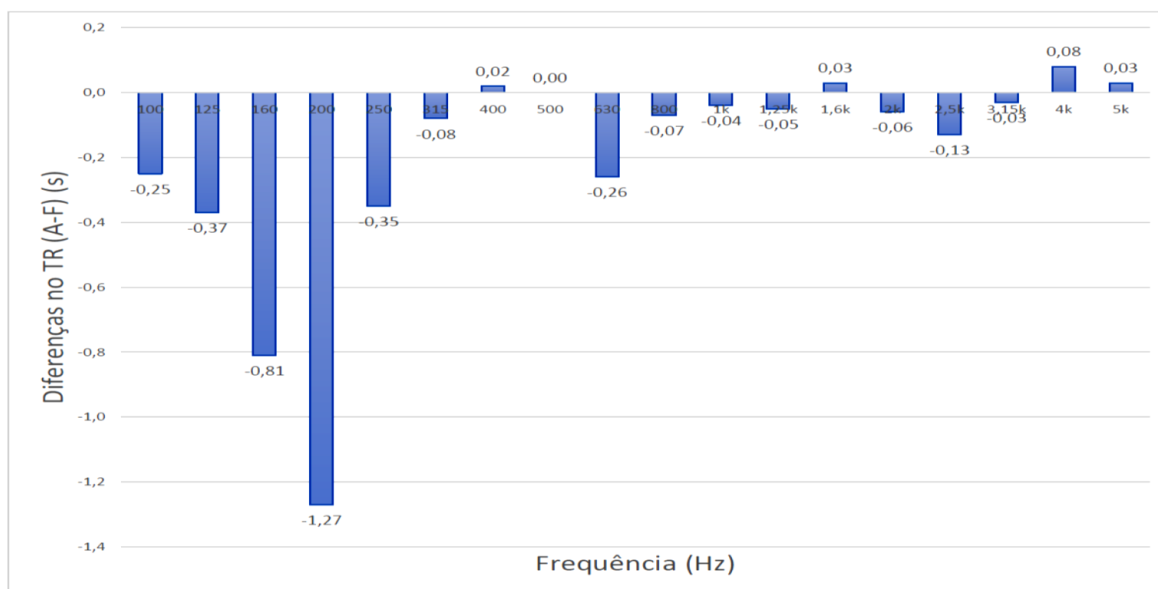


Fig. 5.20 – Diferenças dos valores de TR com as bilhas *abertas* (A) e *fechadas* (F), no ponto 1 da Sinagoga de Tomar.

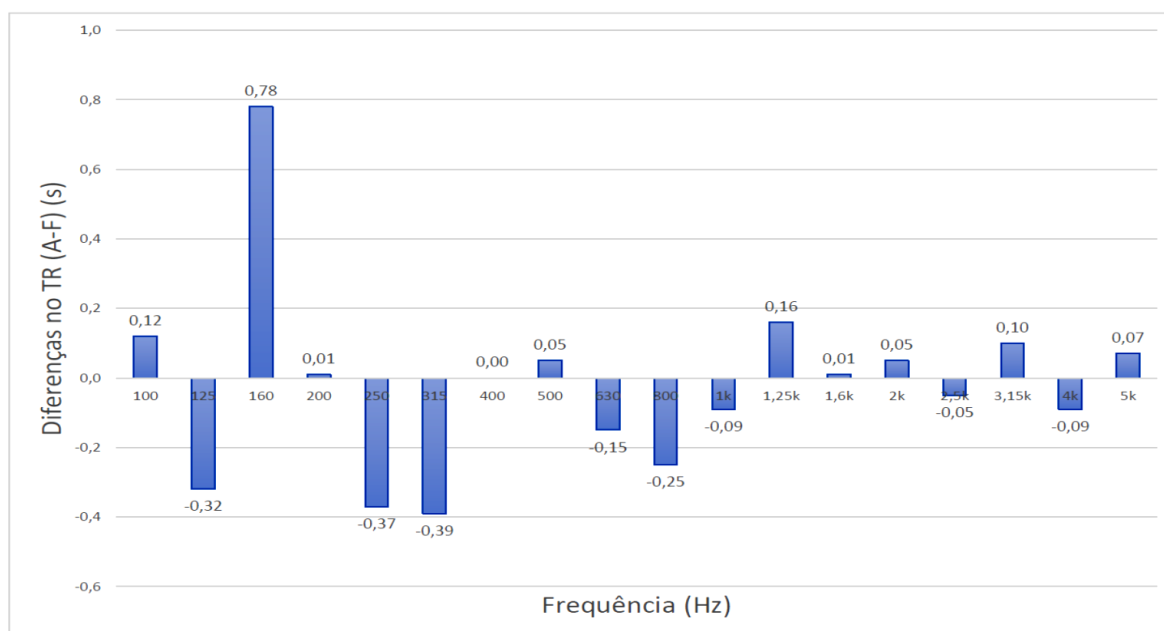


Fig. 5.21 – Diferenças dos valores de TR com as bilhas *abertas* (A) e *fechadas* (F), no ponto 2 da Sinagoga de Tomar.

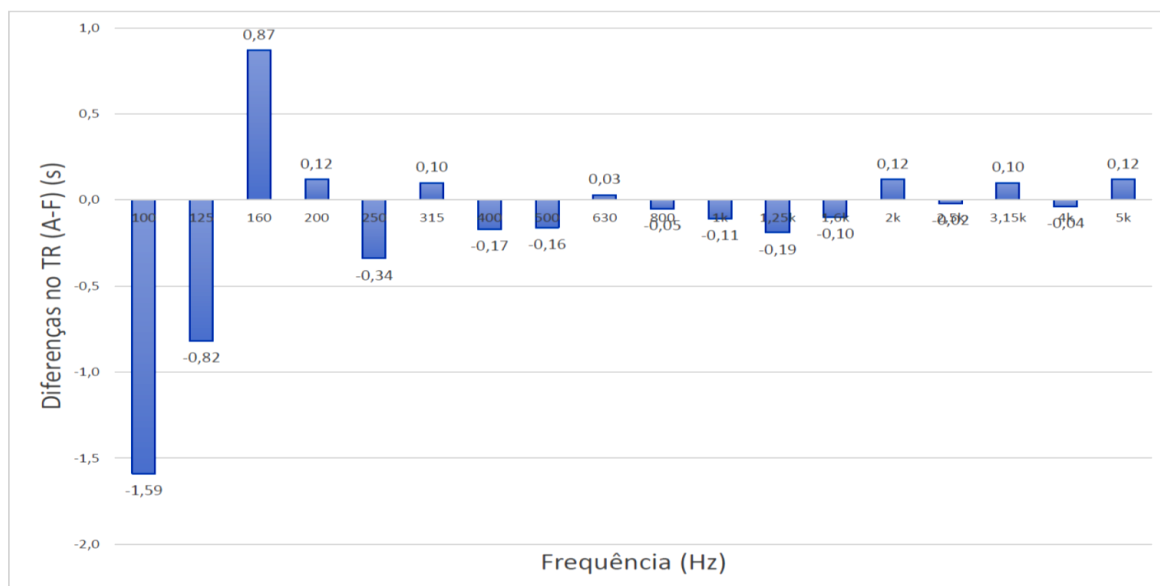


Fig. 5.22 – Diferenças dos valores de *TR* com as bilhas *abertas* (A) e *fechadas* (F), no ponto 3 da Sinagoga de Tomar.

5.3.1.3. TR no conjunto de todos os pontos de medição na sala da Sinagoga de Tomar (localizações A, B, C, D, 1, 2 e 3)

A média da diferença de valores do *TR*, com relação à abertura e oclusão das bilhas acústicas em todos os sete pontos de medição efetuados na Sinagoga de Tomar, apresenta valores mais expressivos para as baixas frequências. Destacam-se as reduções verificadas nas bandas de frequência dos 125 e 250 Hz, com diminuições médias no *TR* de 0,55 e 0,46 s, respetivamente. A eficácia das bilhas acústicas não se verifica em algumas bandas de frequências, mas os valores médios do aumento do *TR* não são superiores a 0,13 s (Figura 5.23).

Os valores médios globais apresentam um aumento do *TR* nas baixas frequências e, depois, uma diminuição tendencial para as altas frequências. Os valores médios mínimos são de aproximadamente 2,50 s e os valores médios máximos são de aproximadamente 6,20 s (Figura 5.24).

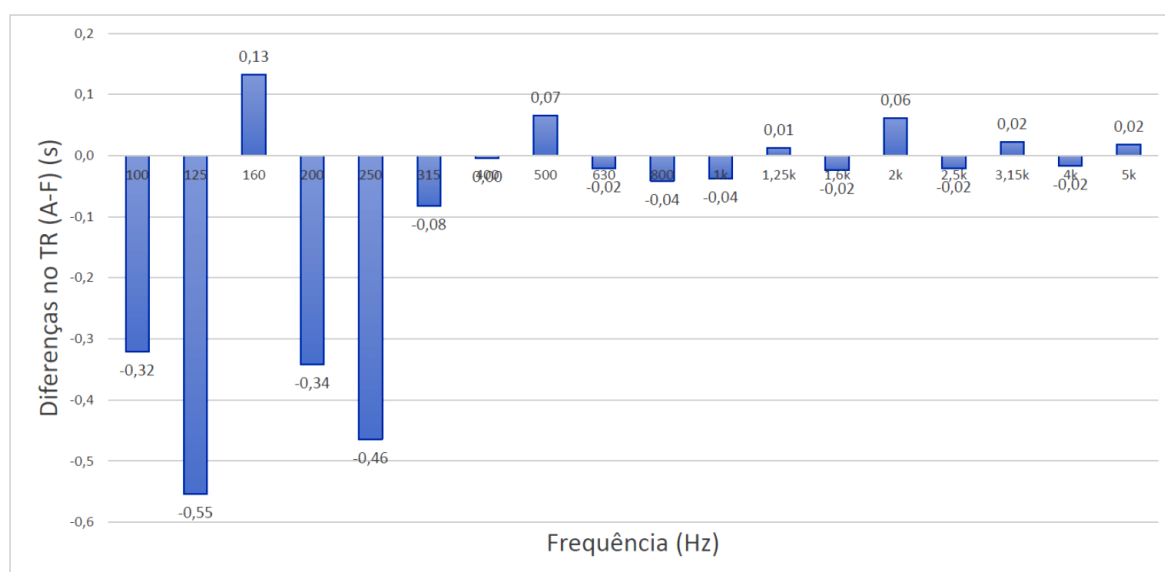


Fig. 5.23 – Diferenças médias dos valores de *TR* com as bilhas *abertas* (A) e *fechadas* (F), em todos os pontos da Sinagoga de Tomar.

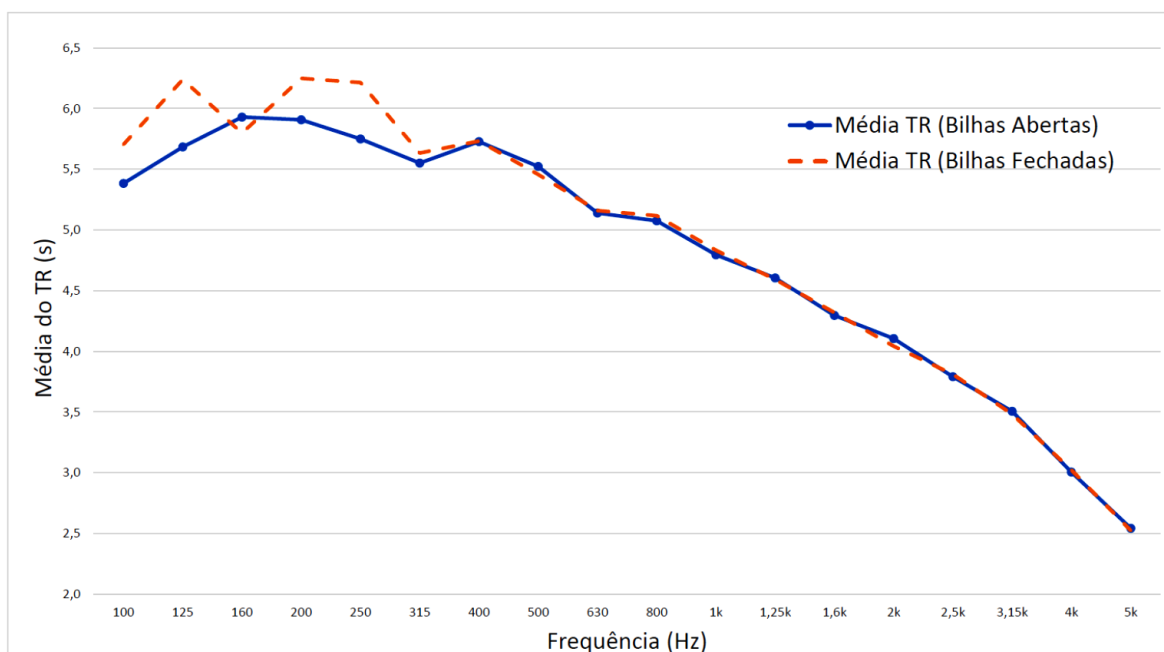


Fig. 5.24 – Valores médios globais (todos os 7 pontos) do *TR*, com as bilhas *abertas* e *fechadas*, na Sinagoga de Tomar.

