

ESTUDO DO FENÓMENO DA DIFUSÃO SONORA – SOLUÇÕES À BASE DE PAINÉIS DIFUSORES

PEDRO EMANUEL ALVES MEIRELES

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

Orientador: Professor Doutor Rui Manuel Gonçalves Calejo Rodrigues

Co-Orientador: Engenheiro Jorge Manuel Mendes Silva Castro

JULHO DE 2012

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2011/2012

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 - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009*.

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

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

À minha Família e Amigos

“Inspiração vem dos outros. Motivação vem de dentro de nós”

Autor Desconhecido

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar um agradecimento muito especial ao Professor Doutor Rui Calejo Rodrigues, orientador desta tese de mestrado, pela sua disponibilidade, gentileza e empenho demonstrado ao longo destes meses.

Um agradecimento também muito especial ao Engenheiro António Costa do Laboratório de Acústica, pela paciência, simpatia e persistência que demonstrou, na tentativa de resolver os problemas que foram surgindo e na disponibilidade que sempre teve para ajudar.

Muito Obrigado também ao Engenheiro Jorge Castro da Vicoustic pela ajuda, simpatia e preocupação na realização deste trabalho e pela disponibilização de todos os produtos que foram necessários para a realização dos ensaios laboratoriais.

À Elisabete Barros, Ruben Monteiro e Liliana Almeida pela amizade e companheirismo, imprescindíveis nestes cinco anos de Faculdade.

À minha família pela preocupação e apoio, e à Empresa António Alves S.A. pela disponibilidade em ajudar, em especial através da produção da mesa circular de suporte, utilizada na preparação do ensaio de espalhamento.

Por fim, mas nunca em último, um muito obrigado ao clube de atletismo Escola do Movimento, que este ano tão bem me acolheu, e que me deu a alegria para poder fazer este trabalho com outra motivação. Um agradecimento muito especial ao meu grupo de treino, em especial ao Tomás Baptista, pela amizade e companheirismo, como de um verdadeiro irmão.

RESUMO

Cada vez mais, o estudo dos fenómenos da difusão sonora apresenta um interesse crescente, pelo que a procura por novos produtos, capazes de responder às necessidades dos espaços com exigências acústicas, é feita de forma mais intensa. A difusão surge como uma das formas de tratamento mais eficazes já que permite a manutenção da energia sonora e a criação de espaços mais harmoniosos acusticamente.

Com a parceria de uma empresa da especialidade, Vicoustic, nesta dissertação pretende-se aprofundar o fenómeno da difusão sonora e caracterizar os produtos que esta comercializa. Para isso, proceder-se-á à análise das metodologias de medição laboratorial para obtenção dos coeficientes de difusão e espalhamento, que se apresentam atualmente como os indicadores mais aceites pela comunidade científica para avaliar a capacidade difusora de um determinado produto.

O trabalho inicia-se com uma contextualização teórica sobre a difusão sonora, onde se abordam temas e conceitos importantes para uma boa compreensão dos restantes capítulos. É igualmente feita uma análise tecnológica de todos os produtos da Vicoustic que apresentam interesse para este estudo. Em seguida é analisada toda a metodologia e montagem dos esquemas laboratoriais para obtenção dos coeficientes pretendidos, com uma caracterização completa e documentada fotograficamente. Não tendo sido possível obter resultados para os produtos da Vicoustic, outras experiências semelhantes são analisadas e uma adequada discussão de resultados e dificuldades sentidas na preparação dos ensaios é levada a cabo.

PALAVRAS-CHAVE: difusão sonora, coeficiente de difusão, coeficiente de espalhamento, ensaios laboratoriais, painéis difusores.

ABSTRACT

Nowadays the study of the sound diffusion phenomena has a growing interest, and thus, the demand for new products, able to meet the needs of the acoustic spaces, is made in a more intense way. The diffusion appears as one of the most effective treatment since it allows the maintenance of sound energy and the creation of acoustically more harmonious spaces.

With the partnership of an expert company, Vicoustic, this thesis aims to detail the phenomenon of sound diffusion and characterize the products intended for diffusion that this company sells. To do this, the methodologies for obtaining laboratory measurements of diffusion and scattering coefficients will be analysed, which actually appears as the indicators more accepted by the scientific community to assess the diffusive capacity of a specific product.

The work begins with a theoretical background on the sound diffusion, where themes and concepts important to a good understanding of the remaining chapters are presented. It is also made an analysis of all technological Vicoustic products which have interest for this study. Then the method and the whole laboratory assembly for obtaining the desired coefficients is carried out, with a complete characterization and photographic documentation. Since it was not possible to obtain results for Vicoustic products, other similar experiments are analyzed and an appropriate discussion of results and difficulties in the preparation of the tests is carried out.

KEYWORDS: sound diffusion, diffusion coefficient, scattering coefficient, laboratory measurements, diffuse panels.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
 1. INTRODUÇÃO	 1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA E CIENTÍFICA	1
1.2. OBJETIVOS	3
1.3. OBJECTO DE ESTUDO	4
1.4. MÉTODO	5
1.5. ENQUADRAMENTO ECONÓMICO, SOCIAL E CULTURAL	5
1.6. MOTIVAÇÃO	8
 2. O FENÓMENO DA DIFUSÃO	 9
2.1. CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA	9
2.2. O QUE É UM DIFUSOR? – PRINCÍPIO DE HYUGENS	11
2.3. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL SONORA DOS DIFUSORES – 1D VS 2D	16
2.4. GEOMETRIA DOS DIFUSORES	19
2.4.1. SUPERFÍCIES PLANAS	19
2.4.2. TRIÂNGULOS E PIRÂMIDES	20
2.4.3. ARCOS CÔNCAVOS	20
2.4.4. ARCOS CONVEXOS	21
2.4.5. DIFUSORES VOLUMÉTRICOS	22
2.5. DIFUSORES DE SCHROEDER	23
2.6. DIFUSORES HÍBRIDOS	32
2.7. QUANTIFICAÇÃO FÍSICA DA DIFUSÃO	35
2.7.1. MODELOS ACÚSTICOS DE ESPAÇOS GEOMÉTRICOS	35
2.7.2. DESENHO DE ESPAÇOS COM PRESENÇA DE DIFUSORES	35
2.7.3. COEFICIENTE DE DIFUSÃO E ESPALHAMENTO	36
2.8. LOCALIZAÇÕES ADEQUADAS PARA OS DIFUSORES E SUAS CONSEQUÊNCIAS	37
2.9. CAMPOS SONOROS: DISTÂNCIA FONTE – RECETOR	40
2.9.1. SCATTERED FIELD	40

2.9.2. <i>NEAR FIELD – FAR FIELD</i>	42
2.9.3. <i>TOTAL FIELD</i>	44
2.10. FUTURO – PERSPETIVAS DE DESENVOLVIMENTO	46
2.10.1. DESENVOLVIMENTO DE <i>SOFTWARE</i> ESPECIFICO	46
2.10.2. RELAÇÃO ENTRE COEFICIENTE DE DIFUSÃO E TEMPO DE REVERBERAÇÃO.....	47
2.10.3. MEDIÇÃO <i>IN-SITU</i> DOS COEFICIENTES DE ESPALHAMENTO E DIFUSÃO.....	47
2.10.4. TECNOLOGIA ATIVA	48
 3. TECNOLOGIA DOS PAINÉIS DIFUSORES	 49
3.1. MULTIFUSER DC2	50
3.1.1. CARACTERÍSTICAS E MODO DE FUNCIONAMENTO.....	50
3.1.2. APLICAÇÕES	50
3.1.3. INFORMAÇÃO TÉCNICA	51
3.1.4. DESEMPENHO	51
3.2. MULTIFUSER WOOD 36	53
3.2.1. CARACTERÍSTICAS E MODO DE FUNCIONAMENTO.....	53
3.2.2. APLICAÇÕES	53
3.2.3. INFORMAÇÃO TÉCNICA	53
3.2.4. DESEMPENHO	54
3.3. MULTIFUSER WOOD 64	56
3.3.1. CARACTERÍSTICAS E MODO DE FUNCIONAMENTO.....	56
3.3.2. APLICAÇÕES	56
3.3.3. INFORMAÇÃO TÉCNICA	56
3.3.4. DESEMPENHO	57
3.4. POLY FUSER QR	59
3.4.1. CARACTERÍSTICAS E MODO DE FUNCIONAMENTO.....	59
3.4.2. APLICAÇÕES	59
3.4.3. INFORMAÇÃO TÉCNICA	59
3.4.4. DESEMPENHO	60
3.5. PULSAR FUSER DA	62
3.5.1. CARACTERÍSTICAS E MODO DE FUNCIONAMENTO.....	62
3.5.2. APLICAÇÕES	62
3.5.3. INFORMAÇÃO TÉCNICA	62

3.5.4. DESEMPENHO.....	63
3.6. POLY WOOD FUSER	65
3.6.1. CARACTERÍSTICAS E MODO DE FUNCIONAMENTO	65
3.6.2. APLICAÇÕES.....	65
3.6.3. INFORMAÇÃO TÉCNICA.....	65
3.6.4. DESEMPENHO.....	66
3.7. SUPER FUSER SPYKE 2	68
3.7.1. CARACTERÍSTICAS E MODO DE FUNCIONAMENTO	68
3.7.2. APLICAÇÕES.....	68
3.7.3. INFORMAÇÃO TÉCNICA.....	68
3.7.4. DESEMPENHO.....	69
3.8. WAVE WOOD.....	71
3.8.1. CARACTERÍSTICAS E MODO DE FUNCIONAMENTO	71
3.8.2. APLICAÇÕES.....	71
3.8.3. INFORMAÇÃO TÉCNICA.....	72
3.8.4. DESEMPENHO.....	72
3.9. TRAP FUSER PREMIUM.....	74
3.9.1. CARACTERÍSTICAS E MODO DE FUNCIONAMENTO	74
3.9.2. APLICAÇÕES.....	74
3.9.3. INFORMAÇÃO TÉCNICA.....	75
3.9.4. DESEMPENHO.....	75
 4. ENSAIOS E MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS	 79
4.1. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO	80
4.1.1. DEFINIÇÃO.....	80
4.1.2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	81
4.1.3. CÁLCULO E ANÁLISE DETALHADA.....	92
4.1.4. ESPAÇO E AMOSTRAS – CARACTERÍSTICAS E EXIGÊNCIAS.....	94
4.2. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO.....	95
4.2.1. DEFINIÇÃO.....	95
4.2.2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	95
4.2.3. CÁLCULO E ANÁLISE DETALHADA.....	101
4.2.4. ESPAÇO E AMOSTRAS – CARACTERÍSTICAS E EXIGÊNCIAS.....	104

5. MONTAGEM LABORATORIAL E DISCUSSÃO DA PROBLEMÁTICA ASSOCIADA	109
5.1. COEFICIENTE DE DIFUSÃO	109
5.1.1. CARACTERIZAÇÃO DO ESPAÇO E MATERIAL.....	109
5.1.2. PROCEDIMENTO DE MONTAGEM E MEDIÇÃO	111
5.1.3. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS	115
5.1.4. VERIFICAÇÕES REGULAMENTARES.....	116
5.1.5. PREVISÃO DE RESULTADOS	116
5.2. COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO	120
5.2.1. CARACTERIZAÇÃO DO ESPAÇO E MATERIAL.....	120
5.2.2. PROCEDIMENTO DE MONTAGEM E MEDIÇÃO	124
5.2.3. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS	128
5.2.4. VERIFICAÇÕES REGULAMENTARES.....	129
5.2.5. PREVISÃO DE RESULTADOS	129
5.3. DISCUSSÃO ASSOCIADA À PROBLEMÁTICA DOS ENSAIOS	134
 6. CONCLUSÃO	 139
 7. BIBLIOGRAFIA	 141

ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 – Jon Cohen	8
Fig. 1.2 – Aplicação de produtos da Vicoustic no estúdio de Jon Cohen	8
Fig. 2.1 – Sala Grosser Musikvereinsaal em Viena	10
Fig. 2.2 – Sala de Concertos Colston Hall em Bistol.	10
Fig. 2.3 – Representação da Zona de Reflexão Especular.	12
Fig. 2.4 – Difracção nos Bordos.	12
Fig. 2.5 – Princípio de Huygens aplicado a uma superfície plana com a incidência de uma onda sonora normal a esta. A – sem indicação das frentes de onda; B – com indicação das frentes de onda.....	13
Fig. 2.6 – Princípio de Huygens aplicado a uma superfície com reentrâncias de profundidades diferentes – alteração de fase. A – sem indicação das frentes de onda; B – com indicação das frentes de onda.....	14
Fig. 2.7 – Princípio de Huygens aplicado a uma superfície com material absorvente – alteração de amplitude. A – sem indicação das frentes de onda; B – com indicação das frentes de onda.....	15
Fig. 2.8 – Princípio de Huygens aplicado a uma superfície curva – otimização de formas. A – sem indicação das frentes de onda; B – com indicação das frentes de onda.....	15
Fig. 2.9 – Respostas Polares para um difusor 1D (A) e um difusor 2D (B).	16
Fig. 2.10 - Goniómetro 2D para Difusores 1D	17
Fig. 2.11 - Goniómetro 3D mais sistema hemisférico para Difusores 2D.	18
Fig. 2.12 – Respostas Polares, para incidência normal a 2kHz, de uma superfície plana com ripas de madeira, uma superfície piramidal e uma superfície otimizada para alteração de fase (da esquerda para a direita).	18
Fig. 2.13 – Resposta Polar para uma superfície plana de 1m de comprimento sujeita a altas frequências, para quatro diferentes distâncias ao receptor (raio): 0.8 m, 1.2 m, 5.0 m e 1000m (de fora para dentro).	19
Fig. 2.14 – Respostas Polares de superfícies planas e com triângulos. A: Superfície Plana com a mesma dimensão que um triângulo (linha fina) e um triângulo (linha grossa); B: Superfície Plana com a mesma dimensão que cinco triângulos (linha fina) e cinco triângulos (linha grossa).	20
Fig. 2.15 – Resposta polar para um arco côncavo para várias distâncias (raio - r) do receptor (r_f representa o comprimento focal da superfície concava). A: $r < r_f$ (linha fina); $r = r_f$ (linha grossa); B: $r > r_f$ (linha fina); $r \gg r_f$ (linha grossa).	21
Fig. 2.16 – Respostas Polares de um semicilindro com um metro de diâmetro para várias frequências. Linha Ponto Traço (40 Hz), Linha continua fina (400 Hz), Linha continua grossa (4000 Hz).	22

Fig. 2.17 – Respostas Polares para um conjunto periódico (linha fina) e não periódico (linha grossa) de um conjunto de semicilindros. Para o conjunto periódico $D \approx 4\lambda$, em que d é o diâmetro do cilindro e λ o comprimento de onda.	22
Fig. 2.18 – Difusor Volumétrico	23
Fig. 2.19 – Difusor de Schroeder (Pulser Fuser DA – Vicoustic)	24
Fig. 2.20 – Níveis de Espalhamento de um difusor de Schroeder (A) e de um difusor plano (B).	24
Fig. 2.21 – Sequência residual quadrática para os números primos de 5 a 23. O perfil do difusor encontra-se ilustrado no rodapé de cada coluna, onde a profundidade de cada poço é proporcional à sequência de números da respetiva coluna.	26
Fig. 2.22 – Respostas Polares de difusores QRD (N=7) a 3000 Hz para diferentes números de períodos. A: 1 período, B: 6 períodos e C: 50 períodos. Linhas radiais de marcação dos lobos a $\pm 76^\circ$, $\pm 40^\circ$, $\pm 19^\circ$ e 0°	27
Fig. 2.23 – O conjunto de Mandelbrot para duas ampliações diferentes.....	30
Fig. 2.24 – Difusor de Schroeder básico (A) e Difusor de Schroeder com desenho fractal (B).....	31
Fig. 2.25 – Distribuição Polar da Energia dispersa por um difusor periódico (linha fina) e um difusor modulado (linha grossa).	31
Fig. 2.26 – Vários componentes de um sistema híbrido: absorvente poroso (A), máscara perfurada (B) e película de cobertura (C).	33
Fig. 2.27 – Respostas Polares para um difusor híbrido (A) e um difusor plano (B).....	34
Fig. 2.28 – Tratamento Acústico de um espaço (Antes e Depois - resposta temporal).....	39
Fig. 2.29 – Resposta temporal para uma reflexão especular associada a um refletor plano (A) e uma reflexão difusa (B). A janela temporal usada na transformação de Fourier para gerar as frequências de resposta no caso da reflexão difusa estão indicados por duas linhas verticais em B.	41
Fig. 2.30 – Respostas espaciais e temporais para uma superfície absorvente (A), uma superfície refletora (B) e uma superfície difusora (C).	41
Fig. 2.31 – Resposta polar de um painel plano quadrado de 1 m de lado, para várias distâncias.....	42
Fig. 2.32 – Variação da Resposta Polar de Espalhamento com a distância ao recetor.	43
Fig. 2.33 – Resposta Temporal (A) e por frequência (B) para o campo total. Em cima som directo mais reflexão especular. Em baixo som directo mais reflexão difusa.	45
Fig. 2.34 – Fluxograma de uma relação entre a forma e características de um espaço com a influência que isso tem nos coeficientes de espalhamento.....	46
Fig. 2.35 – Impressão Artística de um Difusor Activo.	48
Fig. 3.1 – Coeficientes de Absorção e Difusão por frequência para o Multifuser DC2.....	51
Fig. 3.2 – Multifuser DC2.....	52
Fig. 3.3 – Aplicação do Multifuser DC2 – <i>Hi-Fi Room Coreia</i>	52
Fig. 3.4 – Coeficientes de Absorção e Difusão por frequência para o Multifuser Wood 36.....	54

Fig. 3.5 – Diferentes acabamentos de cor para o Multifuser Wood 36.....	55
Fig. 3.6 – Aplicação do Multifuser Wood 36 – <i>Hi-Fi Room</i> Suíça.	55
Fig. 3.7 – Coeficientes de Absorção e Difusão por frequência para o Multifuser Wood 64.	57
Fig. 3.8 – Diferentes acabamentos de cor para o Multifuser Wood 64.....	58
Fig. 3.9 – Aplicação do Multifuser Wood 64 – <i>Hi-Fi Room</i> Dinamarca.....	58
Fig. 3.10 – Coeficientes de Absorção e Difusão por frequência para o Poly Fuser QR.....	60
Fig. 3.11 – Poly Fuser QR e diferentes cores disponíveis.....	61
Fig. 3.12 – Aplicação do Poly Fuser QR.	61
Fig. 3.13 – Coeficientes de Absorção e Difusão por frequência para o Pulsar Fuser DA.....	63
Fig. 3.14 – Pulsar Fuser DA.	64
Fig. 3.15 – Aplicação do Pulsar Fuser DA – Estúdio de Televisão na Áustria.	64
Fig. 3.16 – Coeficientes de Absorção por frequência e em função da cor para o Poly Wood Fuser....	66
Fig. 3.17 – Poly Wood Fuser e diferentes cores disponíveis.....	67
Fig. 3.18 – Aplicação do Poly Wood Fuser.	67
Fig. 3.19 – Coeficientes de Absorção por frequência para o Super Fuser Spyke 2.....	69
Fig. 3.20 – Super Fuser Spyke 2.....	70
Fig. 3.21 – Coeficientes de Absorção e Difusão por frequência para o Multifuser DC2.....	70
Fig. 3.22 – Coeficientes de Absorção por frequência para o Wave Wood.....	72
Fig. 3.23 – Wave Wood e diferentes cores disponíveis.....	73
Fig. 3.24 – Aplicação do Wave Wood num teatro em Singapura	73
Fig. 3.25 – Coeficientes de Absorção e Difusão por frequência para o Trap Fuser Premium.	75
Fig. 3.26 – Trap Fuser Premium.	77
Fig. 3.27 – Trap Fuser Premium – diferentes combinações.....	77
 Fig. 4.1 – Método do Elemento Fronteira – dimensões.....	 82
Fig. 4.2 – Variação do Coeficiente de Difusão com a distância ao receptor.	83
Fig. 4.3 – Variação do Coeficiente de Difusão para uma alteração no espaçamento angular dos receptores.....	84
Fig. 4.4 – Variação do Coeficiente de Difusão para uma alteração no número de períodos de semicilindros.....	85
Fig. 4.5 – Simulação de efeitos de fontes não omnidireccionais no coeficiente de difusão para superfícies planas. A magnitude máxima e os erros de fase são dados na legenda.....	86
Fig. 4.6 – Impulso de resposta Altifalante – Microfone.....	86
Fig. 4.7 – Resposta de Fundo sem difusor.	87

Fig. 4.8 – Resposta de Fundo com difusor.....	87
Fig. 4.9 – Isolamento da Resposta do Difusor.	88
Fig. 4.10 – Deconvolução da Resposta do Difusor.	88
Fig. 4.11 – Resumo do processo para obtenção do coeficiente de difusão para uma amostra plana.	89
Fig. 4.12 – Resumo do processo para obtenção do coeficiente de difusão para uma amostra difusora.....	90
Fig. 4.13 – Coeficientes de Difusão para 4 amostras comerciais. Na imagem da esquerda tem-se os coeficientes de difusão não normalizados e na direita os coeficientes de difusão normalizados.	93
Fig. 4.14 – Definições para a determinação do coeficiente de espalhamento.....	96
Fig. 4.15 – Gráfico dos impulsos detectados para diferentes posições da amostra.....	96
Fig. 4.16 – Gráficos representativos de respostas impulsivas de diversos sinais. Os primeiros três referentes a três ângulos de rotação diferentes, e o último à média aritmética dos três primeiros.....	98
Fig. 4.17 – Esquema de Medição do Coeficiente de Espalhamento.	100
Fig. 4.18 – À esquerda a amostra não incorporada na mesa rotativa (incorreto) e à direita a amostra incorporada na mesa rotativa (correto)	105
Fig. 4.19 – Definição da Profundidade Estrutural.....	106
Fig. 4.20 – Amostra quadrada sobre a mesa rotativa à esquerda e amostra circular à direita	106
Fig. 4.21 – Amostra quadrada apoiada sobre uma placa com 1,5 cm de altura.....	107
Fig. 4.22 – Coeficientes de Espalhamento para uma amostra circular, uma amostra quadrada e uma amostra quadrada sobre uma base com 1,5 cm de altura.....	107
Fig. 5.1 – Painel Difusor Multifuser DC2 da Vicoustic.....	110
Fig. 5.2 – Microfones	110
Fig. 5.3 – Fontes Sonoras	110
Fig. 5.4 – Pulse da Bruel & Kjaer	111
Fig. 5.5 – Colocação dos Painéis Difusores.....	111
Fig. 5.6 – Esquema de montagem do ensaio para determinação do coeficiente de difusão	112
Fig. 5.7 – Ensaio para determinação do coeficiente de difusão: colocação dos microfones nos ângulos 0°, 5°, 10° e 15°.....	113
Fig. 5.8 – Ensaio para determinação do coeficiente de difusão: colocação dos microfones nos ângulos 0°, 5°, 10° e 15° e fonte a 55°	113
Fig. 5.9 – Ensaio para determinação do coeficiente de difusão: colocação dos microfones nos ângulos 0°, 5°, 10° e 15° e fonte a -90°	114
Fig. 5.10 – Ensaio para determinação do coeficiente de difusão: colocação dos microfones nos ângulos 75°, 80°, 85° e 90° e fonte a 90°	114
Fig. 5.11 – Resultados para os coeficientes de difusão, coeficientes de difusão normalizados com uma superfície plana de referência e respostas polares para algumas frequências específicas de uma	

amostra composta por 3 semicilindros, para incidência normal. Nas respostas polares a linha mais clara é referente ao difusor e a mais escura à amostra de referência.....	117
Fig. 5.12 – Resultados dos coeficientes de difusão para amostras compostas por diferente número de semicilindros.....	118
Fig. 5.13 – Resultados dos coeficientes de difusão para diferentes tipos de amostras	119
Fig. 5.14 – Mesa Rotativa e marcação dos ângulos de rotação de 10° em 10°	120
Fig. 5.15 – Mesa de Suporte	121
Fig. 5.16 – Amostra à escala 1:5 composta por 25 painéis Multifuser Wood 64	121
Fig. 5.17 – Microfones apoiados sobre Tripés	122
Fig. 5.18 – Fontes Sonoras	122
Fig. 5.19 – Equipamento de medição da temperatura e humidade relativa	123
Fig. 5.20 – Pulse da Bruel & Kjaer	123
Fig. 5.21 – Esquema de Montagem do Ensaio de Espalhamento.....	124
Fig. 5.22 – Medição de T1.....	125
Fig. 5.23 – Medição de T2.....	126
Fig. 5.24 – Medição de T3.....	126
Fig. 5.25 – Medição de T4.....	127
Fig. 5.26 – Amostras utilizadas para determinação do coeficiente de espalhamento. À esquerda amostra com ripas cilíndricas e à direita amostra com semiesferas dispostas aleatoriamente sobre uma placa de suporte.....	130
Fig. 5.27 – Coeficientes de Espalhamento obtidos por GOMES e MOMMERTZ para a amostra de ripas cilíndricas.....	131
Fig. 5.28 – Coeficientes de Espalhamento obtidos por GOMES e MOMMERTZ para a amostra de semiesferas	131
Fig. 5.29 – Coeficientes de Espalhamento para dois painéis difusores: na esquerda um painel difusor 1D (FlutterFree [®]) e à direita um painel difusor 2D (Skyline [®])	133

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 – Condições de medição para os 4 tempos de reverberação.	100
Tabela 4.2 – Valores dos Coeficientes de Espalhamento da Base da Mesa Rotativa por frequência.....	105

SIMBOLOGIA

A_i – área de medição do recetor i (m^2);

A_{min} – valor mais baixo dos A_i (m^2);

c – velocidade do som (m/s);

d – coeficiente de difusão para incidência aleatória; diâmetro (m);

C – constante associada à expressão (25) do capítulo 4;

D – diâmetro (m);

d_θ – coeficiente de difusão direcional;

$d_{\theta,n}$ – coeficiente de difusão normalizado;

d_{max} – profundidade de reentrância máxima (m);

d_n – profundidade das reentrâncias (m);

$d_{\theta,r}$ – coeficiente de difusão de uma superfície lisa de referência;

e – número de Nepper;

exp – base e dos logaritmos neperianos elevado à potência indicada entre parêntesis;

E_{difusa} – energia refletida de forma difusa (Pa);

$E_{especular}$ – energia refletida de forma especular (Pa);

E_{total} – energia total refletida (Pa);

f – frequência (Hz);

f_{rO} – frequência de relaxação do oxigénio (Hz);

f_{rN} – frequência de relaxação do azoto (Hz);

f_{min} – frequência mínima (Hz);

f_0 – frequência de projeto (Hz);

h – fração molar do vapor de água (%); profundidade estrutural de rugosidades (m);

h_r – humidade relativa (%);

$h1(t)$ – impulso de resposta com a amostra de teste presente – Ensaio Coeficiente Difusão (Pa);

$h2(t)$ – impulso de resposta sem a amostra de teste presente – Ensaio Coeficiente Difusão (Pa);

$h3(t)$ – impulso de resposta com a amostra de teste presente e com a fonte centrada no ponto de referência, de frente para a posição do recetor – Ensaio Coeficiente Difusão (Pa);

H – raio do campo sonoro - Método do Elemento Fronteira (m);

L_i – nível de intensidade sonora corrigido (dB);

L'_i – nível de intensidade sonora (dB);

$l_{máx}$ – comprimento da maior reta contida nos limites da câmara reverberante (m)

m – constante de integração;

m_n – energia do coeficiente de atenuação do ar (m^{-1});

modulo – resto não negativo;

n – número da reentrância de uma sequência QRD;

N – número primo que serve de base para gerar uma sequência QRD; fator de escala; número de medições;

N_i – valor proporcional à área de medição do recetor i

r – raio (m);

p_a – pressão atmosférica ambiente (KPa)

p_r – pressão atmosférica ambiente de referência (KPa)

p_{sat} – pressão de vapor saturante (KPa)

R – raio do arco recetor (m);

rf – raio focal de uma superfície concava (m);

r_1 – distância entre ponto de referência e fonte - Método do Elemento Fronteira (m);

r_2 – distância entre ponto de referência e recetor - Método do Elemento Fronteira (m);

r_3 – distância entre a parte mais afastada da amostra e fonte - Método do Elemento Fronteira (m);

s – coeficiente de espalhamento para incidência aleatória;

s_{base} – coeficiente de espalhamento da base;

$s_{máx}$ – número máximo da sequência QRD;

s_n – número da sequência QRD;

s_θ – coeficiente de espalhamento;

S – área (m^2)

t – temperatura do ar ($^{\circ}C$);

T – tempo de reverberação (s); temperatura atmosférica ambiente (K);

$\bar{T}$ - média espacial da câmara reverberante (s);

T_0 – temperatura atmosférica de referência (K);

T_{01} – temperatura isotérmica no ponto triplo ($^{\circ}C$);

V – volume da câmara reverberante (m^3);

w – largura da reentrância (m);

W – segmento definido no Método do Elemento Fronteira (m);

α – coeficiente de atenuação de sons puros (dB/m);

α_s – coeficiente de absorção da energia total incidente;

$\alpha_{especular}$ – coeficiente de absorção da energia refletida de forma especular;

δ_{α_s} – desvio padrão associado ao coeficiente de absorção da energia total incidente;

$\delta_{\text{aespecular}}$ – desvio padrão associado ao coeficiente de absorção da energia refletida de forma especular;

δ_s – desvio padrão associado ao coeficiente de espalhamento;

$\Delta\varphi$ – azimuth entre dois recetores adjacentes ($^\circ$);

$\Delta\theta$ – elevação entre dois recetores adjacentes (m);

ε – constante associada à dimensionalidade da modulação

θ – ângulo ($^\circ$);

λ – comprimento de onda (m);

λ_0 – comprimento de onda de projeto (m);

λ_{min} – mínimo comprimento de onda (m);

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA E CIENTÍFICA

O Som e o Ruído são dois conceitos que emergem inadvertidamente no quotidiano de todos nós, passando muitas vezes completamente despercebidos pelo frenesim diário a que a sociedade já se habituou. Nesse sentido, e desde à vários séculos, a Acústica apresenta-se como uma ciência muito útil na salvaguarda de diversos interesses, fornecendo as ferramentas e conhecimentos básicos para o estudo e controlo dos diversos fenómenos sonoros. O seu âmbito é vasto, mas destacam-se as aplicações ao nível da acústica arquitetónica e de edifícios, que se afirma como uma das áreas de maior visibilidade na utilização destes saberes. A proteção/isolamento sonoro e a adoção de medidas com o intuito de melhorar o desempenho e o comportamento de um determinado espaço são pois as mais notórias atividades a este nível.

O som percebido nos diversos ambientes não é mais do que uma mistura altamente complexa e heterogénea de ondas sonoras, que se combinam e propagam de infinitos modos. Na realidade, a percepção do som pelo ouvido humano acontece pela combinação de dois tipos de ondas sonoras: as que provêm diretamente da fonte sonora, formando o chamado campo sonoro direto, e as que resultam da reflexão em diversas superfícies, antes de chegar ao recetor, formando o campo sonoro reverberado. O estudo e dimensionamento da “quantidade” de som recebido de forma direta e de forma refletida é pois fundamental na caracterização acústica de um determinado espaço. Na verdade, um dos principais objetivos de investigação em acústica é a análise, manipulação e distribuição do som refletido, para a partir daí, jogar com os interesses de percepção que se pretendem para os recetores.

Sendo o domínio das reflexões o aspeto em que maioritariamente se irá atuar, é fundamental perceber qual o comportamento destas nos diversos tipos de superfícies e materiais, consoante as suas propriedades acústicas. Quando a onda sonora atinge uma superfície a energia que esta contém pode ser transmitida, absorvida ou refletida, sendo comum a simultaneidade destes três fenómenos. A quantidade de energia que é absorvida ou refletida dá pois informações importantes quanto ao comportamento acústico da superfície em estudo. Se uma superfície apresenta uma elevada quantidade de energia absorvida ela será absorvente, caso contrário será refletora. A quantificação desta propriedade é feita através do chamado coeficiente de absorção sonora (α), que traduz a relação entre a energia absorvida e a energia total incidente. Outro aspeto importante, e de grande relevância neste trabalho, está no estudo da forma como o som é refletido. Se este é redirecionado com o mesmo ângulo de incidência e numa direção claramente focalizada, estaremos perante uma superfície refletora lisa. Se pelo contrário, ao incidir na superfície o som se dispersar em diversas direções, estaremos

perante uma superfície difusora. A forma, estrutura e rugosidade da superfície em questão são pois os fatores mais preponderantes na maior ou menor capacidade que esta terá em provocar difusão.

Poderão também existir superfícies onde se conjugam propriedades absorventes e difusoras, e nesse caso ter-se-á uma superfície híbrida.^[1]

Há mais de uma centena de anos que os fenómenos de absorção são estudados. Wallace Clement Sabine foi um dos grandes responsáveis, tendo contribuído largamente para a formulação e publicação de uma considerável biblioteca de coeficientes de absorção, bem como para a definição dos procedimentos normalizados para a obtenção dos mesmos. O aprofundar de conhecimentos nesta área permite, nos dias de hoje, que exista um conhecimento sólido na forma como são concebidos e aplicados produtos para a absorção sonora.

Pelo contrário, o estudo da difusão é bastante recente, sendo que nos últimos trinta anos se tem assistido a um forte crescimento do interesse da comunidade científica neste fenómeno. Investigação mais aprofundada tem permitido melhorar, medir e quantificar de forma mais precisa o comportamento das superfícies difusoras.

A importância do estudo da difusão aumentou exponencialmente nos últimos anos e hoje apresenta-se como um dos maiores aliados dos engenheiros acústicos no estudo e dimensionamento dos espaços em que a acústica apresenta maior relevância. Esse novo conhecimento veio mudar significativamente a forma como os espaços acústicos são concebidos. Se antes do século XX, nos grandes palácios e salas de concerto, a estatúria e elevada ornamentação dos espaços conduzia a maior difusão, no século XX, a utilização de superfícies mais lisas e com menos ornamentação, com o intuito de proporcionar uma arquitetura mais simplista, reduziu a capacidade difusora dos espaços e acentuou as reflexões diretas. Este aspeto veio levantar alguns problemas acústicos nestes espaços, tais como ecos e elevados tempos de reverberação, ainda mais evidentes pelo avanço da engenharia, que permitiu criar superfícies refletoras mais precisas e focalizadas, em comparação com as superfícies lisas pré século XX, feitas manualmente e de forma mais arcaica. Nos dias de hoje, e com a descoberta e exploração dos fenómenos de difusão, a introdução de superfícies difusoras em salas de espetáculo é uma obrigatoriedade. Os conhecimentos obtidos nesta área permitem pois uma aplicação e distribuição adequada destes elementos, que se antes existiam, apenas agora começaram a ser compreendidos e quantificados.^[2]

Tal como referido as salas de espetáculo constituem um dos espaços em que a necessidade de recorrer à difusão se torna mais evidente. Isto deve-se principalmente ao facto de nestes espaços decorrerem atividades em que a perceção do som, seja a palavra ou instrumentos musicais, é fundamental. Numa sala onde esteja a atuar uma orquestra sinfónica é essencial garantir que todos os instrumentos musicais possam ser ouvidos de forma clara pelos espectadores, com o cuidado de garantir um tempo de reverberação não demasiado curto, para que estes não sejam ouvidos com excessiva clareza. Nestes espaços é então importante assegurar um certo “empastelamento” sonoro, claramente vantajoso para a qualidade do ambiente acústico. A garantia de uma boa dispersão do som, que assegure uma envolvimento sonora homogênea por toda a plateia, pode então ser obtida recorrendo a difusores, que para além de garantirem a dispersão mencionada, não retiram energia ao campo sonoro. Torna-se pois evidente que para estes espaços a utilização de difusores é claramente mais vantajosa que o uso de material absorvente, uma vez que este último poderá “roubar” frequências específicas de alguns instrumentos, que dessa forma deixariam de ser perceptíveis pelo público. Para salas mais pequenas, como salas de teatro, em que a inteligibilidade da palavra é fundamental, deve ser atingido um equilíbrio entre a colocação de material absorvente e difusor; o primeiro é utilizado para controlar o

tempo de reverberação enquanto o segundo pretende evitar que as reflexões iniciais provoquem distorção.

O grande salto na aplicação de difusores em salas de concerto e espetáculos deu-se através das descobertas pioneiras de Schroeder, que criou algoritmos de modulação capazes de conceber painéis difusores de propriedades acústicas e desempenho conhecidos. Este conhecimento permitiu aos acústicos grandes avanços ao nível do dimensionamento e aperfeiçoamento de painéis difusores, tais como o *Quadratic Residue Diffuser (QRD²)*, uma vez que o seu comportamento poderia agora ser previsto.^[2] Também nas salas de gravação e audição a difusão sonora é importante na garantia do controlo dos modos próprios de vibração.

Uma boa arquitetura acústica exige pois um equilíbrio entre o volume do espaço, a sua forma e o tratamento das diversas superfícies, utilizando uma combinação adequada de absorvedores, difusores e superfícies planas.

1.2. OBJETIVOS

Nesta dissertação a difusão é pois o grande tema de trabalho. Em colaboração com uma empresa especializada no ramo da Acústica, Vicoustic, pretende-se estudar o comportamento dos painéis à difusão. O objetivo principal, ou seja, a principal questão de investigação que se levanta neste trabalho, é o detalhe da metodologia experimental para obtenção do coeficiente de difusão (*diffusion coefficient*) e do coeficiente de espalhamento (*scattering coefficient*). Procura-se também estudar e perceber quais os produtos da Vicoustic em que existe interesse de aplicação destes ensaios.

O coeficiente de difusão mede a uniformidade com que o som é refletido. A aplicação da norma AES-4id-2001, utilizada para a determinação em laboratório deste coeficiente, nomeia-o como sendo uma medida da similaridade entre a resposta polar da energia espalhada e uma distribuição uniforme. Este é o parâmetro mais importante para os especialistas em acústica e projetistas de difusores já que se apresenta como o indicador comparativo da qualidade entre os diversos produtos.