5.3.2. RASTI

Os resultados das medições do *RASTI* (valor numérico entre 0 e 1) dentro da Sinagoga de Tomar são os apresentados no Quadro 5.5 e avaliam o nível de degradação do sinal entre a fonte sonora e os vários pontos medidos (o ponto 2 encontrava-se atrás de um pilar de pedra).

Quadro 5.5 – Valores do *RASTI* nos seis pontos de leitura (1, 2, 3, 4, 5 e 6) ao longo da sala da Sinagoga de Tomar (ver localização dos pontos na Figura 5.5).

Zona	PONTOS	1ª medição	2ª medição	3ª medição	Média	Média por zona	Média global
Frente	1	0,56	0,56	0,57	0,56	0,45	0,39
	2*	0,33	0,34	0,33	0,33		
Centro	3	0,43	0,44	0,44	0,44	0,41	
	4	0,38	0,37	0,38	0,38		
Fundo	5	0,35	0,34	0,34	0,34	0,32	
	6	0,30	0,31	0,30	0,30		

Tal como se pode verificar pelos dados do Quadro 5.5, a média dos valores do *RASTI* é de 0,39. Na zona frontal o valor é maior (0,45) e na zona posterior o valor é menor (0,32).

De entre todos os pontos medidos, o ponto 6 é o que apresenta a menor média das leituras com 0,30. O ponto 1, localizado mesmo em frente à fonte sonora, é o que apresenta o maior valor de *RASTI*, com uma média de 0,56. Apenas o ponto 1 e o ponto 3 se encontram acima da média global (Figura 5.25).

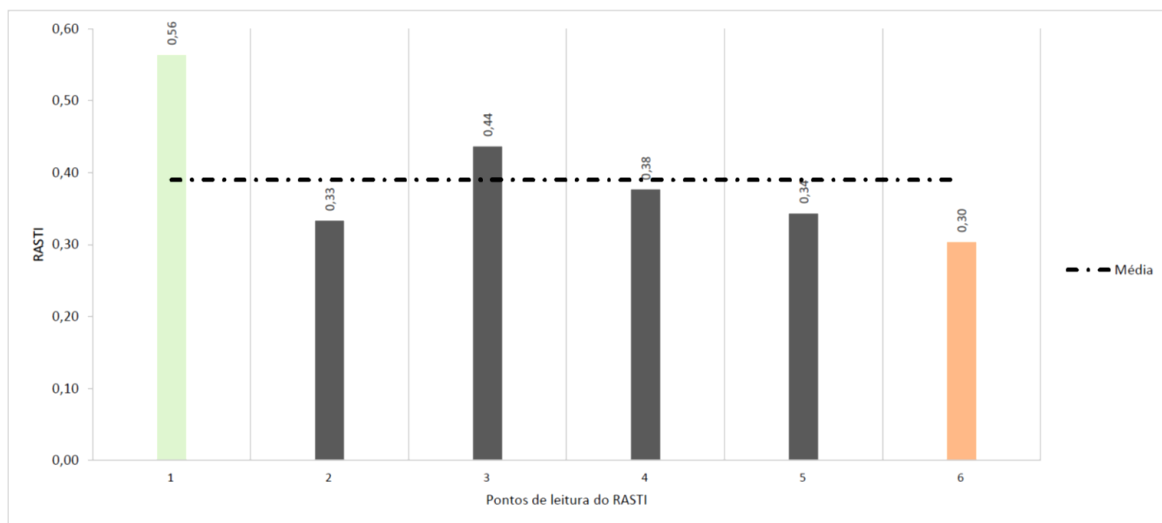


Fig. 5.25 – Valores médios do *RASTI* nos seis pontos de leitura (1, 2, 3, 4, 5 e 6) ao longo da sala da Sinagoga de Tomar, assim como a média global das leituras (linha de cor preta a tracejado/ponto).

Na Figura 5.26 encontram-se esquematizadas as linhas de igual valor de *RASTI* na sala de culto da Sinagoga de Tomar, na qual se pode verificar que apenas a zona imediatamente em torno da fonte sonora tem níveis de inteligibilidade *suficiente*. Todas as outras são *mediócras*.



Fig. 5.26 – Linhas de igual valor de *RASTI*, na sala de culto da Sinagoga de Tomar (a verde as linhas com inteligibilidade acima de *suficiente* e a vermelho as linhas com inteligibilidade *mediocre*).

5.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

5.4.1. ANÁLISE DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO NA SINAGOGA DE TOMAR

Os valores do *TR* medidos na Sinagoga de Tomar indicam que, de uma forma global, as bilhas acústicas existentes são eficazes na redução numérica deste parâmetro. Com valores médios globais no espaço interior da sala de culto (abrangendo todas as frequências) de 4,89 s com as bilhas tapadas e de 4,80 s com as bilhas abertas, o *TR* apresenta uma redução média global no local de 0,09 s o que se traduz numa diminuição de 1,4% (Quadro 5.6).

Em termos de frequência verifica-se uma favorável redução dos valores de *TR* em praticamente todas as bandas de frequência, exceto para os 160, 500, 1250, 2000, 3150 e 5000 Hz. De assinalar as maiores reduções na banda dos 125 Hz (de 0,55 s, ou cerca de 9%) e na dos 250 Hz (de 0,46 s, ou cerca de 8%) (Quadro 5.6).

As bilhas acústicas existentes na Sinagoga de Tomar são, tal como se foi referenciando ao longo deste trabalho, ressoadores de cavidade ou ressoadores de Helmholtz, cuja frequência de eficácia máxima (frequência de ressonância) é dada pela equação 2.24. No Quadro 4.2 apresentam-se os valores estimados destas frequências para cada bilha existente e pode verificar-se que os valores estão compreendidos entre os 100 e os 200 Hz (nenhum deles coincidente com os 160 Hz que, de acordo com os registos e cálculos apresentados no Quadro 5.6, é uma das bandas de frequências na qual não se verifica um decréscimo do *TR* aquando da abertura das bilhas acústicas). Confrontando estes dados teóricos com as diferenças encontradas *in situ* para estas frequências no valor do *TR* medido (apresentadas no Quadro 5.6) é possível afirmar que são dados coerentes com as medições realizadas.

Quadro 5.6 – Diferenças entre os valores do *TR* com as bilhas *abertas* (A) e *fechadas* (F), em todos os pontos de medição, incluindo a média das diferenças em cada ponto, a média por frequência, a percentagem de variação e também a média global das alterações registadas (valores com fundo verde na média indicam valores negativos, logo benéficos).

	TR: Diferenças (A-F)								
Freq. (Hz)	A	B	C	D	1	2	3	Média (s)	%
100	-0,89	0,13	0,25	-0,02	-0,25	0,12	-1,59	-0,32	-5,6
125	-0,92	0,06	-0,65	-0,86	-0,37	-0,32	-0,82	-0,55	-8,9
160	0,44	0,80	-0,55	-0,60	-0,81	0,78	0,87	0,13	2,3
200	-0,88	0,14	-0,19	-0,32	-1,27	0,01	0,12	-0,34	-5,5
250	-0,92	-0,58	-0,04	-0,65	-0,35	-0,37	-0,34	-0,46	-7,5
315	-0,52	0,28	-0,07	0,10	-0,08	-0,39	0,10	-0,08	-1,5
400	0,52	-0,50	0,02	0,08	0,02	0,00	-0,17	0,00	-0,1
500	0,15	0,25	0,20	-0,03	0,00	0,05	-0,16	0,07	1,2
630	0,34	0,00	-0,16	0,05	-0,26	-0,15	0,03	-0,02	-0,4
800	-0,16	0,54	-0,26	-0,04	-0,07	-0,25	-0,05	-0,04	-0,8
1k	-0,01	-0,09	-0,11	0,19	-0,04	-0,09	-0,11	-0,04	-0,8
1,25k	0,11	0,02	0,18	-0,14	-0,05	0,16	-0,19	0,01	0,3
1,6k	-0,07	-0,10	0,04	0,02	0,03	0,01	-0,10	-0,02	-0,6
2k	0,03	0,03	0,10	0,16	-0,06	0,05	0,12	0,06	1,5
2,5k	-0,08	0,03	0,13	-0,03	-0,13	-0,05	-0,02	-0,02	-0,6
3,15k	0,00	0,07	0,05	-0,13	-0,03	0,10	0,10	0,02	0,7
4k	-0,06	-0,05	0,10	-0,06	0,08	-0,09	-0,04	-0,02	-0,6
5k	-0,10	0,03	0,08	-0,10	0,03	0,07	0,12	0,02	0,7
	-0,17	0,06	-0,05	-0,13	-0,20	-0,02	-0,12	-0,09	-1,4
Média das diferenças em cada ponto								Média global	

Em termos globais, esta redução é mais significativa no ponto de leitura *A*, com um decréscimo de 0,17 s no *TR* médio de todas as frequências medidas. É também assinalável que apenas no ponto de leitura *B* se regista uma média total que não comprova a eficácia favorável das bilhas acústicas, com um aumento de 0,06 s no *TR* após abertura das mesmas. Estes resultados não são justificados pelas características e localização dos vasos existentes nestes locais (locais *A* e *B* simétricos em relação à fonte e os mais próximos da fonte, ligeiramente atrás do ponto de emissão. Ver Figura 5.1). Note-se que, no canto *A* existem os vasos n.ºs 2 e 3, com um volume conjunto de aproximadamente 15,12 cm³ e localizados a uma altura média de aproximadamente 4,15 m. No canto *B* existem os vasos n.ºs 1 e 8, com um volume conjunto de aproximadamente 20,71 cm³ e localizados a uma altura média de aproximadamente 4,40 m. Apesar dos volumes serem um pouco diferentes, este facto não justifica os resultados obtidos visto que nos outros pontos situados mais próximos dos cantos onde estão as bilhas acústicas (*C* e *D*) o volume conjunto dos vasos aí existentes é de 19,79 cm³ e 19,21 cm³ (valores muito semelhantes aos dos vasos existentes no ponto *B*), respetivamente, e nestes (*C* e *D*) verificam-se reduções no *TR* global.

Ainda em relação aos valores determinados nos cantos da sala de culto, verifica-se que são os pontos *A* e *D* os que apresentam as maiores reduções no valor de *TR*. Estes pontos são os mais próximos da saída da sala, onde se encontra a porta de madeira e as janelas que comunicam com a rua exterior, podendo influenciar nestes resultados (colocando em causa a concordância simétrica dos pontos de leitura de acordo com a planta praticamente simétrica da sala de culto da Sinagoga de Tomar).

No ponto *C* as bilhas acústicas encontram-se a uma altura um pouco superior às restantes, no valor de aproximadamente 5,30 m (praticamente 1,0 m acima das restantes). Apesar de se ter registado uma redução média global (englobando todas as frequências) no valor de *TR* neste ponto, este é bastante reduzido em relação aos observados nos outros pontos de leitura dos cantos onde se comprova a eficácia acústica dos vasos.

Nos pontos situados no centro da sala (pontos de leitura 1, 2 e 3 cf. Figura 5.1) observa-se uma redução do valor de *TR* aquando da abertura dos vasos acústicos, comprovando também a sua eficácia. O ponto localizado em 1, com uma redução de 0,20 s no *TR* médio, contradiz os resultados obtidos no ponto *B* (atrás mencionado) por se encontrar também muito próximo deste ponto e dos vasos existentes neste canto (bilhas n.ºs 1 e 8).

O volume da sala de oração da Sinagoga de Tomar é de aproximadamente 473 m³ e a sua superfície interior é de aproximadamente 400 m² (considerando um acréscimo de cerca de 30% no teto para ter em conta as abóbadas existentes e os pilares da sala). A previsão matemática simplificada do coeficiente de absorção médio da sala de culto da Sinagoga de Tomar pode ser obtida pela fórmula de Sabine (equação 2.23).

Com a oclusão das bilhas acústicas (e tendo em conta o valor de 4,89 s para o *TR* médio global da sala):

$$T = \frac{0,16V}{A} \leftrightarrow 4,89 = \frac{0,16 \times 473}{\alpha \times 400} \leftrightarrow \alpha = \frac{0,16 \times 473}{4,89 \times 400} \leftrightarrow \alpha = 0,0387$$

Sem a oclusão das bilhas acústicas (e tendo em conta o valor de 4,80 s para o *TR* global da sala):

$$T = \frac{0,16V}{A} \leftrightarrow 4,80 = \frac{0,16 \times 473}{\alpha \times 400} \leftrightarrow \alpha = \frac{0,16 \times 473}{4,80 \times 400} \leftrightarrow \alpha = 0,0394$$

Obtém-se, assim, um aumento de 0,0007 ou cerca de 2% no coeficiente de absorção sonora global da sala de culto pela “ação” das bilhas acústicas. Dados todos os arredondamentos, imprecisões dos algoritmos e fórmulas nos cálculos, tanto para os valores referentes ao espaço como a própria fórmula de Sabine, este pequeno aumento não parece ter fundamentos sólidos que possam validar inequivocamente a sua significância.

Uma análise em frequência (Quadro 5.7) permite evidenciar em que banda se verificam as maiores variações no coeficiente de absorção médio da sala de culto da Sinagoga de Tomar. Tal como esperado, os maiores valores de *TR* implicam os menores coeficientes de absorção e estes estão maioritariamente concentrados nas baixas frequências. No entanto, apesar dos menores valores deste coeficiente, é nas baixas frequências que se evidenciam as maiores variações, com subidas que chegam a atingir os 10% (na banda de frequências dos 125 Hz cf. Quadro 5.7). Nas altas frequências a variação é insignificante, com alguns registos de diminuições no coeficiente de absorção médio (ver Figura 5.27).

Quadro 5.7 – Cálculo do coeficiente de absorção médio (de acordo com a equação de Sabine), por frequência, nas situações em que as bilhas se encontram *abertas* e *fechadas*, assim como a variação observada no seu valor (tanto em valor absoluto como relativo). A gradação de cor indica a verde os maiores valores (a negrito) e a vermelho os valores mais

Freq. (Hz)	Bilhas Abertas		Bilhas Fechadas		Variação do Coef. Absorção	
	TR Médio (s)	Coeficiente de Absorção médio	TR Médio (s)	Coeficiente de Absorção médio	Diferença absoluta	Diferença relativa
100	5,38	0,035	5,70	0,033	0,0020	6%
125	5,68	0,033	6,24	0,030	0,0030	10%
160	5,93	0,032	5,80	0,033	-0,0007	-2%
200	5,91	0,032	6,25	0,030	0,0018	6%
250	5,75	0,033	6,21	0,030	0,0025	8%
315	5,55	0,034	5,63	0,034	0,0005	1%
400	5,73	0,033	5,73	0,033	0,0000	0%
500	5,52	0,034	5,46	0,035	-0,0004	-1%
630	5,14	0,037	5,16	0,037	0,0002	0%
800	5,08	0,037	5,12	0,037	0,0003	1%
1k	4,80	0,039	4,83	0,039	0,0003	1%
1,25k	4,60	0,041	4,59	0,041	-0,0001	0%
1,6k	4,30	0,044	4,32	0,044	0,0002	1%
2k	4,10	0,046	4,04	0,047	-0,0007	-1%
2,5k	3,79	0,050	3,81	0,050	0,0003	1%
3,15k	3,51	0,054	3,48	0,054	-0,0004	-1%
4k	3,01	0,063	3,02	0,063	0,0004	1%
5k	2,54	0,074	2,52	0,075	-0,0005	-1%

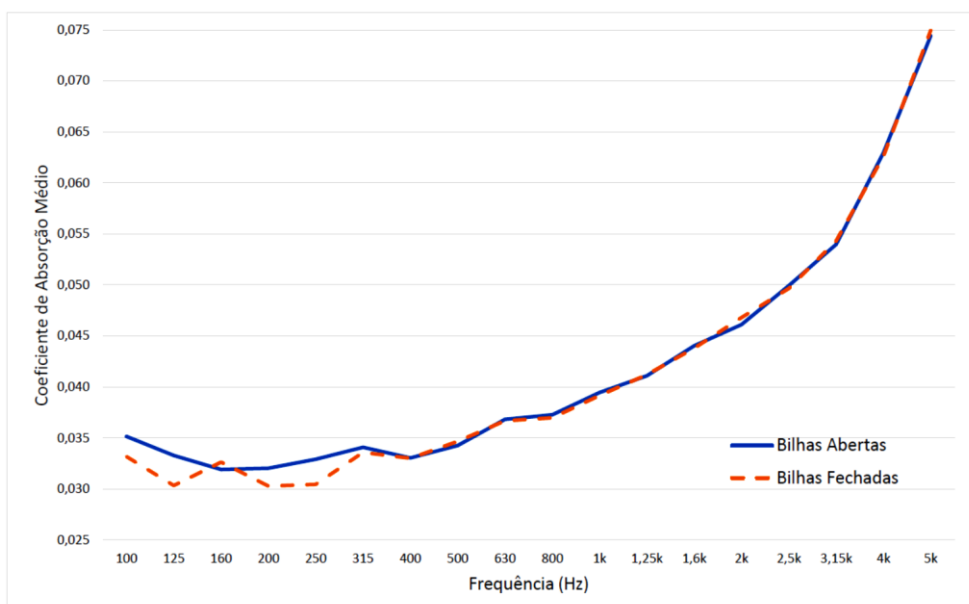


Fig. 5.27 – Coeficiente de absorção sonora médio, a linha azul na situação em que as bilhas se encontravam *abertas* e a linha tracejada vermelha na situação em que as bilhas se encontravam *fechadas*.

Os valores obtidos para o *TR* da sala de culto da Sinagoga de Tomar (médias globais do local de 4,89 s com as bilhas tapadas e de 4,80 s com as bilhas abertas) só por si não ditam a qualidade deste local, a não ser que se saiba o propósito da sua utilização. Sabe-se que nas sinagogas não se ouvia música e, por isso, seria a palavra a principal razão das melhorias acústicas aplicadas. Um valor de tempo de reverberação excessivo reduz a inteligibilidade da palavra, pois o rasto deixado por vogais pode suplantar totalmente as consoantes imediatamente seguintes de uma palavra. Seria, então, importante que o *TR* fosse baixo para que exista uma boa inteligibilidade da palavra.

Com registos médios *in situ* de quase 5 s (medições com a sala praticamente vazia), este local não apresenta características que permitam uma boa compreensão da palavra proferida pelos oradores. Estes valores (tão elevados) podem ser explicados pelo facto de que as superfícies interiores da sala são compostas maioritariamente por materiais muito refletivos do som (granito, argamassa pintada, etc.).

Embora que, com a ocupação de pessoas (suponha-se 20 pessoas na sala de culto) e com as bilhas abertas, o valor de *TR* baixaria, com reduções que poderiam atingir os 2,29 s (cerca de 40%) na banda de oitava de frequência dos 500 Hz (ver Quadro 5.8, valores calculados com base na fórmula de Sabine e absorção localizada das pessoas [1]). Seria expectável, de acordo com esta previsão, que a lotação do local nos dias de oração teria levado a uma melhoria destes valores e, consequentemente, uma melhor compreensão da palavra.

Numa perspetiva de análise comparativa entre a influência das bilhas acústicas numa sala com cerca de 20 pessoas e, num raciocínio semelhante ao apresentado no Quadro 5.8, estimou-se a variação nos valores de *TR* com a ocupação, mas com os valores referentes à oclusão das bilhas (Quadro 5.9). Voltam-se a obter resultados muito semelhantes aos obtidos com as bilhas *abertas* e que apontam para reduções que atingem os 2,29 s (cerca de 40%) na banda de oitava de frequência dos 500 Hz (ver Quadro 5.9, valores calculados com base na fórmula de Sabine e absorção localizada das pessoas [1]).

Quadro 5.8 – Análise em frequência das alterações estimadas no valor de tempo de reverberação, com as bilhas *abertas*, pela existência de cerca de 20 pessoas em pé na sala de culto da Sinagoga de Tomar. Valores da absorção localizada de acordo com [1] e cálculos de acordo com a fórmula de Sabine. Gradação de cor para as variações relativas no tempo de reverberação, onde o verde indica as maiores reduções e o amarelo as reduções mais baixas.

Freq. (Hz)	Pessoa em pé	Bilhas Abertas					
	Absorção localizada	TR Médio Inicial (Tri) (s)	Absorção Sonora Equivalente Inicial (m ²)	Absorção Sonora Equivalente Final (m ²)	TR Médio Final (TRf) (s)	Variação (TRf-Tri) (s)	Diferença relativa (TRf-Tri)/Tri
100	0,19	5,38	14,1	17,9	4,24	-1,15	-21%
125		5,68	13,3	17,1	4,42	-1,26	-22%
160		5,93	12,8	16,6	4,57	-1,36	-23%
200	0,33	5,91	12,8	19,4	3,90	-2,01	-34%
250		5,75	13,2	19,8	3,83	-1,92	-33%
315		5,55	13,6	20,2	3,74	-1,81	-33%
400	0,44	5,73	13,2	22,0	3,44	-2,29	-40%
500		5,52	13,7	22,5	3,36	-2,16	-39%
630		5,14	14,7	23,5	3,22	-1,92	-37%
800	0,42	5,08	14,9	23,3	3,25	-1,83	-36%
1k		4,80	15,8	24,2	3,13	-1,67	-35%
1,25k		4,60	16,4	24,8	3,05	-1,56	-34%
1,6k	0,46	4,30	17,6	26,8	2,82	-1,47	-34%
2k		4,10	18,4	27,6	2,74	-1,37	-33%
2,5k		3,79	20,0	29,2	2,59	-1,20	-32%
3,15k	0,37	3,51	21,6	29,0	2,61	-0,89	-26%
4k		3,01	25,2	32,6	2,32	-0,68	-23%
5k		2,54	29,8	37,2	2,04	-0,51	-20%

Quadro 5.9 – Análise em frequência das alterações estimadas no valor de tempo de reverberação, com as bilhas *fechadas*, pela existência de cerca de 20 pessoas em pé na sala de culto da Sinagoga de Tomar. Valores da absorção localizada de acordo com [1] e cálculos de acordo com a fórmula de Sabine. Gradação de cor para as variações relativas no tempo de reverberação, onde o verde indica as maiores reduções e o amarelo as reduções mais baixas.

Freq. (Hz)	Pessoa em pé	Bilhas Fechadas					
	Absorção localizada	TR Médio Inicial (Tri) (s)	Absorção Sonora Equivalente Inicial (m ²)	Absorção Sonora Equivalente Final (m ²)	TR Médio Final (TRf) (s)	Varição (TRf-Tri) (s)	Diferença relativa (TRf-Tri)/Tri
100	0,19	5,70	13,3	17,1	4,43	-1,27	-22%
125		6,24	12,1	15,9	4,75	-1,49	-24%
160		5,80	13,1	16,9	4,49	-1,31	-23%
200	0,33	6,25	12,1	18,7	4,04	-2,20	-35%
250		6,21	12,2	18,8	4,03	-2,18	-35%
315		5,63	13,4	20,0	3,78	-1,86	-33%
400	0,44	5,73	13,2	22,0	3,44	-2,29	-40%
500		5,46	13,9	22,7	3,34	-2,12	-39%
630		5,16	14,7	23,5	3,23	-1,94	-38%
800	0,42	5,12	14,8	23,2	3,26	-1,85	-36%
1k		4,83	15,7	24,1	3,15	-1,69	-35%
1,25k		4,59	16,5	24,9	3,04	-1,55	-34%
1,6k	0,46	4,32	17,5	26,7	2,83	-1,49	-34%
2k		4,04	18,7	27,9	2,71	-1,33	-33%
2,5k		3,81	19,9	29,1	2,60	-1,21	-32%
3,15k	0,37	3,48	21,7	29,1	2,60	-0,88	-25%
4k		3,02	25,0	32,4	2,33	-0,69	-23%
5k		2,52	30,0	37,4	2,02	-0,50	-20%

Desta forma, e numa tentativa de análise mais realista com a ocupação da sala de culto da Sinagoga de Tomar, é possível verificar que as bilhas acústicas são mais eficazes nas baixas frequências, principalmente até aos 250 Hz (com a exceção da banda dos 160 Hz, tal como anteriormente assinalado). De assinalar as reduções nas bandas dos 125 Hz (de 0,33 s ou cerca de 7%) e na dos 250 Hz (de 0,20 s ou cerca de 4%). Nas altas frequências, as reduções não são significativas (Quadro 5.10).

Quadro 5.10 – Análise em frequência das alterações estimadas no valor de tempo de reverberação, pela diferença obtida entre as bilhas *abertas* e *fechadas*, na hipótese da existência de cerca de 20 pessoas em pé na sala de culto da Sinagoga de Tomar. Valores da absorção localizada de acordo com [1] e cálculos de acordo com a fórmula de Sabine. Gradação de cor para as variações relativas no tempo de reverberação, onde o verde indica as maiores reduções, o amarelo as menores reduções e o vermelho indica aumentos no tempo de reverberação.