O coeficiente de espalhamento relaciona a energia difundida de forma não direta (energia refletida em ângulos diferentes do ângulo da energia incidente) com a energia total refletida. Este coeficiente é pois uma medida da dispersão da energia sonora nas direções não diretas, sendo extremamente útil na modulação acústica de espaços. A introdução deste coeficiente revela-se de especial interesse para caracterizar de forma mais precisa e exata os fenómenos de difusão. A utilização da norma internacional ISO 17497-1:2004 permite a determinação laboratorial deste coeficiente.

Estes coeficientes têm como principal objetivo simplificar a caracterização dos difusores, já que as respostas polares (representações tridimensionais da dispersão energética sonora), como será visto mais à frente, apresentam dados de forma bastante densa, tornando-se complicada a sua análise. Por isso, estima-se um valor único que procura refletir de forma adequada as características das amostras em estudo. Apesar de serem os principais instrumentos de caracterização, os coeficientes apresentados apresentam falhas no seu uso, pelo que se torna necessária a determinação de ambos para compensar as eventuais falhas de cada um.

Prevê-se, no futuro, realizar estes ensaios, em câmara reverberante, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Aí se procederá à montagem experimental dos dois ensaios e à caracterização

da execução dos mesmos, contribuindo para que no futuro estes possam ser realizados com garantias de fiabilidade e credibilidade nos resultados.

As principais questões de investigação que se levantam neste trabalho são:

- Qual a metodologia experimental para obtenção do coeficiente de difusão (*diffusion coefficient*) e do coeficiente de espalhamento (*scattering coefficient*)?
- Quais os produtos da Vicoustic passíveis de ser ensaiados à difusão sonora? Quais as suas características?

1.3. OBJETO DE ESTUDO

A Vicoustic, empresa sediada em Lisboa e com sede logística em Paços de Ferreira, está a estabelecer-se como uma das empresas mais dinâmicas da indústria de soluções acústicas, não só a nível nacional como internacional. Esta empresa oferece uma gama de produtos e serviços inovadores, representando o resultado de anos de desenvolvimento, teste e otimização. Os engenheiros da Vicoustic trabalham frequentemente em parceria estratégica com outros setores da indústria, incluindo institutos de ciência e universidades.

Os produtos comercializados por esta empresa são vários, destacando-se essencialmente três domínios de atuação: *Music & Broadcast*, *HiFi & Home Cinema* e *Industrial*.

Ao nível da difusão são várias as soluções propostas. Para a secção de *Music & Broadcast* os produtos encontram-se divididos numa linha *Studio* e *Premium*, enquanto para as secções de *HiFi & Home Cinema* e *Industrial* apenas se encontram disponíveis os produtos *premium*.

Os produtos da linha *Studio* são todos construídos em poliestireno expandido de alta densidade e são destinados a atuar em médias e altas frequências. Poderão provocar multirreflexão vertical e horizontal ou em apenas uma das direções. Estando inseridos na secção de *Music & Broadcast*, estes painéis difusores são mais indicados para aplicação em espaços como estúdios de produção e gravação de música, onde se pretendam corrigir problemas de inteligibilidade do discurso e imprecisão musical, permitindo obter um som mais puro e definido.

Desta linha os produtos que poderão ser alvo de estudo no âmbito desta dissertação são:

- Pulsar Fuser DA;
- Multifuser DC2;
- Super Fuser Spyke 2.

Os produtos da linha *Premium*, disponíveis para todas as secções, apresentam um acabamento mais nobre já que têm como principal matéria-prima de fabrico a madeira. Mais eficazes a provocar difusão para médias e baixas frequências, estes painéis poderão provocar multirreflexão vertical e horizontal, combinando efeitos curvilíneos especiais. A sua aplicação é vasta abrangendo todo o tipo de espaços.

Desta linha os produtos que poderão ser alvo de estudo no âmbito desta dissertação são:

- Poly Wood Fuser;

- Poly Fuser QR;
- Multifuser Wood 36;
- Multifuser Wood 64.

Para além destes, poderá ter todo o interesse estudar um produto mais ligado à absorção (Wave Wood), mas que apresenta características geométricas que levantam interesse na previsão da difusão criada, e ainda um novo produto difusor, que constitui uma evolução do Trap Fuser RD11, o Trap Fuser Premium.

1.4. MÉTODO

A realização deste trabalho assenta de forma clara na definição de uma metodologia puramente experimental. Esta metodologia tem como principal objetivo a resposta às questões de investigação definidas no ponto 1.2 do presente capítulo. Este método exige o levantamento e caracterização cuidada de todos os elementos necessários à execução experimental, para a partir daí se proceder à montagem da mesma. O conhecimento de todas as variáveis intervenientes, sejam elas dependentes ou independentes, é fundamental para garantir o respeito criterioso das exigências associadas aos ensaios laboratoriais executados. Esta última questão é ainda mais importante quando são seguidas normas, tal como acontece no presente trabalho, que regulam e estipulam todos os pressupostos a seguir de forma a garantir a homogeneização e uniformidade dos resultados obtidos. O esforço pelo cumprimento estrito destas normas é fundamental na garantia de qualidade desses resultados e na aceitação e validação por parte da comunidade.

1.5. ENQUADRAMENTO SOCIAL, ECONÓMICO E CULTURAL

A relevância e pertinência deste trabalho enquadra-se a diversos níveis. De forma mais evidente destaca-se a importância económica associada, pois sendo a Vicoustic uma empresa virada essencialmente para o mercado internacional, a exportação dos seus produtos constitui uma importante alavanca para a afirmação e divulgação de produtos portugueses, de fabrico nacional, no estrangeiro. O sucesso desta comercialização constitui um importante fator na balança comercial portuguesa, traduzindo-se em ganhos evidentes para a economia e competitividade nacional.

Para além do valor económico associado a esta empresa e à comercialização dos seus produtos, existem também repercussões positivas a nível social. Por um lado a criação de emprego que poderá acontecer pelo crescimento e expansão da empresa, e por outro as consequências que a aplicação dos produtos que esta comercializa tem no quotidiano da sociedade. Salas de espetáculo, música e outros espaços são um bom exemplo de locais onde os espectadores beneficiam de forma clara da aplicação de painéis difusores. A qualidade dos espetáculos referidos é maior com a aplicação destes produtos, pelo que também existirá importante relevância ao nível cultural.

A título de exemplo da expansão e desenvolvimento que esta empresa está a sofrer, transcreve-se em seguida uma notícia retirada do Jornal de Negócios de 09 de Setembro de 2011, e também disponível do Portal do Ministério dos Negócios Estrangeiros de Portugal, onde está bem patente a internacionalização desta empresa e as vantagens que esta poderá trazer aos seus colaboradores e país em geral.

«««

Vicoustic vai abrir lojas na Austrália e nos EUA

Para que o seu material acústico se faça ouvir em todo o Mundo, a Vicoustic vai iniciar ainda este ano o seu processo de internacionalização.

Após já ter convencido o produtor de Lady Gaga e de Enrique Iglésias a usar os seus produtos, a empresa de Paços de Ferreira dá novo passo e vai apostar na abertura de duas lojas. Até já tem destino definido: Austrália e EUA.

Na Oceânia, o modelo adotado será de “joint venture” e avança nos próximos meses. Já no mercado norte-americano ocorrerá em 2012, através da abertura de uma loja com “showroom” e comerciais.

“Vamos para a Austrália através de uma “joint venture”, com instalações e logística próprias. Vamos ter serviços de vendas de produtos, mas também de consultoria”, adiantou ao Negócios César Carapinha, fundador e administrador da empresa criada há quatro anos e que este ano quer faturar quatro milhões de euros.

O novo espaço ficará sediado em Frenchs Forest, uma zona industrial nos arredores de Sidney. O investimento será de 500 mil euros, a dividir com parceiro local, a Alchemedia. Carapinha contou como se deu a oportunidade de negócio: “Fomos abordados por um investidor local que está no meio editorial. Através de revistas conheceram-nos e estão interessados em comercializar os nossos produtos.”

A Vicoustic, que centra a sua atividade no “hi-fi” e “music & broadcast”, tinha até aqui uma relação residual com o mercado australiano, através de um fabricante de microfones. “Vendíamos pouco, cerca de 100 mil euros. Com este investimento, esperamos faturar um milhão de euros em 2012. Pode até ser mais”, precisou Carapinha.

Som de proximidade em LA

O mercado norte-americano, especialmente na zona de Los Angeles, onde os grandes estúdios de música e cinema estão sediados, faz muitas solicitações para Paços de Ferreira. Para potencializar este mercado era preciso reforçar a aposta; “Temos adiado este passo, mas no princípio do próximo ano vai concretizar-se”, adiantou o fundador da Vicoustic.

À partida, o investimento far-se-á sem recurso a parceiros locais. “Vamos avançar com uma loja própria, com ‘showroom’ e marketing local”, afiançou César Carapinha. Mas quais as vantagens de ter presença física nos EUA? “A nossa logística é demorada e temos de ter ‘stocks’. Se temos um cliente com uma casa em construção, este não esperará três meses pelos produtos. É importante ter alguém no local que visite o cliente e seja um pouco relações públicas”, respondeu o empresário.

Só assim, defendeu Carapinha, será possível deixar de fazer contratos pontuais nos EUA e “passar a facturar milhões”. Recorde-se que a Vicoustic exporta 90% da sua facturação e está, actualmente, presente em vinte mercados.

Construir fábrica fora de Portugal está em estudo

Após a inauguração da nova plataforma logística dentro de dois meses, com 1500 m² e um investimento de 800 mil euros, a Vicoustic estuda também a construção de uma nova fábrica fora de Portugal. “Não temos nenhuma

decisão final, mas estamos a estudar", disse Carapinha. Em Dezembro do ano passado, o mesmo responsável apontava os EUA e Inglaterra como destinos a avançar ainda em 2012. A estratégia da empresa, com mais de 100 produtos em catálogo, passa por apostar na comercialização para o segmento industrial. "É aí que está o dinheiro", salientou Carapinha. Apesar de grande parte dos produtos da empresa serem exportados, a Vicoustic já equipou a Benfica TV e os estúdios de realidade virtual da RTP.

2011-09-09 08:14

João Carlos Malta, Jornal de Negócios

»»»

Tal como referido na notícia anterior, a Vicoustic tem conseguido convencer grandes nomes da produção musical mundial, como Jon Cohen (figura 1.1), um dos principais produtores de música "Classical Crossover". Cohen produziu registros para todos os grandes nomes do Reino Unido e escreveu e produziu para artistas como Vanessa Mae e Opera Babes. Com um currículo impressionante de mais de três milhões de álbuns vendidos, incluindo sete álbuns que chegaram ao número 1 dos clássicos, Cohen produziu o álbum *Spirit of the Glen* para os Royal Scots Dragoon Guards, que foi premiado Álbum Clássico do Ano de 2009, nos prémios Classical BRIT. Projetos mais recentes incluem artistas como Faryl Smith, The Kenyan Boys' Choir, bem como *remixes* para Leona Lewis, Lady Gaga e Enrique. Na figura 1.2 apresenta-se uma imagem da aplicação de produtos da Vicoustic nos estúdios de Jon Cohen.



Fig. 1.1 – Jon Cohen.^[32]



Fig. 1.2 – Aplicação de produtos da Vicoustic no estúdio de Jon Cohen.^[32]

1.6. MOTIVAÇÃO

A escolha por este tema deveu-se essencialmente ao gosto que o autor apresenta pelas matérias associadas à área da Acústica. Existiu, desde o início, um interesse muito grande em realizar esta dissertação em ambiente empresarial, já que isso poderia possibilitar a realização de um trabalho de maior relevância e interesse económico e social. Por essa razão, há mais de um ano que foram estabelecidos os primeiros contactos nesse sentido. A escolha do tema resultou da concertação entre os interesses de ambas as partes, seguindo sempre uma via mais associada à área da investigação e estudo de novos produtos, tendo em mente a procura de soluções inovadoras e originais. Para além do estudo e caracterização de produtos existentes e comercializados, a investigação de novos produtos apresenta-se como um projeto extremamente aliciante e desafiador, ainda mais na área da difusão, onde pelo menos a nível nacional, muito pouco trabalho foi realizado.

2

O FENÓMENO DA DIFUSÃO SONORA

2.1. CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA

A fundação da Acústica Arquitetónica deve mercedamente ser oferecida a Wallace Sabine, que iniciou os seus estudos nesta área há mais de 100 anos. Desde cedo a principal preocupação acústica esteve do lado da absorção. O estudo deste fenómeno, a criação de tecnologia absorvente e a sua quantificação através da criação de técnicas de medição normalizadas, que permitissem obter coeficientes avaliadores da eficácia dos diversos produtos, foram os principais avanços na área da acústica até há bem pouco tempo atrás. Mesmo depois de tantos anos de investigação e descobertas, persistem problemas na quantificação de algumas superfícies e de alguns fenómenos físicos que se traduzem em coeficientes de absorção superiores à unidade.

Por outro lado a análise e estudo dos fenómenos de difusão é muito recente. Ao longo dos últimos 30 anos importantes avanços se conseguiram nesta área, através do melhor entendimento teórico do fenómeno que permitiu otimizar os processos de dimensionamento de painéis com tecnologia difusora. Na verdade o grande avanço na difusão deu-se a partir do momento em que os engenheiros acústicos descobriram uma forma de modular os fenómenos de difusão, permitindo uma adequada adaptação às exigências de cada espaço. A indústria da acústica pode a partir de agora aproximar a abordagem de mercado dos painéis difusores àquela que é feita para os produtos absorventes, através da quantificação exata, por coeficientes específicos, da capacidade difusora dos seus produtos e das repercussões que isso tem para o tratamento acústico dos espaços.^[3]

As tendências arquitetónicas, tal como já referido na introdução do presente trabalho, tiveram um importante papel na descoberta dos benefícios que a difusão acarreta para o ambiente acústico. Os locais destinados à realização de espetáculos, são por norma, os espaços de referência no estudo da acústica arquitetónica, já que é nestes onde as exigências sonoras mais se destacam. Em salas de concerto anteriores ao século XX, tal como a Grosser Musikvereinssaal em Viena (figura 2.1), a elevada ornamentação das paredes e tetos, característica do estilo arquitetónico da época, conduziam, inadvertidamente, a uma difusão sonora claramente vantajosa para a qualidade acústica do espaço. Nestes espaços era raro existirem superfícies lisas amplas, pelo que se evitavam problemas tais como ecos ou tempos de reverberação demasiado elevados. Este exemplo é extremamente interessante pois, apesar de se tratar de um espaço com mais de uma centena de anos, esta sala continua nos dias de hoje a ser considerada como uma das melhores salas de espetáculos do mundo, tendo inclusive inspirado compositores famosos tais como Brahms, Bruckner, e Mahler.



Fig. 2.1 – Sala Grosser Musikvereinsaal em Viena.^[23]

No século XX assistiu-se a uma mudança radical na forma de conceber e interpretar a arquitetura. A adoção de formas mais cúbicas e superfícies mais lisas, incorporando uma tendência arquitetónica mais simplista, dominaram a concepção de diversos espaços, incluindo salas de espetáculo. Um exemplo claro desta realidade é a sala de concertos Colston Hall em Bristol (Figura 2.2). Esta sala pós-guerra incorpora linhas simples e pouca ou nenhuma ornamentação, num estilo marcadamente modernista, traduzindo-se numa quase inexistente capacidade difusora.

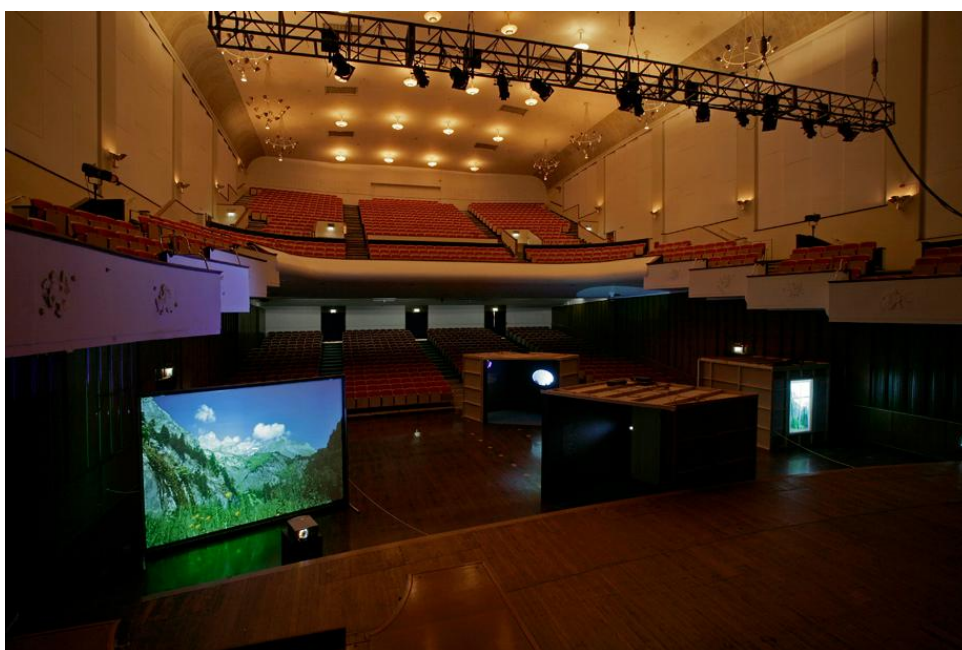


Fig. 2.2 – Sala de Concertos Colston Hall em Bistol.^[24]

A existência de superfícies planas muito extensas pode provocar distorção sonora, conduzindo a problemas como ecos (causados por reflexões tardias, mais de 50ms atrasadas, e que são claramente audíveis), ecos flutuantes (causados pelas repetições refletidas entre paredes paralelas), filtragem (do inglês: *comb filtering* - interferência construtiva e destrutiva entre o som direto e as reflexões primárias) entre outros. Apesar de tudo, importa referir que salas de concerto de elevada qualidade, com superfícies planas, são possíveis de ser realizadas. Um claro exemplo disso é a Symphony Hall em Birmingham.

O segredo, e desafio atual, para a obtenção de espaços com bom comportamento à difusão e respeitando as tendências arquitetónicas pretendidas, está na adaptação dos produtos difusores às exigências do arquiteto, sem que sejam postas em causa as qualidades acústicas do espaço. Haverá pois que encontrar um equilíbrio entre a estética e a funcionalidade para garantir a qualidade final do projeto. O *design* moderno que tem vindo a ser utilizado nos painéis difusores tem facilitado a colaboração entre acústicos e arquitetos.^[4]

2.2. O QUE É UM DIFUSOR? – PRINCÍPIO DE HUYGENS

Quando o som incide numa superfície três fenómenos básicos poderão ocorrer: transmissão, absorção e reflexão. Durante estes processos energia é atenuada, sendo que o somatório da energia total é igual à energia atenuada por absorção e/ou transmissão e a energia espalhada através da reflexão na superfície.

Nos fenómenos de reflexão a energia poderá ser refletida com o mesmo ângulo de incidência, e nesse caso estaremos perante uma reflexão especular, na qual a energia é transmitida numa direção focalizada e num curto espaço de tempo. Quando a energia refletida se dispersar uniformemente em diversas direções, e for igualmente dispersa do ponto de vista temporal (distribuída num período de tempo mais longo do que numa reflexão especular), está-se na presença de uma reflexão difusa. As reflexões especulares sobre uma determinada superfície criam uma zona especular, que pode ser definida, segundo as definições da norma AES-4id-2001, como a “*área contida por linhas imaginárias construídas a partir da fonte de imagem, que é criada em relação ao plano da superfície de referência plana através dos bordos da superfície de referência plana para o arco recetor*”, tal como ilustra a figura 2.3.

Poderão ser descritos três mecanismos que originam reflexão difusa. O primeiro está associado à rugosidade superficial, que provoca dispersão sonora em todas as direções. O segundo mecanismo corresponde à difração nos bordos. Para explicar este fenómeno é útil recorrer a um exemplo prático. Imagine-se um muro de pedra, em que dum lado se encontra a fonte sonora e do outro o recetor. Apesar de não ver a fonte, o recetor é capaz de ouvi-la sempre que esta está ativa. Isso acontece precisamente devido à difração nos bordos, no caso do topo superior do muro. No limite entre o topo do muro e o ar por cima deste, formam-se fontes sonoras secundárias que passam a emitir ondas hemisféricas para o espaço envolvente. Esta emissão secundária permite criar um percurso direto entre a fonte sonora e o recetor, sendo essa a razão pela qual este, apesar de não a ver, a consegue ouvir (figura 2.4). Na acústica arquitetónica a difração nos bordos acontece sempre que uma onda sonora encontra uma alteração na superfície refletora. O terceiro mecanismo consiste num tratamento dado a uma determinada superfície que permita a criação de um difusor numérico. O mecanismo subjacente a um difusor numérico não apresenta relação com qualquer um dos anteriores. Um difusor numérico

trata-se pois de uma estrutura formada por reentrâncias de largura igual mas profundidades diferentes, o que se traduz na dispersão em diversas direções das ondas sonoras incidentes – difusão. Este mecanismo será explicado à frente com maior detalhe.^[5]

A compreensão do fenómeno de difusão é facilitada com as construções de Huygens, originalmente concebidas para explicar o espalhamento da luz, mas que quando adaptadas à acústica permitiram explicar o porquê da energia especular se dirigir numa direção focalizada, associada ao ângulo especular.

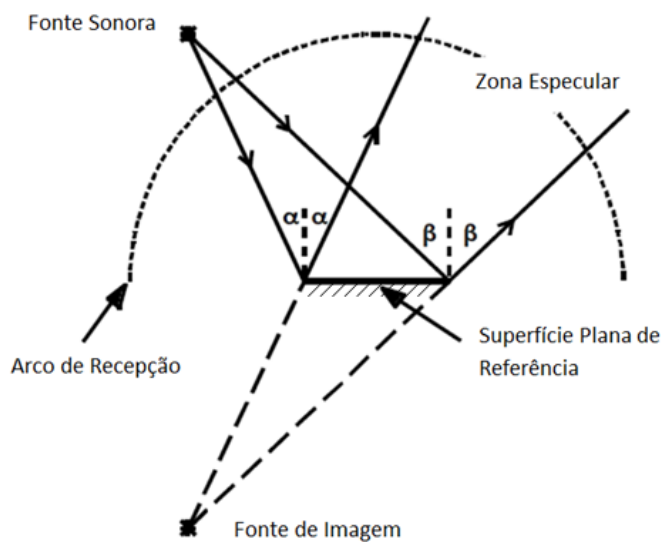


Fig. 2.3 – Representação da Zona de Reflexão Especular.^[18]

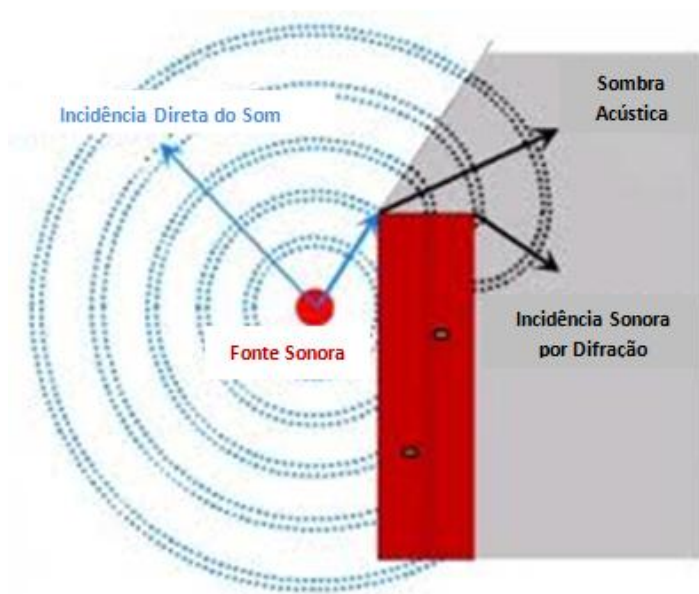


Fig. 2.4 – Difração nos bordos.^[5]

O princípio de Huygens propõe que a superfície de espalhamento seja subdividida num conjunto de pontos/fontes sonoras, igualmente espaçados, que irradiam ondas sonoras hemisféricas. Cada um destes pontos emite ondas concêntricas que acabam por se intercetar. É possível desenhar linhas a unir os pontos mais afastados das ondas hemisféricas concêntricas, formando-se linhas retas pelo facto de as ondas estarem todas em fase. Estas linhas não são mais do que as frentes de onda e mostram a direção de propagação da onda refletida.

A análise da figura 2.5 permite visualizar a aplicação do princípio de Huygens para uma superfície plana onde incide uma onda sonora normal a esta. A onda será refletida com o mesmo ângulo de incidência, neste caso 90° , pelo que a onda refletida dirige-se na direção oposta como indicado.

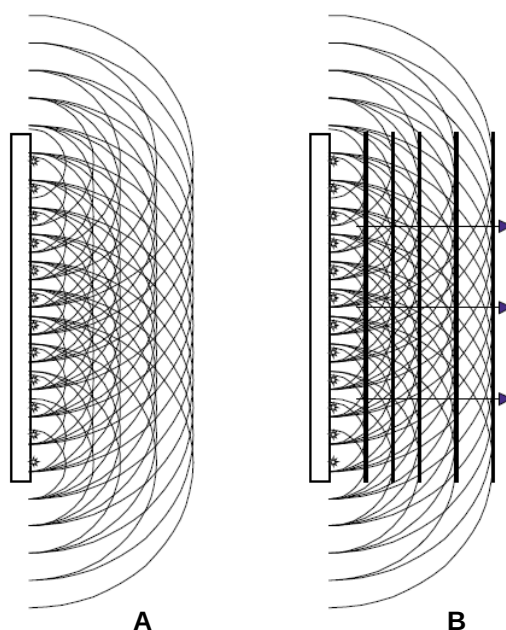


Fig. 2.5 – Princípio de Huygens aplicado a uma superfície plana com a incidência de uma onda sonora normal a esta. A – sem indicação das frentes de onda; B – com indicação das frentes de onda. ^[3]

Se o som provier com outro ângulo de incidência, as ondas em fase vão interferir destrutivamente umas com as outras, e por isso, numa dada direção, apenas se mantém a energia especular.

Para garantir que a energia refletida não seja apenas dispersa na direção especular mas também noutras direções será necessário atuar na fase e amplitude das ondas sonoras, ou seja, as propriedades que as definem.

Uma das formas de provocar alterações na fase das ondas sonoras é colocar saliências e reentrâncias, de diferentes profundidades, alterando a topografia da superfície. Nestas condições esta passará a ser chamada de grelha difusora em fase (*reflexion phase grating*).

A alteração da amplitude das ondas pode ser conseguida através da colocação de material absorvente na superfície refletora. A colocação de áreas com material absorvente, deixando as outras com o comportamento refletor original, permite criar ondas refletidas com diferentes amplitudes, para uma mesma onda incidente. Neste caso temos uma superfície híbrida (que combina absorção e reflexão) chamada de grelha difusora em amplitude (*reflection/absorption amplitude grating*).

As duas soluções anteriores podem ser usadas e combinadas de diversas formas, permitindo a criação das mais variadas superfícies difusoras com diferentes comportamentos.

Na figura 2.6 poderá ser visualizada uma superfície difusora com reentrâncias de diferentes profundidades, separadas fisicamente por divisórias. Como se pode constatar existem dois grupos de reentrâncias que apresentam as mesmas características, pelo que as ondas aí refletidas encontram-se em fase umas com as outras. No entanto quando as ondas hemisféricas dos dois conjuntos se intercetam, ocorrem interferências que provocam desvios na frente de onda, que toma direções de progressão diferentes. Ocorre então o fenómeno de difusão, que poderá ser claramente mais difuso se forem utilizadas outras configurações mais complexas de reentrâncias.

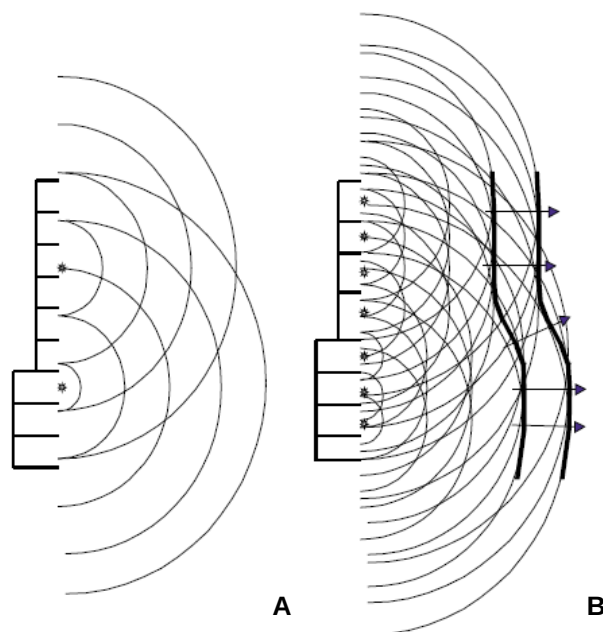


Fig. 2.6 – Princípio de Huygens aplicado a uma superfície com reentrâncias de profundidades diferentes – alteração de fase. A – sem indicação das frentes de onda; B – com indicação das frentes de onda. ^[3]

A colocação de material absorvente, combinado com as características refletoras da superfície, permite também provocar difusão, através da alteração da amplitude das ondas sonoras (figura 2.7). O som ao incidir numa área absorvente vai perder energia e por isso ver a sua amplitude reduzida. Tomando como referência o princípio de Huygens podemos considerar que na zona absorvente não existem fontes sonoras pontuais, pelo que dessa zona não são emitidas ondas sonoras. Isso implica que próximo dessas zonas, as frentes de onda sejam menos avançadas, formando-se uma dispersão de som não homogénea.

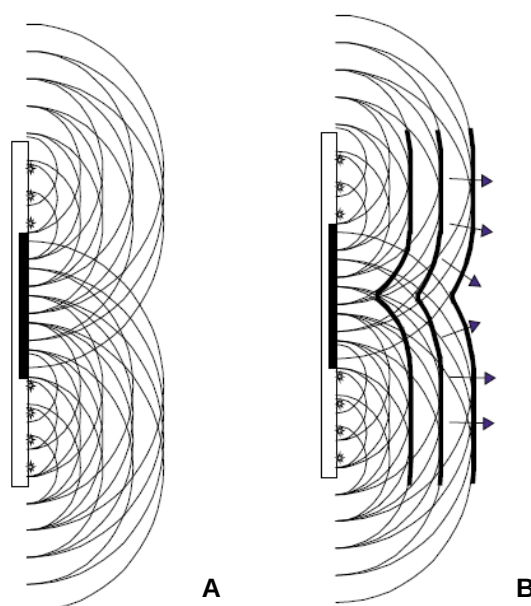


Fig. 2.7 – Princípio de Huygens aplicado a uma superfície com material absorvente – alteração de amplitude. A – sem indicação das frentes de onda; B – com indicação das frentes de onda. ^[3]

O uso de superfícies curvas (otimização de formas) é outra forma de ter difusão sonora sem recorrer à introdução de reentrâncias (figura 2.8). O formato curvo da superfície é suficiente para dispersar homogeneamente a energia pelo espaço, vindo ela de qualquer direção.

Um difusor pode então ser definido como uma superfície que espalha uniformemente a energia refletida e é invariante ao ângulo de incidência, ao ângulo de observação e à frequência, dentro de determinada largura de banda. Estes deverão também apresentar uma assinatura temporal diferente da do som incidente, o que é conseguido à custa da criação de dispersão temporal. ^{[3], [4]}

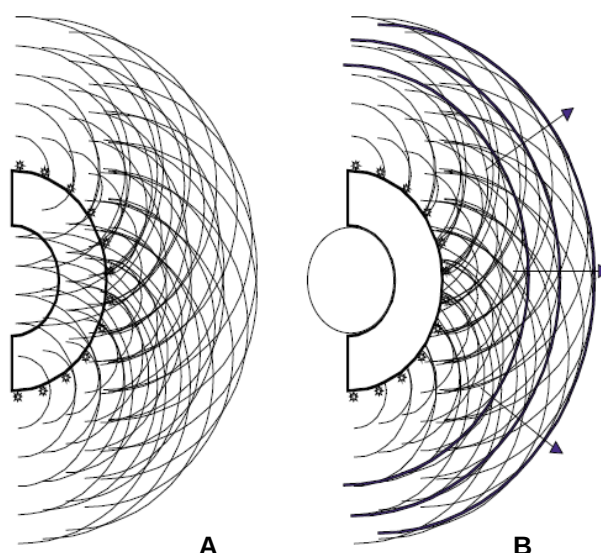


Fig. 2.8 – Princípio de Huygens aplicado a uma superfície curva – otimização de formas. A – sem indicação das frentes de onda; B – com indicação das frentes de onda. ^[3]

2.3. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL SONORA DOS DIFUSORES – 1D VS 2D

Anteriormente foram referidos três tipos de difusores: aqueles que atuam na alteração da fase, os que atuam na alteração da amplitude e aqueles que recorrem à otimização de formas.

Um difusor pode também ser avaliado e classificado pela forma como faz a distribuição espacial das ondas sonoras. Para perceber melhor o comportamento dos difusores recorre-se a gráficos polares que procuram mostrar a forma como a energia se espalha pelo espaço. Para cada frequência e ângulo de incidência existe uma resposta polar. Este tipo de gráficos dão pois uma boa percepção sobre a forma como a energia se dispersa nas diversas direções.

A forma como a dispersão da energia é avaliada depende essencialmente da estrutura do difusor, ou seja, caso se trate de um difusor com um plano de reflexão, ou seja, em que a variação de fase ou amplitude ocorre apenas numa direção, estaremos perante um difusor 1D (figura 2.9 - esquerda); no caso de termos um difusor com múltiplos planos de reflexão, teremos um difusor 2D (figura 2.9 - direita).

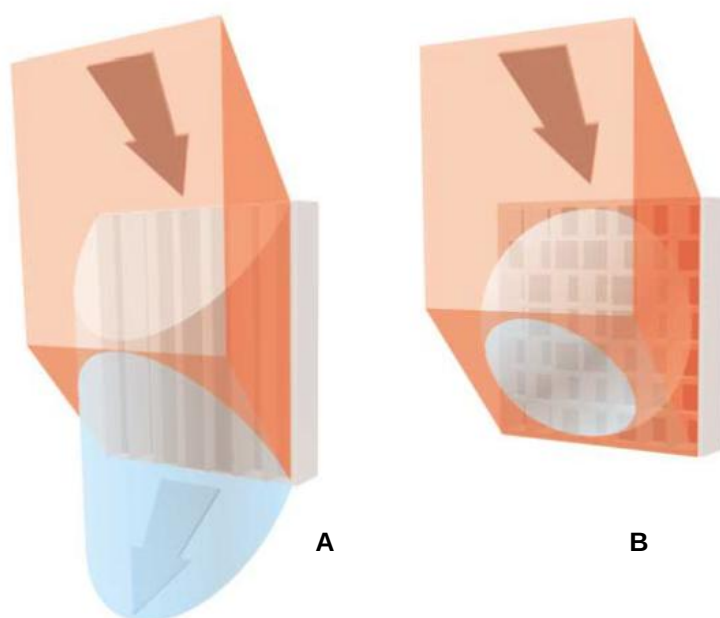


Fig. 2.9 – Respostas Polares para um difusor 1D (A) e um difusor 2D (B).^[3]

Num difusor unidimensional (1D) o som é espalhado através de um semicírculo na direção de variação de fase ou amplitude e é refletido com o mesmo ângulo de incidência. Um difusor bidimensional (2D) dispersa energia uniformemente ao longo de meia esfera, independentemente do ângulo de incidência.

Pode ser estabelecida uma relação entre a quantidade de energia dispersa por um difusor 1D e 2D. Pelo facto de o difusor bidimensional dispersar energia de forma omnidirecional, então para uma mesma direção, este espalha metade da energia quando comparado com um difusor 1D.^[3]

A obtenção de respostas polares implica a realização de ensaios laboratoriais, que se diferenciam consoante está em análise um painel difusor 1D ou 2D. Para difusores 1D, utiliza-se um sistema de

medição com um goniómetro 2D em que existem diversos microfones que formam um semicírculo em torno do difusor (figura 2.10); no caso de termos um difusor com múltiplos planos de reflexão, o ideal será utilizar um goniómetro 3D e um sistema hemisférico (figura 2.11). Este sistema é constituído por um único microfone que percorre toda a sua extensão, sendo colocado normalmente por cima do difusor. Outra hipótese é prender o microfone a um braço mecânico capaz de rodar em torno do difusor. Como a utilização desta estrutura hemisférica é bastante complexa e dispendiosa, é comum realizarem-se medições 2D através de várias direções ortogonais.