Freq. (Hz)	Pessoa em pé	Bilhas Fechadas	Bilhas Abertas	Variação	
	Absorção localizada	TR Médio Final (TRfF) (s)	TR Médio Final (TRfA) (s)	Diferença Absoluta (TRfA - TRfF) (s)	Diferença relativa (TRfA - TRfF)/TRfF (s)
100	0,19	4,43	4,24	-0,20	-4%
125		4,75	4,42	-0,33	-7%
160		4,49	4,57	0,08	2%
200	0,33	4,04	3,90	-0,15	-4%
250		4,03	3,83	-0,20	-5%
315		3,78	3,74	-0,04	-1%
400	0,44	3,44	3,44	0,00	0%
500		3,34	3,36	0,02	1%
630		3,23	3,22	-0,01	0%
800	0,42	3,26	3,25	-0,02	-1%
1k		3,15	3,13	-0,02	-1%
1,25k		3,04	3,05	0,01	0%
1,6k	0,46	2,83	2,82	-0,01	0%
2k		2,71	2,74	0,03	1%
2,5k		2,60	2,59	-0,01	0%
3,15k	0,37	2,60	2,61	0,01	0%
4k		2,33	2,32	-0,01	0%
5k		2,02	2,04	0,01	1%

Estes dados mostram que a lotação da sala de culto da Sinagoga de Tomar (numa hipótese de existirem cerca de 20 pessoas no seu interior) diminui a “eficácia” das bilhas acústicas na redução do valor de *TR*. Com a sala vazia, a eficácia máxima apontaria para uma redução de 0,55 s (rondaria os 9%) na banda dos 125 Hz, enquanto que com a lotação da sala de culto a eficácia máxima seria uma redução de cerca de 0,33 s (rondaria os 7%) na banda dos 125 Hz (ver Quadro 5.10 e Figura 5.28).

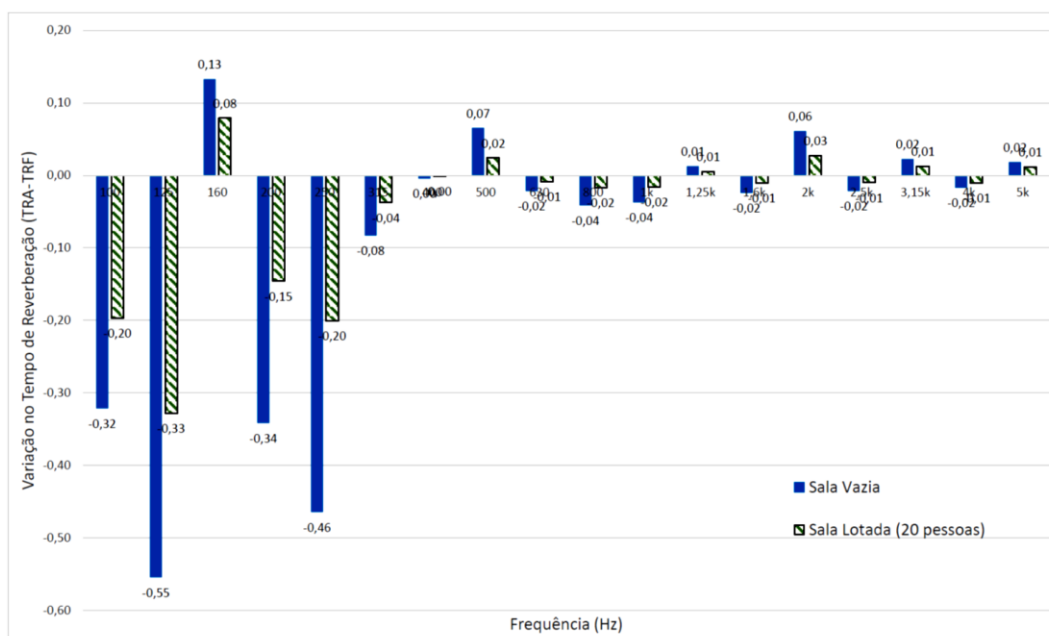


Fig. 5.28 – Variação no tempo de reverberação (diferença dos valores do *TR* quando das bilhas abertas e fechadas) nas situações em que a medição foi realizada com a sala vazia (barras a azul preenchido) e na estimativa de cálculo para a sala ocupada com 20 pessoas (barras a verde listado).

A análise comparativa dos resultados aqui obtidos para os valores do *TR* com outros estudos, realizados em outras sinagogas, demonstra que:

- Os estudos realizados por Desarnaulds *et al.* [15] na igreja de Villette (Suíça) não apresentam dados que indiquem reduções significativas no *TR* quando da abertura dos vasos acústicos (em comparação com a situação em que se encontram *fechados*). Loerincik [11] também não conseguiu comprovar a eficácia dos vasos acústicos existentes pois os valores registados nos ensaios não mostraram nenhuma diferença entre ter os vasos abertos ou ocluídos. Na Sinagoga de Tomar verifica-se alguma eficácia dos vasos acústicos, atingindo reduções máximas de 9% (diminuição máxima de 0,55 s), o que contraria a ineficácia dos vasos acústicos apresentada nos estudos realizados por Desarnaulds *et al.* [15];
- Na igreja de Syens (Suíça), Desarnaulds *et al.* [15] não registaram praticamente nenhuma alteração nos valores do *TR* quando os vasos foram *fechados*. Loerincik [11] também não registou nenhuma diferença entre vasos *abertos* e *fechados*.

5.4.2. ANÁLISE DO RASTI NA SINAGOGA DE TOMAR

A inteligibilidade da palavra na sala de culto da Sinagoga de Tomar foi avaliada pela medição do *RASTI*, com as bilhas acústicas abertas. Neste trabalho não se apresentam os resultados dos ensaios do *RASTI* com as bilhas tapadas porque, após várias medições nos pontos centrais da sala de culto (pontos 3 e 5)

com tempos de medição de 8 s, não se verificaram diferenças significativas dos valores. Nem mesmo em medições com o tempo máximo de avaliação do *RASTI*, que são os 32 s.

Este método objetivo (*RASTI*) deriva da degradação do sinal medido e inclui automaticamente o efeito da reverberação e do ruído de fundo.

Para se obter uma inteligibilidade no mínimo de *suficiente*, seria expectável que o *RASTI* medido fosse superior a 0,45.

No entanto, os registos indicam que apenas a zona frontal, mais próxima da fonte sonora, apresenta uma média de 0,45 o que a coloca no limite entre o *mediocre* e o *suficiente*. No ponto 1, colocado mesmo em frente à fonte sonora, o *RASTI* é de 0,56 com uma *suficiente* inteligibilidade da palavra (Figura 5.29).

No geral, a sala de culto da Sinagoga de Tomar apresenta uma inteligibilidade *mediocre*, não satisfazendo os valores mínimos ideais para a função (Figura 5.29).

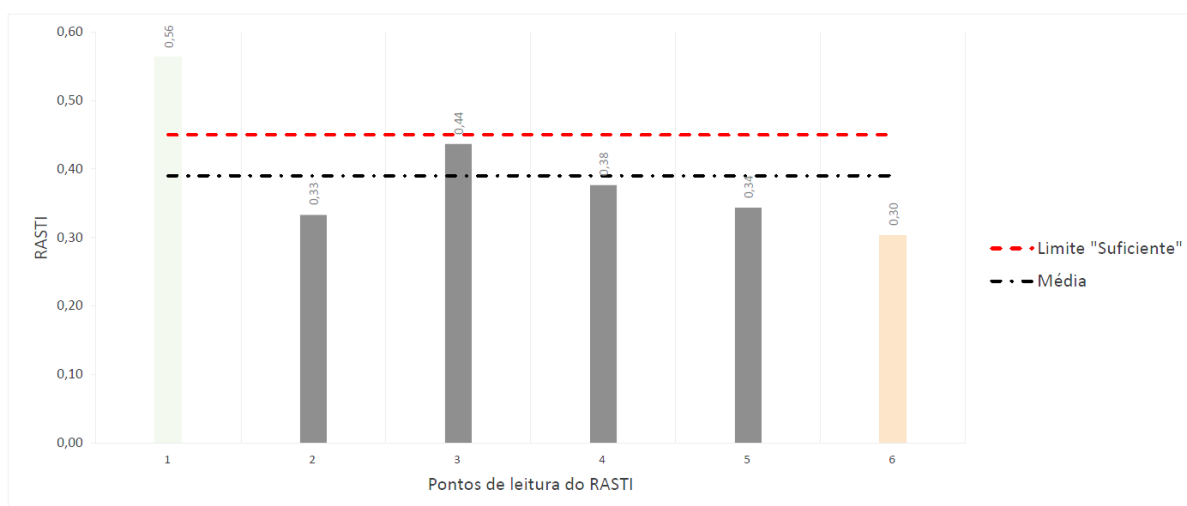


Fig. 5. 29 – Valores médios do *RASTI* nos seis pontos de leitura (1, 2, 3, 4, 5 e 6) ao longo da sala da Sinagoga de Tomar, assim como a média global das leituras (linha de cor preta a tracejado/ponto) e o limite da inteligibilidade *suficiente* (linha de cor vermelho a tracejado).

A análise comparativa dos resultados aqui obtidos para os valores do *RASTI* com outros estudos, realizados em outras sinagogas, demonstra que:

- Os estudos realizados na igreja de Villette (Suíça) por Loerincik [11] apontam para valores de *RASTI* superiores a 0,33 e com máximo de 0,59. Na comparação entre a abertura e oclusão dos vasos, os dados indicam que, em média, os vasos abertos prejudicam o valor do *RASTI* em 0,01 mas este valor é numericamente insignificante (a abertura ou oclusão dos vasos não altera significativamente o valor do *RASTI*). Estes valores são concordantes com os obtidos na Sinagoga de Tomar;
- Na igreja de Syens (Suíça), Loerincik [11] apresentou dados que indicam que os valores do *RASTI* não sofreram quase nenhuma alteração em vasos *fechados*.

6

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES

Este estudo apresenta dados que proporcionam a verificação da eficácia do uso de bilhas acústicas na sala de culto da Sinagoga de Tomar. Um trabalho realizado no único local de Portugal onde ainda existem hoje vasos acústicos que se encontram íntegros e embutidos (na posição invertida) na alvenaria deste antigo local de culto. Com origem arquitetónica nos finais do séc. XIV ou inícios do séc. XV, estes instrumentos acústicos foram muitas vezes considerados como eficazes na melhoria da qualidade acústica de um local.

Este estudo, a par de alguns outros que ao longo dos últimos anos foram realizados em outros países, são a base científica que permitem uma tentativa de resposta à pergunta:

- “As bilhas acústicas melhoram a qualidade sonora do local?”

Obter dados para uma possível resposta a esta pergunta é o objetivo principal deste projeto.

Os ensaios realizados permitiram a medição do tempo de reverberação com e sem a oclusão das oito bilhas acústicas existentes na sala de culto da Sinagoga de Tomar e comprovam alguma eficácia. Atenda-se a que este estudo não tem como principal objetivo a melhoria dos valores do tempo de reverberação deste local. O objeto central de estudo e análise é só o possível efeito que as bilhas acústicas produzem na acústica da sala de culto.

A oclusão experimental dos orifícios de acesso às bilhas acústicas foi conseguida com o uso de “tampas” em aglomerado negro de cortiça (com 30 mm de espessura e 100 kg/m³), cortados na medida certa, encrustados e revestidos pelo exterior a fita autocolante de folha de alumínio no sentido de neutralizar ou minimizar a absorção das ondas sonoras produzidas.

Em termos médios globais, considerando todas as frequências, o valor do tempo de reverberação da sala de culto (onde seria importante uma boa emissão e receção da palavra e não da música) é de 4,89 s com as bilhas tapadas e de 4,80 s com as bilhas abertas, muito superiores aos ideais que seriam inferiores a 1,5 s. Estes valores tão elevados têm um maior contributo nas baixas frequências e estão relacionados, principalmente, com os materiais refletivos constituintes dos elementos construtivos do espaço. As frequências muito altas são as que apresentam valores mais baixos (ainda assim superiores a 2,5 s) principalmente devido à absorção que o ar (volume) provoca nas altas frequências.

A redução média global nos valores do tempo de reverberação no local (média de todas as frequências e em todos os pontos da sala) foi de 0,09 s (ou 1,4%). Estes valores não traduzem a verdadeira eficácia das bilhas acústicas, a qual se evidenciou numa análise discriminada por bandas de frequência.

Numa análise por banda de frequências de 1/3 de oitava verifica-se uma redução dos valores de tempo de reverberação em praticamente todas as bandas exceto para as dos 160, 500, 1250, 2000, 3150 e 5000 Hz. De assinalar as maiores reduções na banda dos 125 Hz (de 0,55 s ou cerca de 9%) e na dos 250 Hz (de 0,46 s ou cerca de 8%).

As bilhas acústicas existentes na Sinagoga de Tomar são ressoadores de cavidade (ressoadores de Helmholtz). Calculadas as frequências de eficácia máxima (frequência de ressonância) verificou-se que os valores estão compreendidos entre os 100 e os 200 Hz (nenhum deles coincidente com os 160 Hz que, de acordo com os registos e cálculos apresentados, é uma das bandas de frequências na qual não se verifica um decréscimo do tempo de reverberação aquando da abertura das bilhas acústicas). Confrontando estes dados teóricos com as maiores diferenças encontradas *in situ* para estas frequências no valor do tempo de reverberação medido, é possível afirmar que são dados coerentes com as medições realizadas, ou seja, os maiores decréscimos nos valores do tempo de reverberação (numa análise por gama de terços de oitavos de frequência) estão associados às baixas frequências (as quais correspondem às frequências dos vasos acústicos existentes).

Ainda em relação aos valores determinados, nos cantos da sala de culto verifica-se que são os pontos *A* e *D* os que apresentam as maiores reduções no *TR*. Estes pontos são os mais próximos da saída da sala, onde se encontra a porta de madeira e as janelas que comunicam com a rua exterior, podendo influenciar nestes resultados (colocando em causa a concordância de simetria dos pontos de leitura de acordo com a planta praticamente simétrica (quadrada) da sala de culto da Sinagoga de Tomar).

No ponto *C* as bilhas acústicas encontram-se a uma altura um pouco superior às restantes, no valor de aproximadamente 5,30 m (praticamente 1,0 m acima das restantes). Apesar de se ter registado uma redução média global (englobando todas as frequências) no *TR* neste ponto, este valor é bastante reduzido em relação aos observados nos outros pontos de leitura dos cantos onde se comprova a eficácia acústica dos vasos.

Nos pontos situados no centro da sala (denominados por 1, 2 e 3) observa-se uma redução do valor de *TR* aquando da abertura dos vasos acústicos, comprovando também a sua eficácia. O ponto localizado em 1, com uma redução de 0,20 s no *TR médio*, contradiz os resultados obtidos no ponto *B* (atrás mencionado) por se encontrar também muito próximo deste ponto e dos vasos existentes neste canto (bilhas n.ºs 1 e 8).

O volume da sala de oração da Sinagoga de Tomar é de aproximadamente 473 m³ e a sua superfície interior é de aproximadamente 400 m² (considerando um acréscimo de cerca de 30% para ter em conta as abóbadas existentes no teto e os pilares da sala). A previsão matemática simplificada do coeficiente de absorção médio da sala de culto da Sinagoga de Tomar (obtida pela fórmula de Sabine) aponta para um aumento de cerca de 0,001 (ou 2%) no coeficiente de absorção sonora global da sala pela ação das bilhas acústicas. Dados todas as imprecisões e aproximações no algoritmo de cálculo este pequeno aumento não tem fundamentos sólidos que validem a sua significância.

Uma análise mais fina, por frequência, permite evidenciar em que banda se verificam as maiores variações no coeficiente de absorção médio da sala de culto da Sinagoga de Tomar. Nas baixas frequências obtiveram-se os menores coeficientes de absorção (aproximadamente 0,03 nas bandas dos 100 aos 400 Hz) e nas altas chegaram a atingir-se máximos de 0,07 (na banda dos 5 kHz). No entanto, apesar dos menores valores deste coeficiente, é nas baixas frequências que se evidenciam as maiores

variações pela abertura das bilhas acústicas, com subidas que chegam a atingir os 10% (variação de 0,003 na gama de frequências dos 125 Hz). Nas altas frequências a variação é insignificante.

Todos os registos até agora apresentados foram realizados com a sala praticamente vazia. Seria esta a realidade quando a sala de culto se encontrava lotada de pessoas para a oração, a situação mais realista e com mais interesse?

Para responder a esta questão simulou-se a existência de 20 pessoas na sala de culto. Calculou-se que com as bilhas *abertas* ou *fechadas*, o valor do tempo de reverberação tenderia a reduzir-se, no máximo, em cerca de 2,29 s (aproximadamente 40%) na banda de oitava de frequência dos 500 Hz. A comparação por banda de frequências entre as bilhas *abertas* e *fechadas*, numa sala lotada, afirma que as bilhas acústicas seriam mais eficazes nas baixas frequências, principalmente até aos 250 Hz (com a exceção da banda dos 160 Hz, tal como anteriormente assinalado). De assinalar as reduções na banda dos 125 Hz (de 0,33 s ou cerca de 7%) e na dos 250 Hz (de 0,20 s ou cerca de 4%). Nas altas frequências, as reduções não são significativas. Tal como o expectável e de acordo com esta previsão, a lotação do local nos dias de oração teria levado a uma melhoria dos valores do tempo de reverberação e, conseqüentemente, uma melhor compreensão da palavra. No entanto, estes dados não evidenciam a influência da lotação da sala na eficácia das bilhas acústicas.

A comparação entre a eficácia das bilhas acústicas em sala vazia e em sala lotada mostra que a lotação com pessoas da sala de culto da Sinagoga de Tomar diminui a eficácia relativa das bilhas acústicas na redução do tempo de reverberação. Com a sala vazia a redução máxima rondaria os 0,55 s (9%) na banda dos 125 Hz enquanto que com a lotação da sala de culto a redução máxima previsível rondaria os 0,33 s (7%) na banda dos 125 Hz.

De forma complementar, foram realizados ensaios de medição do *RASTI* (sem e com a oclusão das bilhas acústicas) e os valores (semelhantes nos dois casos) apontam para uma inteligibilidade na zona frontal (mais próxima da fonte sonora) com uma média de 0,45 o que a classifica no limite entre o *mediocre* e o *suficiente*. No geral, a sala de culto da Sinagoga de Tomar apresenta uma inteligibilidade *mediocre*, não satisfazendo os valores mínimos ideais (mínimos de 0,45 para uma inteligibilidade *suficiente*) e o efeito acústico das bilhas não é assinalável.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Sendo este um estudo sem precedentes em Portugal, pode tornar-se a base de futuros desenvolvimentos. As oito bilhas acústicas existentes na sala de culto da Sinagoga de Tomar são, indiscutivelmente, uma riqueza nacional e que merecem o seu devido valor. Antecedentes dos ressoadores de Helmholtz, estes ancestrais ainda se encontram íntegros e funcionais.

Trabalhos futuros deveriam incidir na medição de outros parâmetros acústicos (D_{50} , *STI*, etc.) dentro da sala de culto, com e sem oclusão das bilhas, e em muitos outros pontos (principalmente junto da porta e das janelas, no intuito de verificar a influência que a ligação estrutural ao exterior tem no tempo de reverberação e *RASTI*).

Por outro lado, e se fosse possível a sua reprodução ou aquisição de vasos semelhantes, efetuar a realização de ensaios em laboratório aos ditos vasos. Com as variáveis exteriores mais controladas e constantes, os valores obtidos seriam o mais aproximado possível das características dos vasos.

A medição da frequência de ressonância de cada vaso, *in situ*, seria também muito valioso, assim como a sua medição em ambiente laboratorial.

Se fosse possível, era muito interessante incluir no interior das bilhas acústicas material absorvente e verificar se os resultados apontariam para um alargamento em frequência da zona de eficácia (embora que com uma possível perda de amplitude de absorção).

Havendo também a possibilidade, o estudo seria ainda mais completo se fossem realizados ensaios *in situ* com a lotação controlada do local, por exemplo, com 10 pessoas, depois com 20 pessoas e até se atingir a lotação completa da sala de culto.

Por fim, sugere-se que sejam realizados estudos que permitam o aumento do número de bilhas acústicas na sala de culto, tanto nos cantos como variando a sua localização (como no chão ou em diferentes alturas, ao longo das paredes, alinhados ou não, etc.). Assim, seria possível determinar o número ideal de vasos existentes para que a qualidade acústica da sala fosse satisfatória.

Referências Bibliográficas

- [1] T. Zakinthinos e D. Skarlatos, "The effect of ceramic vases on the acoustics of old Greek orthodox churches," *Elsevier*, pp. 1307-1322, 2007.
- [2] V. Desarnaulds, Y. Loerincik e W. Stöckli, "Vases acoustiques dans les églises du Moyen Age," 2001.
- [3] C. M. Tomar, Dezembro 2019. [Online]. Disponível em: <http://www.cm-tomar.pt>. [Acedido em Fevereiro 2020].
- [4] T. C. Portugal, "Visit Center of Portugal," [Online]. Disponível em: www.centerofportugal.com. [Acedido em Fevereiro 2020].
- [5] A. P. O. Carvalho, *Acústica ambiental e de edifícios*, 8.15 ed., Porto: FEUP, 2019.
- [6] R. Guerra, 2006. [Online]. Disponível em: <http://w3.ualg.pt/~rguerra/Acustica/som.pdf>. [Acedido em Março 2020].
- [7] "Ruído de baixa frequência - Engenharia," [Online]. Disponível em: www.ruidobaixafrequencia.pt. [Acedido em Março 2020].
- [8] P. Editora, "Infopédia," 2020. [Online]. Disponível em: <https://www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa/inteligibilidade>. [Acedido em Março 2020].
- [9] A. P. Carvalho, "Relations between rapid speech transmission index (RASTI) and other acoustical and architectural measures in churches.," *Applied Acoustics*, 1998.
- [10] M. Almeida, S. Silva e T. Ferreira, *Física das construções - Acústica ambiental e de edifícios*, Minho: Universidade do Minho, 2007.
- [11] Y. Loerincik, *Etude sur les Vases Acoustiques* (Diplôme in Département de Physique EPFL), Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2000.
- [12] F. M. C. L. M. Pereira, *Caracterização acústica de igrejas românicas*, Porto, 2019.
- [13] A. Barba e A. Giménez, "El Tteatro principal de Valencia: vasijas acústicas y cámaras de resonancia," *TecniAcustica (Cáceres)*, 2011.
- [14] V. Desarnaulds e Y. Loerincik, "Vases acoustiques dans les eglises en Suisse," Janeiro 2001.
- [15] V. Desarnaulds, Y. Loerincik e A. P. O. Carvalho, "Efficiency of 13th-century acoustic ceramic pots in two swiss churches," Outubro 2001.
- [16] Z. Djordjevic, K. Penezic e S. Dimitrijevic, "Acoustic vessels as an expression of medieval music tradition in Serbian sacred architecture," *Muzikologija*, pp. 105-132, 2017.
- [17] J. D. R. Amado, "Caracterização acústica de sinagogas - A sinagoga Mekor Haim (Porto)," Fevereiro 2011.
- [18] C. M. Tomar, Dezembro 2019. [Online]. Disponível em: <http://www.cm-tomar.pt/index.php/pt/sinagoga>. [Acedido em Fevereiro 2020].
- [19] "Sinagoga de Tomar," Fevereiro 2020. [Online]. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Sinagoga_de_Tomar. [Acedido em Abril 2020].
- [20] M. Freitas, "Património Cultural - D.G.P.C.," Julho 2011. [Online]. Disponível em: http://www.monumentos.gov.pt/Site/APP_PagesUser/SIPA.aspx?id=3384. [Acedido em Abril 2020].
- [21] CVR, "Dar Corda ao Neurónio," Fevereiro 2008. [Online]. Disponível em: <http://darcordaoneuronio.blogspot.com/2008/02/sinagoga-de-tomar.html>. [Acedido em Abril 2020].
- [22] C. Batata, "Relatório Final do Acompanhamento e Escavação Arqueológicas Realizados na Sinagoga de Tomar," Cornucopia River, Tomar, 2019.
- [23] C. Trincão, "História de Tomar," Outubro 2019. [Online]. Disponível em: <https://historiadetomar.weebly.com/10-os-judeus-e-a-judiaria.html#>. [Acedido em Abril 2020].
- [24] F. Benders, "VITRUVIUS - De architectura Libri X," [Online]. Disponível em: www.vitruvius.be. [Acedido em Março 2020].

- [25] P. Jubilut, “Biologia total,” 2019. [Online]. Disponível em: <https://blog.biologiatotal.com.br/ondas-luz-som/>. [Acedido em Março 2020].
- [26] U. Matias, 2013. [Online]. Disponível em: www.monografias.com. [Acedido em Março 2020].
- [27] R. A. Serway e J. W. Jewett, “Ondas transversales,” 7ª ed., vol. Vol. I, México, CENGAGE Learning, 2008.
- [28] G. M. Silva, “ResearchGate,” [Online]. Disponível em: www.researchgate.net. [Acedido em Março 2020].
- [29] M. Paula, “Portal acústica,” 2019. [Online]. Disponível em: <http://portalacustica.info/modelagem-acustica/>. [Acedido em Março 2020].
- [30] “Weighting filter,” 2017. [Online]. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Weighting_filter. [Acedido em Março 2020].
- [31] “Pressão sonora,” 2018. [Online]. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Pressão_sonora. [Acedido em Março 2020].
- [32] V. M. Adrião, Maio 2016. [Online]. Disponível em: <https://lusophia.wordpress.com/2016/05/03/>. [Acedido em Abril 2020].
- [33] AJN, “e Sefarad,” Fevereiro 2019. [Online]. Disponível em: <https://esefarad.com/?p=88113>. [Acedido em Abril 2020].
- [34] I. N. Estatística, Novembro 2012. [Online]. Disponível em: <https://www.ine.pt>. [Acedido em Junho 2020].
- [35] F. S. Salvador e M. G. Nunes, “Conservação e Reabilitação da Sinagoga de Tomar,” Lisboa, 2016.

ANEXO 1

Para além do mencionado no capítulo 3.4. *Locais de culto com vasos acústicos*, existem as seguintes referências de localização de vasos acústicos, dadas por Loerincik [11]:

SUIÇA

- Baden: Argovie, igreja de Trois Rois, com vasos acústicos localizados junto das janelas, com a particularidade de terem o fundo aberto (Figura A1.1) [14];

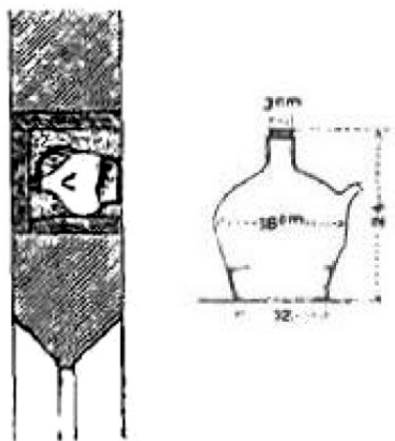


Fig. A1.1 – Modelos exemplificativos dos vasos acústicos encontrados em Baden (Suíça) [14].