Para o cálculo das respostas polares, que permitem visualizar de forma gráfica a maneira como o som é disperso pelas superfícies, é comum utilizar-se o Método do Elemento Fronteira (*Boundary Element Technique*), que será abordado com maior pormenor no capítulo 4. A figura 2.12 ilustra as respostas polares para três tipos de superfícies difusoras: uma superfície lisa com ripas de madeira paralelas, uma superfície em forma de pirâmide e uma superfície difusora otimizada, especializada na alteração da fase das ondas sonoras. De referir que estas respostas polares foram obtidas para uma frequência de 2 kHz e uma incidência normal. Para o primeiro caso, superfície com ripas de madeira paralelas, temos um difusor típico unidimensional, na qual as reflexões se dão na horizontal, pelo facto de as ripas estarem dispostas verticalmente. Para este, a reflexão especular é bastante significativa, formando-se um lobo mais pronunciado na resposta polar. Para a superfície piramidal as reflexões seguem a simetria nas quatro faces triangulares. A última superfície, difusor 2D, mostra-se como sendo a mais eficaz na dispersão da energia pelo espaço, distribuindo a energia uniformemente ao longe de um hemisfério.^[3]

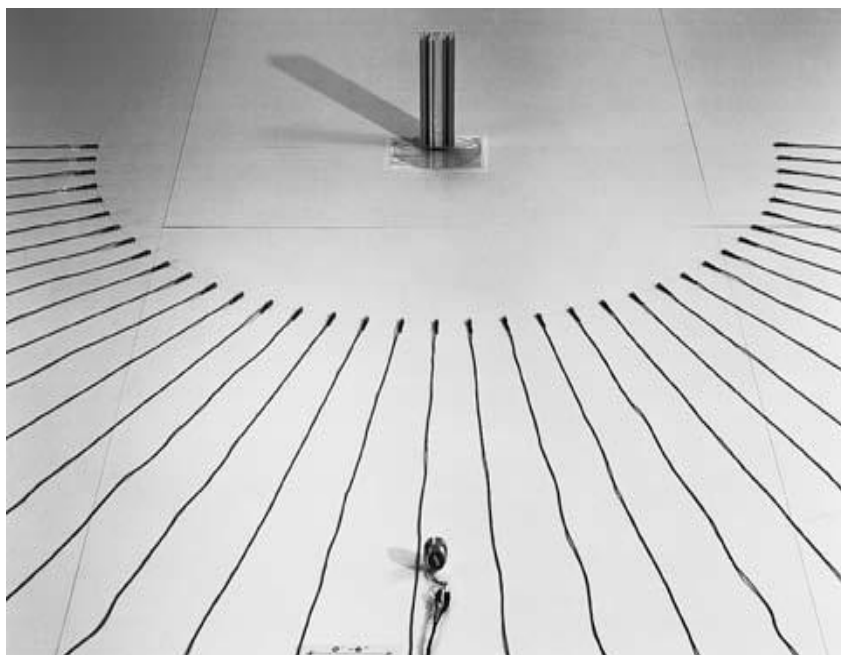


Fig. 2.10 – Goniómetro 2D para Difusores 1D.^[1]



Fig. 2.11 - Goniómetro 3D mais sistema hemisférico para Difusores 2D. ^[1]

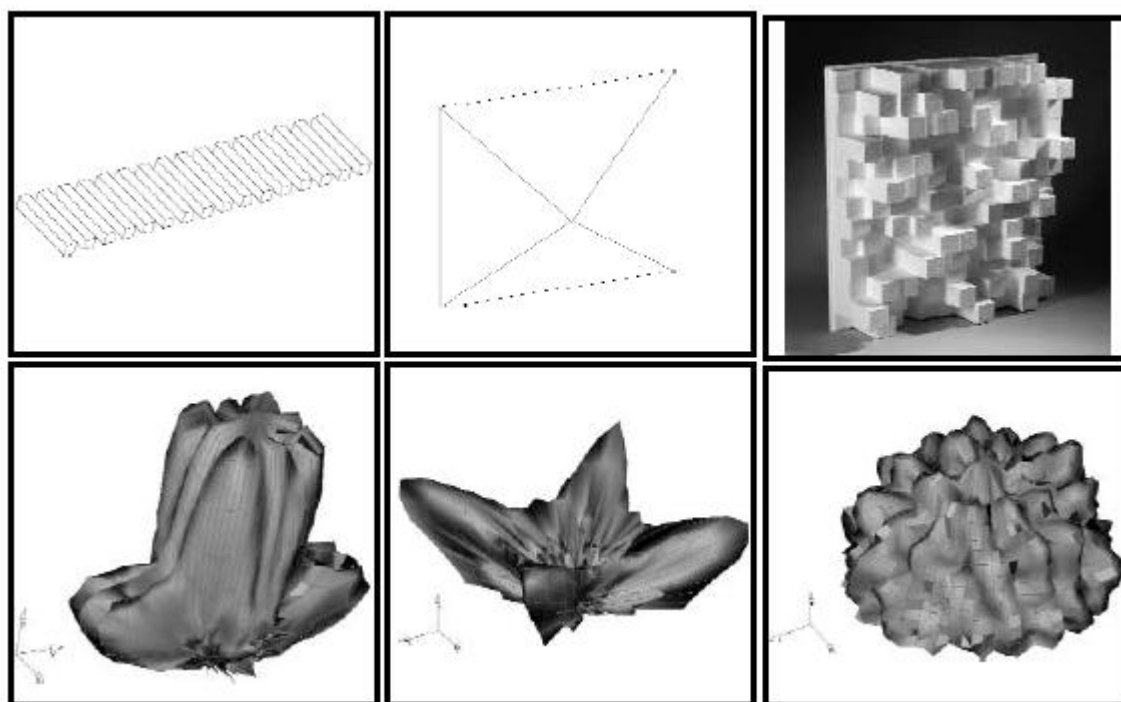


Fig. 2.12 – Respostas Polares, para incidência normal a 2 kHz, de uma superfície plana com ripas de madeira, uma superfície piramidal e uma superfície otimizada para alteração de fase (da esquerda para a direita). ^[3]

2.4. GEOMETRIA DOS DIFUSORES

Existem diversas geometrias que podem ser utilizadas para provocar difusão sonora. Pirâmides e Triângulos, Arcos Côncavos e Convexos, Superfícies Curvas Otimizadas, Fractais, Difusores Volumétricos e até mesmo superfícies planas são exemplos de geometrias responsáveis por difusão. Nesse sentido será abordado em seguida, de forma breve, o comportamento à difusão de superfícies planas, triângulos e pirâmides, arcos côncavos, arcos convexos e difusores volumétricos. A referência a curvas otimizadas e fractais surgirá enquadrado noutras rubricas.

2.4.1. SUPERFÍCIES PLANAS

As superfícies planas são por norma as superfícies mais comuns na arquitetura. Apesar de se associar imediatamente superfícies planas a reflexões especulares, o fenómeno de difusão também nelas está presente principalmente pelo efeito de reflexão nos bordos. Na figura 2.13 está a resposta polar para altas frequências de um refletor plano de um metro de comprimento.

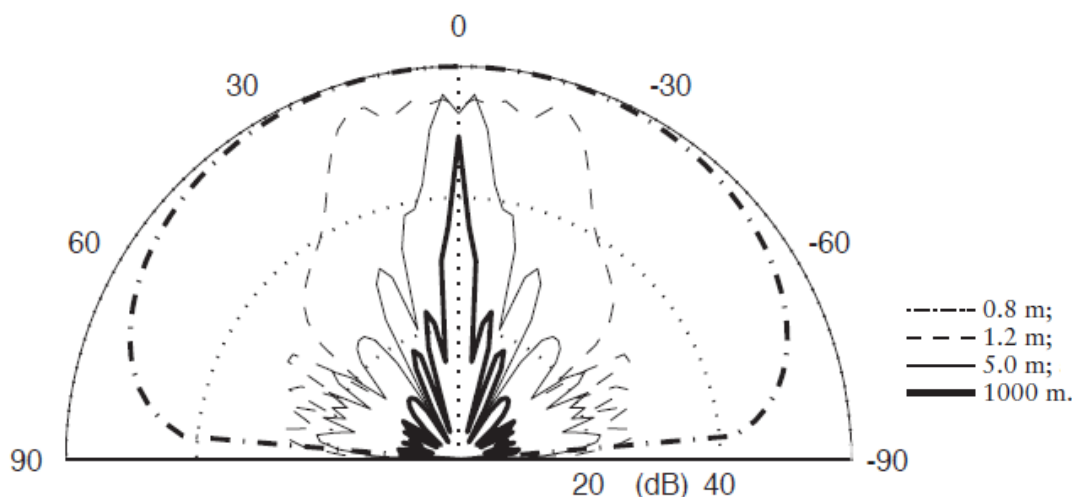


Fig. 2.13 – Resposta Polar para uma superfície plana de 1m de comprimento sujeita a altas frequências, para quatro diferentes distâncias ao recetor (raio).^[1]

A análise da figura 2.13 permite verificar que para distâncias elevadas a energia reflete-se cada vez mais de forma especular, numa direção focalizada e com o mesmo ângulo de incidência do estímulo sonoro. No entanto para curtas distâncias o painel plano provoca uma difusão bastante significativa, sem que no entanto este possa ser considerado um bom difusor.^[1]

2.4.2. TRIÂNGULOS E PIRÂMIDES

Triângulos e Pirâmides podem provocar diversas formas de difusão e reflexões especulares dependendo da sua geometria e disposição. Na verdade o espalhamento provocado por um conjunto de pirâmides ou triângulos é muito influenciado pelo declive das inclinações laterais destes elementos.

Em comparação com as superfícies planas, estes elementos são claramente mais difusores, tal como pode ser observado pela análise da figura 2.14. Para além disso, esta figura demonstra que a colocação de um conjunto com maior número de triângulos permite dispersar energia de forma mais eficaz, com menor criação de lobos.^[1]

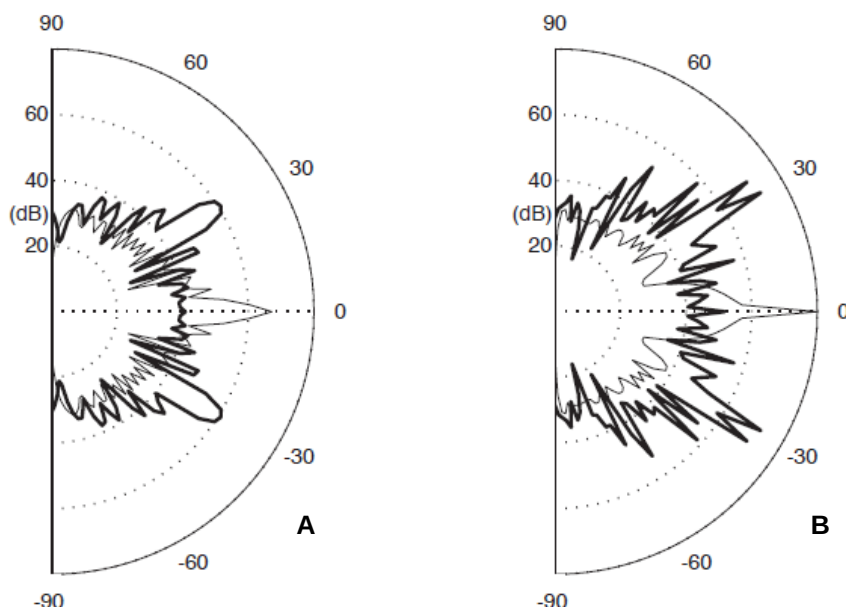


Fig. 2.14 – Respostas Polares de superfícies planas e com triângulos. A: Superfície Plana com a mesma dimensão que um triângulo (linha fina) e um triângulo (linha grossa); B: Superfície Plana com a mesma dimensão que cinco triângulos (linha fina) e cinco triângulos (linha grossa).^[1]

2.4.3. ARCOS CÔNCAVOS

As superfícies côncavas são por norma um grave problema para os acústicos pois a sua forma é responsável pela focalização excessiva do som que origina reflexões muito intensas em certos planos. Isto pode levar a uma distribuição energética disforme, bem como à ocorrência de ecos e coloração do timbre.

Os problemas que um arco côncavo pode criar estão intimamente dependentes do seu arco e da posição das fontes sonoras e recetores.

Este tipo de superfícies deve estar pois afastado de locais com presença de pessoas, evitando que estejam direcionados para estes espaços. Caso isso não seja possível deverão ser cobertos por material absorvente ou difusor para evitar os problemas enunciados.

A figura 2.15 mostra a resposta polar para um arco côncavo para várias distâncias (raio - r) do recetor (rf representa o comprimento focal da superfície concava).^[1]

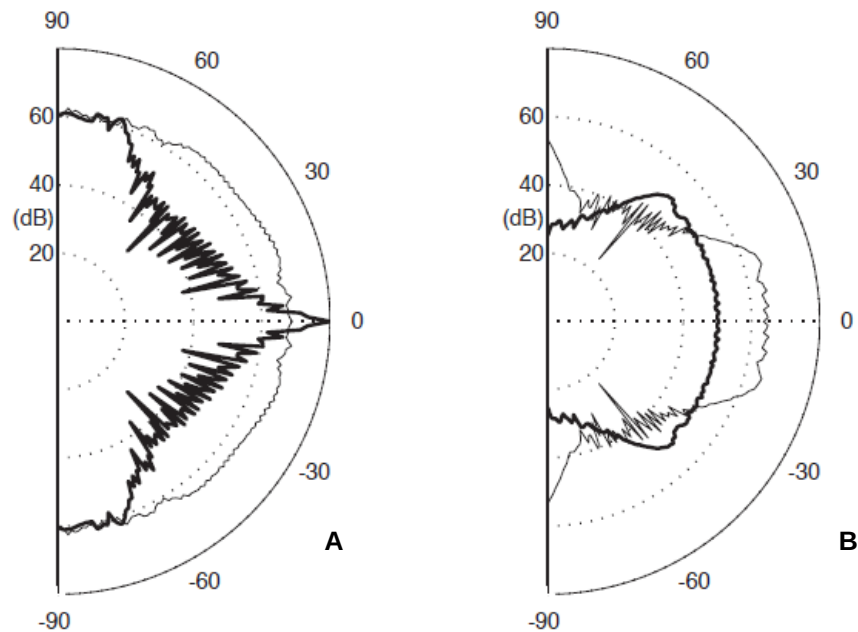


Fig. 2.15 – Resposta polar para um arco côncavo para várias distâncias (raio - r) do recetor (r_f representa o raio focal da superfície concava). A: $r < r_f$ (linha fina); $r = r_f$ (linha grossa); B: $r > r_f$ (linha fina); $r \gg r_f$ (linha grossa).^[1]

2.4.4. ARCOS CONVEXOS

As formas mais comuns associadas a arcos convexos são cilindros e esferas. Cilindros são muito eficazes na dispersão do som num plano enquanto as esferas dispersam hemisfericamente. Na figura 2.16 podem ser vistas as respostas polares para um semicilindro para diversas frequências. Na mesma constata-se que para médias e altas frequências a dispersão espacial do som é omnidirecional. O mesmo já não acontece para baixas frequências em que o comprimento de onda é maior e por isso os bordos do cilindro e mesmo a parte traseira começam a ter efeito na difusão.

Um cilindro isolado não apresenta grandes resultados ao nível da difusão pelo que, a serem utilizados, estes são dispostos em conjunto. A resposta polar depende então da forma como os cilindros estão dispostos em sequência. A figura 2.17 dá noção da dispersão que pode ser alcançada através da utilização de um conjunto de semicilindros. A sequência com que estes estão dispostos tem elevado impacto na dispersão energética como se pode constatar. Se o conjunto de semicilindros for disposto de forma não periódica geram-se mais lobos e por isso maior dispersão sonora; o contrário acontecerá para uma sequência periódica de semicilindros.^[1]

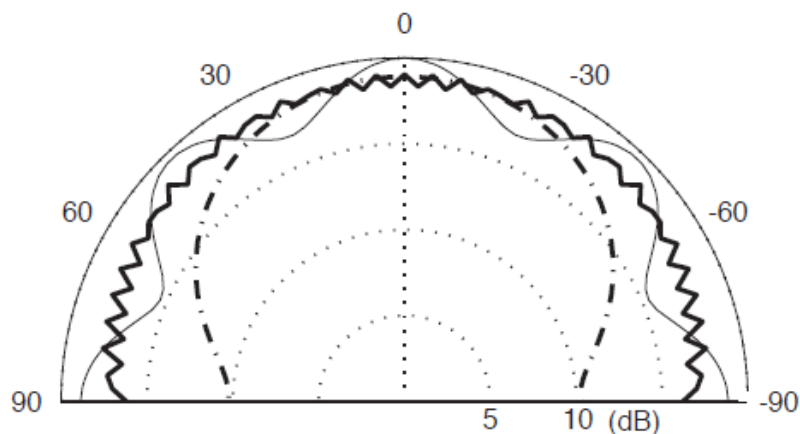


Fig. 2.16 – Respostas Polares de um semicilindro com um metro de diâmetro para várias frequências. Linha Ponto Traço (40 Hz), Linha contínua fina (400 Hz), Linha contínua grossa (4000 Hz).^[1]

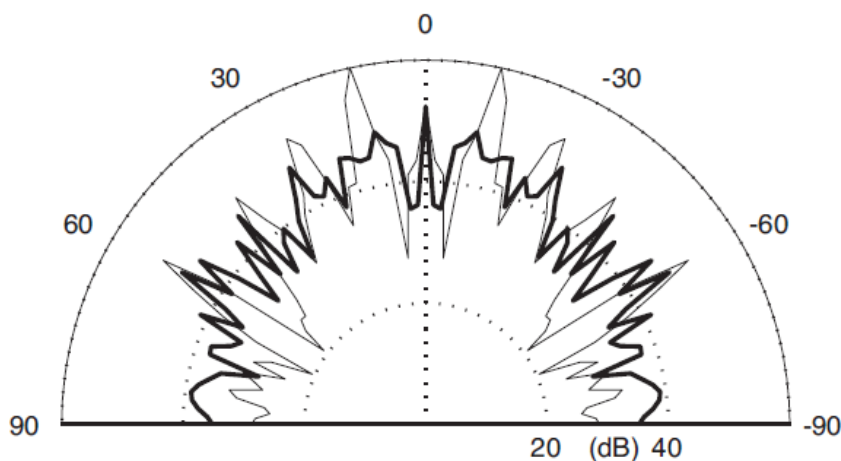


Fig. 2.17 – Respostas Polares para um conjunto periódico (linha fina) e não periódico (linha grossa) de um conjunto de semicilindros. Para o conjunto periódico $D \approx 4\lambda$, em que d é o diâmetro do cilindro e λ o comprimento de onda.^[1]

2.4.5. DIFUSORES VOLUMÉTRICOS

Quando se pensam em difusores associa-se imediatamente à sua colocação em paredes ou tetos. No entanto outra abordagem pode ser feita para além da colocação de painéis difusores em superfícies. Uma nova solução passa por colocar o difusor no volume do espaço em vez de fixá-lo a uma superfície. O espaço influenciado por este tipo de difusores é o dobro daquele que é conseguido para os difusores colocados em superfícies. Esta situação permite que melhores resultados possam ser atingidos. Um dos problemas deste tipo de difusores está no espaço por ele ocupados e no eventual incómodo à funcionalidade do espaço que possam vir a criar.

Da mesma forma que para situações anteriores também aqui se deverá usar um conjunto de elementos arranjados numa sequência não periódica. Outro aspeto importante prende-se com a densidade dos materiais utilizados já que com uma densidade muito baixa o som passa sem sofrer qualquer tipo de

alteração. Uma estrutura que adense para o interior deverá apresentar o comportamento mais interessante. Na figura 2.18 é possível ver um esquema de um difusor volumétrico.^[1]

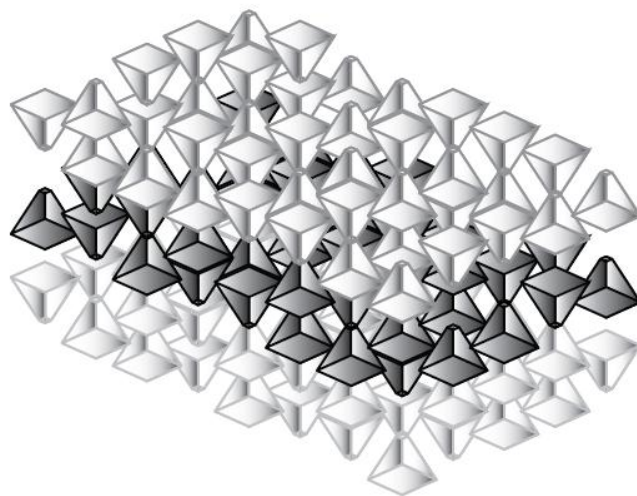


Fig. 2.18 – Difusor Volumétrico. ^[1]

2.5. DIFUSORES DE SCHROEDER

Manfred Schroeder é um dos grandes responsáveis pelo avanço tecnológico da difusão, tendo os seus trabalhos pioneiros contribuído para a melhor compreensão deste fenómeno e sobretudo, para a capacidade de modular e dimensionar superfícies difusoras com propriedades e comportamento conhecidos. Estas descobertas permitiram uma adaptação personalizada e adequada às exigências, ao nível da difusão, de diferentes tipos de espaços.

Schroeder foi responsável pela invenção de superfícies difusoras com alteração de fase das ondas sonoras (*phase grating diffuser*, também conhecido como difusor de Schroeder – exemplo de um difusor deste género na figura 2.19).^[6] As potencialidades que estes difusores contêm vieram satisfazer de forma perfeita as necessidades dos engenheiros acústicos, que passam agora a dispor de uma ferramenta de definição de superfícies difusoras com comportamento acústico conhecido, baseando-se em simples formulações matemáticas.

Este difusor, como já visto anteriormente, aposta na alteração de fase das ondas sonoras para provocar difusão sonora. Essa variação é conseguida à custa de reentrâncias de largura idêntica mas profundidades diferentes. Diferentes combinações geométricas destas reentrâncias conduzem a comportamentos difusores distintos. As sequências e sua repetibilidade são pois um fator preponderante para este comportamento.

A figura 2.20 mostra a comparação da dispersão energética de um difusor de Schroeder e um difusor plano. Pode-se constatar que a difusão sonora do painel com alteração de fase é muito superior ao do painel plano. No primeiro a dispersão energética é conseguida para todas as direções de forma homogênea, tal como se pode ver pelos lobos que se formam, e que demonstram que o comportamento difusor do painel segue uma tendência de repetição associada à sequência de reentrâncias usada. Já

para o painel plano a reflexão especular é a mais evidente, já que a dispersão energética se dá segundo uma direção marcadamente focalizada, ou seja, associada ao ângulo de reflexão especular, no caso, incidência perpendicular ao painel, já que a reflexão se dá a aproximadamente a 0° de inclinação.

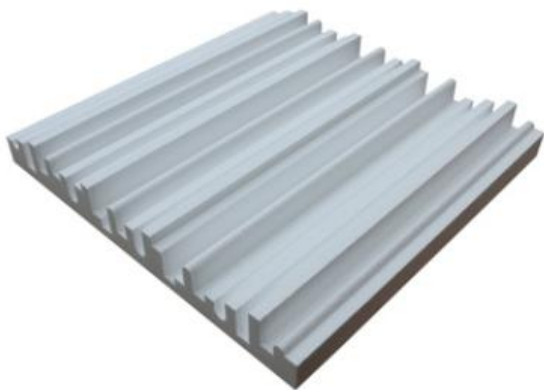


Fig. 2.19 – Difusor de Schroeder (Pulser Fuser DA – Vicoustic) ^[4]

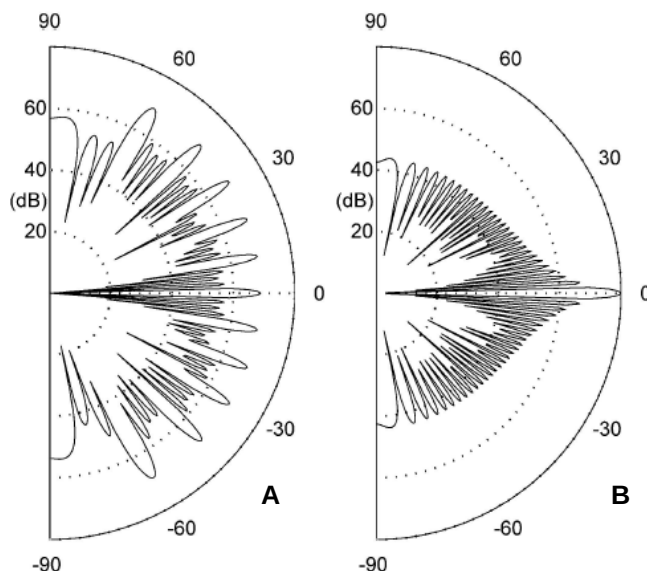


Fig. 2.20 – Níveis de Espalhamento de um difusor de Schroeder (A) e de um difusor plano (B). ^[4]

Como já foi referido, o dimensionamento destes painéis assenta na alteração de fase das frentes de onda (*phase grating diffuser*). Para conceber um painel com estas características é necessário utilizar um método que permita obter as sequências de reentrâncias e suas profundidades que permitam alcançar o grau de difusão desejado. Para obter este método, Schroeder recorreu à teoria dos números, ciência que estuda as propriedades dos números naturais, e que apesar de recorrer a pressupostos polémicos, tem permitido aos cientistas e investigadores chegar a conclusões muito interessantes a vários níveis. Neste âmbito a teoria dos números, formulada por Gauss, foi a grande base para a formulação da sequência residual quadrática, que permitiu a construção dos difusores residuais quadráticos (difusores QRD – *Quadratic Residue Diffusers*). Um exemplo de um difusor QRD está patente na figura 2.19.

Desta forma pode-se pois concluir que a distribuição polar das pressões refletidas é determinada pela profundidade e dimensões das reentrâncias. Schroeder demonstrou que, ao escolher uma sequência residual quadrática, a energia refletida por cada lobo de difração é a mesma.

O dimensionamento dos painéis difusores de Schroeder segue equações bastante simples que a seguir se enunciam. Há que referir que para esta teoria estar correta a propagação de ondas planas (simplificação da propagação de ondas esféricas – propagação segundo uma direção em que as ondas poderão ser representadas como segmentos de reta verticais paralelos entre si) nas reentrâncias deve ser evidente.

A dimensão das reentrâncias para a frequência máxima (comprimento de onda mais pequeno) poderá ser obtida através da seguinte expressão:

$$w = \frac{\lambda_{min}}{2} \quad (1)$$

Em que w é a largura da reentrância e λ_{min} é o mínimo comprimento de onda, dado pelo quociente entre a velocidade do som c e a frequência máxima $f_{máx}$.

A fórmula apresentada refere-se apenas a um limite de aplicabilidade e não a um limite superior de qualidade de um difusor. Os separadores físicos entre reentrâncias devem ser o mais estreitos possíveis, mas não em demasia para não entrarem em vibração facilmente. A necessidade de implantação destes separadores prende-se com o interesse de ter ondas de propagação planas.

A sequência residual quadrática é o meio matemático mais conhecido para o dimensionamento das dimensões das reentrâncias. A formulação desta sequência é baseada num número primo. O número da sequência s_n , para a reentrância n pode ser obtido da seguinte forma:

$$s_n = n^2 \text{ modulo } N \quad (2)$$

Em que *modulo* representa o resto não negativo, e costuma ser abreviado através da sigla *mod*. N representa o número primo que serve de base para gerar a sequência.

Para melhor se entender o método referido torna-se útil recorrer a um exemplo prático. Considerando um valor de $N = 7$, a profundidade do sexto poço será dada por: $s_5 = 5^2 \text{ modulo } 7 = 25 \text{ modulo } 7$. O *modulo 7* significa que 7 é subtraído de 25 até se obter resto não negativo, ou seja, 7 é subtraído de 25 três vezes com resto 4. A profundidade do sexto poço será então proporcional ao número 4. ^[31]

São calculadas as primeiras 4 reentrâncias sendo que as restantes correspondem aos resultados invertidos das primeiras, até obter 7 reentrâncias, o que corresponde a um período. Por isso para as diversas reentrâncias a sua profundidade é determinada da seguinte forma:

Reentrância Zero: $0^2 \text{ modulo } 7 = 0$;

Reentrância Um: $1^2 \text{ modulo } 7 = 1$;

Reentrância Dois: $2^2 \text{ modulo } 7 = 4$;

Reentrância Três: $3^2 \text{ modulo } 7 = 2$;

Reentrância Quatro: 2;

Reentrância Cinco: 4;

Reentrância Seis: 1;

Reentrância Sete: 0.

Na figura 2.21 apresenta-se uma tabela com as profundidades das diversas reentrâncias para os números primos N entre 5 e 23.

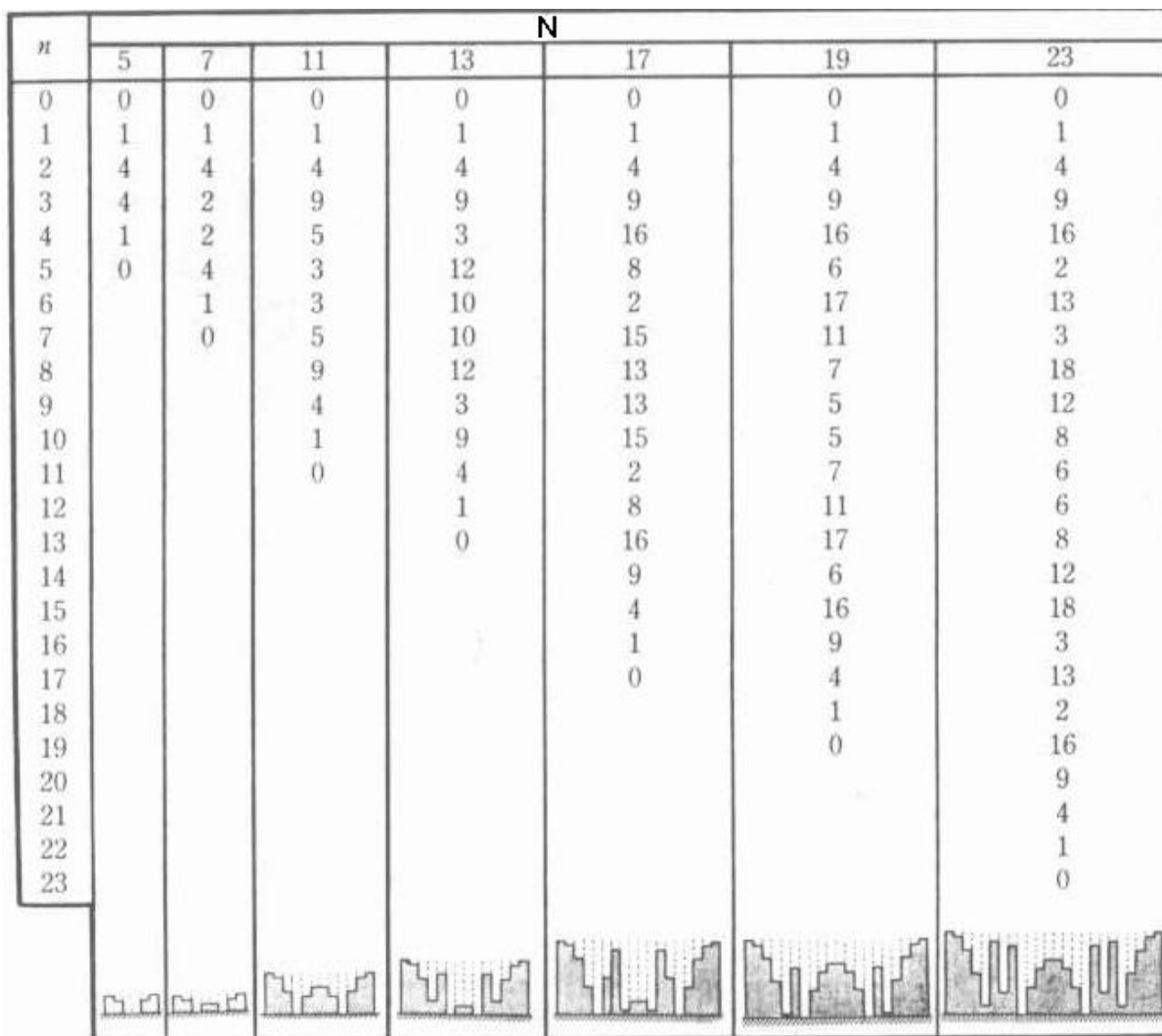


Fig. 2.21 – Sequência residual quadrática para os números primos de 5 a 23. O perfil do difusor encontra-se ilustrado no rodapé de cada coluna, onde a profundidade de cada poço é proporcional à sequência de números da respectiva coluna.^[31]

Os difusores de Schroeder são dimensionados para uma determinada frequência f_0 (frequência de projeto), normalmente uma frequência limite mínima. Por conveniência na apresentação da formulação matemática é comum apresentar-se o respectivo comprimento de onda λ_0 (obtido pelo quociente entre a velocidade do som c e a frequência mínima f_{min}), sendo que a profundidade das reentrâncias d_n poderá ser obtida através da expressão (3).

$$d_n = \frac{s_n \times \lambda_0}{2N} \quad (3)$$

A profundidade d_n poderá variar entre 0 e $\lambda_0/2$, sendo que a frequência mínima corresponde àquela a partir do qual é possível produzir lobos energéticos numa resposta polar.

Sendo usada esta técnica para a construção de um difusor então os lobos obtidos num gráfico de espalhamento energético têm todos a mesma energia, tal como pode ser visto na figura 2.20 (esquerda).

Pelo que já foi referido, constata-se que a periodicidade é um dos aspetos de maior relevância no comportamento de difusores de Schroeder. A figura 2.22 ilustra as respostas polares de três difusores ($N = 7$) com periodicidade diferente.

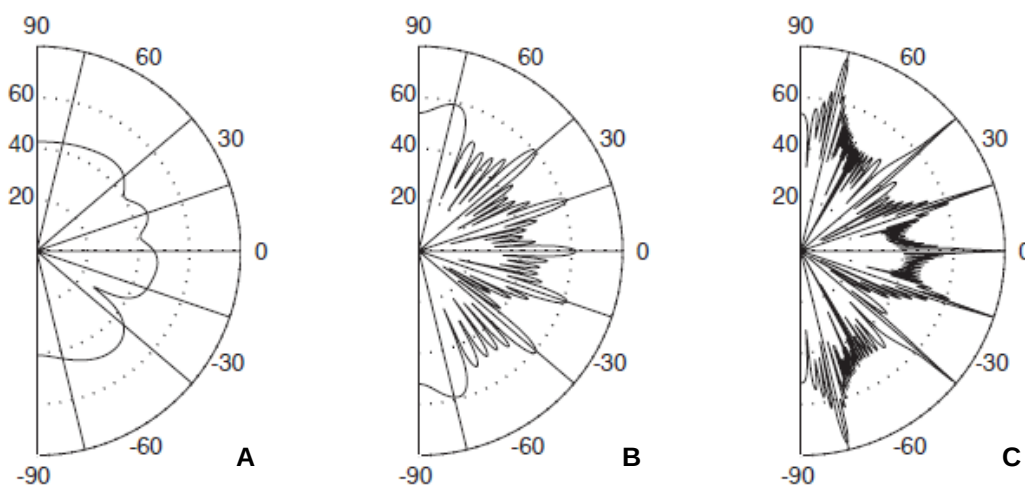


Fig. 2.22 – Respostas Polares de difusores QRD ($N=7$) a 3000 Hz para diferentes números de períodos. A: 1 período, B: 6 períodos e C: 50 períodos. Linhas radiais de marcação dos lobos a $\pm 76^\circ$, $\pm 40^\circ$, $\pm 19^\circ$ e 0° .^[1]

A imagem A da figura 2.22 considera um único período. A resposta polar apresenta uma difusão homogênea em todas as direções, no entanto levanta problemas de formulação matemática que põe em causa a própria definição de Schroeder. Se por outro lado mais períodos forem utilizados, os lobos da resposta polar tornam-se mais próximos, o que leva a uma dispersão das reflexões mais heterogênea pois existem ângulos de reflexão predominantes e zonas de anulação entre eles.

Daqui se conclui que uma importante ponderação do número de períodos a utilizar deve ser feita de forma a garantir a maior eficácia ao nível da difusão sonora. Nesse sentido o melhor *design* será aquele obtido através de um número reduzido de períodos, por exemplo cinco, de tal forma a que estes garantam periodicidade suficiente, e em que os lobos da resposta polar não se encontrem excessivamente próximos. O período deve ser suficientemente largo de forma a garantir um número suficiente de lobos, o que implica que devem existir várias reentrâncias de largura considerável.

Para altas frequências os comprimentos de onda associados são pequenos, logo pela expressão (1) poderia prever-se a necessidade de ter reentrâncias o mais estreitas possíveis. No entanto esta afirmação não é totalmente válida devido essencialmente a duas questões: custos de produção e absorção. Em termos práticos torna-se muito complexo e dispendioso conceber produtos com as reentrâncias muito estreitas e próximas umas das outras; para além disso, essa geometria aumenta a

camada fronteira viscosa (*viscous boundary layer*) comparativamente à largura, o que provoca um aumento da absorção. Dessa forma é comum que a largura das reentrâncias se situe entre 2,5 e 5 cm.

No que diz respeito à profundidade das reentrâncias, e também à escolha do número primo associado à sequência residual quadrática, também se encontram limitações ao nível de fabrico, pelo que existe uma estreita relação com as frequências a que os produtos são capazes de funcionar. Desta forma, para uma profundidade de reentrância máxima, $d_{máx}$, a frequência de *design* (Hz) pode ser obtida da seguinte forma:

$$f_0 = \frac{s_{máx}}{N} \times \frac{c}{2d_{máx}} \quad (3)$$

Onde $s_{máx}$ é o maior número da sequência residual quadrática, c a velocidade do som (m/s), e N o número primo da sequência QRD.

A razão entre $s_{máx}$ e o número primo N permite determinar a eficiência a baixas frequências do produto em estudo.

A largura de banda de atuação de um difusor de Schroeder é pois limitada nas altas frequências pela largura das reentrâncias e nas baixas frequências pela profundidade das mesmas.

Outro aspeto de grande importância ao nível da análise de frequências prende-se com a localização das chamadas frequências críticas, que reduzem, para essas frequências, a eficácia difusora de um painel. Para um difusor QRD as frequências críticas ocorrem para $m \times N \times f_0$, onde m é uma constante de integração que assume valores 1, 2, 3, ... Para estas frequências, e devido ao facto de todas as reentrâncias refletirem em fase, o difusor comporta-se como uma superfície plana, refletindo por isso de forma especular e não difusa. Isto acontece quando as profundidades das reentrâncias são múltiplos de metade do comprimento de onda. Para evitar a ocorrência destas frequências críticas é necessário coloca-las acima da frequência máxima de funcionamento do difusor, seguindo a expressão (4) abaixo enunciada.

$$N > \frac{c}{2wf_0} \quad (4)$$

Existem outro tipo de sequências que podem ser utilizadas para a modulação de superfícies difusoras. Outra formulação bastante conhecida é a sequência da raiz primitiva. O seu modo de determinação não será aqui abordado, no entanto é interessante salientar que para este caso, se um difusor for feito usando esta sequência, o lobo central, associado à reflexão especular, é suprimido, enquanto os outros mantêm sensivelmente o mesmo nível.

Esta técnica de gerar sequências constitui uma operação avançada da teoria de números que tem permitido obter respostas e soluções muito interessantes. Não só na Acústica, como na Astronomia, em sistemas de controlo de erros para computadores, informações digitais de áudio e telefonia móvel, esta teoria tem sido extremamente útil.

Apesar de se tratar de uma invenção engenhosa, os difusores de Schroeder têm nos últimos tempos vindo a sofrer alguns melhoramentos tendo em vista a resolução de problemas particulares tais como: largura de banda, periodicidade ou mesmo a aparência.

A largura de banda surge como um problema na medida em que o ser humano tem a capacidade para ouvir um largo espectro de frequências (entre 20 Hz e 20000 Hz). Se ao nível da ótica os estudos são feitos para intervalos de frequência estreitos, nos difusores a conceção é feita para uma largura de banda maior e considerada mais importante (entre os 80 Hz e 5000 Hz). Para conseguir obter um difusor com a capacidade de responder eficazmente a todo este intervalo de frequências é necessário realizar reentrâncias estreitas e muito profundas, o que na prática se torna praticamente inconcebível pois a estrutura torna-se demasiado dispendiosa e altamente absorvente, pois o som ao entrar nestas reentrâncias tem maior dificuldade em sair por reflexão, pelo que existem perdas mais significativas sob a forma de calor. Para tentar resolver este problema foram obtidas soluções baseadas na teoria do caos e em fractais.

De forma a abranger diversas oitavas, os difusores têm de apresentar reentrâncias com escalas e dimensões muito diversas. Tendo em atenção a expressão que relaciona a frequência e o comprimento de onda (comprimento de onda igual à relação entre a velocidade do som e a frequência), podemos ver que para frequências baixas, as ondas sonoras terão comprimentos de onda cada vez mais elevados, pelo que as reentrâncias, para apresentarem eficácia na difusão destas ondas sonoras, teriam de ter a mesma ordem de grandeza destas para que as ondas sonoras não passassem incólumes pela reentrância. Ora isso implica que para baixas frequências fosse necessário ter reentrâncias com dimensões na ordem dos metros, enquanto para frequências mais elevadas a ordem de grandeza já seria o centímetro. Esta discrepância não é exequível do ponto de vista prático pelo que considerações têm de ser feitas.

Fractais são elementos que mantêm aproximadamente a mesma escala de dimensões para diferentes níveis de ampliação. Um dos fractais mais famosos é o conjunto de Mandelbrot (figura 2.23) em que para diferentes ampliações (diferenças superiores a mil vezes) se pode constatar que existe uma manutenção da forma e proporção do objeto, apesar de escalas bem diferentes. Utilizando esta técnica na construção de painéis difusores é possível abranger uma largura de banda de oitavas muito superior. Tal pode ser visto na figura 2.24, em que do lado esquerdo tem um difusor de Schroeder normal e do lado direito um difusor com *design* fractal, existem reentrâncias mais largas e outras mais pequenas, e a profundidades diferentes, no interior destas. Enquanto as reentrâncias de menores dimensões atuam nas altas frequências as mais largas atuam nas mais baixas frequências. Pelo facto de apresentarem esta abrangência de largura de banda estes painéis são normalmente chamados de Difratais.^[7] Para o exemplo apresentado existiam duas escalas diferentes de reentrâncias, no entanto para obter uma boa difusão a frequências muito baixas é necessário ter três escalas diferentes, em que a escala maior é cerca de cinquenta vezes superior à escala mais pequena.

No domínio da periodicidade está-se perante uma contradição. Para os painéis que usam a técnica de alteração de fase é necessário que estes apresentem sequências com uma periodicidade definida de tal forma a que se possam formar lobos de igual dimensão e distribuição espacial uniforme (definição ótima de difusão para Schroeder). No entanto a existência de lobos implica que haja reflexão predominante em direções definidas, sendo que entre eles existe falta de reflexão. Nessa ordem de ideias o difusor ideal será aquele que distribui energia pelo espaço de forma uniforme e sem a criação de lobos. A contradição inicialmente mencionada surge precisamente neste ponto, já que a teoria de números sugere a necessidade de periodicidade e consequentemente a formação de lobos na resposta energética do difusor.

Para tentar resolver este paradoxo, Angus^[8], propôs soluções para os difusores baseada na telefonia móvel, que já tem influência na produção de microfones e altifalantes.

Ao nível das telecomunicações utilizam-se códigos que permitem que vários utilizadores utilizem uma mesma largura de banda ao mesmo tempo. O pressuposto deste fenómeno baseia-se na distribuição de componentes de frequência pela largura de banda. Esta técnica de espalhamento de componentes de frequência pode ser aproximada aos difusores. O objetivo é pois dispersar a energia existente nos lobos para tornar o espectro energético mais uniformemente distribuído em todas as direções (figura 2.25).

Para um difusor o processo adotado para conseguir este efeito é o seguinte: são utilizados dois difusores de Schroeder, um normal e o outro que produz a mesma resposta polar mas em fase oposta. Isto é conseguido através da construção de um difusor de tal forma a que as reentrâncias estejam dispostas de forma simétrica em relação ao primeiro. Ao serem dispostos em sequência, os difusores simétricos vão ser sempre colocados adjacente, formando uma sequência aleatória sem periodicidade definida. Este aspeto vai permitir anular a formação de lobos e garante uma distribuição energética mais uniforme em todas as direções. Obviamente, que dado o número limitado de painéis que existem à disposição, as sequências ao fim de algum tempo poderão encontrar, em algumas partes, repetibilidade. Para evitar essa situação ao máximo é comum a utilização de programas de computador que procuram as sequências menos repetitivas. ^[4]

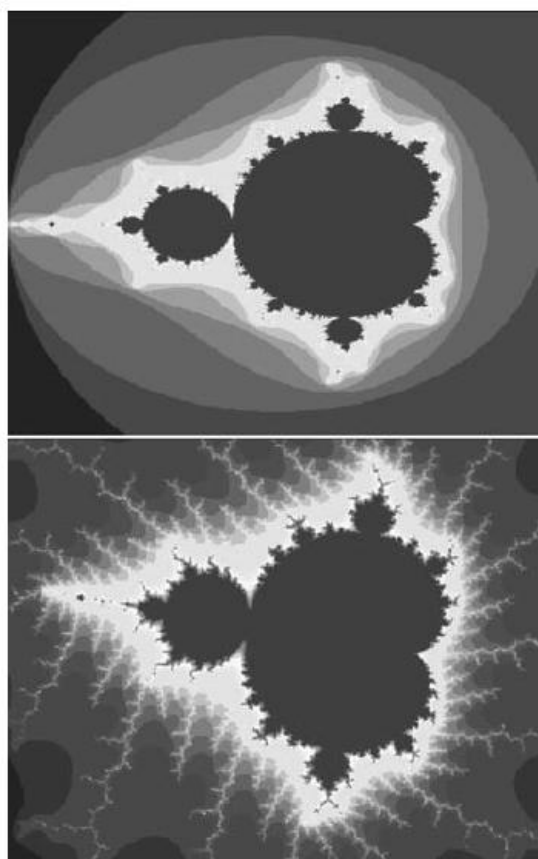


Fig. 2.23 – O conjunto de Mandelbrot para duas ampliações diferentes. ^[4]

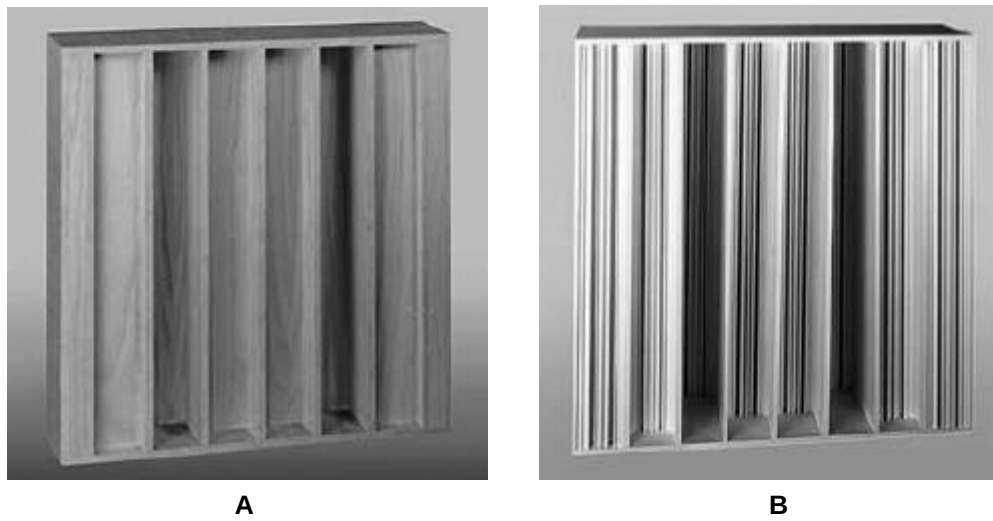


Fig. 2.24 – Difusor de Schroeder básico (A) e Difusor de Schroeder com *design* fractal (B).^[4]

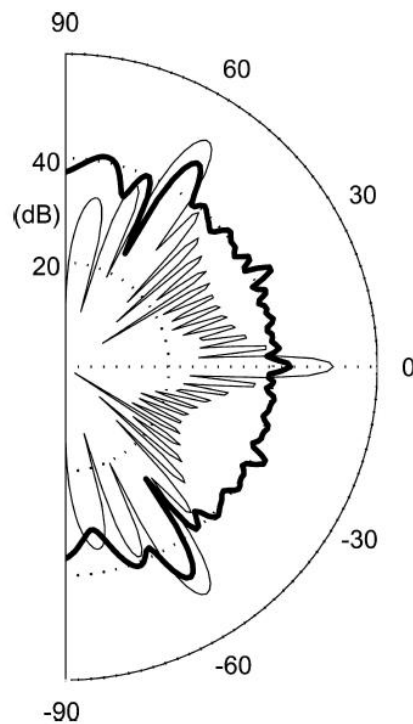


Fig. 2.25 – Distribuição Polar da Energia dispersa por um difusor periódico (linha fina) e um difusor modulado (linha grossa).^[4]

Um dos aspetos mais marcantes dos difusores de Schroeder é a sua forma. Esta questão levanta muitas vezes problemas e conflitos com a arquitetura. Arquitetos que prefiram linhas retas e simples muito dificilmente irão aceitar a implantação deste tipo de difusores nos seus projetos. Por norma, e

difícilmente, os arquitetos estão dispostos a pôr a função à frente da forma, o que dificulta significativamente os processos de diálogo e concretização entre arquitetos e acústicos.

Há no entanto que arranjar soluções e entendimentos que permitam resolver estas questões, pois a capacidade acústica de um espaço, principalmente de salas de espetáculo ou outros locais em que este é um parâmetro essencial para o seu correto funcionamento, não pode ser deixada para segundo plano. Nesse sentido, na fase de dimensionamento dos painéis difusores, o desenho destes tem sido objeto de cada vez mais atenção e cuidado, na tentativa de arranjar formas de os integrar na arquitetura dos edifícios, sem pôr em causa as suas referências e conceitos estéticos. Para obter formas diferentes e mais adaptáveis à arquitetura, normalmente formas curvas, recorre-se a operações de otimização numérica, que apesar de não apresentar a mesma elegância dos métodos teóricos numéricos, é bastante robusta e eficaz. Esta otimização é feita à custa de computadores que procuram, por processos iterativos, as melhores soluções para cada problema. Este processo iterativo segue essencialmente os seguintes passos:

- 1- Cálculo das pressões sonoras nas posições onde estão colocados os recetores;
- 2- Cálculo do Desvio Padrão, na largura de banda pretendida, entre o espalhamento obtido e o espalhamento que se deseja;
- 3- Somam-se os desvios anteriormente mencionados para obter o erro total associado;
- 4- Se o erro é aceitável o processo termina e está descoberta uma curva otimizada, caso contrário o processo terá de prosseguir através da alteração dos parâmetros da curva.^[26]

A utilização de curvas nestes processos é bastante comum já que estas garantem simplicidade e elegância, o que normalmente se coaduna com grande parte da arquitetura.

2.6. DIFUSORES HÍBRIDOS

Um difusor tem como principal função, como já foi visto, atuar nas ondas sonoras incidentes de tal forma a provocar reflexões o tanto mais dispersas possíveis pelo espaço. Ora isso pode ser conseguido à custa da modificação estrutural da superfície ou então através da alteração da impedância superficial, ou seja, alteração das propriedades que se manifestam pela maior ou menor facilidade com que o som tem em passar. Quando numa determinada superfície colocamos material absorvente em algumas áreas, deixando as restantes com propriedades refletoras, o comportamento das ondas sonoras também será diferente em cada uma destas zonas, atingindo-se difusão. Estaremos, neste caso, perante um difusor híbrido, que conjuga propriedades absorventes e refletoras na promoção de difusão sonora.

Uma superfície híbrida é essencialmente constituída por três partes: uma camada acusticamente absorvente, uma segunda camada com uma determinada geometria de perfuração, denominada de máscara perfurada, e por fim uma fina camada de cobertura, acusticamente transparente, ou seja, que não provoque nenhum entrave à propagação do som. A figura 2.26 mostra as três camadas mencionadas.

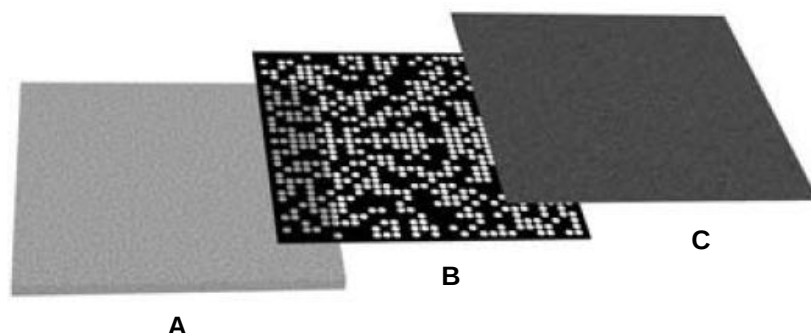


Fig. 2.26 – Vários componentes de um sistema híbrido: absorvente poroso (A), máscara perfurada (B) e película de cobertura (C).^[4]

A máscara perfurada é a camada que faz o controlo dos locais de absorção e difusão. Nos locais onde existam furos o som passa por estes e dirige-se para a camada absorvente, promovendo-se por isso absorção. Se o som incidir numa parte não perfurada será refletido sem tomar contacto com a superfície absorvente. A matriz de perfuração é pois o elemento mais significativo na forma como se gera difusão, devendo ser dimensionado tendo em conta o tipo, a intensidade e a forma como se pretende que a difusão ocorra. Esta dispersão ótima de orifícios pode ser alcançada através de uma sequência binária aleatória com propriedades conhecidas e autocorreladas, de tal forma a que se possa obter o menor número possível de repetições. Nesta ordem de ideias quando na sequência binária aparece um 1 teremos nessa posição um furo, caso contrário aparecerá um 0. Repetições nas sequências devem ser evitadas a todo o custo pois isso irá implicar a criação de lobos e por isso uma dispersão sonora menos eficaz. A teoria dos números pode mais uma vez nesta situação fornecer um diverso número de sequências.

A figura 2.27 ilustra as respostas polares para uma superfície híbrida (em cima) e para uma superfície plana. Constata-se que a superfície híbrida provoca mais dispersão, tal como seria expectável. Essa dispersão pode inclusive ser incrementada, se a superfície em vez de lisa apresentar ondulação, o que reduz as reflexões especulares e contribui para um maior grau de difusão sonora. Este tipo de painéis tem vindo a ser utilizado cada vez mais em estúdios de gravação de música ou em espaços similares.^[4]

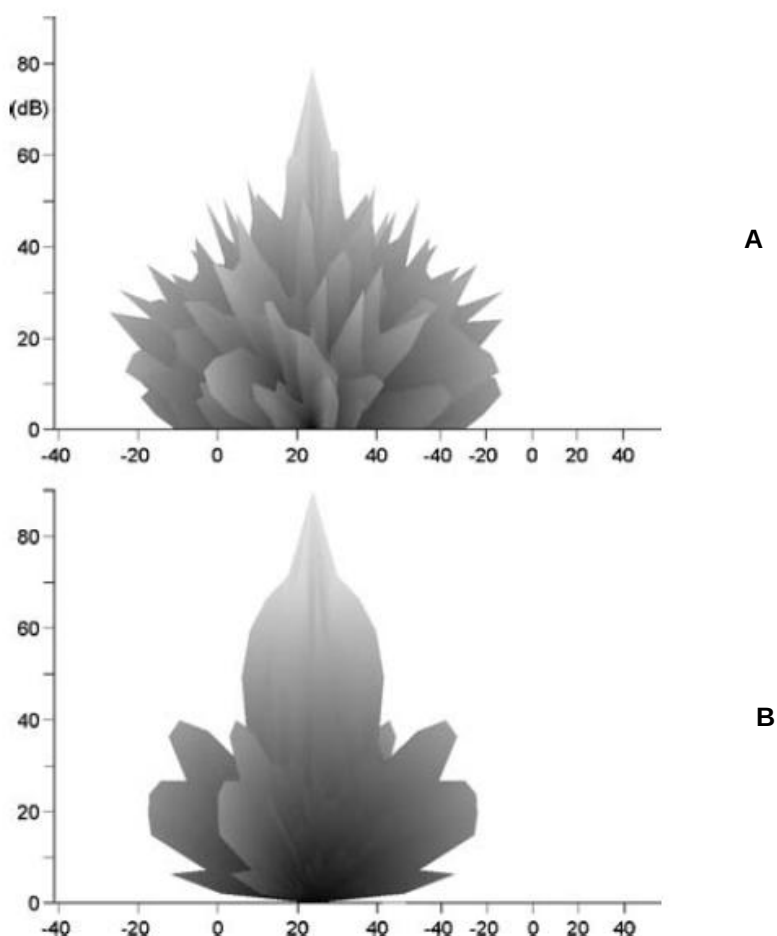


Fig. 2.27 – Respostas Polares para um difusor híbrido (A) e um difusor plano (B).^[4]

Por forma a reduzir ainda mais a quantidade de reflexões especulares opta-se muitas vezes por conceber superfícies híbridas curvas. Ao nível da absorção, os coeficientes correspondentes mantêm-se sensivelmente iguais quer para as superfícies curvas, quer para as planas, no entanto a difusão é visivelmente aumentada.

Quando o som passa pelos materiais absorventes porosos este apresenta uma velocidade menor quando comparado com o ar. Para além disso importa salientar que os absorventes porosos atuam principalmente nas altas frequências. Por essa razão as superfícies híbridas têm a capacidade de perturbar o campo sonoro mais para as altas frequências quando comparado com difusores lisos da mesma profundidade. Pelo facto de a absorção ser inevitável neste tipo de difusores eles não deverão ser utilizados em espaços onde a absorção deva ser minimizada, tal como em auditórios ou salas de espetáculo.

2.7. QUANTIFICAÇÃO FÍSICA DA DIFUSÃO: A NECESSIDADE DE COEFICIENTES DE AVALIAÇÃO

Uma vez exposto o que é um difusor e qual a sua função importa esclarecer de que forma se avalia o seu comportamento e eficácia, de modo a que seja possível estabelecer comparações e hierarquizar as diversas superfícies difusoras. A determinação teórica de coeficientes que permitam estabelecer estas comparações, corresponde a uma das questões de investigação deste trabalho, pelo que será alvo de maior detalhe no capítulo 4.

Com a descoberta da importância e utilidade dos fenómenos da difusão, tornou-se necessário compreendê-los em maior profundidade e acima de tudo prever e caracterizar o seu comportamento ao nível da dispersão sonora. Dessa necessidade surge o estudo dos coeficientes de difusão e espalhamento.

Existem dois princípios/modelos guias que estão por detrás da determinação destes dois coeficientes: modelos acústicos de espaços geométricos e o desenho de espaços com a presença de difusores.

2.7.1. MODELOS ACÚSTICOS DE ESPAÇOS GEOMÉTRICOS

Os modelos acústicos de espaços geométricos precisam de representar os processos de espalhamento sonoro para garantir a obtenção de previsões precisas. O fenómeno da difusão é importante neste contexto já que estes modelos são comumente aplicados em situações e gamas de frequências onde este seja significativo, sendo que estes modelos constituem aproximações para altas frequências. Neste sentido foram desenvolvidos métodos que representem o espalhamento sonoro de superfícies rugosas e que têm em conta os seus bordos.

Uma das consequências mais importantes na previsão da difusão sonora está na obtenção do tempo de reverberação. Na verdade se o espalhamento sonoro não for previsto e modelado será de esperar uma previsão exagerada para o tempo de reverberação. Isto acontece pois se não existem fenómenos difusores, acentuam-se as reflexões diretas que dificultam o decaimento sonoro, conduzindo a maiores tempos de reverberação.^{[9], [10], [11]} Esta questão acentua-se ainda mais para espaços com uma distribuição não uniforme de material absorvente ou com uma desproporção de dimensões. A previsão cuidada das reflexões primárias (aquelas que chegam nos primeiros 10 ms) assume especial importância pois o seu impacto nas necessidades difusoras do espaço é bastante considerável.

A determinação do coeficiente de espalhamento permite perceber qual a percentagem de energia refletida que é tratada de uma maneira difusa, sendo essa informação fundamental na modelação de espaços acústicos. Ainda há pouco tempo este coeficiente era determinado de forma empírica, através de um trabalho de intuição e tentativa e erro. Agora existem métodos que permitem a sua determinação experimental.^[12]

2.7.2. DESENHO DE ESPAÇOS COM PRESENÇA DE DIFUSORES

Para avaliar convenientemente o comportamento difuso das superfícies, métodos de medição da difusividade das reflexões foram desenvolvidos. Os engenheiros acústicos necessitavam de ser capazes de caracterizar adequadamente o comportamento acústico das superfícies para poderem conceber as especificações mais adequadas para as mesmas. É precisamente nesse sentido que surgem os coeficientes de difusão.

Uma das grandes vantagens da utilização e estudo deste coeficiente está na capacidade que foi dada aos acústicos de fugirem da utilização dos difusores de Schroeder e por isso apostar em outras formas, como as curvas, para o tratamento de espaços à difusão. A utilização do coeficiente de difusão nesta situação, surge como necessidade de otimização do desenho destas novas superfícies. Com isto foi possível estabelecer melhor relação de coordenação com arquitetos, adequando a aplicação de difusores a estilos arquitetónicos mais modernos.^{[12], [13]}

2.7.3. COEFICIENTE DE DIFUSÃO E ESPALHAMENTO

Estes coeficientes têm como principal objetivo simplificar a caracterização dos difusores, já que as respostas polares apresentam dados de forma bastante densa, tornando-se complicada a sua análise. Por isso estima-se um valor único que procura refletir de forma adequada as características das amostras em estudo. Há no entanto que salientar que as respostas polares continuam obviamente a ser um instrumento de extrema importância para a complementação da caracterização dos difusores.

Apesar de serem os principais instrumentos de caracterização, os coeficientes referidos apresentam falhas no seu uso. E essa é uma das principais razões para a necessidade de determinação de ambos, já que a sua caracterização permite a compensação das falhas de cada um.

Estes coeficientes constituem pois representações simplificadas da realidade na caracterização do som refletido. A determinação e caracterização da difusão para cada banda de terço de oitava não parece válida nem representativa, já que não consegue descrever as complexas frentes de onda refletidas que se geram nas mais diversas superfícies. A questão aqui passa pois por tentar descobrir qual a melhor forma de determinar um único valor que consiga, eficaz e representativamente, descrever os fenómenos de difusão. Ao contrário da absorção, não existe uma definição física simples para os coeficientes de difusão e espalhamento e mesmo os acústicos, fabricantes de difusores e *designers* não parecem entender-se sobre qual o coeficiente mais adequado. Por isso, tal como já foi referido, é importante articular os dois coeficientes na tentativa de compensar as falhas e defeitos de cada um.

A comunidade científica internacional decidiu então seguir esta ideia e estabelecer normas *standard* para a determinação dos coeficientes de difusão e absorção. O trabalho de Mommertz e Vorländer^[14],^[15] revelou-se chave para a conceção da norma ISO 17497-1:2004, “*Acoustics – sound-scattering properties of surfaces. Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room*”^[16], que define o processo para a determinação do coeficiente de espalhamento para incidência aleatória. Este método permite a eficaz determinação dos valores aleatórios de incidência mas é de difícil previsão. Os métodos em campo livre (*free field*) são laboriosos do ponto de vista experimental mas de mais fácil previsão. Por essa razão Peter d’António e Trevor Cox^[17] desenvolveram uma metodologia em campo livre, publicada na *Audio Engineering Society* e muito bem aceite pela comunidade científica, que permite determinar experimentalmente o coeficiente de difusão (AES-4id-2001).^[18]

Os termos espalhamento e difusão têm significados diferentes apesar de estarem constantemente a ser relacionados pelo que é fundamental defini-los à luz das normas atrás referidas.

O coeficiente de difusão mede a uniformidade com que o som é refletido. A aplicação da norma AES-4id-2001 nomeia este coeficiente como sendo uma medida da similaridade entre a resposta polar da energia espalhada e uma distribuição uniforme.

Conclui-se pois que para um coeficiente de difusão ser adequado este deverá ser tal que permita classificar o painel em questão de acordo com uma hierarquia de qualidade. Este é o parâmetro mais importante para os especialistas em acústica e projetistas de difusores já que se apresenta como o

indicador da qualidade dos difusores em estudo. Peter D'António e Trevor Cox ^[27] sugerem que um bom coeficiente de difusão é aquele que:

- Apresenta uma base física sólida e é claro na sua definição e conceito, encontrando-se relacionado com o papel da difusão na acústica de espaços;
- É consistente na avaliação e classificação do comportamento dos difusores;
- É aplicável a uma grande variedade de superfícies e geometrias;
- É previsível e mensurável através de um processo normalizado.

Por sua vez, o coeficiente de espalhamento relaciona a energia difundida de forma não direta (energia refletida em ângulos diferentes do ângulo da energia incidente) com a energia total refletida. Este coeficiente é pois uma medida da dispersão da energia sonora nas direções não diretas, sendo extremamente útil na modulação acústica de espaços. A introdução deste coeficiente revela-se de especial interesse para caracterizar de forma mais precisa e exata os fenómenos de difusão, já que permite, por exemplo, incorporar os efeitos de espalhamento nos bordos das amostras ou a rugosidade superficial. Estes fenómenos apresentam relevância nos resultados finais e por isso devem ser tidos em conta, sob pena de provocarem erros tais como a sobreconsideração do tempo de reverberação.

A caracterização exaustiva da metodologia experimental referida nas normas anteriores será abordada no capítulo 4.

2.8. LOCALIZAÇÕES ADEQUADAS PARA OS DIFUSORES E SUAS CONSEQUÊNCIAS

Em espaços onde as condições acústicas sejam exigentes a importância e proximidade dos ouvintes aos limites/fronteiras da mesma são extremamente importantes no estudo de colocação de elementos difusores. Os locais mais indicados para a colocação de materiais difusores ou absorventes serão pois aqueles onde ocorrem as reflexões primárias, e por isso num campo próximo da fonte sonora.

Desde há algum tempo que se descobriu que as reflexões primárias ocorrem com frequência nos espaços mencionados. Por isso surgiu a necessidade de colocação de material absorvente nos locais onde estas ocorrem, para evitar que atinjam o ouvinte antes das ondas sonoras diretas. Isto acontece pois, como já foi referido, é comum os ouvintes estarem próximos dos limites/fronteiras das salas, pelo que a probabilidade de receberem uma reflexão dessas áreas antes do som direto é grande. A colocação desse material absorvente entre a fonte e o recetor permite criar entre os dois uma zona temporal e espacialmente livre de reflexões (RFZ – *Reflection Free Zone*). Esta zona é temporalmente livre de reflexões pois esta proteção só é assegurada numa janela temporal específica, antes que as reflexões nas outras superfícies do espaço atinjam o ouvinte. É espacialmente livre de reflexões pois este fenómeno só ocorre numa área específica da sala. Depois de passada a janela temporal associada à RFZ as reflexões noutras superfícies chegam de forma audível ao ouvinte. A absorção é pois utilizada para controlar as reflexões de primeira ordem entre fonte e recetor, bem como remover reflexões primárias que sejam audíveis de forma intensa, o que pode provocar coloração (distorção do conteúdo espectral ou timbre do som direto) e deslocamento de imagem (do inglês: *image shift* – fenómeno que

acontece quando o som é percebido de uma direção que não coincide com a direção de emissão do som).

Outro aspecto importante e de grande relevância no âmbito da utilização de difusores é a reflexão de ondas sonoras nas partes traseiras dos espaços. Não sendo de todo interessante que existam reflexões especulares nas paredes traseiras, já que isso afeta significativamente os ouvintes próximos dessas zonas, poderia ser equacionada a colocação de material absorvente, no entanto essa solução traduz-se num forte amortecimento da capacidade sonora do espaço, conduzindo às chamadas salas mortas. A solução para este problema está na colocação de difusores que irão evitar a ocorrência de reflexões especulares e ao mesmo tempo garantir a manutenção da energia sonora. Estes difusores traseiros são capazes de fornecer um som *surround* passivo que garante maior e melhor envolvimento sonora do ambiente, sem praticamente interferir com o som direto.

Outra questão que se levanta com frequência é a quantidade de difusores que deverão ser colocados num espaço. A resposta não é óbvia pois isso depende marcadamente dos gostos pessoais de cada um. Se for colocado material absorvente nos locais das reflexões primárias e nas paredes traseiras então o som direto será, pelo menos num campo sonoro próximo, ouvido de forma muito instantânea e pura, já que grande parte das reflexões foram anuladas. Se por outro lado forem utilizados materiais difusores nessas posições assistir-se-á a uma ampliação e alargamento das imagens sonoras. Se essa distribuição de difusores for feita corretamente então o som ouvido pelos espectadores parece mais próximo do ideal, ou seja, aquele que é ouvido próximo da fonte sonora.

Conclui-se portanto que o ideal será procurar um equilíbrio entre materiais absorventes e difusores, em função das características do espaço, de forma a obter o ambiente desejado. Como já foi referido a influência da percepção pessoal tem um forte impacto na escolha das melhores soluções. Por exemplo, para estúdios de gravação de música algumas pessoas preferem que o espaço seja praticamente morto (colocação de grande quantidade de absorventes) enquanto outros preferem uma combinação das duas. Na verdade esta última solução tem-se mostrado como a mais comum, sendo que se for pretendida alguma vivacidade no espaço, a opção por absorção mais difusão é melhor do que a combinação de absorção e reflexão.^[3]

Na figura 2.28 apresenta-se um exemplo do tratamento acústico de uma sala com material absorvente e difusor, seguindo os objetivos atrás mencionados. Na primeira imagem referente à situação inicial, antes do tratamento, podem ver-se reflexões das paredes laterais, chão, teto e parede traseira. As primeiras reflexões a serem recebidas pelos recetores são as das paredes laterais, chão e teto. Mais tarde são sentidas as reflexões que se dão na parede traseira; estas surgem de forma espaçada no tempo. Tendo isto, e procedendo ao tratamento do espaço, o que se faz é colocar material absorvente para tratar as primeiras reflexões, ou seja, nas paredes laterais, chão e teto, formando-se a já referida zona livre de reflexões (RFZ), e colocar difusores na parte traseira para garantir dispersão temporal e espacial do som e assim criar um campo difuso que contribua para um ambiente sonoro mais envolvente.

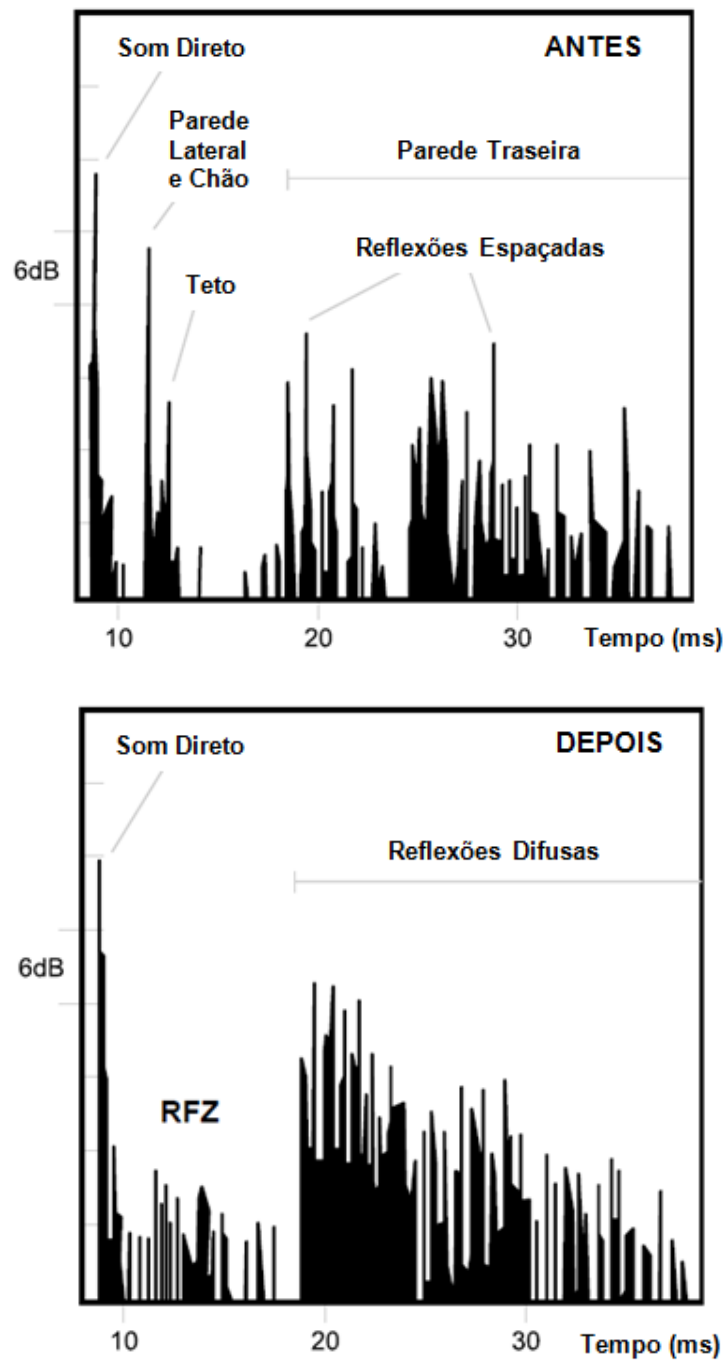


Fig. 2.28 – Tratamento Acústico de um espaço (Antes e Depois - resposta temporal).^[3]

2.9. CAMPOS SONOROS: DISTÂNCIA FONTE-RECETOR

A distância ideal entre a fonte e o recetor é outra questão importante a esclarecer. Neste sentido surgem os conceitos de campos sonoros que irão influenciar a determinação da distância ideal de trabalho, ou seja, a distância ótima a que deve estar posicionado o ouvinte da superfície de espalhamento. Esta distância poderá ser determinada considerando o campo espalhado ou o campo total (*Scattered Field* e *Total Field*).

2.9.1. SCATTERED FIELD

A distância ideal será aquela que permitir a formação de uma frente de onda coerente, ou seja, quando as ondas sonoras a baixas, médias e altas frequências se combinarem de forma organizada. O ouvinte poderá essencialmente encontrar-se no campo próximo ou afastado em relação à fonte sonora. Algures entre estes dois estará a posição ideal.

O campo sonoro espalhado pode ser descrito através de uma resposta temporal, espacial e por frequência. A resposta temporal descreve o nível de som espalhado em função do tempo de chegada do impulso sonoro para um dado ângulo de incidência e um dado ângulo de observação. A resposta por frequência descreve o nível de som espalhado em função da frequência do impulso sonoro para um dado ângulo de incidência e um dado ângulo de observação. A resposta temporal relaciona o ângulo de incidência com a intensidade sonora, através de um diagrama semicircular que dá noção da localização da dispersão espacial.

A figura 2.29 ilustra a resposta temporal para uma reflexão especular associada a um refletor plano (A) e uma reflexão difusa (B). A janela temporal usada na transformação de Fourier para gerar as frequências de resposta no caso da reflexão difusa estão indicados por duas linhas verticais em B.

A análise da figura 2.29 permite perceber que para um refletor plano e liso a reflexão especular é basicamente uma réplica do som direto orientada na direção especular. Para um painel finito este gráfico representa a reflexão especular e em seguida os efeitos associados aos bordos do mesmo. Para um painel difusor a reflexão difusa dá-se de forma espaçada a nível temporal.

Na figura 2.30 pode ser vista a resposta temporal e espacial para superfícies com características acústicas diferentes: uma superfície refletora, uma superfície absorvente e uma superfície difusora. Ao nível da resposta espacial pode-se ver que no caso da absorção e reflexão o som é refletido especularmente, ou seja, com o mesmo ângulo de incidência, só que com intensidades muito diferentes pois a superfície absorvente atenua fortemente esta reflexão (ver resposta temporal). Para o difusor, tal como seria expectável, a resposta espacial obtida é distribuída uniformemente nas diversas direções.