- Bâle: igreja de Carmes;
- Bâle: igreja dos Franciscanos, com vasos datados a partir do final do séc. XII, com alguns de tamanho grande e gargalo de 75 cm, localizados em grupos de três entre os arcos da abóbada e outros com gargalo de cerca de 5 cm, com altura e largura de 14 cm e em formato de pêra [14];
- Bienne: Stadtkirche, igreja paroquial do séc. XV, onde se encontraram 8 vasos acústicos localizados na nave nas paredes acima das janelas e também outras cinco aberturas que possivelmente também teriam vasos [14];
- Bischofzell: Turgovie, Allerheiligenkapelle, capela dos Santos, onde se descobriram três vasos na parede norte (cuja função talvez tenha sido apenas o de melhorar a ventilação ou o controlo da humidade e não propriamente por razões acústicas), quebrados durante uma restauração em 1968 [14];
- Diessenhofen: Turgovie, igreja paroquial de St. Dionys, com seis vasos encontrados na parede norte e três na parede sul, a cerca de seis metros do chão (retirados e infelizmente quebrados), com o gargalo contra o interior da igreja e colocados em intervalos que variavam entre 1,80 e 2,45 m [14];
- Gelterkinden: Bâle, igreja paroquial datada entre 1480 e 1490, com muitos vasos acústicos nas paredes (nos cantos e acima das janelas) integrados e visíveis nos morais (Figura A1.2) [14];

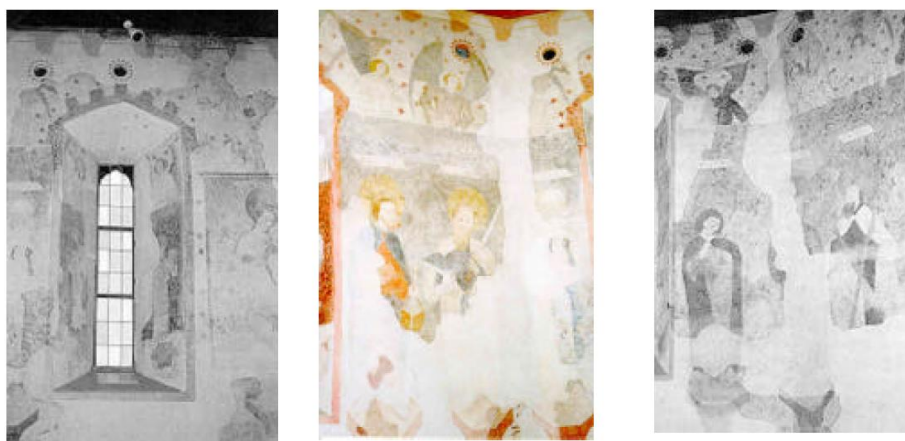


Fig. A1.2 – Posição e integração nas pinturas dos vasos acústicos nas igrejas de Gelterkinden (Suíça) [14].

- Jussy: Genève, igreja (séc. XV) onde se encontrou um jarro de 28 cm de altura e diâmetro, em cerâmica vidrada verde e com duas alças [14];
- Klingnau: Argovie, Stadtkirche;
- Lucerne: St. Anna im Bruch (séc. XVII), 17 vasos acústicos, cinco dos quais na abside e os outros 12 junto das janelas;
- Oberkirch perto de Frauenfeld: Turgovie, igreja (séc. XIII) onde foram encontrados quatro vasos na fachada frontal, dois na parede sul, 9 na parede norte e seis no lado oeste (dispostos simetricamente em torno de uma janela) (Figura A1.3) [14];

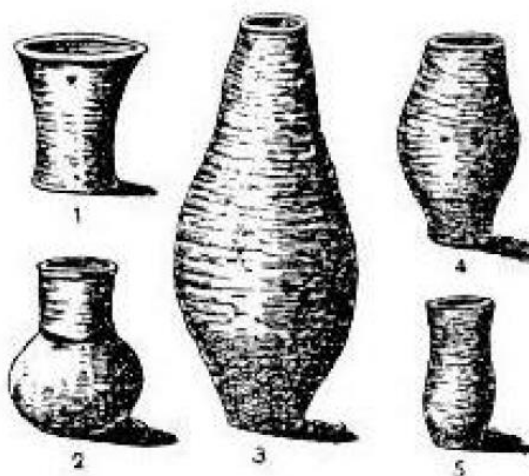


Fig. A1.3 – Alguns modelos propostos para alguns dos vasos acústicos da igreja paroquial de Oberkirch (n.º 3 e 4) e de Oberwinterthur (n.º 1 e 2) (Suíça) [14].

- Oberwinterthur: Zurich, St. Arbogast, com vasos acústicos encontrados na abóbada (séc. XII) e também outros 83 vasos acústicos localizados na parede traseira (representa a maior coleção de vasos acústicos entre as igrejas suíças), dispostos simetricamente em quatro linhas paralelas e que irradiam de uma cruz formada por quatro vasos e três vasos [14]. Os vasos têm uma altura de 16 a 25 cm e um gargalo (abertura) de cerca de 12 cm, o diâmetro máximo dos vasos (entre

o fundo e a abertura) é de cerca de 20 cm, outros têm uma altura de cerca de 10 cm, uma abertura de cerca de 10 cm e um diâmetro no fundo de cerca de 6 cm [14];

- Porrentruy: Jura, capela de St. Michel, (séc. XV), com vasos integrados nos murais [14];
- Rein perto de Brugg: Argovie, igreja de Saint-Leodegar, os vários vasos acústicos foram descobertos perto de uma janela (século XV), sob tijolo e gesso [14];
- Rheinfelden: Argovie, Johanniterkirche, com vasos acústicos encontrados (restaurados e ainda visíveis) nos murais desta igreja, sob o teto [14];
- Riehen: Bâle, igreja na qual se realizaram escavações em 1942 e se encontrou um nicho de 0,95 por 0,85 m sob o antigo piso da igreja com cerca de 20 vasos acústicos [14];
- Stetten: Shaffouse, igreja do mosteiro Gnadenal, na qual foram descobertos vasos acústicos murados nas abóbadas da igreja com as cavidades quase cheias de serragem e fechadas com gesso [14];
- Zurich (Ötendbach): igreja dominicana, com 68 vasos acústicos murados sob o teto de madeira, dispostos em *zigue-zague* em duas linhas, com as aberturas visíveis e incorporadas na decoração do século XIV (Figura A1.4) [14].



Fig. A1.4 – Imagem exemplificativa das características dos vasos acústicos e da sua localização na igreja dominicana de Zurich (Suíça) [14].

FRANÇA

Aquitaine

- Bergerac;
- Igreja de Rion, St. Barthélémy;
- Saint Girons d'Hagetmau: vários vasos acústicos enterrados no pavimento;
- Saint Sever-sur-Adour;
- Sarlat-Bergerac;
- Sorde l'Abbaye;
- Tourtoirac – capela de l'Abbaye, do séc. XIII: uma dúzia de vasos acústicos.

Alsace

- Colmar: cathedral de St Martin, do séc. XIII ao séc. XIV;
- Strasbourg: igreja de Dominicains, destruída em 1870.

Auvergne

- Chamalière-sur-Loire – igreja (séc. XI-XII) com 30 vasos acústicos;
- Issoire: igreja beneditina de St. Avit (séc. XI) encontra-se destruída;

- Lavaudieu perto de Brioude: abadia dos beneditinos, igreja de St. André (séc. XI) cerca de vinte vasos alinhados acima dos muros;
- Le Monastier;
- Mègemont près Besse-en-Chandesse: abadia cisterciense (séc. XII-XIII);
- Mozat – abadia de St. Pierre (séc. X ao séc. XV), com vasos acústicos na nave da igreja;
- Riom – Ste. Chapelle (séc. XIV) com 113 vasos, bloqueada em 1971;
- Vic-le-Comte.

Bourgogne

- Châlon-sur-Saône: igreja de Cordeliers (séc. XV) demolida em 1846 (reservado um dos vasos acústicos);
- Capela perto de Toulon-sur-Arroux (séc. XII) com 4 vasos acústicos encontrados;
- Montréales: vasos acústicos encontrados no absidiolo (capela radiante);
- Préty perto de Tournus: com um vaso acústico num dos pilares.

Bretagne

- Bourgbarré: três vasos na sacristia (séc. XVII);
- Briec: igreja de St. Pierre e de St. Paul (séc. XVI), restaurada em 1975 e com 16 vasos acústicos alinhados;
- Carhaix Église des Carmes (o edifício desapareceu);
- Chatillon-sur-Seiche;
- Combrit: vasos acústicos nos painéis do teto;
- Ploaré – Douarnenez: igreja de St. Herlé (séc. XVI-XVII) com 110 vasos acústicos originais e 18 obstruídos no séc. XVIII;
- Ergué – Armel: igreja de St-Alor (séc. XVI), com 17 vasos acústicos alinhados;
- Ergué – Gabéric: vasos acústicos nos painéis do teto;
- Goudelin perto de Plouagat: 14 vasos acústicos;
- Hillion perto de St. Brieuc: 6 vasos acústicos;
- La Gacilly: um vaso conservado em Nantes;
- Landéda: capela de N.D. des Anges, convento de Cordeliers (séc. XV);
- Lendéan: igreja do convento de Cordeliers (séc. XV);
- Landerneau: igreja de St. Thomas (séc. XVI) com 7 vasos acústicos;
- Lannion: igreja de St. Jean-du-Baly ;
- Le Folgoët: colegiado de Notre-Dame (séc. XV) com 7 vasos acústicos;
- Le Juch: igreja de Notre-Dame e St. Maudet (séc. XVII) com 42 vasos originais;
- Le Trévoux: 10 vasos acústicos alinhados;
- Malansac: igreja (séc. XVII) com 16 vasos acústicos;
- Melgven: igreja de St. Pierre e St. Paul, (séc. XVI) com 17 vasos acústicos. Com remodelações no séc. XVIII e no séc. XIX;
- Morlaix: igreja de Cordeliers de St. François de Cuburien (séc. XVI) com 63 vasos acústicos nas paredes, muitos dos quais têm vindo a ser obstruídos;
- Pleyben-Christ: 14 vasos acústicos;
- Plougonvelin: igreja da abadia de St. Mathieu (séc. XIV) foi destruída e foram recuperados dois vasos;
- Pluherlin: capela de Croix, com 7 vasos acústicos colocados a 2 m do chão;
- Pouldreuzic: igreja paroquial, com 14 vasos acústicos descobertos aquando de uma decapagem;
- Porspoder: igreja de St. Léonor de Larret (séc. XIV-XVI) com 14 vasos acústicos;
- Rochefort-en-Terre: antiga igreja colegiada de Chanoines (séc. XVI) com 57 vasos acústicos;

- Quéménéven: capela N.D. de Kergoat (séc. XVI-XVII) com 54 vasos acústicos;
- Quimper: igreja de Ursulines, cujo edifício desapareceu;
- Quimperlé: igreja de Notre-Dame (séc. XV) cujo sistema acústico foi removido com a aplicação de revestimento;
- Quistinic;
- St. Etienne-en-Coglès: vasos acústicos na torre da igreja (séc. XII);
- St. Renan: capela do hospital de St. Yves (séc. XV) destruída, continha 20 vasos acústicos, dois dos quais foram recuperados e conservados em Quimper;
- St. Thégonnec: igreja de Notre-Dame (séc. XVII) com 11 vasos acústicos;
- Trégourez: igreja de St. Idunet (séc. XVI) com 13 vasos acústicos datados do séc. XVII.

Centro

- Le Liget: abadia bizantina de Chartreux, com 14 vasos acústicos;
- St. Benoît-sur-Loire: vasos acústicos enterrados sob a calçada da abadia.

Champagne

- Troyes: igreja de St. Jean (séc. XVI) com 2 vasos acústicos.

Languedoc

- Banassac;
- Chasseradès;
- Fournels;
- Inos;
- Le Vignogoul perto de Montpellier: abadia gótica, com 29 vasos acústicos;
- Luc perto de La Bastide: igreja de St. Pierre (séc. XIII) parcialmente reconstruída no séc. XIX, com 15 vasos acústicos;
- Maguelonne-les-Montpellier: igreja de St. Pierre (séc. XI) com 40 vasos acústicos ;
- Mercoire perto de Langogne: Abadia cisterciense (séc. XIII), com 14 vasos acústicos na capela e 30 vasos danificados na nave;
- Perpignan: catedral com vasos para aligeirar a estrutura;
- St. Georges-de-Levejac: 7 vasos acústicos.