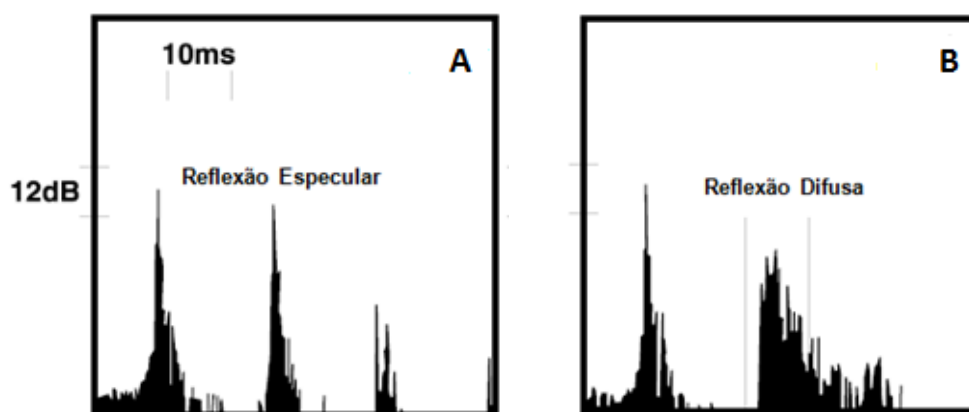


Fig. 2.29 – Resposta temporal para uma reflexão especular associada a um refletor plano (A) e uma reflexão difusa (B). A janela temporal usada na transformação de Fourier para gerar as frequências de resposta no caso da reflexão difusa estão indicados por duas linhas verticais em B.^[3]

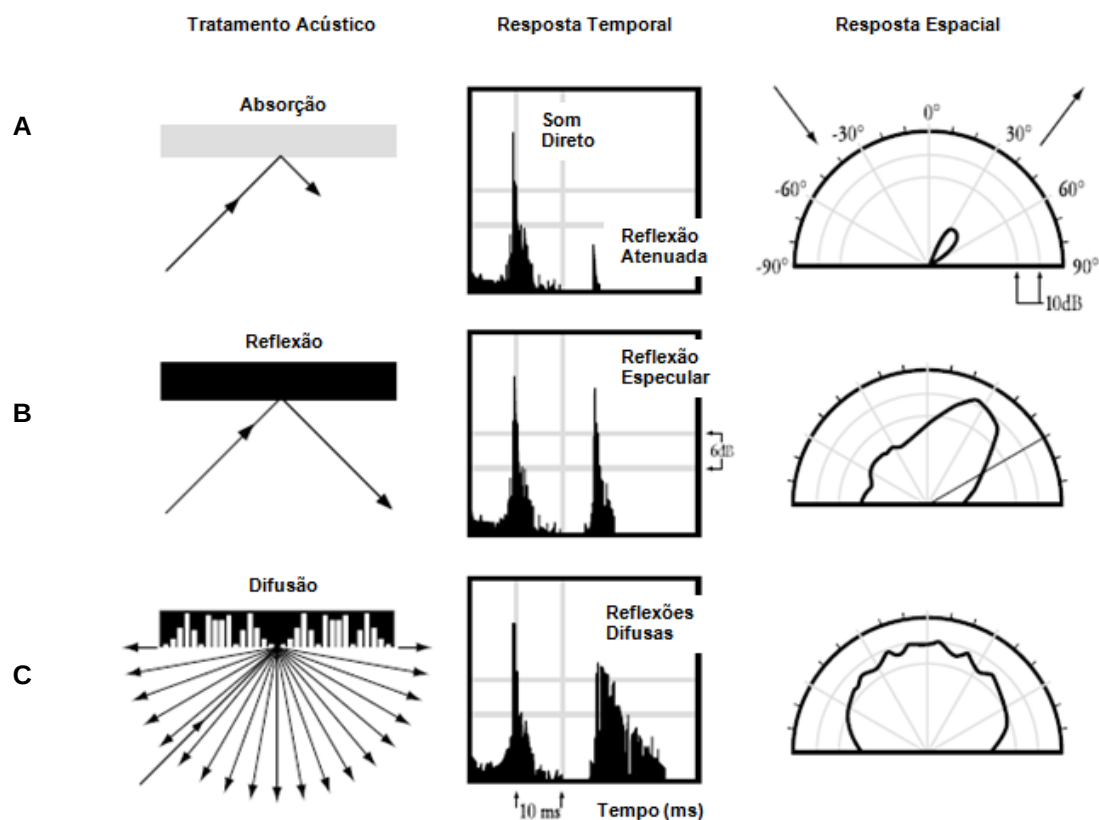


Fig. 2.30 – Respostas espaciais e temporais para uma superfície absorvente (A), uma superfície refletora (B) e uma superfície difusora (C).^[3]

2.9.2. NEAR FIELD - FAR FIELD

A distância entre a fonte e o recetor tem grande influência na difusão gerada pelo que se torna extremamente importante avaliar estas distâncias e os efeitos que as mesmas incutem aos valores dos coeficientes de difusão.

Nesse sentido existem essencialmente dois conceitos que importa esclarecer: Campo Próximo (do inglês *Near Field*) e o Campo Afastado (do inglês: *Far Field*). Teremos um Campo Afastado quando a queda de pressão difusa que se verifica entre duas distâncias, em que a segunda é o dobro da primeira, é de 3dB para geometrias 2D e 6dB para geometrias 3D. Para este campo funciona a lei inversa da distância, ou seja, a variação da pressão sonora é inversamente proporcional à distância, ao contrário do que acontece para um campo próximo em que a pressão sonora depende da distância à fonte sonora. Um campo sonoro afastado pode ainda ser definido como a região onde a diferença entre as distâncias máxima e mínima das ondas sonoras refletidas entre o painel e os recetores é pequena relativamente ao comprimento de onda, para além de que deverá ser assegurada uma distância ao recetor maior comparada com o comprimento de onda.

Para o caso de uma fonte omnidirecional, ou seja, uma fonte que emite de igual forma em todas as direções, existe uma relação muito próxima entre a quantidade de energia difusa e a proximidade entre fonte e recetor. Para este caso verifica-se que quanto maior a proximidade entre fonte e recetor maior o grau de difusão, que por exemplo para uma distância de cerca de 0,1 m permite difundir energia em todas as direções de forma muito semelhante e na intensidade máxima (figura 2.31).

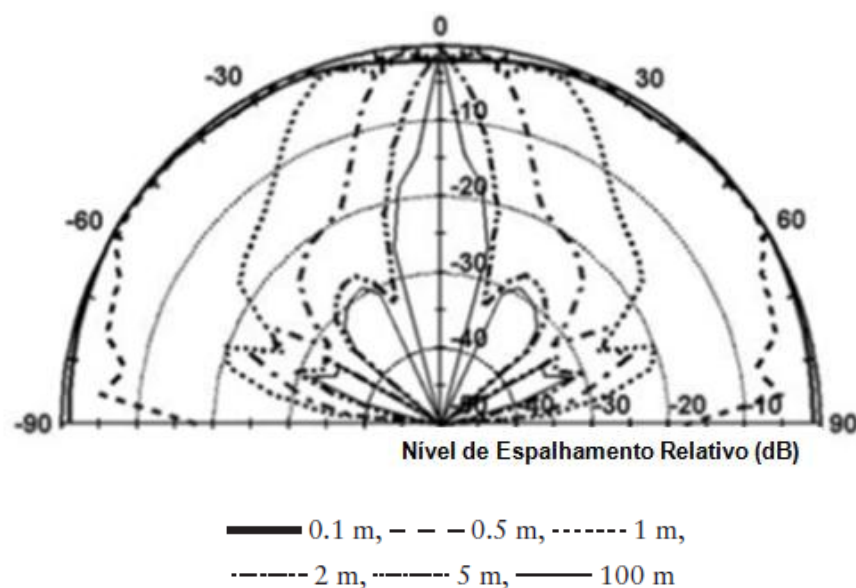


Fig. 2.31 – Resposta polar de um painel plano quadrado de 1 m de lado, para várias distâncias. ^[1]

A análise da figura 2.31 permite constatar que para curtas distâncias os refletores planos apresentam-se como bons difusores, o que à partida pode parecer um contrassenso dada a conhecida limitação dos refletores planos em difundir a energia.

Para entender este contrassenso é pois fundamental perceber os principais problemas que se levantam para superfícies planas. Uma das grandes dificuldades que este tipo de painéis apresenta ao nível da

difusão está associada a fontes sonoras unidirecionais. Este tipo de fontes promove reflexões diretas segundo o mesmo ângulo de incidência o que se traduz em problemas de ecos, coloração e deslocamento de imagem.

Para evitar que situações como estas, (em que um refletor plano se apresenta como um bom difusor para campos próximos) é comum no estudo do nível de difusão, adotar o campo afastado como método de ensaio, mesmo que muitas vezes esse campo seja claramente superior ao necessário.

Para situações em que se utiliza o campo afastado o que acontece é que vão existir microfones instalados dentro da zona de reflexão direta e outros fora desta zona. Desta forma é possível medir a quantidade de energia dispersa para fora da zona de reflexão direta, o que constitui essencialmente o grande objetivo de um difusor – mover energia para fora da zona referida

Existem critérios a respeitar para a fixação das distâncias associadas a um campo afastado. São eles:

- A distância da fonte ao recetor deve ser maior quando comparado com o comprimento de onda;
- A distância entre pares de pontos entre os recetores e a superfície difusora devem ser pequenas quando comparadas ao comprimento de onda.

Convém no entanto tomar em atenção que as formulações concebidas para o campo afastado não se aplicam a recetores oblíquos, tal como pode ser constatado na figura 2.32.

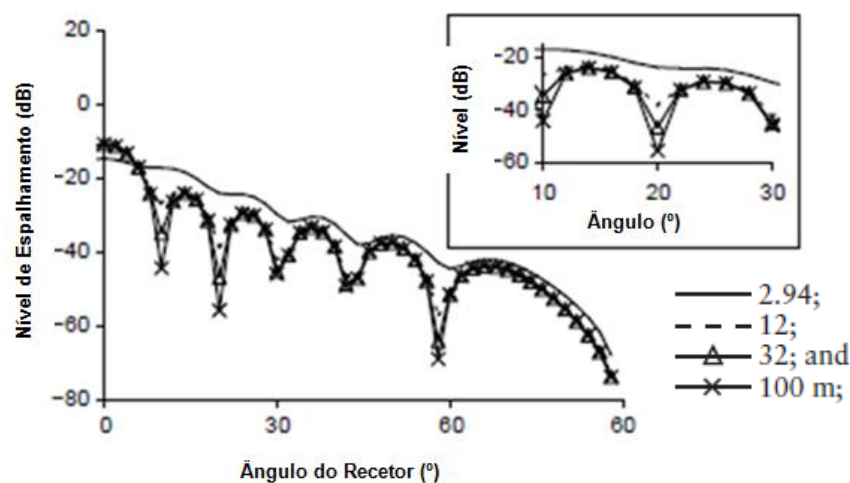


Fig. 2.32 – Variação da Resposta Polar de Espalhamento com a distância ao recetor. ^[1]

Pela análise da figura anterior percebe-se que para recetores oblíquos a distância necessária para se atingir o campo afastado é de tal forma elevada que impossibilita o seu ensaio em laboratório. Só para distâncias na ordem das dezenas de metros ou mesmo centenas é que se consegue atingir uma resposta polar estável em campo afastado. E isto acontece devido à significativa interferência destrutiva que ocorre. Os problemas mencionados ocorrem porque a quantidade de interferência destrutiva é muito sensível às magnitudes relativas das ondas provenientes das fontes secundárias na superfície de espalhamento (interferência de fase).

Para contornar esta situação poderá recorrer-se a uma simplificação que na verdade permite que não seja necessária a instalação de um verdadeiro campo afastado. Será pois suficiente garantir que a maioria dos recetores estejam colocados fora da zona de reflexão direta. A partir daí poderá estabelecer-se uma correlação para a obtenção da resposta polar para um campo afastado.

O documento *standard*, AES-4id-2001, aconselha que 80% dos recetores estejam colocados fora da zona de reflexão direta. Neste sentido a análise do coeficiente de difusão na distância correspondente ao limite da zona de reflexão direta é um importante indicador da qualidade do painel difusor em estudo. Por isso se no limite referido o coeficiente de difusão apresentar já um valor baixo, está-se perante um difusor de fraca qualidade, já que este consegue transferir muito pouca energia para fora da zona de reflexão direta. O inverso acontecerá se no limite referido o coeficiente de difusão for elevado.

Outras soluções podem ser utilizadas para a estimativa de um campo afastado a partir de um campo próximo. A utilização de holografia acústica ou de modelos numéricos de validação, assumem-se como alternativas ao processo atrás referido.^[1]

Apesar de o campo afastado ser o mais adequado em muitos espaços acústicos é comum as fontes e os recetores estarem muito próximos, encontrando-se por isso no campo próximo. Em termos práticos é aconselhado que os recetores estejam pelo menos a três comprimentos de onda das superfícies difusoras.

Muitas das anomalias que ocorrem nestes espaços devem-se ao facto de os recetores se encontrarem no campo próximo. Sendo as distâncias demasiado curtas entre fonte e recetor é comum que surjam problemas como *comb-filtering* e efeitos perturbadores provocados pelos lobos associados à resposta polar de um difusor (quanto maior a distância ao difusor, mais a frente de onda é coerente e homogénea, eliminando-se os lobos). Para além disso se o recetor estiver muito próximo do difusor ele vai receber as reflexões diretas sem que elas tenham tempo de sofrer dispersão temporal e espacial. Desta forma o som direto e refletido torna-se similar e a interferência aumenta. Daqui surge a necessidade de fazer referência ao campo sonoro total (*Total Field*).^[3]

2.9.3. TOTAL FIELD

Até aqui, para o campo sonoro próximo e afastado, só foi considerado o campo que se cria associado ao som difuso. O Campo Total pretende não só ter em conta este contributo, mas também o do som direto, o que basicamente se trata da situação real em qualquer espaço.

As reflexões para além de afetarem a direccionalidade e a amplitude, também podem introduzir coloração.

Anteriormente já foi mostrada qual a resposta temporal para reflexões especulares e reflexões difusas. Na figura 2.33 é possível ver as respostas temporais e por frequência para um campo total; na parte superior da figura temos som direto mais uma reflexão especular e na parte inferior som direto e reflexão difusa.

Para o som direto combinado com uma reflexão especular o nível de intensidade sonora é aproximadamente o mesmo e o resultado ao nível de frequências é a criação de *comb filtering*. Este fenómeno é indesejável para a maior parte dos espaços e traduz-se na interferência que ocorre entre o som direto e as reflexões especulares primárias. O espectro sonoro resultante (figura 2.33) apresenta muitos picos e quedas, numa sequência homogénea, em que as quedas correspondem a situações em que os dois sinais se anulam. Apesar de tudo a existência deste fenómeno não é muitas vezes perceptível pela relação entre as frequências dos picos/quedas e as bandas de frequências audíveis pela

audiência, bem como pelo mascaramento de outras reflexões. A obtenção das frequências referidas é conseguida através da aplicação de transformações de Fourier no intervalo indicado na figura 2.33.

Para o som direto combinado com uma reflexão difusa, o tempo de resposta de espalhamento é mais prolongado no tempo, a resposta espacial é mais homogénea e a resposta por frequência caracteriza-se por uma sucessão irregular de picos e quedas tal como se verificava para o campo difuso. A frequência de resposta do campo total aproxima-se mais da resposta para o som direto, uma vez que a difusão minimiza as interferências. De salientar que o ouvinte não estará sujeito a picos e quedas tão significativas como para o som refletido especularmente e por isso as interferências a este nível são mais reduzidas. O fenómeno de *comb-filtering* é igualmente reduzido pois o difusor vai atrasar a chegada das primeiras reflexões (formando a RFZ) e por isso vai desencontrá-las do som direto.

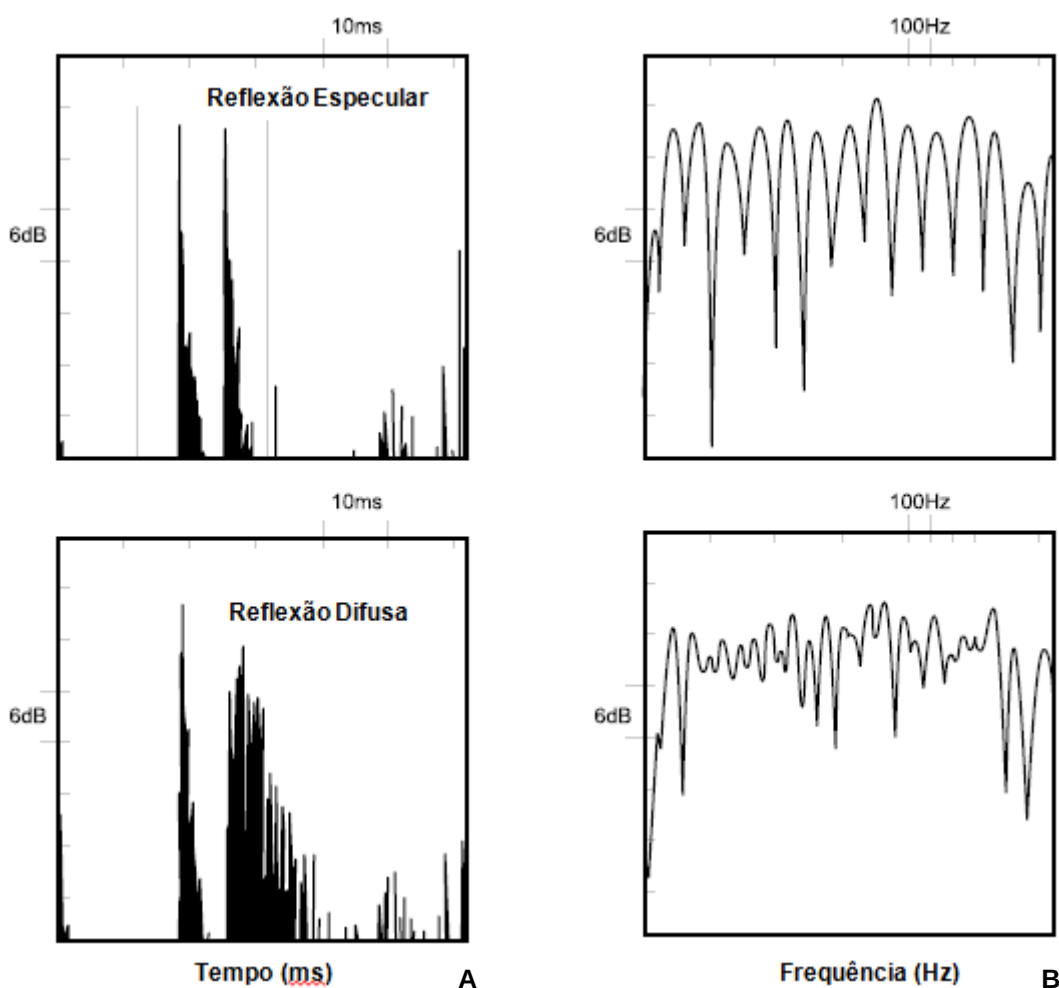


Fig. 2.33 – Resposta Temporal (A) e por frequência (B) para o campo total. Em cima som direto mais reflexão especular. Em baixo som direto mais reflexão difusa.^[3]

2.10. FUTURO – PERSPETIVAS DE DESENVOLVIMENTO

2.10.1. DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE ESPECÍFICO

Nos últimos anos tem-se assistido ao desenvolvimento cada vez mais preciso de *software* específico para a modulação acústica de espaços. A absorção é o grande elemento de base destes programas, no entanto estudos recentes têm demonstrado que a introdução da difusão neste tipo de programas garante mais fiabilidade e precisão aos resultados obtidos.

O algoritmo base deste tipo de programas traça raios desde a fonte sonora até ao recetor, registando todas as reflexões que podem ocorrer noutras superfícies. Quando ocorrem reflexões em superfícies absorventes a energia dos raios sonoros diminui e o programa irá parar quando ultrapassar uma resposta temporal pré-definida ou então quando atingir um determinado número de reflexões.

Um estudo elaborado por Hodgson em 1990 permitiu encontrar grande semelhança entre os resultados previstos e medidos, no estudo do campo sonoro em salas de grandes dimensões se os tetos e paredes tivessem uma área de cerca de 60% a 80% de material difusor. Em 2000 já praticamente todos os modelos de previsão, e correspondentes programas de cálculo, tinham em conta as reflexões difusas ou os fenómenos de espalhamento (Bork 2000).

Quando não existe informação medida para o grau de difusão e espalhamento de um determinado espaço, é útil encontrar relações e aproximações empíricas que permitam perceber as repercussões que alterações nos coeficientes de espalhamento têm nos diversos parâmetros dos espaços em estudo.

Em 2006, Jonathan Rathsam e Lily M. Wang, da Universidade de Nebraska – Lincoln, desenvolveram um estudo para perceber precisamente o impacto da alteração do coeficiente de espalhamento nas várias características do espaço envolvente. Os resultados demonstram que o tempo de reverberação (T30 – tempo que o som demora a decair 30 dB) é o parâmetro mais afetado por alterações nos coeficientes de espalhamento. Isto acontece pois num espaço fechado com paredes paralelas, o som fica “preso” entre elas, tendo menos hipóteses de se dispersar, pelo que conduz a tempos de reverberação mais elevados. A introdução de espalhamento redireciona estas reflexões para outros locais com material absorvente e por isso o tempo de reverberação é reduzido para um aumento do grau de espalhamento.

Um fluxograma foi então elaborado para estabelecer uma relação entre a forma e características de um espaço com a influência que isso tem nos coeficientes de espalhamento (figura 2.34).

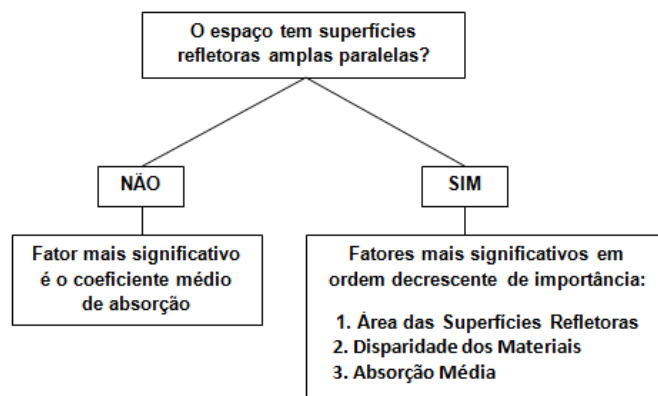


Fig. 2.34 – Fluxograma de uma relação entre a forma e características de um espaço com a influência que isso tem nos coeficientes de espalhamento. ^[5]

Pode-se então concluir que a difusão vai desempenhar um papel fundamental nos próximos anos na elaboração e refinamento de novos *softwares* para a modulação da acústica de espaços. Uma das questões que ainda hoje tem criado algumas dificuldades ao nível da programação relaciona-se com a inclusão dos fenómenos de difração nos bordos das superfícies. Existem fortes suspeitas que a resposta para a correção de algumas imprecisões que ainda hoje existem esteja precisamente na quantificação e consideração deste efeito.^[5]

2.10.2. RELAÇÃO ENTRE COEFICIENTE DE DIFUSÃO E TEMPO DE REVERBERAÇÃO

O conhecimento dos coeficientes associados aos fenómenos da difusão ainda hoje não está completamente sedimentado, ainda existindo várias questões a que não foi possível dar resposta.

Uma das questões que mais se levanta é se será possível estabelecer uma relação entre estes coeficientes e características físicas do espaço. Para o coeficiente de absorção foi já possível encontrar uma relação deste com o tempo de reverberação. O que se pretende é perceber se é possível estabelecer uma relação similar mas com o coeficiente de difusão, ou seja, procurar um parâmetro que caracterize a difusão de um espaço. Para além disto seria também extremamente útil estabelecer uma relação entre estes coeficientes e a resposta subjetiva do espaço, já que existe pouca informação sobre a forma de colocação de difusores e a quantidade ótima necessária.^[19] Até que se descubram evidências científicas neste tema, a aplicação de difusores continuará a seguir uma tendência empírica, baseada na precedência e intuição.^[12]

2.10.3. MEDIÇÃO IN-SITU DOS COEFICIENTES DE ESPALHAMENTO E DIFUSÃO

Outro aspeto que seguramente será alvo de estudo no futuro é a descoberta de formas expeditas para a medição dos coeficientes de espalhamento e difusão *in situ* ou em espaços, e não apenas em materiais.

Ao nível da medição *in situ*, através de estudos de modelos de espaços acústicos em ambiente de ensaio ^[20], percebeu-se que um dos mais importantes fatores para garantir a obtenção de resultados fiáveis era a necessidade de informação base válida para introduzir no *software* de medição. Dados relativos aos coeficientes de absorção e espalhamento das diversas superfícies são pois aqueles com maior impacto neste tipo de ensaios.

Apesar de o coeficiente de espalhamento ter sido desenvolvido com o propósito de completar a informação relativamente ao fenómeno da difusão e ser aplicado na modulação de espaços acústicos, não existem ainda ensaios suficientes em modelos de espaços que permitam obter resultados fiáveis para diversos parâmetros desses espaços, tal como o tempo de reverberação. Os modelos existentes permitem obter bons resultados em determinado tipo de espaços, mas falham por completo em outros. Se a forma e dimensão de um espaço for tal que se crie um campo difuso, mesmo que não existam superfícies que provoquem difusão e espalhamento, então o tempo de reverberação desse espaço pode ser determinado de forma correta.^[21] Para espaços com outras formas, a modulação do espalhamento sonoro é fundamental para a obtenção de resultados válidos. Como o coeficiente de espalhamento depende do modelo de espaço utilizado, a aplicação cega dos coeficientes aí obtidos pode conduzir a resultados imprecisos, especialmente se se tratar de um espaço não difuso.^{[12], [22]}

2.10.4. TECNOLOGIA ATIVA

O controlo de ruído de forma ativa tem levantado muito interesse nos últimos tempos, no entanto esta tecnologia não está ainda amplamente distribuída pelos elevados custos e dificuldades de aplicação. Tem no entanto sido utilizada com sucesso na indústria automóvel e de aviação, bem como em sistemas de ventilação.

O controlo de ruído de forma ativa tem como princípio base a anulação do ruído provocado pela fonte através da emissão de um sinal da mesma magnitude mas com a fase oposta. Quando as ondas sonoras destas duas emissões se encontram vão-se anular e o som deixa de ser audível.

Para a difusão foi já pensado um mecanismo com um objetivo semelhante. Nos difusores ativos o que acontece é que este é capaz de anular uma determinada reflexão, seguindo-se, de uma fonte secundária, um sinal que adiciona uma reflexão artificial que imita as características do difusor.

A figura 2.35 mostra uma impressão artística de um difusor ativo. Nalgumas das reentrâncias estão posicionados pequenos altifalantes. Mudando a forma de resposta dos altifalantes é possível obter diferentes tipos de reflexões. A investigação nesta área tem como principal objetivo a atuação dos difusores para mais baixas frequências. Dado que para estas frequências o comprimento de onda é muito grande, as dimensões do painel e das suas reentrâncias teriam também de apresentar a mesma ordem de grandeza, o que é impossível do ponto de vista prático. Nesse sentido a colocação de altifalantes, que têm a capacidade de mudar a real dimensão das reentrâncias, poderia resolver este problema e proporcionar uma mais eficaz atuação para as mais baixas frequências.

Estas ideias continuam no entanto num estado embrionário pelo que não se sabe se algum dia será construído um modelo difusor com estas capacidades.^[4]



Fig. 2.35 – Impressão Artística de um Difusor Ativo.^[4]

3

TECNOLOGIA DOS PAINÉIS DIFUSORES

No presente capítulo pretende-se fazer uma análise tecnológica dos vários produtos comercializados pela Vicoustic que poderão, futuramente, ser alvo dos ensaios referidos neste trabalho, descritos com maior detalhe nos capítulos 4 e 5.

Para cada painel difusor serão abordados aspetos como: características e modo de funcionamento, aplicações, informação técnica (tipo de material, tipo de instalação, dimensões, peso, acondicionamento e outros) e desempenho (gráficos elucidativos dos coeficientes de absorção e/ou difusão).

À exceção de um produto que tem como principal finalidade provocar absorção, todos os outros são destinados à difusão. O Wave Wood é o produto com funções absorventes. A sua análise, no âmbito deste trabalho, tem como principal objetivo perceber se a geometria utilizada no seu desenho tem ou não influências significativas ao nível da difusão.

Os produtos abordados são os que a seguir se apresentam (os respetivos folhetos comerciais podem ser consultados nos anexos mencionados):

- Multifuser DC2 (Anexo A1.1);
- Multifuser Wood 36 (Anexo A1.2);
- Multifuser Wood 64 (Anexo A1.3);
- Poly Fuser QR (Anexo A1.4);
- Pulsar Fuser DA (Anexo A1.5);
- Poly Wood Fuser (Anexo A1.6);
- Super Fuser Spyke 2 (Anexo A1.7);
- Wave Wood (Anexo A1.8);
- Trap Fuser Premium (Anexo A1.9).

3.1. MULTIFUSER DC2

3.1.1. CARACTERÍSTICAS E MODO DE FUNCIONAMENTO

O Multifuser DC2 é um painel de difusão bidimensional que usa uma geometria de reentrâncias baseada nas sequências residuais quadráticas, tratando-se por isso de um painel QRD (*Quadratic Residue Diffusor*). Pelo facto de o painel ser de difusão bidimensional acontece que se cruzam duas sequências QRD formando a estrutura quadrática de diferentes volumes que pode ser vista na figura 3.2. Para este painel foi utilizada uma sequência com $N=13$ (0,1,4,9,3,12,10,10,12,3,9,4,1,0). Por questões de logística e para permitir o encaixe dos painéis, alterações ao nível da sequência QRD foram efetuadas. Estas alterações representam cerca de 5% em relação à sequência QRD original, pelo que não será expectável qualquer impacto significativo, ao nível funcional, desta alteração.

Este painel é frequentemente aplicada em paredes ou tetos, proporcionando multireflexão nos planos vertical e horizontal, sendo especialmente utilizado em espaços críticos de som. Ele atua principalmente ao nível das altas frequências essencialmente devido à inclinação (13°) que os topos das reentrâncias apresentam. Como para altas frequências o comprimento de onda associado é baixo, diferenças de nível ao longo de pequenos desenvolvimentos têm forte impacto na forma como estas frequências são dispersas pelo espaço. A difusão é por isso mais eficaz e o som torna-se mais límpido e claro.

O Multifuser DC2 é eficaz na resolução de problemas como a falta de inteligibilidade do discurso ou definição musical. O seu desenho, se bem articulado com os interesses da arquitetura do espaço, encaixa perfeitamente em qualquer tipo de ambiente.

3.1.2. APLICAÇÕES

- Salas de Audição;
- *Home Theaters*;
- Estúdios de Gravação e Emissão;
- Estúdios de Pós-Produção;
- Espaços de *Performance* melhorada;
- Espaços de Ensaios;
- Salas de Conferência e Teleconferência;
- Espaços Públicos;
- Auditórios.

3.1.3. INFORMAÇÃO TÉCNICA

- **Material:** Poliestireno Expandido de alta densidade (60 Kg/m^3);

- **Tipo de Instalação:** Cola Flexível Adesiva;
- **Dimensões:** 60 x 60 x 14,7 cm (cada painel);
- **Peso:** 6,8 Kg;
- **Acondicionamento:** Caixa com 6 unidades com 71 x 61,5 x 61,5 cm;
- **Outros:** Pode ser pintado com tintas aquosas;

3.1.4. DESEMPENHO

Ao nível do desempenho este painel já tem avaliado o seu coeficiente de absorção para as diversas frequências, tal como se pode constatar na figura 3.1. Esta avaliação foi feita na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, no âmbito de um protocolo com o projeto NI&DEA. De referir que o coeficiente de difusão constante no mesmo gráfico foi obtido por correlação matemática.

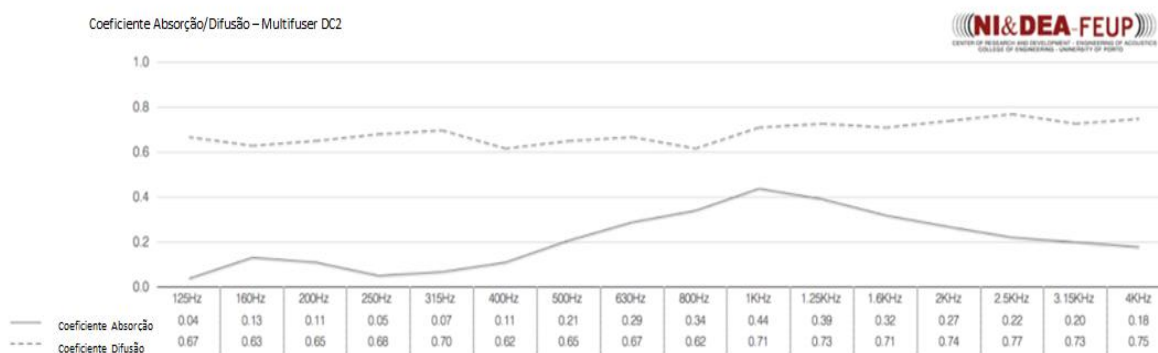


Fig. 3.1 – Coeficientes de Absorção e Difusão por frequência para o Multifuser DC2. ^[25]

Pela análise da figura 3.1 pode-se constatar que a absorção para baixas frequências é muito reduzida. Esta maior transparência às baixas frequências deve-se ao facto de a geometria do painel não ser suficiente para absorver os maiores comprimentos de onda associados e também ao facto de o material do painel ser menos denso, por exemplo quando comparado com a madeira. É para as médias frequências que ocorre maior absorção, com um coeficiente máximo igual a 0,44 para os 1000 Hz.

Quanto à difusão esta ocorrerá de forma mais intensa para as médias e altas frequências graças à geometria das reentrâncias e inclinações dos topos como já mencionado. Os valores para este coeficiente oscilam entre os 0,62 e os 0,77.

Em seguida apresentam-se imagens deste produto e suas aplicações (figuras 3.2 e 3.3).

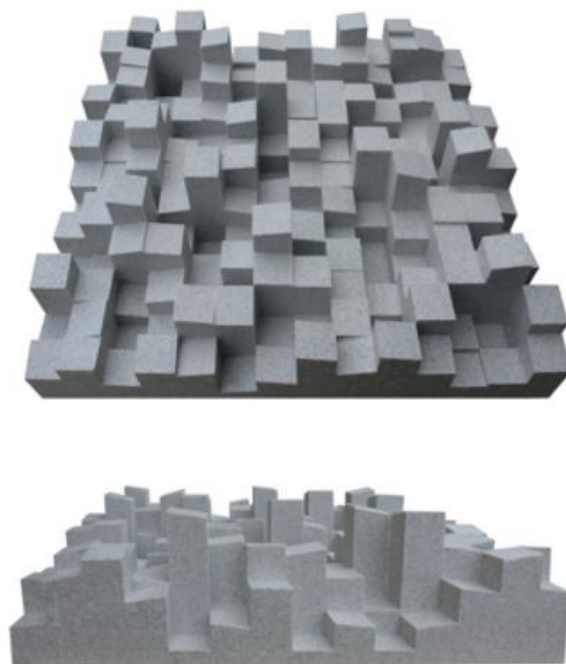


Fig. 3.2 – Multifuser DC2. ^[25]

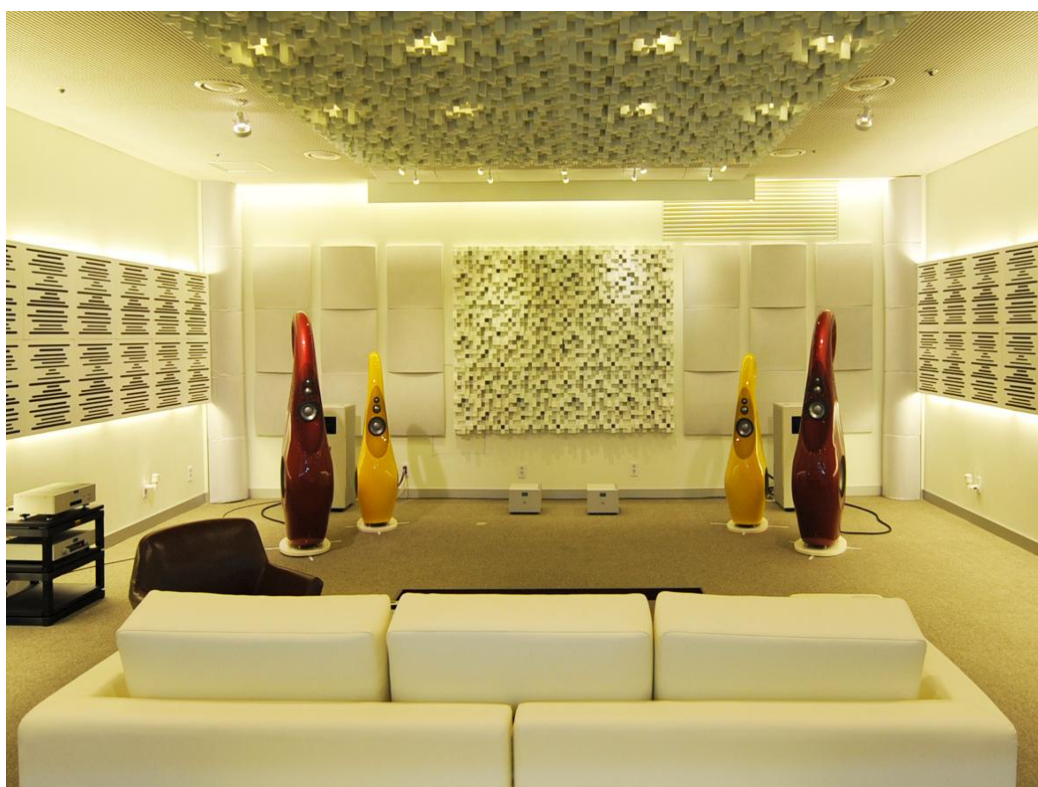


Fig. 3.3 – Aplicação do Multifuser DC2 – *Hi-Fi Room Coreia*. ^[25]

3.2. MULTIFUSER WOOD 36

3.2.1. CARACTERÍSTICAS E MODO DE FUNCIONAMENTO

O Multifuser Wood 36 é um painel difusor bidimensional que usa uma geometria de reentrâncias baseada nas sequências residuais quadráticas, tratando-se por isso de um painel QRD (*Quadratic Residue Diffusor*). A sua superfície de impacto angular, graças às diversas inclinações atribuídas aos topos das reentrâncias (alteração das técnicas de reflexão), permitem uma distribuição mais eficaz do som para altas frequências.

Feito de madeira maciça, é adequado para o uso em locais como salas de concertos, salas Hi-Fi e estúdios de gravação, onde uma eficaz difusão é normalmente necessária, sem que ocorra demasiada absorção ao mesmo tempo.

O painel é constituído por duas partes. Cada parte pode ser girada em direções diferentes, de modo a que se alcance um espalhamento omnidirecional do som, com difusão particularmente eficaz nas médias e baixas frequências. A elevada densidade que a madeira apresenta é uma das razões para a eficácia nas frequências referidas, uma vez que esta característica garante menor transparência do painel às mesmas. O Multifuser Wood 36 opera entre os 470 Hz e 10 kHz.

O material nobre utilizado (madeira) e o desenho do painel torna-o adequado para uma série de configurações.

3.2.2. APLICAÇÕES

- Salas de Audição;
- *Home Theaters*;
- Estúdios de Gravação e Emissão;
- Estúdios de Pós-Produção;
- Espaços de *Performance* melhorada;
- Espaços de Ensaios;
- Salas de Conferência e Teleconferência;
- Espaços Públicos;
- Auditórios.

3.2.3. INFORMAÇÃO TÉCNICA

- **Material:** Madeira Maciça;
- **Tipo de Instalação:** Fixação Mecânica e Adesiva;
- **Dimensões:** 59,5 x 59,5 x 7,5 cm (cada painel);

- **Peso:** 11,5 Kg;
- **Acondicionamento:** Caixa com 1 unidade com 59,5 x 29,9 x 10,08 cm;
- **Outros:** Disponível em Preto, Branco e Beije;

3.2.4. DESEMPENHO

O desempenho do Multifuser Wood 36 à absorção sonora foi já avaliado, através de ensaios realizados na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, no âmbito de um protocolo com o projeto NI&DEA. A figura 3.4 ilustra os resultados obtidos. Nesta poderá também ser encontrado o coeficiente de difusão, obtido por processos de correlação matemática.

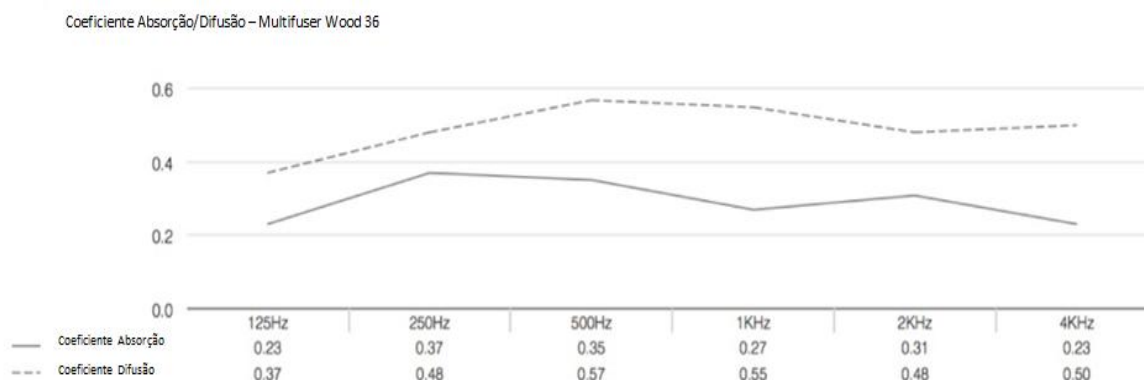


Fig. 3.4 – Coeficientes de Absorção e Difusão por frequência para o Multifuser Wood 36. ^[25]

Pela análise da figura 3.4 pode-se constatar que a absorção é mais eficaz para as médias frequências. Quando comparado com o Multifuser DC2 pode-se constatar que este painel apresenta uma absorção mais eficaz nas baixas e médias frequências. Isto acontece pois, como já foi referido, a madeira apresenta maior densidade que o poliestireno expandido e por isso apresenta menor transparência a estas frequências, traduzindo-se isso em maior eficiência ao nível da absorção. Os valores para os coeficientes de absorção oscilam entre 0,23 e 0,37.

A difusão ocorrerá de forma mais evidente para as médias e altas frequências graças à geometria das reentrâncias e inclinações dos topos como já mencionado. Os valores para este coeficiente oscilam entre os 0,37 e os 0,57. Quando comparado com o Multifuser DC2 este painel apresenta menor eficácia ao nível da difusão.

Imagens deste produto e suas aplicações podem ser vistas nas figuras 3.5 e 3.6.



Fig. 3.5 – Diferentes acabamentos de cor para o Multifuser Wood 36. ^[25]



Fig. 3.6 – Aplicação do Multifuser Wood 36 – *Hi-Fi Room* Suíça. ^[25]

3.3. MULTIFUSER WOOD 64

3.3.1. CARACTERÍSTICAS E MODO DE FUNCIONAMENTO

O Multifuser Wood 64 é, tal como o Multifuser Wood 36, um painel de difusão bidimensional que usa uma geometria de reentrâncias baseada nas sequências residuais quadráticas, tratando-se por isso de um painel QRD (*Quadratic Residue Diffusor*).

As questões associadas às inclinações dos topos das reentrâncias que permitem uma distribuição sonora mais eficaz nas altas frequências, os materiais, aplicações e estrutura deste painel são em tudo idênticas ao Multifuser Wood 36, tal como já anteriormente referido.

A principal diferença entre estes dois modelos está na sua gama de frequências de atuação. O Multifuser Wood 64 opera entre os 310 Hz e 8 kHz, frequências ligeiramente inferiores às do Multifuser Wood 36 (470 Hz - 10 kHz). A razão para isto está na diferença geométrica entre os dois painéis, já que o primeiro apresenta reentrâncias com maior altura.

3.3.2. APLICAÇÕES

- Salas de Audição;
- *Home Theaters*;
- Estúdios de Gravação e Emissão;
- Estúdios de Pós-Produção;
- Espaços de *Performance* melhorada;
- Espaços de Ensaios;
- Salas de Conferência e Teleconferência;
- Espaços Públicos;
- Auditórios.

3.3.3. INFORMAÇÃO TÉCNICA

- **Material:** Madeira Maciça;
- **Tipo de Instalação:** Fixação Mecânica e Adesiva;
- **Dimensões:** 59,5 x 59,5 x 13,5 cm (cada painel);
- **Peso:** 17,5 Kg;
- **Acondicionamento:** Caixa com 1 unidade com 59,5 x 29,9 x 15,8 cm;
- **Outros:** Disponível em Preto, Branco e Beije;

3.3.4. DESEMPENHO

Ensaio realizado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, no âmbito de um protocolo com o projeto NI&DEA, permitiram obter os coeficientes de absorção sonora para este painel (figura 3.7). O coeficiente de difusão presente na figura 3.7 foi obtido pela Vicoustic recorrendo a processos de correlação matemática.

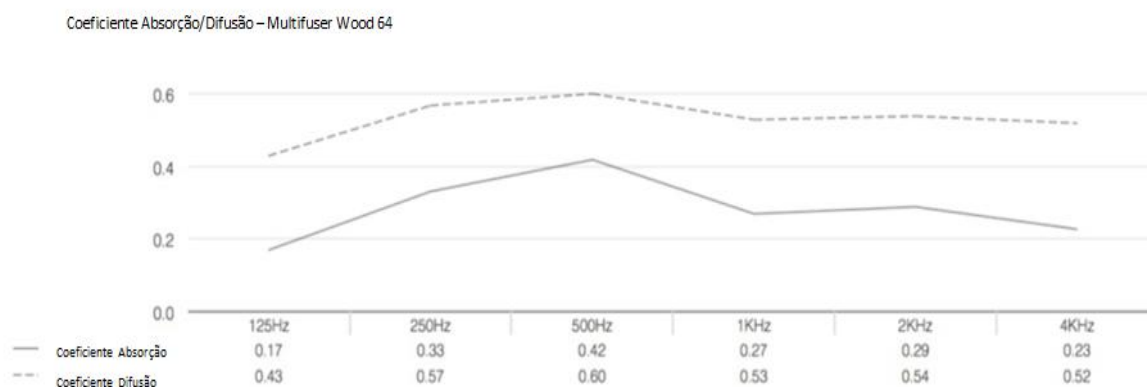


Fig. 3.7 – Coeficientes de Absorção e Difusão por frequência para o Multifuser Wood 64. ^[25]

A análise da figura anterior permite verificar que a absorção é mais evidente nas médias frequências. Quando comparado com o Multifuser Wood 36 pode-se constatar que este painel apresenta uma absorção mais eficaz nos 500 Hz (pouco mais de 0.4), não existindo no entanto diferenças muito significativas entre os resultados obtidos para os dois painéis. A oscilação dos coeficientes de absorção ocorre entre os valores de 0,17 e 0,42.

A difusão sonora é promovida de forma idêntica ao Multifuser Wood 36, pelo que os respetivos coeficientes, apesar de ligeiramente superiores, não apresentam diferenças significativas, oscilando entre os 0,43 e os 0,60.

Em seguida apresentam-se imagens deste produto e suas aplicações (figuras 3.8 e 3.9).



Fig. 3.8 – Diferentes acabamentos de cor para o Multifuser Wood 64. ^[25]



Fig. 3.9 – Aplicação do Multifuser Wood 64 – *Hi-Fi Room* Dinamarca. ^[25]

3.4. POLY FUSER QR

3.4.1. CARACTERÍSTICAS E MODO DE FUNCIONAMENTO

O Poly Fuser QR é um painel capaz de criar difusão eficaz e controlada dentro de uma faixa de frequências específica. Para além da sequência residual quadrática (QRD) conseguida através de 11 reentrâncias, para este painel foi também desenvolvida uma curva elíptica ótima que cria um segundo eixo difusor. Por esta razão este é também um painel bidirecional, já que consegue provocar difusão segundo os eixos horizontal e vertical. Quando o difusor é colocado numa posição vertical, a sequência residual quadrática irá afetar a difusão segundo o eixo horizontal. Para esta posição a curva irá afetar a difusão segundo o eixo vertical. O contrário ocorrerá se o painel for colocado na posição horizontal. Este painel é eficaz entre os 400 Hz e os 5 kHz.

O Poly Fuser QR é feito inteiramente em madeira, o que confere maior densidade ao produto e garante maior eficácia para as mais baixas frequências pelas razões já anteriormente explicadas.

Este painel é utilizado para combater problemas de *comb-filtering*, cancelamento de resposta (anulação de ondas em fase oposta) e problemas de ecos. Além disso, a difusão criada dá uma sensação de espaço para a música, sem provocar excesso de amortecimento acústico.

Projetado para quartos *Hi-Fi*, salas, casas de culto, centros de conferências e espaços de ensaio de música, ou qualquer outro espaço onde o tratamento acústico possa ser necessário.

3.4.2. APLICAÇÕES

- Salas de Audição;
- *Home Theaters*;
- Estúdios de Gravação e Emissão;
- Estúdios de Pós-Produção;
- Espaços de *Performance* melhorada;
- Espaços de Ensaio;
- Salas de Conferência e Teleconferência;
- Espaços Públicos;
- Auditórios.

3.4.3. INFORMAÇÃO TÉCNICA

- **Material:** Madeira Maciça;
- **Tipo de Instalação:** Fixação Mecânica e Adesiva;
- **Dimensões:** 59,7 x 59,7 x 13 cm (cada painel);

- **Peso:** 18 Kg;
- **Acondicionamento:** Caixa com 1 unidade com 65 x 65 x 20,5 cm;
- **Outros:** Disponível em Preto, Branco, Beije, Nórdico e Cereja;

3.4.4. DESEMPENHO

O desempenho deste painel à absorção e difusão sonora pode ser visto na figura 3.10. Esta avaliação foi feita na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, no âmbito de um protocolo com o projeto NI&DEA. De referir que o coeficiente de difusão constante no mesmo gráfico foi obtido por correlação matemática.

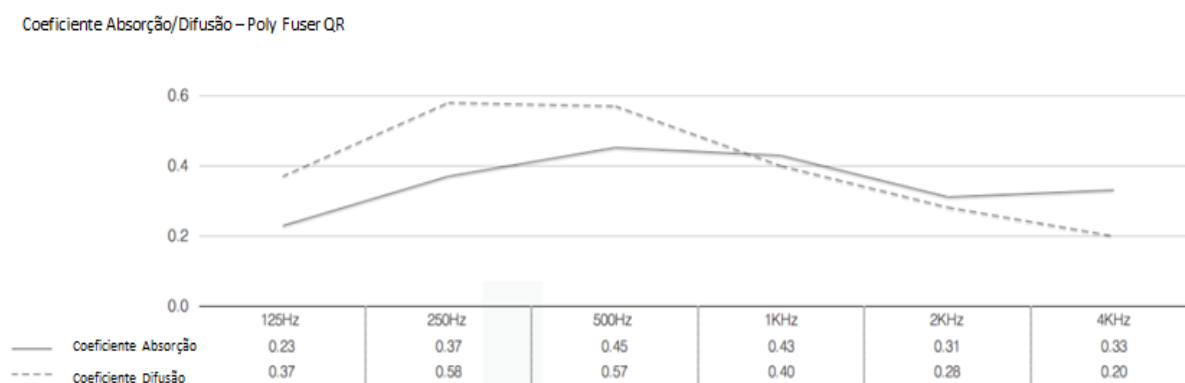


Fig. 3.10 – Coeficientes de Absorção e Difusão por frequência para o Poly Fuser QR. ^[25]

Pode-se verificar que a absorção é mais eficaz para as médias frequências. Este painel apresenta uma absorção mais evidente para os 500 Hz, atingindo um coeficiente de absorção de aproximadamente 0.45.

Os valores para os coeficientes de absorção oscilam entre 0,23 e 0,45.

A difusão é promovida de forma mais eficaz nas médias e baixas frequências, com valores para o respetivo coeficiente a oscilar entre os 0,2 e os 0,58.

As figuras 3.11 e 3.12 permitem ver o aspeto deste produto e a sua aplicação numa sala.



Fig. 3.11 – Poly Fuser QR e diferentes cores disponíveis. ^[25]



Fig. 3.12 – Aplicação do Poly Fuser QR. ^[25]

3.5. PULSAR FUSER DA

3.5.1. CARACTERÍSTICAS E MODO DE FUNCIONAMENTO

O Pulsar Fuser DA é construído a partir de Poliestireno Expandido de alta qualidade. Projetado para operar em altas frequências, estes painéis trabalham exclusivamente numa direção (unidirecionais). É comum a aplicação conjunta destes painéis segundo as duas direções (vertical e horizontal) para proporcionar multireflexão, sendo especialmente aplicados em paredes traseiras, paredes laterais ou tetos.

Na sua geometria usam uma sequência QRD modulada.

A aplicação destes painéis é adequada para *Home Cinemas*, permitindo experimentar um som mais definido. Poderão igualmente ser aplicados noutro tipo de espaços e ser sujeitos a diversos tipos de acabamentos.

3.5.2. APLICAÇÕES

- Salas de Audição;
- *Home Theaters*;
- Estúdios de Gravação e Emissão;
- Estúdios de Pós-Produção;
- Espaços de *Performance* melhorada;
- Espaços de Ensaios;
- Salas de Conferência e Teleconferência;
- Espaços Públicos;
- Auditórios.

3.5.3. INFORMAÇÃO TÉCNICA

- **Material:** Poliestireno Expandido de alta densidade (60 Kg/m³);
- **Tipo de Instalação:** Cola Flexível Adesiva;
- **Dimensões:** 60 x 60 x 7,5 cm (cada painel);
- **Peso:** 9,4 Kg;
- **Acondicionamento:** Caixa com 12 unidades com 63 x 63 x 62 cm;
- **Outros:** Pode ser pintado com tintas aquosas;

3.5.4. DESEMPENHO

Ao nível do desempenho este painel já tem avaliado o seu coeficiente de absorção para as diversas frequências, tal como se pode constatar na figura 3.13. De referir mais uma vez que esta avaliação foi feita na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, no âmbito de um protocolo com o projeto NI&DEA. O coeficiente de difusão figura no gráfico apresentado, fruto de operações de correlação matemática.

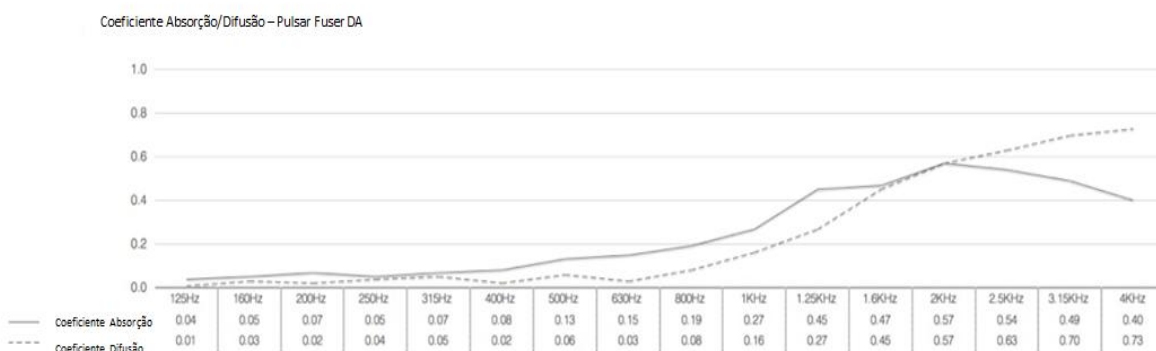


Fig. 3.13 – Coeficientes de Absorção e Difusão por frequência para o Pulsar Fuser DA. ^[25]

Os fenómenos de absorção sonora são, para este painel, mais eficazes nas altas frequências, enquanto para as baixas e médias, é praticamente inexistente. A absorção mais eficaz é atingida para os 2 kHz, através de um coeficiente de absorção de 0,57 (valores oscilam entre 0,04 e 0,57).

No que diz respeito à difusão a tendência é a mesma que para a absorção, ou seja, difusão claramente mais evidente para as altas frequências e sem eficácia para as restantes frequências. Os valores para este coeficiente oscilam entre os 0,01 e os 0,73.

Na página seguinte apresentam-se imagens deste produto e suas aplicações (figuras 3.14 e 3.15).

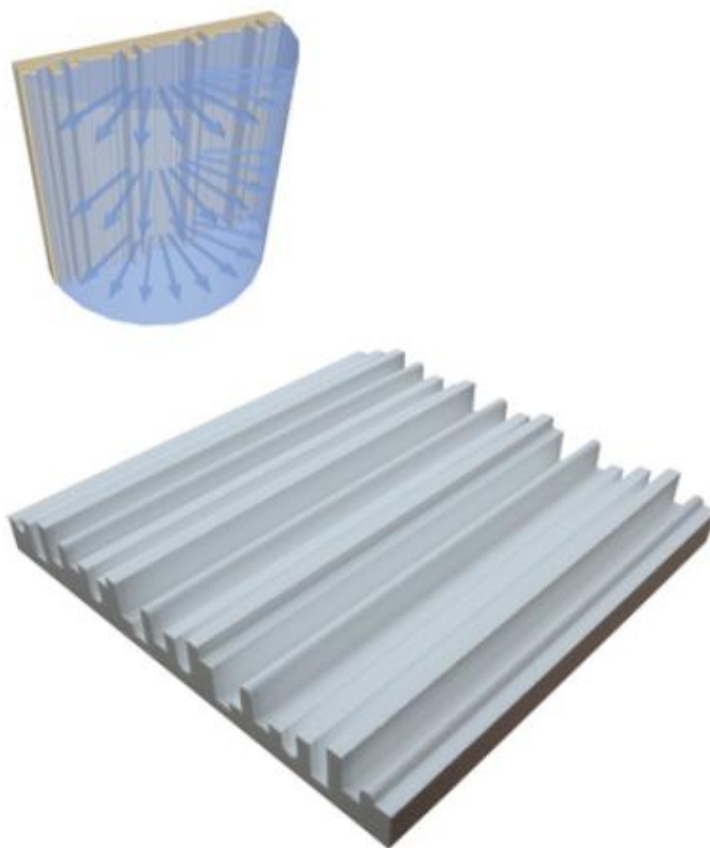


Fig. 3.14 – Pulsar Fuser DA. ^[25]



Fig. 3.15 – Aplicação do Pulsar Fuser DA – Estúdio de Televisão na Áustria. ^[25]

3.6. POLY WOOD FUSER

3.6.1. CARACTERÍSTICAS E MODO DE FUNCIONAMENTO

O Poly Wood Fuser é capaz de criar difusão controlada dentro de uma banda de frequências mais específica. Este painel foi projetado com base numa curva otimizada, que garante uma difusão elíptica de frequências indesejadas.

O material que cobre exteriormente o painel tem uma densidade controlada, permitindo a criação de um padrão de difusão infinito (eficiente entre os 300 Hz a 12 kHz), que é capaz de quebrar ondas estacionárias e ecos flutuantes.

O interior do painel é composto por uma espuma acústica, com densidade de 25 Kg/m³, que tem duas funções: amortecer o efeito da membrana de difusão e agir como um amortecedor de banda larga para baixas e médias frequências.

3.6.2. APLICAÇÕES

- Salas de Audição;
- *Home Theaters*;
- Estúdios de Gravação e Emissão;
- Estúdios de Pós-Produção;
- Espaços de *Performance* melhorada;
- Espaços de Ensaio;
- Salas de Conferência e Teleconferência;
- Espaços Públicos;
- Auditórios.

3.6.3. INFORMAÇÃO TÉCNICA

- **Material:** Espuma Acústica (25 Kg/m³) e Madeira;
- **Tipo de Instalação:** Cola Flexível Adesiva;
- **Dimensões:** 59,7 x 59,7 x 13 cm (cada painel);
- **Peso:** 9,5 Kg (Preto); 8,5 Kg (Branco)
- **Acondicionamento:** Caixa com 6 unidades com 69,5 x 62,5 x 24,5 cm;
- **Outros:** Cores disponíveis: Preto, Branco, Beije, Nórdico e Cereja;

3.6.4. DESEMPENHO

A avaliação feita pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, no âmbito de um protocolo com o projeto NI&DEA, permitiu obter os valores para os coeficientes de absorção sonora indicados na figura 3.16.

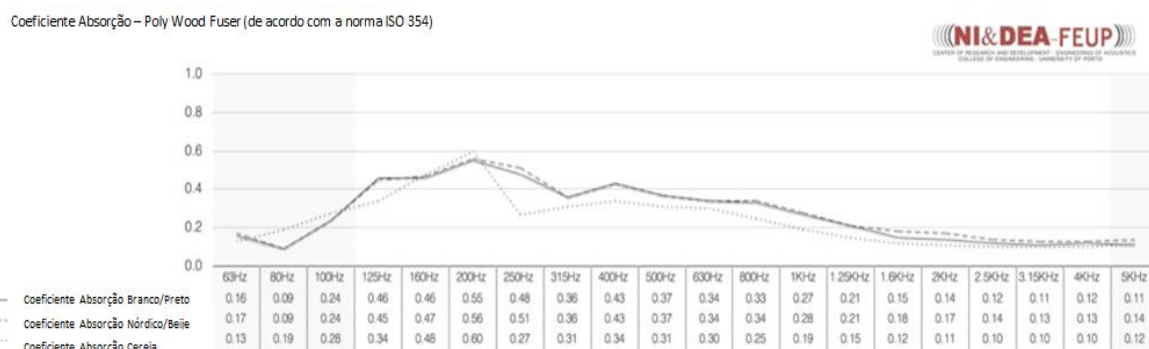


Fig. 3.16 – Coeficientes de Absorção por frequência e em função da cor para o Poly Wood Fuser. ^[25]

A análise deste gráfico permite constatar uma maior eficácia nas baixas frequências. Esta vai diminuindo à medida que as frequências aumentam, sendo que o coeficiente mais elevado, 0,60, é atingido aos 200 Hz.

Os valores para os coeficientes de absorção oscilam sensivelmente entre 0.10 e 0.60.

De salientar que são obtidos resultados diferentes para o coeficiente de absorção consoante a cor de pintura do painel. Para as cores branco, preto, nórdico e beije o comportamento é semelhante. No entanto, para a cor cereja o perfil do coeficiente de absorção é mais inconstante, salientando-se uma queda pronunciada aos 250 Hz. Para os 80 Hz o valor do coeficiente de absorção é aproximadamente o dobro do que o obtido para as outras cores.

Na página seguinte apresentam-se imagens deste produto e suas aplicações (figuras 3.17 e 3.18).



Fig. 3.17 – Poly Wood Fuser e diferentes cores disponíveis. ^[25]



Fig. 3.18 – Aplicação do Poly Wood Fuser. ^[25]

3.7. SUPER FUSER SPYKE 2

3.7.1. CARACTERÍSTICAS E MODO DE FUNCIONAMENTO

Fabricado em Poliestireno expandido de alta qualidade (EPS), o Super Fuser Spyke 2 funciona como um redirecionador de energia sonora, corrigindo problemas frequentes de salas, como a inteligibilidade da fala ou a imprecisão musical.

Aplicado em tetos para tratar médias e altas frequências, este produto redistribui o som por toda a sala, gerando um ambiente mais uniforme e homogêneo. Graças à sua geometria matemática, o Super Fuser Spyke 2 opera de uma forma mais moderada, em comparação com os produtos de difusão comuns, evitando uma agitação excessiva das ondas sonoras.

3.7.2. APLICAÇÕES

- Salas de Audição;
- *Home Theaters*;
- Estúdios de Gravação e Emissão;
- Estúdios de Pós-Produção;
- Espaços de *Performance* melhorada;
- Espaços de Ensaios;
- Salas de Conferência e Teleconferência;
- Espaços Públicos;
- Auditórios.

3.7.3. INFORMAÇÃO TÉCNICA

- **Material:** Poliestireno Expandido (60 Kg/m³)
- **Tipo de Instalação:** Cola Flexível Adesiva;
- **Dimensões:** 60 x 60 x 12,5 cm (cada painel);
- **Peso:** 7,4 Kg;
- **Acondicionamento:** Caixa com 6 unidades com 63 x 63 x 62 cm;
- **Outros:** Pode ser pintado com tintas aquosas;

3.7.4. DESEMPENHO

Ao nível do desempenho este painel já tem avaliado o seu coeficiente de absorção para as diversas frequências, tal como se pode constatar na figura 3.19. Esta avaliação foi feita na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto no âmbito de um protocolo com o projeto NI&DEA.

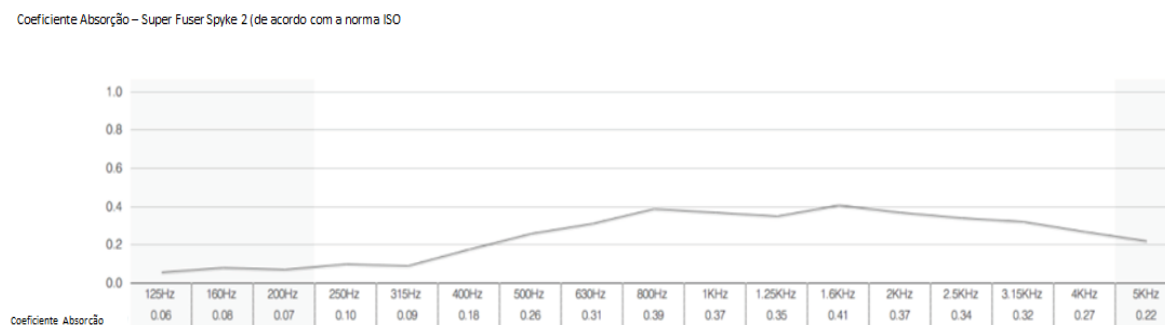


Fig. 3.19 – Coeficientes de Absorção por frequência para o Super Fuser Spyke 2. ^[25]

A análise da figura 3.19 permite verificar a existência de uma absorção mais eficaz nas médias e altas frequências. Esta eficácia vê-se diminuída para uma diminuição das frequências, sendo que o coeficiente de absorção mais elevado (0,41) é atingido para os 1.6 kHz. Os valores destes coeficientes oscilam sensivelmente entre 0.06 e 0.41.

Nas figuras 3.20 e 3.21 apresentam-se imagens deste produto e suas aplicações.

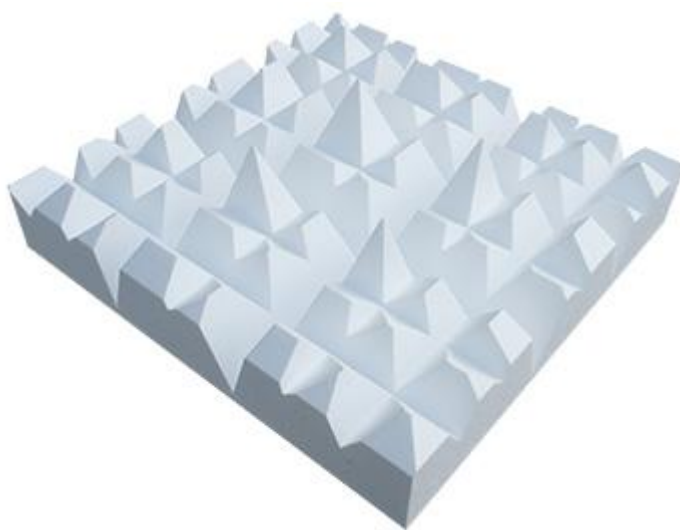


Fig. 3.20 – Super Fuser Spyke 2. ^[25]



Fig. 3.21 – Aplicação do Super Fuser Spyke 2 - Portugal. ^[25]

3.8. WAVE WOOD

3.8.1. CARACTERÍSTICAS E MODO DE FUNCIONAMENTO

O painel Wave Wood foi desenvolvido especificamente para tratar os problemas acústicos sem destruir o ambiente de um espaço, ou provocar sobrearmortecimento sonoro. Ele pode ser usado em salas de controlo, estúdios, salas de transmissão ao vivo, onde uma gama de instrumentos e vozes são gravadas, salas de ensaio e espaços de alto desempenho.

Este painel é feito a partir de uma combinação de espuma acústica e madeira. Os seus resultados de conceção, baseados em pesquisas das propriedades acústicas da madeira e da espuma, combinado com cavidades sequenciais não-lineares, permitem ao Wave Wood atuar com dupla função - absorvedor e difusor.

O Wave Wood usa a tecnologia ARCS (*Absorption and Reflection Control System* – Sistema de Controlo de Absorção e Reflexão). O sistema de ARCS é um modelo de pesquisa da Vicoustic, na área de absorção e combinação de soluções de difusão. Por isso a combinação e montagem das espumas e madeiras com melhores propriedades é aliada à conceção de cavidades sequenciais não lineares. O sistema pressupõe o equilíbrio ideal entre a área de absorção e superfície de reflexão.

É indicado no tratamento de médias e altas frequências, sendo comum a sua utilização para a resolução de diversos problemas acústicos, como por exemplo ecos flutuantes. Poderá igualmente ser eficaz no controlo de baixas frequências quando instalado nos cantos de um quarto e utilizado como *bass trap*.

Está disponível com cinco diferentes tipos de acabamentos de madeira, disponíveis para atender uma gama diversa de interiores de estúdios.

3.8.2. APLICAÇÕES

- Salas de Audição;
- *Home Theaters*;
- Estúdios de Gravação e Emissão;
- Estúdios de Pós-Produção;
- Espaços de *Performance* melhorada;
- Espaços de Ensaio;
- Salas de Conferência e Teleconferência;
- Espaços Públicos;
- Auditórios.

3.8.3. INFORMAÇÃO TÉCNICA

- **Material:** Espuma Acústica (25 Kg/m^3) e Madeira;
- **Tipo de Instalação:** Cola Flexível Adesiva;
- **Dimensões:** 59,7 x 59,7 x 6,2 cm (cada painel);
- **Peso:** 13,5 Kg;
- **Acondicionamento:** Caixa com 10 unidades com 63 x 63 x 62 cm;
- **Outros:** Cores disponíveis: Preto, Branco, Beije, Nórdico e Cereja;

3.8.4. DESEMPENHO

Ensaio realizado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, no âmbito de um protocolo com o projeto NI&DEA, permitiram obter os coeficientes de absorção sonora para este painel (figura 3.22).

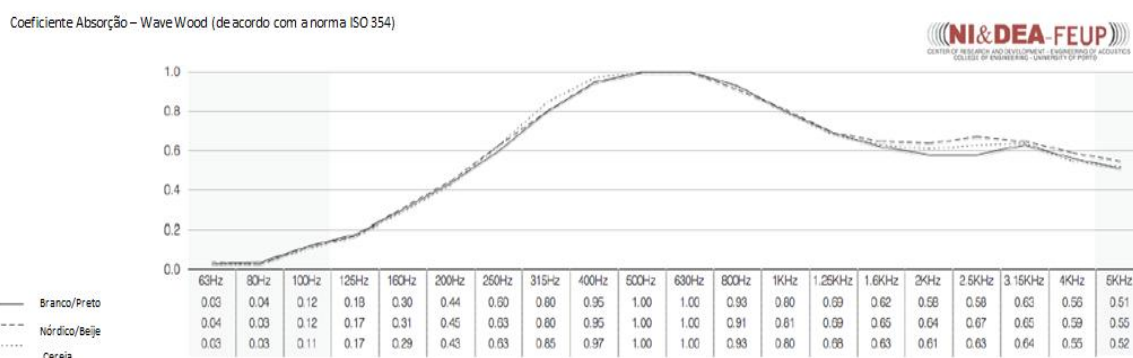


Fig. 3.22 – Coeficiente de Absorção por frequência para o Wave Wood. ^[25]

Os valores dos coeficientes de absorção para este painel oscilam entre 0,03 e 1, sendo que a eficácia a este nível diminui significativamente com a diminuição das frequências, dos 500 Hz para baixo.

A absorção é mais eficaz para as médias e altas frequências, obtendo-se resultados máximos (1,0) para as frequências de 500 Hz e 630 Hz.

De salientar que não existe grande diferença ao nível do coeficiente de absorção para as variações de cor existentes para este produto, ao contrário do que acontecia por exemplo com o painel Poly Wood Fuser já anteriormente descrito. Apenas pequenas variações não significativas se podem assinalar nas altas frequências.

Imagens deste produto e suas aplicações são a seguir apresentadas (figuras 3.23 e 3.24).



Fig. 3.23 – Wave Wood e diferentes cores disponíveis. ^[25]



Fig. 3.24 – Aplicação do Wave Wood num teatro em Singapura. ^[25]

3.9. TRAP FUSER PREMIUM

3.9.1. CARACTERÍSTICAS E MODO DE FUNCIONAMENTO

Fabricados a partir de Poliestireno Expandido de alta qualidade (EPS), o Trap Fuser Premium é um painel unidirecional capaz de controlar reflexões de som através da combinação de dois fenômenos: absorção e difusão. Por esta mesma ambivalência de funções este painel é híbrido uma vez que a energia do som poderá ser dispersa e absorvida, através das diversas superfícies e reentrâncias existentes na estrutura do painel.

A principal finalidade deste painel é o tratamento de frequências médias ou altas, tendo por isso sido projetado para atuar entre os 550 Hz e os 5 KHz. O Trap Fuser Premium não é mais do que um difusor que usa uma sequência residual quadrática (QRD), combinada com a aplicação de divisórias em madeira, de diferentes profundidades. Estas divisórias são colocadas nas reentrâncias de menores dimensões em largura, que têm como principal objetivo efetuar absorção. A colocação destas diminui o efeito de absorção do painel e a função de difusão assume por isso maior relevância.

Em muitas aplicações práticas, especialmente aquelas que necessitam de uma grande área de tratamento à difusão, é comum a repetição dos painéis difusores. Esta repetição, tal como já foi mencionado, traduz-se em sequências periódicas que formam lobos nas respostas polares, associados a uma maior concentração de energia em direções específicas. Este fenómeno diminui a eficácia ao nível da difusão, pelo que a periodicidade deve ser evitada ao máximo, e por isso sequências o mais diversificadas possíveis devem ser utilizadas. Essa é precisamente uma das vantagens deste painel que permite conjugar e formar diversas sequências diferentes.

É precisamente com o intuito de evitar periodicidade excessiva que este painel assume-se como inovador. O Trap Fuser Premium permite posicionar o painel através das suas duas metades e assim criar sequências aleatórias. Ao rodar estes difusores em direções diferentes, poderão conseguir-se combinações diversas. Estudos demonstram que existem padrões específicos que promovem uma otimização da difusão sonora, pelo que este painel, pela sua versatilidade, é capaz de uma grande variedade de padrões e consequentemente variadas formas de difusão.

Assumindo posições 0 e 1, os painéis podem ser posicionados de acordo com sequências binárias simples, com variações de 180°.

Outra combinação possível é através da rotação em 90 ° dos painéis, que permitem obter uma estrutura difusora bidimensional (2D).

3.9.2. APLICAÇÕES

- Salas de Audição;
- *Home Theaters*;
- Estúdios de Gravação e Emissão;
- Estúdios de Pós-Produção;
- Espaços de *Performance* melhorada;

- Espaços de Ensaio;
- Salas de Conferência e Teleconferência;
- Espaços Públicos;
- Auditórios.

3.9.3. INFORMAÇÃO TÉCNICA

- **Material:** Poliestireno Expandido de alta densidade (60 Kg/m^3);
- **Tipo de Instalação:** Cola Flexível Adesiva;
- **Dimensões:** 60 x 60 x 17,2 cm (cada painel);
- **Acondicionamento:** Caixa com 6 unidades com 71 x 61,5 x 61,5 cm;
- **Outros:** Pode ser pintado com tintas aquosas e está disponível em três cores diferentes: branco, preto e cinzento;

3.9.4. DESEMPENHO

O desempenho deste painel à absorção e difusão sonora pode ser visto na figura 3.25. Esta avaliação foi feita na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, no âmbito de um protocolo com o projeto NI&DEA. De referir que o coeficiente de difusão constante no mesmo gráfico foi obtido por correlação matemática.