Loire (país de)

- Angers: igreja de St. Martin (séc. XII) reconstituída no séc. XVIII, com vários vasos acústicos;
- Bontgarand-en-Sautron: igreja de Notre-Dame;
- Les Epesses: muitos vasos acústicos na abóbada;
- Le Chapelle - Launay, perto de Savenay: dois vasos acústicos conservados em Nantes;
- Le Bernard;
- Givrand: igreja romana, com um vaso de gargalo estreito de 2 litros de volume;
- La Meilleraye: Trappe, 42 decantadores de vidro, *in situ*;
- La Roche-sur-Yon: igreja (séc. XII) destruída em 1846;
- Lécousse, perto de Fougères: alguns potes nas Fontes modernas;
- Montaigu: igreja de St. Georges, com vários vasos;
- Nantes: igreja de Jacobins e St. Martin, com os vasos acústicos no museu;
- Saint Gilles-sur-Vie;
- Saint Jean-de-Monts: igreja (séc. XIV) demolida em 1935, com três vasos acústicos descobertos e um vaso no museu de Croix-de-Vie;
- Saint Sulpice-des-Landes: igreja (séc. XV).

Lorraine

- Metz: basílica de St. Pierre-en-la-Citadelle (séc. IV) com 11 vasos acústicos no subsolo;
- Metz: igreja do convento de Célestins (séc. XIV-XV) destruída em 1861, sobre a qual existe um manuscrito do séc. XV que refere a colocação de vasos (1432);

Norte

- Calais: igreja de Notre-Dame (séc. XV) com vários vasos acústicos dispostos em corredores sob o pavimento.

Normandia

- Alvimare: igreja (séc. XIII com remodelações nos séculos XVI-XVII) destruída por volta de 1860 e com oito vasos nos pilares;
- Bellencombte, perto de Dieppe;
- Blosseville-ès-Plains;
- Contremoulins, perto de Fécamp;
- Fervaques: abadia, igreja de St. Patrice de Rouen (séc. XVI);
- Fry perto de Argueil: igreja (séc. XVI) com 4 vasos acústicos;
- Mont-aux-Malades perto de Rouen: edifício (séc. XII) cujo sistema acústico é do séc. XVII;
- Montivilliers: abadia, com uma dúzia de vasos situados nos cantos da torre de Perruel, perto de Périers-sur-Andelle;
- Rouen: igreja de St. Patrice do séc. XVI, com um vaso de vidro no museu;
- Saint Laurent-en-Caux: igreja demolida em 1852, com supostamente um vaso acústico do séc. XIII;
- Sainte Trinité de la Luizerne: abadia do séc. XV, com vasos na abóbada, num dos quais foram descobertas moedas de ouro;
- Sotteville-lez-Rouen: igreja demolida em 1863, com dois vasos acústicos recuperados e supostamente datados do séc. XVI;
- Touques: igreja de St. Thomas.

Paris

- Igreja dos Beneditinos ingleses (séc. XVIII) sendo depois de 1900 a Schola Cantorum, com uma ânfora (vaso) descoberta recentemente na abóbada durante alguns trabalhos.

Picardie

- Naours: vasos descobertos na abóbada;
- Noyon: catedral (séc. XII) na qual existe uma adega “fonocampal” (sala subterrânea totalmente revestida com vasos acústicos nas paredes);

Poitou-Charente

- Cerizay;
- Chauvigny: capela do castelo dos bispos (séc. XV) em ruínas;
- Loudun: igreja de Ste. Croix;
- Talmont.

Provence – Costa Azul

- Arles: igreja de St. Blaise (séc. XIII) com 15 vasos acústicos;
- Cap Martin, Roquebrune: convento (séc. XII) em ruínas, restam apenas 3 vasos de 15;
- Le Castelet: com 7 vasos de 14;

- Marseille: basílica de St. Victor (séc. XII) com 12 vasos acústicos;
- Méounes-les-Montrieux: capela de St. Michel, a abóbada tinha 7 vasos acústicos, mas desabou em 1973;
- Taurentum perto de La Ciotat: cidade antiga, com vasos semelhantes a barris, encontrados nas paredes de um edifício semicircular;
- Venasque: igreja (séc. VI-VII), com 7 vasos usados para aligeirar a abóbada;
- Villeneuve-les-Avignon: igreja (séc. XIV) arruinada, mas com três vasos recuperados.

Pirenéus

- Cahors: igreja de Ste. Urcize (séc. XIV) com 10 vasos acústicos dos quais 6 estão no local;
- Fornols: território de Campôme, perto de Prades – capela de St. Christophe, arruinada com recuperação de 4 vasos acústicos;
- Lectoure: capela do antigo convento de Clarisses (séc. XVII) demolido, com três formas de vasos e algumas cópias no museu;
- Lourdes: igreja antiga destruída em 1904 e com os vasos acústicos no museu;
- Luz Saint-Sauveur: igreja de Commanderie;
- Saint Beaulize de L’Hirondel;
- Saint Paul-des-Fonts: resta apenas um vaso de 12.

Ródano – Alpes

- Charlieu: igreja de St. Fortunat (séc. XI) com um vaso;
- Le Bénisson-Dieu perto de Roanne: igreja (séc. XII);
- Lyon : basílica de St. Martin d’Ainay (séc. XII) com dois vasos no museu;
- Montbrison: igreja Notre-Dame (séc. XIV-XV);
- Montbrison: capela de St. Victor de Laprade (séc. XVII) com 9 vasos acústicos, 5 dos quais quebrados e 4 recuperados;
- Montverdun perto de Boen: três vasos acústicos encontrados no subsolo;
- Nérondes: nave (séc. XI e séc. XVII) demolida em 1868, com 20 vasos e apenas um recuperado;
- Pommiers-en-Forez: Prieuré – igreja (séc. XII) com 29 vasos acústicos;
- Saint-Chef-en-Dauphiné: abadia (séc. X-XI) com 45 vasos acústicos;
- Saint Thomas-la-Garde: igreja dominicana (séc. XII) demolida em 1884, com 10 vasos destruídos, 2 réplicas (quebradas) recuperadas.

ALEMANHA

- Adlersberg perto de Regensburg: dominicanos, arquitetura gótica, com três vasos acústicos;
- Altbaumburg perto de Bad-Kreuznach: capela do castelo (séc. XIII-XIV) em ruínas;
- Andernach bei Koblenz: St. Martins kloster;
- Braunschweig (Brunswick): igreja de dominicanos (séc. XIV) com 16 vasos recuperados no Museu Nacional. Foram encontrados 28 vasos, cheios até meio de turfa e com rolha;
- Burgfelden (Feldberg) perto de Freiburg im Breisgau: igreja (séc. XI) com vasos alinhados em três linhas;
- Cologne: igreja de St. Séverin (séc. XIII-XIV) cujos vasos correspondem aos padrões de pintura;
- Cologne: igreja de St. Géréon (séc. IV) com vasos a aligeirar as abóbadas;
- Edersleben perto de Sangerhausen: 5 vasos descobertos durante a sua demolição por volta de 1900;
- Egelin;

- Emmerich: igreja colegiada de St.Martin;
- Franckfort: torre de Eschenheimer, com vasos de aligeirar;
- Haale em Saale: igreja de Carmes Déchaussés, destruída;
- Hagenau: Niklauskirche;
- Hambourg (Homburg) perto de Stadtoldendorf (Staat Oldendorf): capela destruída;
- Isen perto de Wasserburg: igreja românica, com um vaso encontrado num pilar e duas cópias no museu de Traunstein;
- Köln: St. Gereon;
- Köln: St. Severin;
- Kyritz perto de Postdam: igreja Franciscana (séc. XIII) com um vaso descoberto durante a sua demolição em 1797;
- Lichtenburg perto de Salder;
- Mariastuhl no Magdebourg: igreja do convento, com 10 vasos;
- Mesdede: Stiftskirche;
- Neuss: igreja de St. Quirin, em Carolingien, com duas grandes ânforas enterradas no chão;
- Neuss: Jesuitenkloster;
- Ostrom: igreja pós-Carolingiana com vasos a aligeirar a abóbada;
- Pletesjach: Ehemalige Kurtäuserkirche (antiga igreja cartuxa);
- Plötz (Plötske) perto de Gommern: o edifício desapareceu;
- Rheinfelden: igreja de St. Jean;
- Salder: castelo, com presença de tubos e cones nas paredes;
- Stetten in Gnadentale - Hohenzollern: igreja do convento (séc. XIII) com vasos na abóbada colocados posteriormente;
- Tiefenbran: igreja paroquial de St. Maria Magdalena;
- Unterkrain: igreja de Karthaus de Plettriach (séc. XV) com vasos alinhados;
- Warburg;
- Xanten: igreja de St. Victor (séc. IX) Carolíngia - 18 vasos no chão, virados com o gargalo para baixo, cobertos com argamassa;
- Zerbst;

BÉLGICA

- Anvers: igreja do Convento de Récollets (séc. XV-XVI) com dois vasos do final do séc. XV no museu Steen Eglise;
- Bruges: igreja antiga de St. Donatien, edifício desapareceu, abóbada era construída por vasos e tijolos ocós;
- Liège: igreja de St. Paul, com um vaso;
- Orval: igreja da abadia, com vasos no último vão da nave;
- Tournai: demolida no séc. XV.

CHIPRE

- Famagouste: igreja perto da igreja das Carmelitas e dos Armênios;
- Famagouste: igreja de St. Georges-des-Grecs (séc. XIV) com grandes jarros;
- Famagouste: igreja de Ste. Marie-du-Carmel (séc. XIV) com vasos colocados em pedras;
- Stazousa: abadia (séc. XIV-XV) em Kalokhoría, com dois vasos nas ruínas.

ESPAÑA

- Barcelona: igreja do convento de São Francisco (séc. XIV-XV) edifício destruído em 1836 e com 5 vasos recuperados, mantidos no Museu de Sèvres;
- Sagonte: ruínas do teatro romano, com 9 cavidades que seriam destinadas, possivelmente, cada uma a receber um *echea*.

GRÃ-BRETANHA

- Aberbrach (Brittany);
- Chichester: igreja de St. Olave;
- Fountains Abbey;
- Norwich: igreja de Mountergate;
- Norwich: igreja de St. Peter's Mancroft;
- Upton perto de Southwell.

GRÉCIA

- Corinto: *echea* transportado a Roma por Memmius.

CRETA

- Vasos descobertos por volta de 1663 em teatros antigos.

HUNGRIA

- Budapeste: vasos presentes nas abóbadas de banhos turcos, em ruínas;
- Pécs: duas mesquitas turcas com muitos vasos, numa das quais se encontraram 85 vasos.

IRLANDA

- Youghal: igreja de Ste. Marie (séc. XIV) com 10 vasos.

ITÁLIA

- Ancône: igreja de Santa Maria di Piazza, com 13 vasos;
- Bolzano: igreja de S. Francesco (séc. XIV) com 8 vasos;
- Catania: castelo de Ursino (séc. XIII) com 56 vasos em duas salas;
- Moroni: edifício desapareceu;
- Nord: Sardenha, com quatro *echea* no teatro romano;
- Pérouse: templo de S. Angelo – Peléochrétien, com cavidades internas de aligeiramento;
- Ravenne: Ninfa, em ruínas ;
- Ravenne: igreja de St. Vital, período bizantino (séc. VI) com a cúpula central feita de vasos encaixados uns nos outros;
- Ravenne: Mausoléu de Galla Placidia (vasos de aligeirar a abóbada);
- Roma: circo de Maxence (vasos de aligeirar a abóbada);
- Roma: Minerva Medica – rotunda (vasos de aligeirar a abóbada);
- Roma: Mausoléu com cúpula de Tor'dei Schiavi (vasos de aligeirar a abóbada);

- Roma: Mausolée com cúpula de Sant' Elena (vasos de aligeirar a abóbada);
- Roma: Villa Adriana – termas de Heliocaminus (vasos de aligeirar a abóbada);
- Roma: Villa Gordiani – estrada Prenestine (vasos de aligeirar a abóbada);
- Rossano Calabro: igreja de San Panaghia (séc. XII-XIII) com 11 vasos;
- Sampierdarena perto de Gênes: igreja de San Bartolomeo del Fossato, destruída, com 9 vasos;
- Vitipeno: ginásio na rua de V. Veneto (séc. XVI) com 42 vasos.

HOLANDA

- Sint Odilienberg perto de Ruremonde: Carolíngia, com 10 vasos empilhados dois a dois na argamassa do piso;
- Oosterbech bei Arnhem.

POLÓNIA

- Inowrazlaw: igreja de Ste. Marie, da época romana e com vasos do séc. XIV;
- Wloclawek em Wisla (Weichsel): catedral, com 16 vasos e um exemplar no museu.

PORTUGAL

- Tomar: pequena sinagoga (séc. XIV).

RÚSSIA

- Grodna: igreja de St. Boris do séc. XVI, com três vasos;
- Moscou: igreja de St. Basile-le-Bienheureux (séc. XVI) com quatro vasos;
- Moscou: igreja de St. Nicolas-des-Bouchers (séc. XVI);
- Novgorod;
- Pskov;
- Rostov;
- Spasco-Nérédinskaia (séc. XII) com 24 vasos;
- Tvoritchenskaia (séc. XII) com dois vasos.