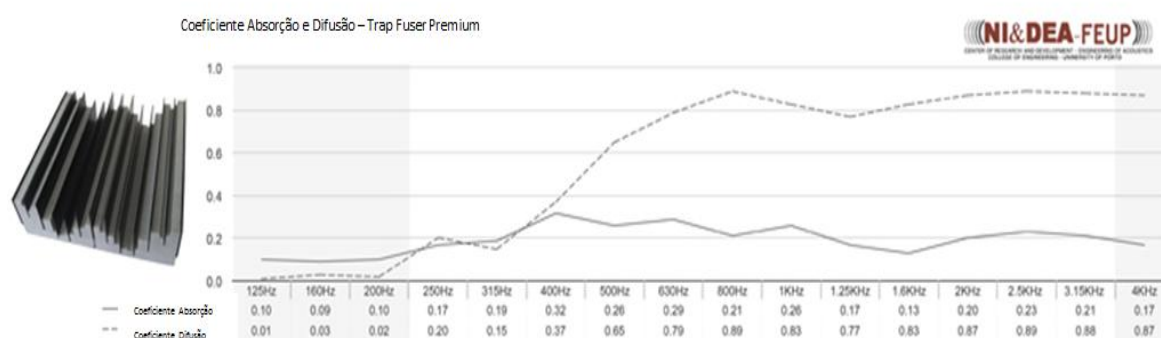


Fig. 3.25 – Coeficientes de Absorção e Difusão por frequência para o Trap Fuser Premium. ^[25]

A análise da figura 3.25 permite concluir que a absorção é mais eficaz para as médias e altas frequências, obtendo-se resultados máximos para 400 Hz. Oscilações entre 0,09 e 0,32 ocorrem para este coeficiente.

Quanto à difusão prevê-se que se obtenham valores muito elevados para as médias e altas frequências. A partir dos 315 Hz dá-se um crescimento bastante acentuado dos valores deste coeficiente, atingindo-se o valor máximo de 0,89 aos 800 Hz e 2,5 KHz.

Para as mais baixas frequências praticamente não ocorre difusão pelo que os coeficientes de difusão oscilam entre 0,01 e 0,89.

Na página seguinte apresentam-se imagens deste produto e diversas combinações que podem com este ser realizadas (figuras 3.26 e 3.27).

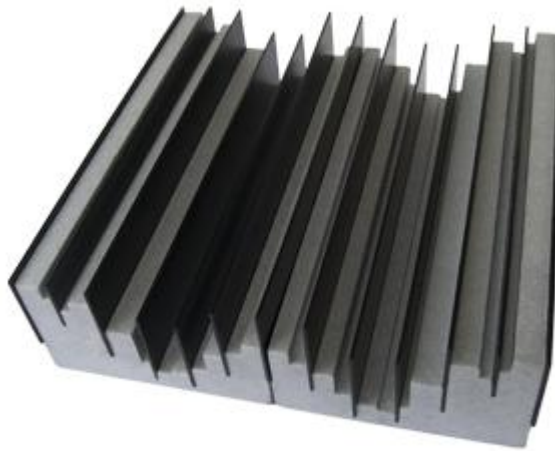


Fig. 3.26 – Trap Fuser Premium. ^[25]

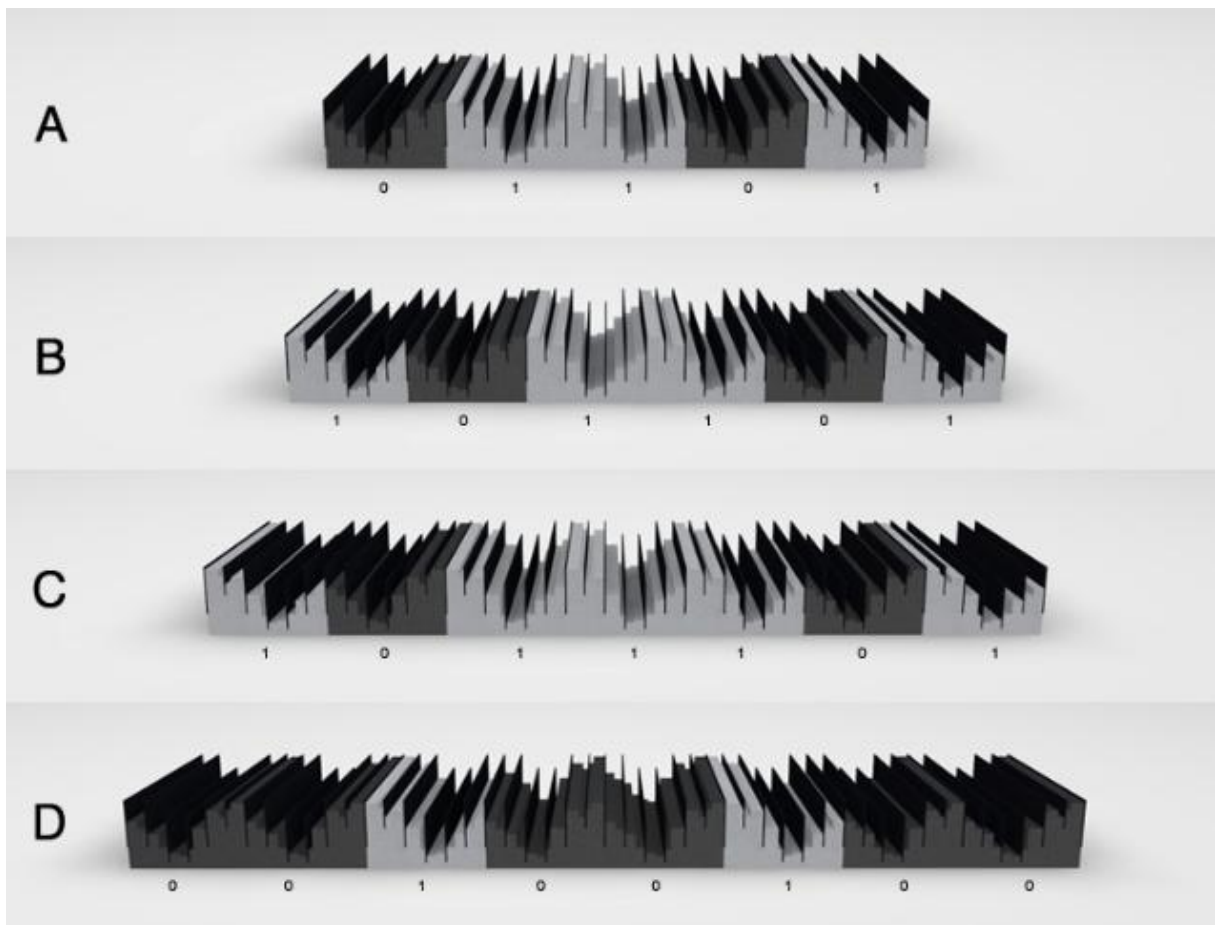


Fig. 3.27 – Trap Fuser Premium – diferentes combinações. ^[25]

4

ENSAIOS E MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS

No presente capítulo pretende-se fazer uma caracterização e análise das operações experimentais necessárias para proceder à determinação dos coeficientes de difusão e espalhamento, para a caracterização à difusão dos painéis referidos no capítulo 3 do presente trabalho, embora por questões de limitação de meios não seja objetivo deste trabalho a realização desses ensaios. Tal possibilidade ficará em aberto para desenvolvimento futuro, assim que se reúnam todas as condições (*hardware* e *software*) necessárias para a sua concretização.

Para a caracterização dos difusores existem normas que devem ser respeitadas para a realização de ensaios laboratoriais. Nesta rubrica são de fundamental interesse as normas: ISO 17497-1:2004, “*Acoustics – sound-scattering properties of surfaces. Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room*” e AES-4id-2001, “*AES information document for room acoustics and sound reinforcement systems - Characterization and measurement of surface scattering uniformity*”. A utilização deste tipo de normas tem uma grande importância industrial já que visam garantir a uniformidade e equivalência na avaliação e comparação de produtos.

A norma ISO 17497-1:2004 especifica uma metodologia laboratorial de medição do coeficiente de espalhamento, com incidência aleatória, em função da rugosidade da superfície em estudo. As medições são levadas a cabo numa câmara reverberante, podendo ser adotada uma escala real ou um modelo à escala reduzida. Este ensaio tem como principal objetivo fornecer dados que permitam descrever a quantidade de energia que é refletida de forma não especular. Os resultados obtidos podem ser utilizados para comparar diversos produtos e proceder a cálculos de concepção e dimensionamento de espaços acústicos.

Importa salientar que o método referido na ISO 17497-1:2004 produz resultados qualitativos e não quantitativos, uma vez que esta não se destina a caracterizar a uniformidade espacial do espalhamento de uma superfície, mas antes o rácio entre a energia espalhada de forma não especular e a energia total.

Uma norma AES (*Audio Engineering Society*) destina-se a funcionar como um guia para auxiliar os fabricantes, consumidores e público em geral, implicando um consenso daqueles que se encontram direta e materialmente afetados pelas suas disposições e âmbito. Estes documentos contêm um resumo da informação científica e técnica do tema em estudo, sendo a sua redação feita por um grupo tecnicamente competente.

Para o presente estudo a norma AES-4id-2001 assume especial importância. Apesar de não se tratar de uma norma ISO, esta tem sido amplamente utilizada e difundida pela comunidade científica

internacional, devendo-se a sua elaboração em muito ao trabalho de Peter D'António e Trevor Cox. Importa no entanto salientar que actualmente está em fase de elaboração a norma ISO 17497-2: *Measurement of the directional diffusion coefficient in a free field*, que visa precisamente incorporar a metodologia referida na norma AES-4id-2001.

A norma AES-4id-2001 fornece orientações para a caracterização da uniformidade de espalhamento produzido por superfícies, a partir de medições ou previsões de diversas respostas polares. O principal objetivo é pois a quantificação do espalhamento através de um coeficiente de difusão. Este coeficiente não é mais do que uma medida quantitativa da qualidade de produtos difusores. A sua utilização permite assim classificar estes produtos no que diz respeito à sua capacidade difusora. Poderá também ser indicado para o desenvolvimento de modelos geométricos para diversos espaços acústicos. É no entanto importante salientar que o coeficiente de difusão não se destina a ser usado cegamente como base para os algoritmos correntes de difusão ou em modelos acústicos geométricos. O coeficiente de difusão caracteriza o som refletido a partir de uma superfície, tendo em conta a uniformidade da resposta polar por ela criada. As informações constantes no documento detalham uma metodologia de caracterização em campo livre, que é o mesmo que se dizer que o ensaio é feito numa câmara anecóica.

A partir daqui é possível distinguir a utilidade e âmbito de aplicação destes dois coeficientes. O coeficiente de espalhamento é utilizado em programas de modelação, juntamente com o coeficiente de absorção, com incidência aleatória. O coeficiente de difusão é utilizado pelos fabricantes para desenhar superfícies difusoras e permitir quantificar a sua potência difusora.

4.1. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO

4.1.1. DEFINIÇÃO

Já anteriormente foi referido, mas por uma questão de clarificação de conceitos, mais uma vez são aqui elucidadas algumas definições importantes, tal como referidas na norma AES-4id-2001.

- **Difusão Completa:** existirá difusão completa para as duas condições a seguir indicadas:
 - a) – “condição que ocorre com um difusor de um plano quando todos os recetores numa resposta polar semicircular recebem a mesma pressão sonora refletida.”
 - b) – “condição que ocorre com um difusor hemisférico quando a mesma energia sonora é espalhada desde a superfície para todos os ângulos.”

A difusão completa ocorrerá sempre que as respostas polares se apresentem completamente uniformes.

- **Coeficiente de Difusão Direcional (*Directional Diffusion Coefficient* - d_0):** “medida da uniformidade da difusão produzida por uma superfície para uma posição da fonte.”

O valor deste coeficiente, pode teoricamente, oscilar entre zero e um, onde zero representa uma superfície que reflete a energia incidente de tal forma que apenas um microfone regista o

impulso sonoro, enquanto o valor de θ corresponde a uma situação em que é atingida uma difusão completa pela superfície refletora. O índice θ representa o ângulo de incidência relativamente à normal à superfície e se este não for mencionado considerar-se-á incidência aleatória.

- **Coeficiente de Difusão (*Diffusion Coefficient* – $d_{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n}$):** “medida da uniformidade da difusão para mais de uma posição da fonte.”

O coeficiente de difusão (a seguir indicado) é pois obtido através da média dos diversos coeficientes de difusão direccionais associados às diversas posições da fonte sonora. Os índices $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ representam os ângulos de incidência relativamente à normal à superfície e se estes não forem mencionados considerar-se-á incidência aleatória.

- **Coeficiente de Difusão para incidência aleatória (*Random Incidence Diffusion Coefficient* – d):** “medida da uniformidade da difusão para uma amostra representativa de fontes sobre um semicírculo completo para um difusor de um plano, ou um hemisfério completo para um difusor hemisférico.”

4.1.2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A forma como a dispersão da energia é avaliada depende essencialmente da estrutura do difusor, ou seja, caso se trate de um difusor com um plano de reflexão, também chamado de difusor 1D, utiliza-se um sistema de medição com um goniómetro 2D (figura 2.10) em que existem diversos microfones que formam um semicírculo em torno do difusor; no caso de termos um difusor com múltiplos planos de reflexão, o ideal será utilizar um goniómetro 3D e um sistema hemisférico (figura 2.11). Este sistema é constituído por um único microfone que percorre toda a sua extensão, sendo colocado normalmente por cima do difusor. Outra hipótese é prender o microfone a um braço mecânico capaz de rodar em torno do difusor. Como a utilização desta estrutura hemisférica é bastante complexa e dispendiosa, é comum realizarem-se medições 2D através de várias direcções ortogonais.

Para difusores com um plano de reflexão as medições deverão ser feitas numa câmara anecóica, no entanto também poderá ser utilizada uma sala de grandes dimensões em que o teto e as paredes estejam suficientemente afastadas do difusor ensaiado e em que se usa o chamado Método do Elemento Fronteira (do inglês *Boundary Layer Technique*). Existem pois medidas a ser respeitadas para a utilização deste tipo de espaços. Os microfones são colocados no chão, a uma distância R do difusor, e da forma já mencionada, enquanto a fonte sonora deve estar localizada a uma distância $2R$. A distância H (ver figura 4.1) permite obter o limite necessário para a medição da zona livre de reflexão (define o raio do campo sonoro, ou seja, o lugar geométrico a partir do qual o campo sonoro é governado pela reverberação do local (câmara reverberante neste caso)). Entre este lugar geométrico e a fonte, o campo sonoro é direto e da responsabilidade da fonte e por isso estimasse a distância das paredes aos vários elementos na sala, sendo igual a $2,45R$, enquanto o segmento W é igual a $2,5R$. Quanto maiores as amostras a ensaiar maiores deverão ser estas distâncias.

Uma das características mais marcantes da técnica referida prende-se com o facto de o solo funcionar como um espelho, o que implica que na realidade seja medida a difusão de uma amostra com o dobro da altura da amostra ensaiada.

Existem também limitações ao nível das distâncias entre a amostra, o microfone e a fonte sonora no que se refere ao limite máximo da frequência que poderá ser medida. A figura 4.1 ilustra as distâncias enunciadas na expressão que se segue.

$$|r_1 - r_2 - r_3| \ll \lambda/2 \quad (1)$$

A relação das distâncias mencionadas permite obter o comprimento da onda sonora. A partir deste e da velocidade da onda sonora é possível determinar a frequência máxima passível de medição.

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (2)$$

Para esta técnica é altamente conveniente que a malha de microfones ou o braço mecânico utilizado para movimentar o microfone, sejam pequenos o suficiente para evitar interferências nas medições através de reflexões nestes objetos. Os suportes deverão, por exemplo, não estar na linha direta entre o difusor e a fonte sonora e serem revestidos por material absorvente ou acusticamente transparente (material que não provoca interferência na deslocação das ondas de pressão sonora).

Se para difusores 1D as medições são bastante mais simples e de rápida realização, para os difusores de planos múltiplos o processo de cálculo é bastante mais complexo e moroso já que exige a utilização de goniómetros hemisféricos, a ser implantados em câmara anecóica, que como já foi referido, exigem maiores despesas, trabalho de montagem e consumo de tempo.

Com as dificuldades previstas para a utilização de goniómetros hemisféricos constatou-se que este trabalho poderia ser conseguido recorrendo a modelos de previsão. Angelo Farina ^[1] propôs a utilização de dois arcos semicirculares, que juntos formam o hemisfério, para a realização da medição. Na verdade esta opção justifica-se pelo facto de a simetria ser bastante útil neste tipo de medições, já que reduz o número de ensaios necessários para a obtenção de resultados válidos.

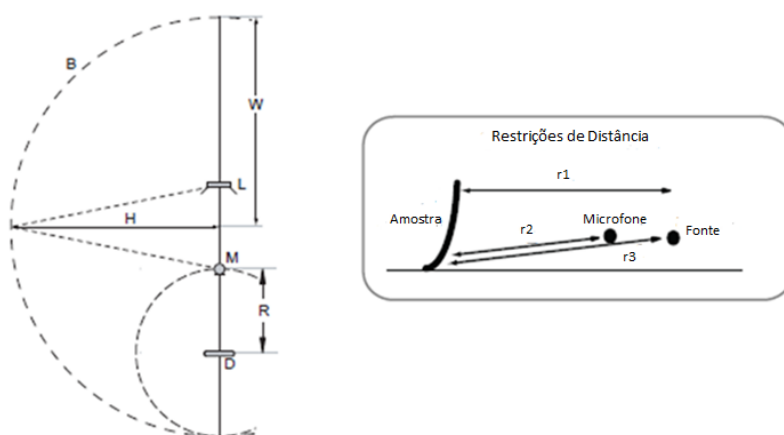


Fig. 4.1 – Método do Elemento Fronteira – dimensões. ^[1]

Para estes ensaios poderão ser utilizadas amostras à escala real ou a uma escala definida. Haverá no entanto, para o segundo caso, que proceder à adaptação das frequências de estudo conforme o fator de escala utilizado. A absorção dos diversos elementos deverá ser sempre a mesma independentemente da escala utilizada, sendo que a este nível deverá ainda entrar-se em linha de conta com a viscosidade limite das camadas dos materiais.

Apesar do referido anteriormente, a medição do coeficiente de difusão em câmara anecóica traduz-se na situação que permite obter resultados mais precisos e é precisamente essa que é referida na norma em estudo. A razão para este facto está na maior facilidade que, neste espaço, existe de isolar as reflexões de interesse, no caso, as reflexões provenientes da amostra em estudo. A câmara anecóica deverá apresentar um coeficiente de reflexão da pressão sonora das paredes não superior a 0,05, o que é equivalente a um coeficiente de absorção superior a 0,9975.

No que diz respeito ao campo de medição poderá ser utilizado o campo próximo (*near field*) ou o campo afastado (*far field*). Os difusores a ensaiar deverão ser colocados de tal forma que alguns ou todos os recetores estejam no campo próximo. É comum proceder a medições nestas duas situações já que estas permitem medir a quantidade de difusão provocada (campo afastado) e perceber aspetos particulares mais próximo da amostra, tal como a focalização por exemplo (campo próximo).

Para o campo afastado, quer para uma medição semicircular quer hemisférica, existem distâncias específicas que necessitam ser cumpridas:

$$1) \quad r \gg D_{max} \quad (3)$$

$$2) \quad r/D_{max} \gg D_{max}/\lambda \quad (4)$$

$$3) \quad r = 2 \times r1 \times r2 / (r1 + r2) \quad (5)$$

Em que r representa a distância entre fonte e recetor ao ponto de referência, D_{max} é a maior dimensão do difusor, λ o comprimento de onda, $r1$ é a distância entre fonte e ponto de referência, $r2$ é a distância entre recetor e ponto de referência.

Para alcançar um verdadeiro e completo campo afastado são muitas vezes necessárias distâncias de medição incompatíveis com o espaço disponível, pelo que se torna difícil a sua aplicação. Nesse sentido considera-se suficiente, caso não seja possível instalar um verdadeiro campo afastado, garantir que 80% dos microfones estejam colocados fora da zona de reflexão especular (figura 4.2). Para esta última situação a distância entre a fonte e o ponto de referência deve ser de 10 m e o semicírculo ou hemisfério de recetores deve apresentar um raio de 5 m, segundo a norma AES-4id-2001.

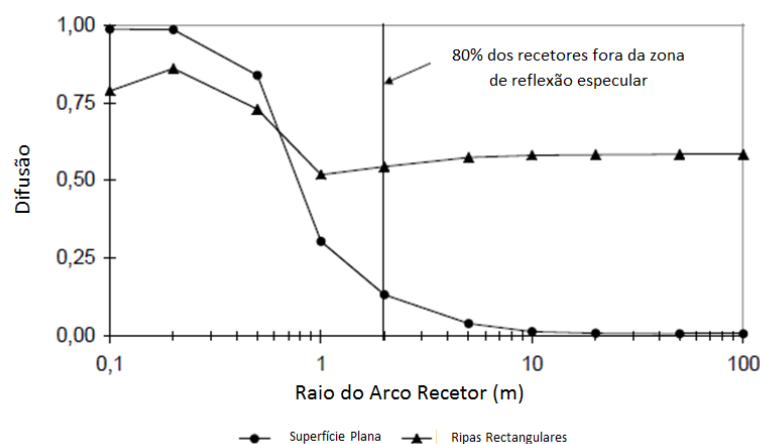


Fig. 4.2 – Variação do Coeficiente de Difusão com a distância ao recetor. ^[18]

Como para um valor de $R = 5$ m é necessária uma sala com 12,2 m de altura, 24,4 m de largura e 25,0 m de comprimento, ou seja, dimensões demasiado elevadas, é comum adotar estes valores para uma escala 1:5, e por isso utilizar um $R = 1$ m.

A geometria utilizada para os recetores e microfones em cada medição deve ser sempre a mesma para evitar erros e deve ser registada nos relatórios dos ensaios.

As medições deverão ser feitas para um espaçamento angular máximo de 5° entre os recetores. Isto poderá ser conseguido à custa da implantação dos vários recetores com esta diferença angular ou então através de um sistema móvel. A figura 4.3 ilustra a variação do coeficiente de difusão para uma alteração no espaçamento angular dos recetores.

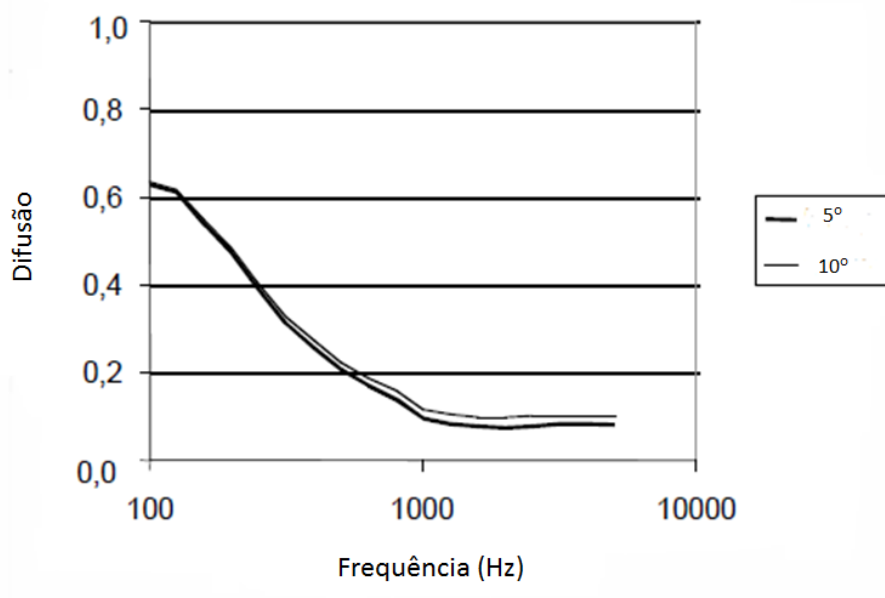


Fig. 4.3 – Variação do Coeficiente de Difusão para uma alteração no espaçamento angular dos recetores. ^[18]

Para a obtenção do coeficiente de difusão para incidência aleatória as posições da fonte deverão ser colocados com diferenças angulares máximas de 10° , formando um semicírculo ou hemisfério tendo como referência a normal à amostra. Quando as medições estão limitadas a dificuldades ao nível do tempo de medição, por simplificação deverão ser determinados os coeficientes de difusão direccionais para os ângulos de incidência normal e de 55° .

As amostras a ensaiar deverão ser completas de tal forma a que possam ser medidos todos os efeitos associados à rugosidade e efeitos de reflexão nos bordos da amostra. Por isso o ideal será colocar toda a estrutura em estudo. Caso isso não seja possível, devido às elevadas dimensões, deverão ser cumpridas exigências relativamente ao número de períodos a utilizar para garantir a obtenção de resultados fiáveis. Nesse sentido deverá garantir-se um mínimo de 4 períodos completos, sendo que a utilização de maior número de períodos permitirá uma melhor aproximação da real resposta polar e da percepção dos lobos criados. Os efeitos da periodicidade no coeficiente de difusão podem ser vistos na figura 4.4. Se o objetivo não é atender aos efeitos de periodicidade, mas conhecer apenas a difusão de uma unidade, então basta ensaiar um painel. Para amostras aleatórias ou não periódicas a medição do

efeito da rugosidade superficial assume-se como o parâmetro de avaliação mais importante. Nesse sentido deverá ser utilizada uma amostra ampla o suficiente para garantir que a medição da difusão é sobretudo influenciada pelo efeito da rugosidade e não dos efeitos de reflexão nos bordos.

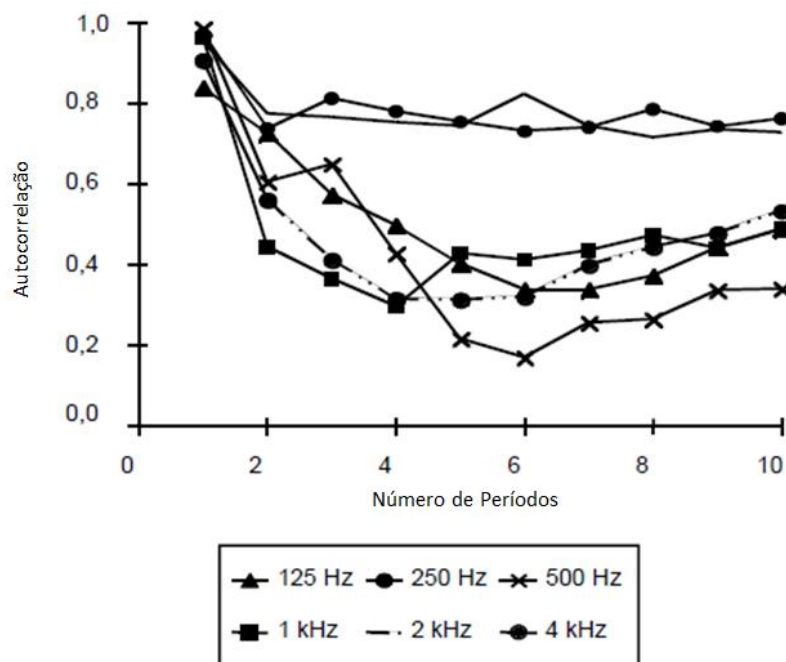


Fig. 4.4 – Variação do Coeficiente de Difusão para uma alteração no número de períodos de semicilindros. ^[18]

Para a obtenção das respostas polares poderão ser usados diversos métodos tais como medições de impulso-resposta, transformadas rápidas de Fourier (FFT), espectrometria do tempo de atraso (TDS), ou sequência de máximo comprimento (MLS). Pelo facto de ser mais rápido e simples o método MLS é o mais utilizado.

No que diz respeito à fonte sonora, esta deverá ser preferencialmente omnidirecional com variações aceitáveis de ± 2 dB em magnitude e $\pm 20^\circ$ em fase em relação a uma superfície de referência plana. Os recetores (microfones) devem ter todos a mesma sensibilidade independentemente da direccionalidade sonora com variações aceitáveis de ± 1 dB em magnitude e $\pm 20^\circ$ em fase. A figura 4.5 ilustra a variação do coeficiente de difusão para alterações da omnidireccionalidade da fonte sonora.

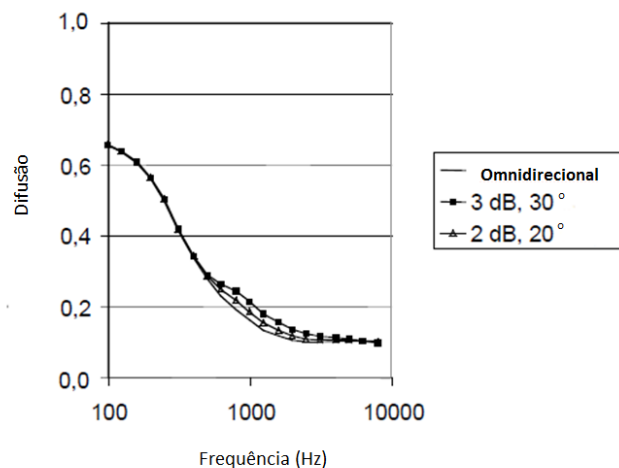


Fig. 4.5 – Simulação de efeitos de fontes não omnidireccionais no coeficiente de difusão para superfícies planas. A magnitude máxima e os erros de fase são dados na legenda. ^[18]

Para cada par fonte-recetor deverão ser feitas diversas medidas:

- O impulso de resposta com a amostra de teste presente ($h_1(t)$);
- O impulso de resposta sem a amostra de teste presente ($h_2(t)$);
- Se são utilizados mais que um microfone ou fonte sonora, o impulso de resposta sem a amostra de teste presente e com a fonte centrada no ponto de referência, de frente para a posição do recetor ($h_3(t)$);

Em seguida detalha-se em maior pormenor o processo para a determinação do coeficiente de difusão.

1. **Impulso de Resposta Altifalante - Microfone:** o primeiro passo passa por determinar o impulso recebido por cada microfone para cada ângulo de difusão. Nesta primeira fase coloca-se o altifalante na câmara anecóica na posição em que o difusor estará colocado em fases posteriores, sendo este direccionado no mesmo alinhamento axial que cada um dos microfones, para cada ângulo de espalhamento. Neste sentido são colocados 37 microfones, espaçados de 5° , o que perfaz um “semicírculo” de 180° . Desta forma são medidas as respostas de cada microfone, correspondendo por isso a 37 ângulos. É comum efectuarem-se duas vezes estas medições, e por isso um total de 74 registos. Um exemplo deste registo ($h_3(t)$) pode ser visto na figura 4.6.



Fig. 4.6 – Impulso de resposta Altifalante – Microfone. ^[1]

2. **Resposta de Fundo sem difusor:** nesta fase o altifalante é colocado na sua posição de origem sem qualquer difusor presente. O que se pretende é obter a resposta, para cada um dos 37 ângulos, ao som produzido pelo altifalante, sem que este sofra qualquer tipo de rotação para acompanhar o eixo de cada microfone. Como se pretende fazer este registo para cada ângulo, ou seja, para cada um dos 37 microfones, então este faz-se de forma sequencial, ligando-se em cada medição apenas o microfone correspondente ao ângulo de medição pretendido, mantendo os outros desligados. A figura 4.7 ilustra os resultados deste procedimento ($h_2(t)$), encontrando-se destacado um intervalo com limites tracejados, a chamada janela temporal, que corresponde a um intervalo de 10ms, onde se isolam as reflexões relevantes.

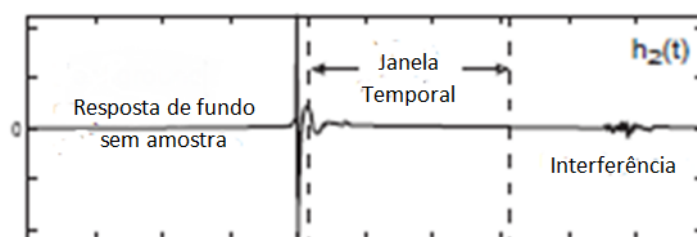


Fig. 4.7 – Resposta de Fundo sem difusor. ^[1]

3. **Resposta de Fundo com difusor:** repete-se o procedimento anterior mas com o difusor presente na câmara anecóica ($h_1(t)$).

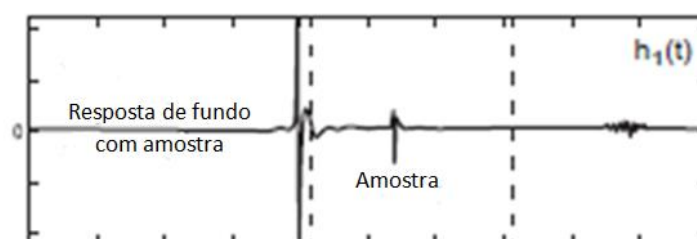


Fig. 4.8 – Resposta de Fundo com difusor. ^[1]

4. **Isolamento da Resposta do Difusor:** nesta fase subtrai-se ao registo de fundo com difusor o registo de fundo sem difusor, ou seja, $h_1(t) - h_2(t)$. Com isto isola-se a resposta do difusor, notando-se claramente uma significativa redução de som direto, que não provoca grandes interferências com o som difuso. Para além disso verifica-se também uma redução das interferências da sala (figura 4.9).

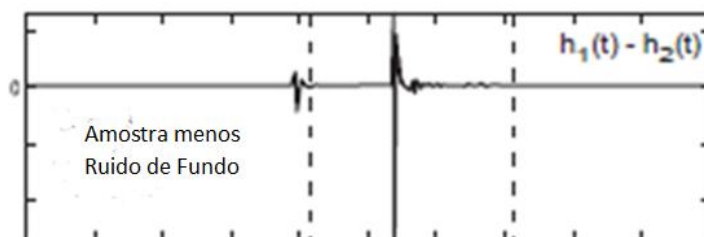


Fig. 4.9 – Isolamento da Resposta do Difusor. ^[1]

5. **Deconvolução da Resposta do difusor:** nesta fase é possível estabelecer uma correlação entre todos os resultados anteriores, utilizando processos de deconvolução e transformações de Fourier. É precisamente a partir deste resultado $h_4(t)$ que o processo prosseguirá.

$$h_4(t) = IFT \left\{ \frac{FT[h_1(t) - h_2(t)]}{FT[h_3(t)]} \right\} \quad (6)$$

FT e IFT representam, respectivamente, a transformação de Fourier e a transformação inversa de Fourier.

A figura 4.10 permite perceber qual o sinal obtido e a ampliação da janela temporal de 10 ms.

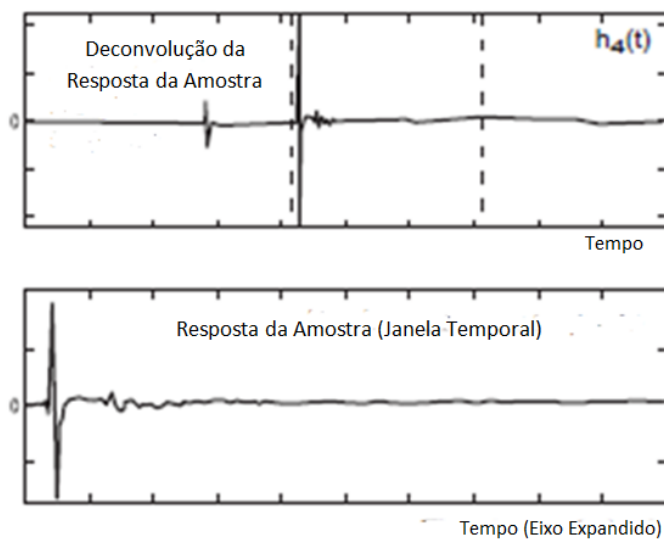
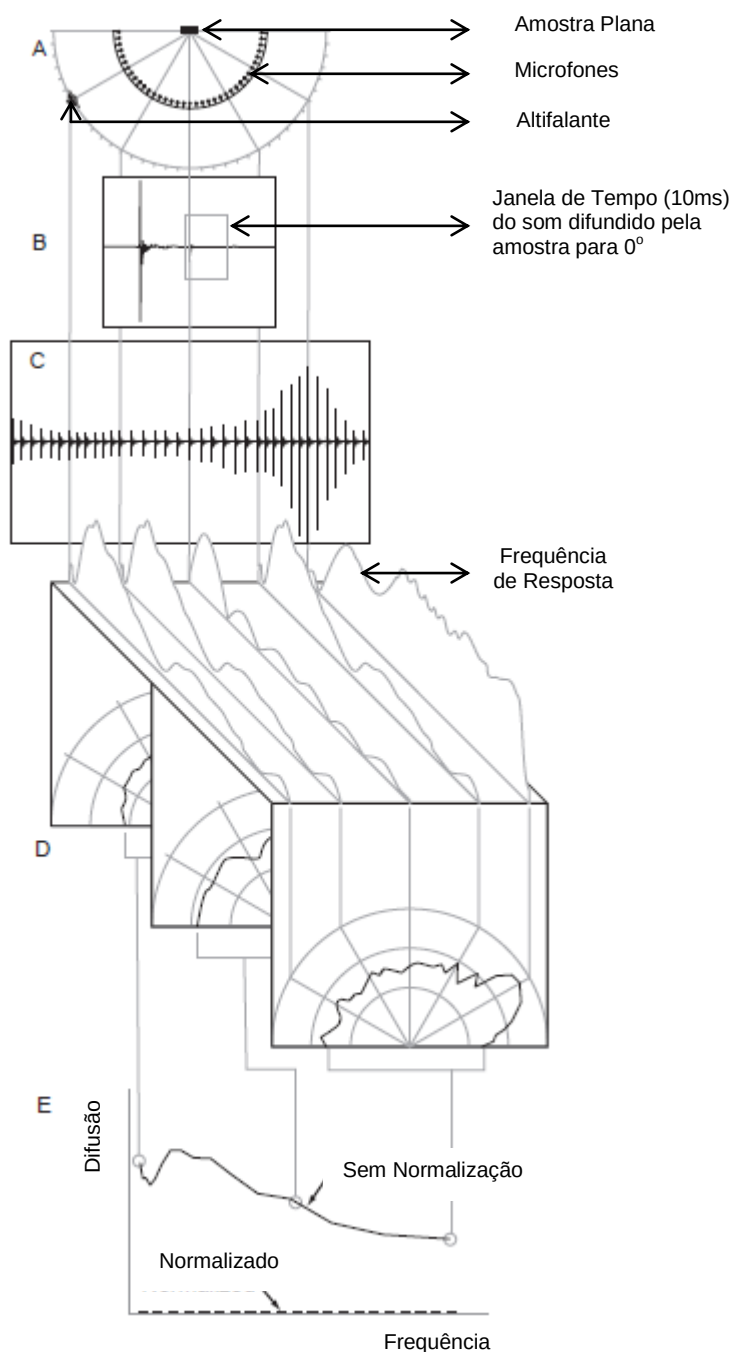


Figura 4.10 – Deconvolução da Resposta do Difusor. ^[1]

Para todo este processo convém referir que se considera que todas as condições se mantêm constantes ao longo do tempo, pelo que a medição de todas as respostas são realizadas em condições suficientemente semelhantes para serem consideradas válidas. No entanto esta situação poderá não se manter válida se forem feitas medições à escala real. Para a resolução deste problema a evolução tecnológica tem-se mostrado um valioso aliado, já que permitiu criar sistemas capazes de medir os impulsos registados pelos 37 microfones de uma só vez e para um único estímulo sonoro, permitindo que todos os registos sejam obtidos para exactamente as mesmas condições.