ESCANDINÁVIA

- Aaker: ilha de Borholm, Dinamarca – igreja Ce Nylarsker, com seis vasos na parede - 6 vasos numa parede;
- Bjerresjoe: diocese de Lund perto de Ystad, na Suécia – igreja (séc. XIII) com 40 a 50 vasos em linha;
- Bornholm;
- Bosjökloster, Scanie, Suécia: igreja românica
- Jerrestad, Scanie;
- Horning perto de Randers, Jutland, Dinamarca: igreja romana (não será românica?) com 14 vasos;
- Malmö, Scanie. “Grenier public”;
- Odm, Jutland: com 19 vasos na igreja romana;
- Stanby, Jutland: com seis urnas;

- Svendborg, Dinamarca: igreja de St. Nicolas (séc. XII) com seis vasos que incluíam um pedaço de madeira no gargalo;
- Svendborg: igreja de Notre-Dame, com 10 garrações;
- Tondering, Jutland, com quatro vasos;
- Verster Ahlstedt: com vários vasos;
- Verster Alling, Jutland, com três vasos.

TURQUIA

- Ezani-Frígia: teatro Romano com seis pares de alvéolos escavados num bloco de mármore, agrupados dois a dois, destinados a receber 12 *echea*.

JUGOSLÁVIA

- Maribor (anteriormente Marburg em Drau): catedral com urnas com uma forma particular;
- Pleterjach (Pleterje): Eslovénia (séc. XV) com 57 vasos e com vários furos na parte inferior e virados para o interior do edifício.

SÉRVIA

- **Igreja dos Santos Apóstolos Pedro e Paulo, perto de Novi Pazar:** Foram encontrados 11 vasos acústicos na zona central, embutidos 40 cm abaixo da cornija da cúpula, distanciados de meio metro a um metro. Também se descobriram vasos na abside, embutidos de tal forma que formam uma linha horizontal. Além destes, existem dois vasos nos cantos de cada meia cúpula (oito vasos no total). Observou-se que os vasos tinham cerca de 30 cm de altura e uma abertura de cerca de 3,5 cm. Todos os vasos estavam embutidos na posição horizontal, de modo que a abertura do gargalo estivesse orientada para o espaço interior da igreja (ainda visíveis) [16];
- **Igreja de São Pedro e Paulo (mosteiro de Stara Pavlica, perto de Brvenik):** datada do século XII, encontra-se em ruínas (com a cúpula ainda em pé). Descobertos 8 vasos acústicos, com cerca de 25 cm de altura, maior raio de 15 cm e o raio do fundo de 10 cm, posicionados horizontalmente na parede de pedra, com a abertura do gargalo (obstruídas com argamassa) orientada para o interior da igreja e o fundo do vaso na parede. Também foram encontrados outros vasos, maiores, com 30 cm de maior raio. Todos os vasos encontrados foram feitos de argila cozida, de cor avermelhada e não esmaltados e considerou-se que foram intencionalmente fabricados para fins acústicos [16];
- **Igreja de São Nicolau, perto de Kuršumlija: (1152-68)** Quatro vasos acústicos, um dos quais ainda bem preservado e guardado no Museu Nacional de Belgrado. Este vaso tem altura de 32 cm, maior raio de 23,5 cm, raio da parte inferior de 13,5 cm, espessura das paredes de cerâmica de 5 a 8 mm, abertura do gargalo de cerca de 12 cm, feito de barro cozido de cor vermelho-amarelo e não esmaltado, decorado com três faixas e com várias linhas na zona superior. Como foi embutido horizontalmente, a abertura do gargalo do vaso foi orientada em direção ao espaço interior da igreja e o fundo foi embutido na parede. Considerou-se que estes vasos foram intencionalmente fabricados para fins acústicos [16];
- **Igreja da Transfiguração de Cristo (Pridvorica):** as características de seu estilo arquitetónico datam do final do século XII. Foram descobertos dois vasos acústicos sob os arcos rebatidos, nos lados leste e oeste, que sustentam a cúpula central. Encontravam-se posicionados na

horizontal, com o fundo na parede e com a abertura do gargalo orientada em direção ao espaço interior da igreja. A altura dos vasos é de cerca de 35 cm e a abertura tem cerca de 10 cm de raio [16];

- **Igreja da Ascensão de Cristo (mosteiro de Žižka):** Séc. XIII, aí se encontraram alguns vasos acústicos, posicionados sob a cúpula principal: na parede da abside norte, no início do arco rebatido (um de cada lado), sob o arco rebaixado ocidental e à mesma altura do lado norte (dois de cada lado), também na parede norte sob o arco rebatido (dois de cada lado). Os vasos encontravam-se posicionados na horizontal, de modo que as aberturas estavam viradas para o interior da igreja. A altura dos vasos, encontrados na parede oeste, era de 38 cm e os encontrados sob a cúpula tinham tanto como 43 cm; as aberturas mediam cerca de 14 cm [16];
- **Igreja dos Santos Apóstolos (Patriarcado de Peć):** Fundada no séc. XIII, é um centro espiritual e o mausoléu dos arcebispos e patriarcas sérvios. Os vasos acústicos aqui encontrados estavam embutidos nas paredes, sob os arcos rebatidos superiores nos lados norte, oeste e sul (assumiu-se que os vasos podem ter sido posicionados no lado leste, de forma análoga às outras posições, mas o lado oriental estava totalmente coberto por argamassa, não existindo certezas quanto a isto. As aberturas dos vasos mediam cerca de 10 cm de largura [16];
- **Igreja da Ascensão de Cristo (mosteiro de Mileševa):** Séc. XIII, encontraram-se, sob os arcos que sustentam a cúpula, 20 vasos acústicos semelhantes a jarros, que se pensa terem sido fabricados para fins acústicos porque, antes de serem embutidos nas paredes, os gargalos e alças foram quebradas e foi feito um buraco no centro do fundo. Eram jarros maiores, com pescoços longos e estreitos, uma alça, um corpo arredondado e com o maior raio localizado abaixo da zona do meio. Encontravam-se posicionados na horizontal, mas com o fundo orientado para o espaço interior da igreja. Também se pensa que inicialmente eram jarros de água, feitos de barro que ficavam brancos após a cozedura. Um dos vasos recuperados, foi esmaltado em verde, com traços de listras na superfície devido ao processo de produção por guincho e à decoração de pequenos pontos impressos, encontrando-se conservado no Museu Nacional de Belgrado (Figura A1.5). Este vaso tem 23,5 cm de altura, raio do fundo de 11 cm, raio da abertura no fundo de 4,5 cm e com raio da zona mais larga de 17 cm [16];

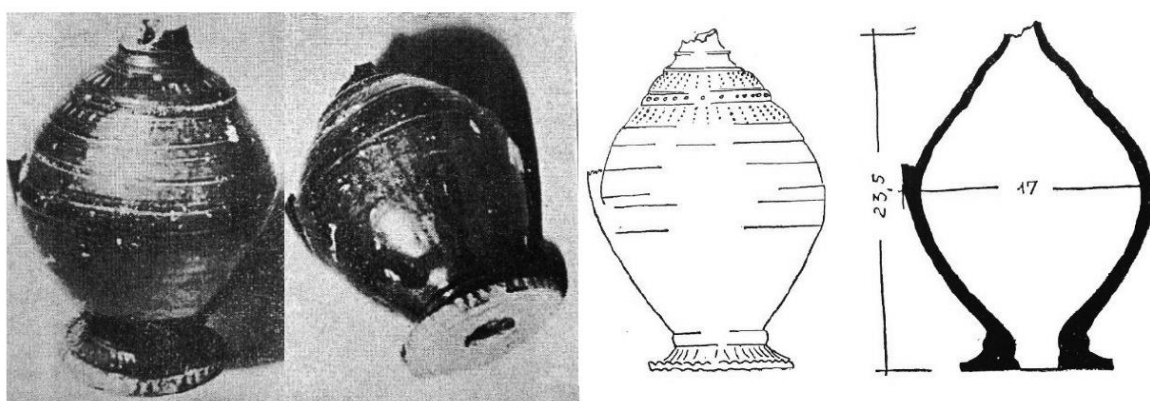


Fig. A1.5 – Vasos acústicos esmaltados em verde, com um buraco no fundo, do mosteiro de Mileševa, Sérvia [16].

- **Igreja da Teofania (mosteiro Davidovica, perto de Brdarevo):** Séc. XIII, foram encontrados dois vasos acústicos de cerâmica na parede ocidental sob a cúpula, posicionados na horizontal, com o fundo embutido na parede e as aberturas orientadas para o espaço interior da igreja. O fundo do primeiro vaso é côncavo por dentro e achatado por fora, com um raio de 9 cm, o raio na zona mais larga do vaso é de 15 cm e observa-se uma perfuração no corpo do vaso (pode sugerir que os vasos não foram propositadamente fabricados para fins acústicos. Ambos foram produzidos da mesma maneira, mas o segundo tem um fundo um pouco mais largo, com 10,6 cm, preserva uma alça pequena com um alargamento em forma de botão na parte superior, com superfície de cor vermelho escuro. Há uma marca técnica do guincho no fundo de ambos os vasos (um recesso circular central, com 2,5 cm de raio) e três impressões equidistantes a 4,5 cm (sugere que os vasos foram produzidos na mesma oficina) [16];
- **Igreja da vila de Trg, perto de Žubagubica:** Séc. XIII-XIV, abriga nove vasos acústicos, a uma altura de 3,75 m do piso, encontrados na parede norte do corredor da igreja (foram retirados em boas condições, analisados e preservados no museu nacional de Požarevac). Os vasos acústicos encontrados são do mesmo tipo e aproximadamente das mesmas dimensões (Figura A1.6), com um fundo plano, corpo redondo, gargalo curto com aba dobrada e listras decorativas (um destes com um buraco perfurado no corpo). Um facto distintivo desses vasos é que foram instalados na posição vertical de gargalo para baixo (abertura orientada em direção ao piso [16];

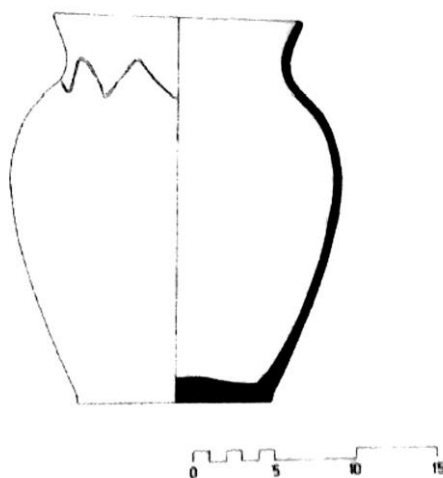


Fig. A1.6 – Modelo do vaso acústico da igreja da vila de Trg, perto de Žubagubica, Sérvia [16].

- **Igreja da Apresentação da Santa Mãe de Deus (mosteiro de Nova Pavlica, perto de Brvenik):** Séc. XIV, alberga um vaso acústico em cada pendente, posicionados horizontalmente nas paredes, com a abertura orientada para o interior da igreja (atualmente obstruídas por cilindros de madeira com um raio de aproximadamente 8 cm). A altura dos vasos varia de 40 a 46 cm e o raio da abertura é de 10 cm [16];
- **Igreja da Santa Mãe de Deus (Donja Kamenica, perto de Knjaževac):** Séc. XIV, aqui se encontrou um vaso acústico na pendente orientada a sudoeste e outro a sudeste. A altura dos vasos era de 20 a 25 cm, mas foram destruídos após o colapso da cúpula [16];

- **Igreja da Ascensão de Cristo (mosteiro Ravanica):** Séc. XIV. Um jarro, mencionado como acústico, foi encontrado durante os trabalhos de conservação [16];
- **Igreja da vila de Komarane:** atualmente em ruínas, foram descobertos sob os destroços dois vasos de cerâmica (preservados na Faculdade de Arquitetura da Universidade de Belgrado), com 22 cm de altura, raio do fundo de 12,5 cm e raio do topo de 13 cm, com um orifício central de 3 cm de raio e cuja dimensão mais larga é de 18 cm. A cerâmica, com espessura de aproximadamente 5 mm, tinha cor vermelha não esmaltada. Considera-se que foram produzidos originalmente para fins acústicos [16];
- **Capela abobadada da Torre de São Jorge, no mosteiro de Hilandar:** Séc. XV-XVI, foram encontrados vasos acústicos de cerâmica nos pendentes nordeste e noroeste, em posição horizontal, com as aberturas apontando para o interior. O raio das aberturas era de 1 a 2 cm (arredondada nas bordas), a altura era de cerca de 40 cm [16];
- **Mosteiro da Capela do Hilandar:** sem dados sobre o ano da sua construção, aqui se encontraram vasos acústicos atrás de uma sala de 4,6 m por 3,2 m, abobadada com uma cúpula irregular. Em cada pendente sul foi encontrado um vaso acústico, com altura de cerca de 50 cm, posicionados horizontalmente e com a abertura orientada para o interior da capela [16].