Obtidos os resultados, estes são processados de forma a fornecerem as frequências de resposta, as respostas polares e finalmente os coeficientes de difusão.

A figura 4.11 resume todo o processo atrás referido para um difusor plano, com o objetivo de obter os coeficientes de difusão.



A. Esquema representativo da geometria de medição com indicação das medições nos ângulos -60° , -30° , 0° , 30° e 60°

B. Resposta do microfone a 0° ao som emitido pelo altifalante.

C. Resposta dos microfones ao som refletido pela amostra para todos os ângulos de incidência. De salientar que os impulsos máximos registam-se para 60° que corresponde ao mesmo ângulo de incidência da fonte. Isto acontece por se tratar de um refletor plano.

D. Aplicação de Transformação de Fourier aos impulsos registados em cada microfone para a obtenção das frequências de resposta.
Em seguida para a obtenção das respostas polares somam-se as frequências de resposta em 1/3 de banda de oitava, obtendo-se assim as intensidades sonoras L_i .
Mais uma vez torna-se claro pela análise da resposta polar que as frequências máximas atingem-se para o ângulo de reflexão direta (60°).

E. Processando as respostas polares é possível obter os coeficientes de difusão para cada frequência. Sem normalização o coeficiente de difusão diminui com o aumento da frequência. Com a normalização dos coeficientes de difusão obtém-se a curva normalizada, que neste caso é nula pois só existe reflexão direta. Ver explicação detalhada mais à frente.

Figura 4.11 – Resumo do processo para obtenção do coeficiente de difusão para uma amostra plana. ^[1]

Convém explicar mais detalhadamente os resultados obtidos no gráfico E da figura 4.11, que relaciona o coeficiente de difusão com a respetiva frequência. Sem normalização verifica-se uma diminuição do coeficiente de difusão para um aumento de frequência. Isto acontece porque um aumento da frequência provoca uma diminuição do comprimento de onda (consultar expressão (2)). Ora uma diminuição do comprimento de onda faz com que a dimensão do painel seja, comparativamente, cada vez maior, o que implica que as ondas sonoras o atinjam em maior quantidade, aumentando por isso o volume de reflexões diretas, ou seja, existe menor quantidade de energia difusa e consequentemente os coeficientes de difusão são menores. Para remover estes efeitos recorre-se à normalização. Como neste caso está em análise um refletor plano, e por isso existe essencialmente reflexão direta, verifica-se que a resposta normalizada é nula.

O mesmo processo, mas agora para uma amostra difusa, permite obter o mesmo tipo de construções gráficas, se bem que, obviamente, com resultados diferentes (ver figura 4.12).

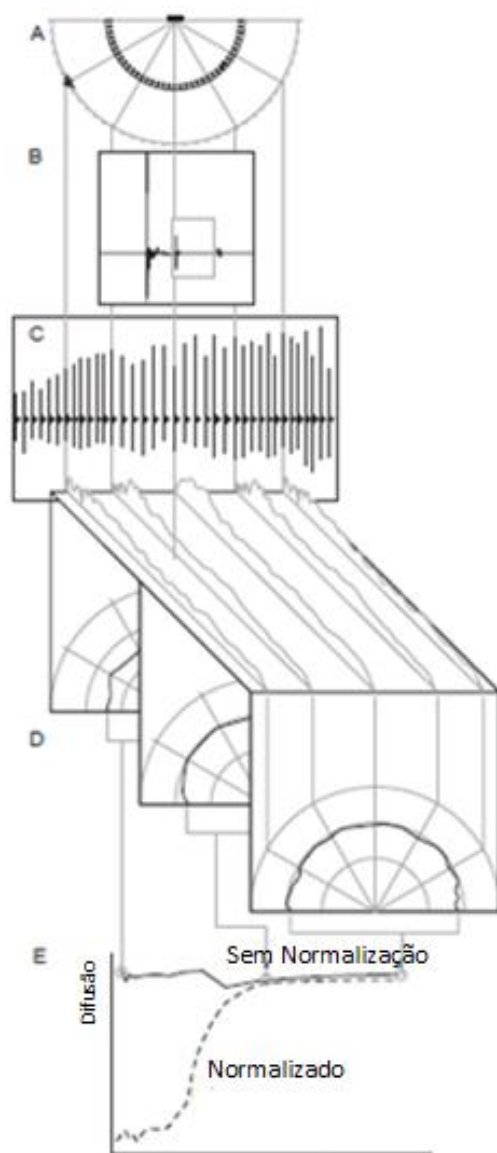


Figura 4.12 – Resumo do processo para obtenção do coeficiente de difusão para uma amostra difusora. ^[1]

Para uma amostra difusora os resultados ilustrados na figura 4.12 apresentam algumas diferenças comparativamente à figura 4.11. Tratando-se de uma amostra difusora será de esperar que os impulsos registados pelos microfones não sejam tão elevados e concentrados para o ângulo de reflexão especular, assistindo-se sim a uma distribuição dos impulsos, mais ou menos homogénea no caso da figura 4.12, pelos diversos ângulos de reflexão. Com a aplicação das transformações de Fourier é possível obter as frequências de resposta e as respetivas respostas polares, que se caracterizam por ser mais semicirculares, graças à maior homogeneidade de distribuição dos impulsos sonoros. Por fim importa analisar o gráfico que relaciona o coeficiente de difusão com a frequência. Sem normalização verifica-se que a difusão é quase sempre máxima (valor máximo = 0,6), o que obviamente não traduz a realidade, e por isso há que normalizar o coeficiente de difusão com os resultados obtidos para o difusor plano. Desta forma obtém-se um traçado mais real e de maior facilidade de análise, onde se removem efeitos indesejados de difracções nos bordos das amostras, que permitem obter os coeficientes de difusão do corpo útil dos painéis difusores.

Importa referir que os processos elucidados em 4.11 e 4.12 são normalmente realizados por *software* específico, que de forma automática permite obter os valores das intensidades sonoras registadas por cada microfone para a partir daí se proceder ao cálculo dos coeficientes de difusão. Para a execução do ensaio bastará ensaiar a amostra em estudo e uma amostra plana de referência para as posições de microfone e fonte já mencionadas.

A janela temporal utilizada nestas medições tem como objetivo isolar as reflexões associadas à amostra em estudo, removendo reflexões residuais que não tenham interesse. A sua determinação é feita considerando o tempo mais curto e mais longo das reflexões de interesse. O tempo mais curto pode ser obtido através de considerações geométricas, enquanto o tempo mais longo deverá abranger mais do que as reflexões de primeira ordem para garantir a obtenção da resposta completa da amostra. A inspecção visual do gráfico do impulso de resposta é também muito útil no isolamento das reflexões de interesse.

Ainda para a janela temporal deverá ser assegurado que o rácio sinal-ruído (S/N - relação entre o sinal e o ruído eletromagnético do aparelho) seja, em relação a uma superfície de referência plana, pelo menos de 40 dB.

O valor de S/N é dado pela expressão a seguir apresentada:

$$S/N = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\int_T [h_1(t) - h_2(t)]^2 dt}{\int_T h_2^2(t) dt} \right\} \quad (7)$$

Em que T é a janela temporal adoptada.

O valor de S/N deverá ser determinado para cada banda de terço de oitava.

Após a definição da janela temporal é necessário aplicar uma transformação de Fourier e obter, para cada frequência na banda de interesse, o nível de intensidade em terço de oitava L' , em decibéis.

Se forem utilizadas um conjunto de distâncias fonte-recetor (r_1 - r_2) diferentes, os níveis de intensidade sonora (L'_i) devem ser corrigidos para permitir o espalhamento esférico e cilíndrico.

Para um valor de r_1 e r_2 , respectivamente iguais a 10 e 5, o valor corrigido para o nível de intensidade sonora (L_i) é dado por:

$$L_i = L'_i + \varepsilon \times 10 \log_{10} \frac{r}{6.67} \quad (8)$$

Em que r representa a relação de r_1 e r_2 já anteriormente explicitada. O valor de ε será igual a 1 se for usada uma modulação bidimensional e igual a 2 se for usada uma modulação tridimensional.

Apesar de tudo as variações de distâncias deverão ser evitadas, realizando as medições segundo um arco. A aplicação desta correcção deve-se ao facto de as amostras de teste não refletirem o som com a formação de ondas esféricas ou cilíndricas.

A obtenção das respostas polares é feita à custa de modelos computacionais o método dos elementos finitos, método do elemento limite ou métodos mais rápidos como a difração de Fresnel.

4.1.3. CÁLCULO E ANÁLISE DETALHADA

A determinação do coeficiente de difusão segue de forma simplificada o procedimento já referido: primeiro determina-se a energia refletida pela superfície em estudo e representam-se os resultados num gráfico polar; a partir deste, e em função da frequência, obtém-se um único valor para o coeficiente de difusão.

Para a determinação dos coeficientes de difusão a partir das respostas polares poderão ser usados vários processos estatísticos, tais como: desvio padrão, diretividade, níveis de zonas de reflexão direta e harmónicas esféricas. Mas a técnica mais comum e utilizada para a determinação deste coeficiente baseia-se num processo de autocorrelação. A função de autocorrelação é utilizada usualmente para medir a semelhança entre um sinal e a versão atrasada do mesmo, tendo em vista a análise da semelhança temporal entre ambos os sinais. É também possível utilizar esta função para a análise da semelhança entre a energia espalhada espacialmente e o ângulo do recetor.

Pode ser estabelecida uma relação entre a capacidade difusora de um painel e o valor obtido para o coeficiente de difusão obtido pela função de autocorrelação. Uma superfície que dispersa o som em todas as direcções apresenta altos valores de autocorrelação, acontecendo o inverso para difusores com dispersão em direcções específicas.

Para uma fonte sonora fixa e em que cada posição de cada recetor recebe impulsos da mesma área de medição, para frequências em terços de oitava, tem-se então que o coeficiente de difusão direccionado determinado por autocorrelação é dado por:

$$d_{\theta} = \frac{(\sum_{i=1}^n 10^{Li/10})^2 - \sum_{i=1}^n (10^{Li/10})^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n (10^{Li/10})^2} \quad (9)$$

Em que θ é o ângulo de incidência, Li é um conjunto de valores de pressão sonora em decibéis obtidos da resposta polar e n é o número de recetores.

O valor para o coeficiente de difusão obtido a partir da expressão (9) é um valor “bruto” na medida em que apresenta algumas incongruências e dificuldades na interpretação dos resultados. Por isso existe a necessidade de normalizar este coeficiente (através a relação dos resultados com os obtidos para um reflector plano). O coeficiente de difusão normalizado pode pois ser obtido através da expressão que se a seguir se apresenta:

$$d_{\theta,n} = \frac{d_{\theta} - d_{\theta,r}}{1 - d_{\theta,r}} \quad (10)$$

Em que d_θ é o coeficiente de difusão de uma amostra de teste e $d_{\theta,r}$ o coeficiente de difusão para uma superfície lisa de referência da mesma dimensão que a amostra de teste.

O recurso a esta normalização pretende por exemplo eliminar os efeitos de reflexão nos bordos das amostras. As reflexões nestes locais fazem com que o coeficiente de difusão aumente para a diminuição das frequências. Isto acontece porque a amostra atua como uma fonte que dispersa energia omnidirecionalmente, traduzindo-se por isso em maiores coeficientes de difusão. Desta forma conseguem-se obter resultados mais intuitivos.

A figura 4.13 permite perceber as diferenças entre os coeficientes de difusão normalizados e não normalizados.

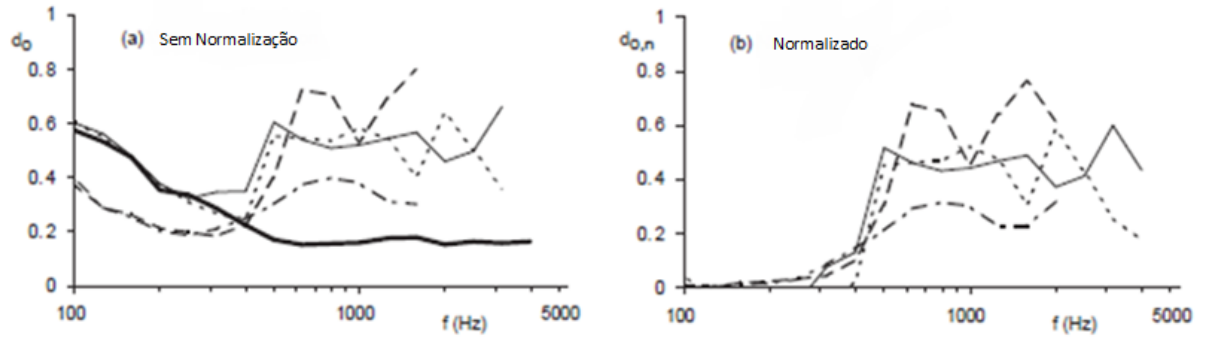


Fig. 4.13 – Coeficientes de Difusão para 4 amostras comerciais. Na imagem da esquerda tem-se os coeficientes de difusão não normalizados e na direita os coeficientes de difusão normalizados. ^[1]

Quando os recetores não recebem impulsos da mesma área de medição haverá que efectuar o cálculo do coeficiente de difusão direcciona através da expressão a seguir apresentada:

$$d_\theta = \frac{(\sum_{i=1}^n 10^{Li/10} N_i)^2 - \sum_{i=1}^n (10^{Li/10})^2}{(\sum_{i=1}^n N_{i-1}) \sum_{i=1}^n N_i (10^{Li/10})^2} \quad (11)$$

Em que N_i é um valor proporcional à área de medição do recetor i , e pode ser calculado da seguinte forma:

$$N_i = \frac{A_i}{A_{min}} \quad (12)$$

$$A_i = \frac{4\pi}{\Delta\varphi} \text{sen}^2\left(\frac{\Delta\theta}{4}\right) \quad \theta = 0^\circ \quad (13)$$

$$A_i = 2\text{sen}(\theta)\text{sen}\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) \quad \theta \neq 0^\circ, |\theta| \neq 90^\circ \quad (14)$$

$$A_i = \text{sen}\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) \quad |\theta| = 90^\circ \quad (15)$$

Em que $\Delta\varphi$ e $\Delta\theta$ são o azimute e elevação entre dois recetores adjacentes, tratando-se de espaçamentos angulares com normalmente 5° . $A_{\min}$ é o valor mais baixo dos A_i para i de 1 a n .

4.1.4. ESPAÇO E AMOSTRAS – CARACTERÍSTICAS E EXIGÊNCIAS

Para o ensaio em laboratório há que ter em especial atenção a amostra que é utilizada, uma vez que esta terá de respeitar determinadas características, sob pena de não ser representativa do difusor em estudo, conduzindo por isso a resultados erróneos.

Uma das características de maior influência nos resultados dos ensaios destas amostras é a periodicidade da geometria do difusor. A norma AES-4id-2001, aconselha que as amostras tenham pelo menos uma repetição completa de 4 sequências para que os efeitos associados à repetição geométrica estejam incluídos nos resultados. Se o objetivo não é atender aos efeitos de periodicidade, mas conhecer apenas a difusão de uma unidade, então basta ensaiar um painel.

Para amostras que não seguem nenhum padrão de repetição, ou seja, amostras aleatórias, deve-se garantir que estas sejam suficientemente grandes para representar a sua rugosidade, bem como garantir que mais do que os efeitos de bordo, sejam contabilizados os efeitos de reflexão do corpo do difusor.

Quando as amostras para representarem o comportamento do painel apresentam dimensões muito consideráveis, tornando-se impossível recorrer a ensaios em laboratório, é comum recorrer-se a modelos de previsão, usando escalas menores. O avanço tecnológico atual permite com facilidade a obtenção das amostras pretendidas e com as escalas necessárias utilizando impressoras 3D, capazes de imprimir os desenhos feitos em CAD 3D.

As amostras de teste, os microfones e os altifalantes deverão ser colocados sobre uma superfície totalmente refletora. Este facto faz com que o espaço de medição seja na verdade semi-anecóico (para utilização em câmara anecoica). A superfície deverá ter um coeficiente de reflexão da pressão sonora de pelo menos 0.99 e deverá ser suficientemente larga para garantir que os efeitos de reflexão dos bordos estão, pelo menos, 40 dB abaixo do sinal detetado na janela de interesse. Para garantir a medição de todas as frequências, sem que reflexões destrutivas o impeçam, a fonte e os recetores deverão estar suficientemente próximos da superfície refletora. Nesse sentido existe a regra de considerar que os equipamentos de medição não estejam a uma distância superior a um quarto do comprimento de onda da superfície refletora.

4.2. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO

4.2.1. DEFINIÇÃO

Já anteriormente foi referido, mas por uma questão de clarificação de conceitos, mais uma vez são aqui elucidadas algumas definições importantes, tal como referidas na norma ISO 17497-1:2004.

- **Coeficiente de Espalhamento (*Scattering Coefficient* - s_0):** “valor calculado por um menos o rácio da energia acústica refletida de forma especular e a energia acústica total refletida.”

O valor deste coeficiente, pode teoricamente, oscilar entre zero e um, onde zero representa uma superfície que reflete toda a energia incidente de forma especular, e um uma superfície que reflete toda a energia de forma difusa. O índice θ representa o ângulo de incidência relativamente à normal à superfície e se este não for mencionado considerar-se-á incidência aleatória.

- **Coeficiente de Espalhamento para incidência aleatória (*Scattering Coefficient* – s):** “valor calculado por um menos o rácio da energia acústica refletida de forma especular e a energia acústica total refletida por uma superfície num campo sonoro difuso.”

4.2.2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Tal como já foi referido o princípio base do coeficiente de espalhamento (figura 4.14) consiste em separar a energia de reflexão direta (energia refletida no mesmo ângulo de incidência do som) e a energia de reflexão difusa (energia refletida em ângulos diferentes do de reflexão direta). Para cada uma destas energias existem algoritmos específicos para o seu cálculo. Desta forma determina-se o coeficiente de espalhamento como sendo a proporção de energia refletida de forma não especular. No entanto, importa referir que este coeficiente informa sobre a quantidade de energia refletida da forma referida, mas não sobre a forma como essa energia se distribui pelos vários ângulos de reflexão, assumindo-se para essa questão que existe uma mistura de reflexões nas diversas direções. Convém também referir que esta última assunção é válida para um campo reverberante (do inglês: *reverberant field*) em que ocorrem múltiplas reflexões até à dissipação da energia sonora, no entanto para um campo sonoro próximo (do inglês: *early sound field*) em que existem reflexões isoladas e específicas, há que modelar com especial atenção estas reflexões sob pena de pôr em causa a precisão do coeficiente de espalhamento determinado.

Tal como o coeficiente de difusão, também o coeficiente de espalhamento depende da frequência e do ângulo de incidência sonora. Para este trabalho, o estudo dos coeficientes de espalhamento é feito num campo sonoro difuso. Para esta situação pode ter interesse perceber a partir de que frequência um determinado espaço pode ser considerado difuso. Nesse sentido Schroeder propôs a seguinte relação:

$$f > 0.2 \sqrt{\frac{c^3 T}{V}} \quad (16)$$

Em que f é a frequência mínima que garante um campo sonoro difuso, em Hertz (Hz), c é a velocidade do som no ar em metros por segundo (m/s), T é o tempo de reverberação do espaço, em segundos (s) e V o volume da câmara reverberante em metros cúbicos (m^3).

O princípio básico deste método pode ser explicado à luz da análise do comportamento das reflexões e do fenómeno de espalhamento, para diversos impulsos sonoros. A figura 4.15 ilustra um gráfico com a resposta temporal de três impulsos sonoros, que correspondem à resposta da uma superfície rugosa em campo sonoro livre, para três orientações diferentes da amostra.

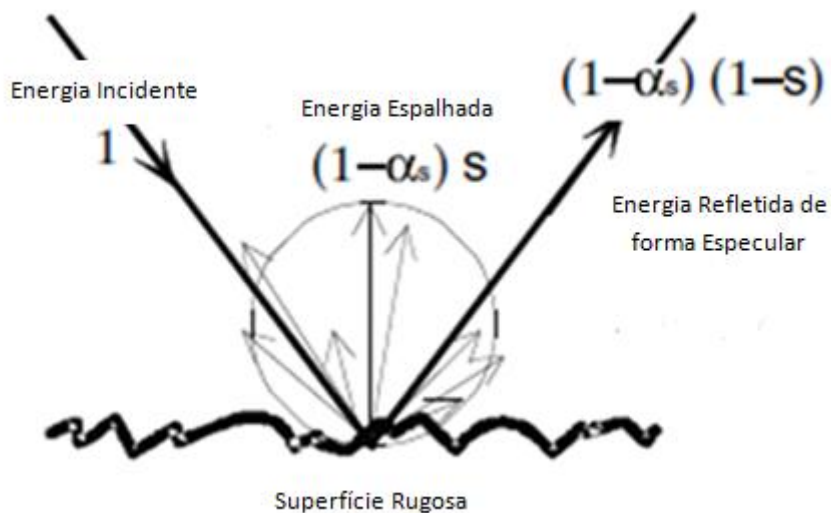


Fig. 4.14 – Definições para a determinação do coeficiente de espalhamento. ^[1]

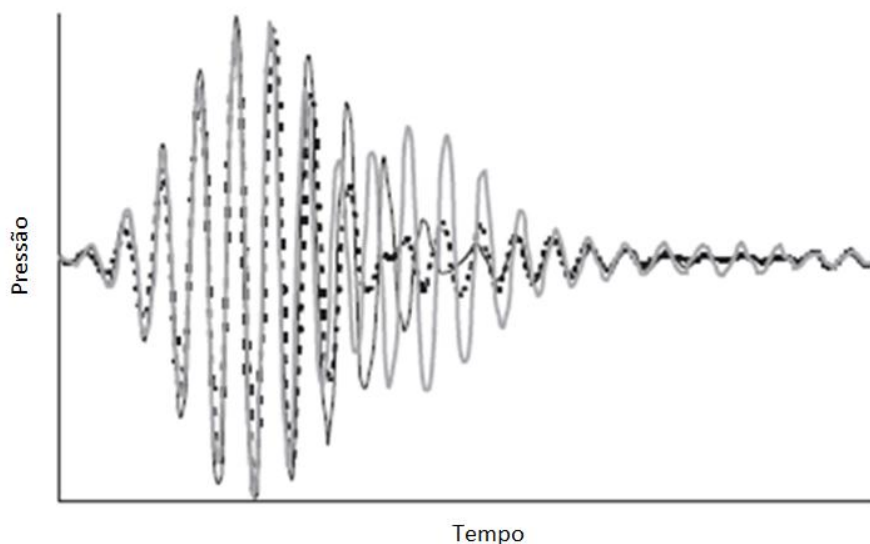


Fig. 4.15 – Gráfico dos impulsos detetados para diferentes posições da amostra. ^[1]

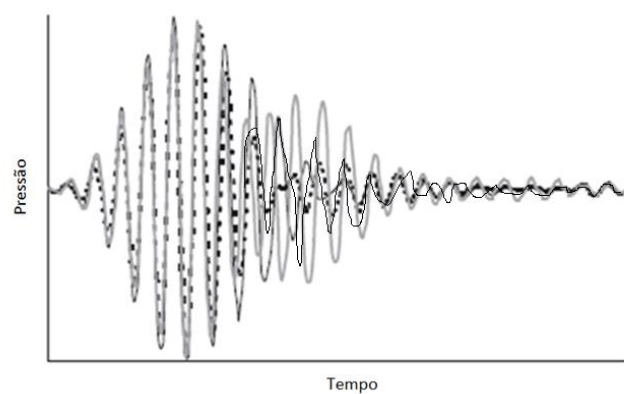
A análise da figura 4.15 permite verificar que numa fase inicial as várias respostas temporais se encontram praticamente coincidentes. Isto acontece, pois nesta fase predominam as reflexões especulares, idênticas em termos de intensidade, independentemente da orientação da amostra. Esta receção mais inicial está também associada ao facto de as reflexões especulares terem mais energia e por isso chegarem mais rapidamente ao microfone quando comparado com as reflexões difusas, energeticamente mais fracas. Quando as reflexões difusas começam a ser mais evidentes, numa janela temporal mais avançada, começa a verificar-se desfasamento das reflexões associadas aos diversos sinais, e por isso, graficamente, os impulsos já não são coincidentes. A separação destas duas energias (especular e difusa) está pois na base desta metodologia prática. Através de uma média com sintonia de fase (do inglês *phase-locked*) dos impulsos para diversas posições da amostra (ponto a partir do qual se define, aproximadamente, o início do aparecimento das reflexões difusas), as reflexões especulares adicionam-se de forma coerente enquanto as reflexões difusas tomam um comportamento de interferência destrutiva do sinal, pelo que a média aritmética final de todos os impulsos dará um sinal que contém apenas a energia refletida de forma especular, já que a energia refletida de forma difusa se vai anular para uma rotação completa da amostra. Neste contexto, é importante garantir a medição de um elevado número de respostas impulsivas para que o valor médio contenha essencialmente a componente especular das reflexões. A resposta impulsiva é em seguida objeto de integração inversa para se obter o respetivo tempo de reverberação. Importa, no entanto, referir que apesar das respostas impulsivas de uma amostra difusora serem diferentes para cada ângulo de rotação, a energia total associada ao decaimento é sempre a mesma.

A figura 4.16 ilustra vários gráficos da resposta impulsiva de 4 sinais sobrepostos, e o resultado obtido para a média dos mesmos. Nessa mesma figura torna-se evidente a quase anulação da energia difusa, sendo que a resposta impulsiva final contém apenas a energia refletida de forma especular. Importa referir que esta figura pretende apenas representar de forma muito esquemática a ideia subjacente a este processo, pelo que os dados nela contidos não se referem a nenhum ensaio ou teste real.

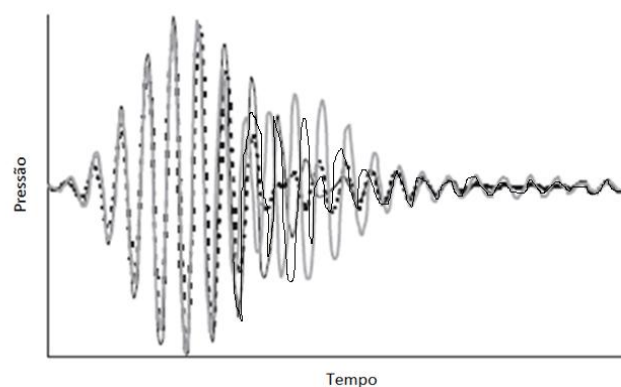
Tradicionalmente uma resposta impulsiva é obtida através da emissão de um estímulo sonoro do tipo Dirac. Na ISO 354 ^[29] a resposta impulsiva é definida como a “*evolução temporal da pressão sonora observada num ponto de um compartimento, resultante da emissão de um impulso de Dirac noutra ponto do compartimento*”. Como na prática é impossível gerar um som que corresponda a uma função delta Dirac, recorre-se a sons de curta duração para se produzir uma resposta impulsiva. Para a execução deste método é ainda comum utilizarem-se sinais periódicos pseudo-aleatórios, tal como o MLS (*Maximum Length Sequence*) ou outro sinal determinístico com espectro constante e realizar a transformação da resposta medida numa resposta impulsiva. Para outras informações mais detalhadas sobre o sinal de teste consultar a ISO 354 ^[29]. De referir, no entanto, que o método do ruído interrompido não permite a medição do coeficiente de espalhamento.

Os sinais pseudo-aleatórios referidos têm uma função de autocorrelação do tipo delta Dirac periódico. A grande vantagem na utilização deste tipo de sinais está no facto de o seu comportamento ser conhecido *a priori* e de poder ser repetido indefinidamente.

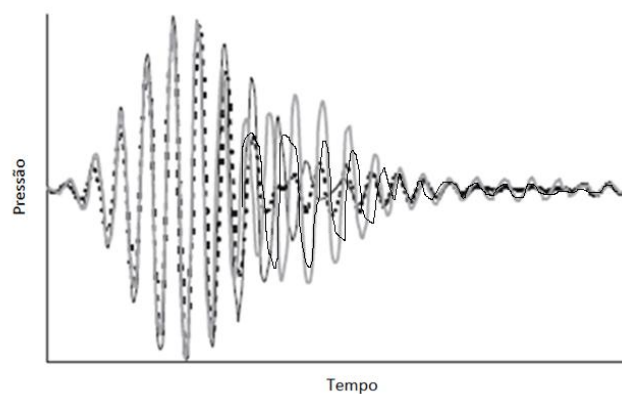
O uso de técnicas que usem funções de autocorrelação tem várias vantagens na medição do coeficiente de espalhamento num campo sonoro difuso. Uma das vantagens reside no facto de as medições poderem ser feitas em contínuo, durante a rotação da mesa. Nesse sentido poderá ser usado apenas um sinal em que o período de emissão do mesmo seja igual ao tempo de uma rotação completa da mesa, ou então vários sinais com períodos de emissão mais curtos (cumprindo no total o tempo equivalente ao tempo de uma rotação completa da mesa), sendo no final realizada a média das respostas obtidas.



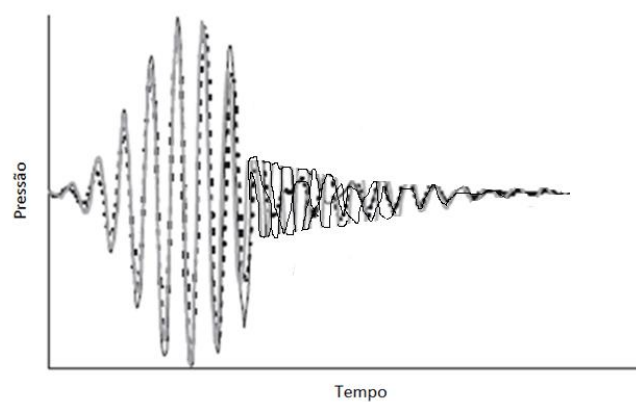
Conjunto de
Ângulos 1



Conjunto de
Ângulos 2



Conjunto de
Ângulos 3



**Média
Aritmética**

Fig. 4.16 – Gráficos representativos de respostas impulsivas de diversos sinais. Os primeiros três referentes a três conjuntos de ângulos de rotação diferentes, e o último à média aritmética dos três primeiros. ^[1]

A forma de colocação das fontes sonoras e recetores é a mesma que a referida na norma ISO 354. No que diz respeito aos recetores, ou seja, os microfones, estes devem ser omnidireccionais. Devem ser efectuados registos para diferentes posições dos microfones afastados entre si de pelo menos 1,5 m, a 2 m da fonte sonora e pelo menos a 1 m de distância da amostra e das paredes da câmara. Quanto à fonte sonora esta deverá igualmente ser omnidireccional e deverão ser registadas várias posições para a mesma, espaçadas de pelo menos 3 m. As dimensões referidas deverão, no caso de estar a ser utilizada uma amostra à escala, ser dadas pelo fator de escala N . Pelo menos 12 curvas de decaimento independentes devem ser registadas, pelo que o produto entre as posições dos recetores e da fonte deverá ser sempre superior a 12. A ISO 354 exige que pelo menos 3 posições para os recetores e 2 posições para a fonte sejam registadas. A utilização, em simultâneo, de mais que uma fonte sonora é possível, desde que a diferença na potência radiada seja menor ou igual a 3 dB em cada banda de terço de oitava. Para esta última situação o número de curvas de decaimento pode ser reduzido a seis.

O processo inicia-se com a medição dos impulsos sonoros, usando a técnica já referida conforme a ISO 354, sem e com a amostra de teste, sem que a mesa rotativa esteja em movimento, obtendo-se, respetivamente, os tempos de reverberação T_1 e T_2 . Nesta fase é necessário efectuar pelo menos 6 medições, através de duas posições para a fonte e três posições para o microfone. O tempo de reverberação corresponde à média aritmética dos diversos tempos de reverberação determinados para cada posição.

Para cada posição fonte-recetor é gerado e recebido um sinal periódico pseudo-aleatório de forma contínua, enquanto a mesa rotativa está em funcionamento. A duração total da medição deverá ser igual ao tempo correspondente a uma volta completa da mesa rotativa.

Poderão também, em alternativa, para cada posição fonte-recetor, ser realizadas n medições com a amostra rodada entre cada medição de $360^\circ/n$. O valor de n deverá estar entre 60 e 120, sendo 72 um valor comum, correspondendo a variações angulares de 5° . De referir que, de acordo com Mommertz, rotações angulares muito pequenas não são desejáveis, uma vez que, os impulsos assim obtidos não poderão ser considerados estatisticamente independentes, sendo essa uma das condições para que este método seja válido.

O sinal utilizado deverá ser sempre o mesmo em todas as medições para assegurar a homogeneidade e igualdade nos resultados obtidos. Para obter uma resposta que não dependa do tempo, é necessário efectuar uma média de sintonia de fase para as n medições. Este processo poderá ser feito através da média das respostas dos impulsos de pressão ou através da média dos sinais recebidos antes de calcular as respostas dos impulsos de pressão.

Estas medições feitas com a mesa rotativa em funcionamento e sem a amostra permitem determinar o tempo de reverberação T_3 . Com a mesa rotativa em funcionamento e a amostra presente obtém-se o tempo de reverberação T_4 .

A tabela 4.1 resume as diversas medições para os tempos de reverberação que necessitam de ser realizadas. A figura 4.17 ilustra o procedimento de medição.

Tabela 4.1 – Condições de medição para os 4 tempos de reverberação. ^[16]

Tempo de Reverberação	Amostra de Teste	Mesa Rotativa
T1	Ausente	Sem Rotação
T2	Presente	Sem Rotação
T3	Ausente	Com Rotação
T4	Presente	Com Rotação

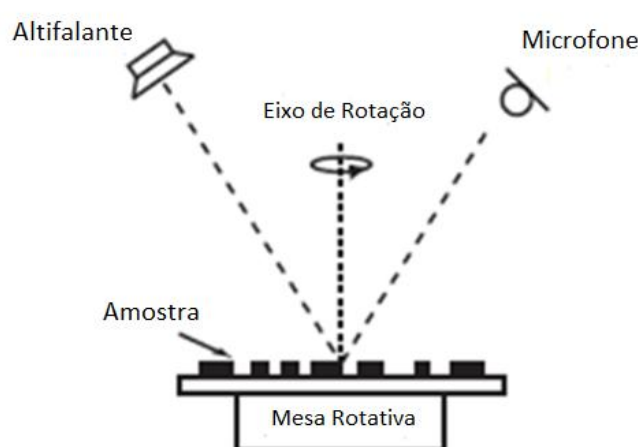


Fig. 4.17 – Esquema de Medição do Coeficiente de Espalhamento. ^[1]

No que diz respeito a este ensaio ainda existem outros aspectos que importa referir:

- Para evitar erros de medição associados à movimentação de ar é comum que os ensaios não se iniciem antes de 15/N minutos, depois de se sair da sala e fechar a porta;
- As medições deverão ser realizadas o mais rapidamente possível por causa das possíveis flutuações de temperatura que possam vir a ocorrer. Este aspeto é de fácil execução em amostras à escala, no entanto em amostras à escala 1:1 é necessário que a rotação da mesa se faça lentamente. Desta forma medições à escala real são muito demoradas e com dificuldades acrescidas a nível logístico, uma vez que são necessárias mesas rotativas de dimensões consideráveis. Por todas estas razões é facilmente perceptível a preferência por ensaios com amostras à escala;
- Variações de temperatura e humidade podem ter grande influência nos resultados finais dos coeficientes de espalhamento, principalmente para as altas frequências, pelo que esses valores devem ser medidos antes e depois, a cada quatro ensaios;
- Reduzir a atenuação do ar conduz a medições mais precisas, mas obriga a substituir o ar por hélio;

- A avaliação das respostas impulsivas é realizada através do método da integração da resposta impulsiva tal como referido na ISO 354. O limite de integração deve ser fixado em -30 dB e a avaliação do tempo de reverberação deve-se situar entre -5 dB e -20 dB.

4.2.3. CÁLCULO E ANÁLISE DETALHADA

A partir dos valores dos quatro tempos de reverberação determinados é possível calcular os coeficientes de absorção da energia total incidente, α_s , e da energia refletida de forma especular, $\alpha_{\text{especular}}$.

$$\alpha_s = 55.3 \frac{V}{S} \left(\frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - \frac{4V}{S} (m_2 - m_1) \quad (17)$$

Em que V é o volume da câmara reverberante (m^3), S é a área da amostra de teste (m^2), c_1 é a velocidade do som no ar (m/s) durante a medição de T_1 , c_2 é a velocidade do som no ar (m/s) durante a medição de T_2 , m_1 é a energia do coeficiente de atenuação no ar (m^{-1}) durante a medição de T_1 e m_2 é a energia do coeficiente de atenuação no ar (m^{-1}) durante a medição de T_2 .

De referir que os parâmetros c (m/s) e m (m^{-1}) poderão ser calculados da seguinte forma:

$$c = 343,2 \sqrt{\frac{273,15+t}{293,15}} \quad (18)$$

Em que t é a temperatura do ar em graus celsius.

$$m = \frac{\alpha}{10 \log e} \approx \frac{\alpha}{4.343} \quad (19)$$

Em que α é o coeficiente de atenuação da pressão sonora. O valor de α é colocado em dB/m, sendo que o resultado do quociente tem a unidade de metros recíprocos m^{-1} .

Os valores de α são retirados da norma NP 4361- 1: 1997, “Atenuação do som na sua propagação ao ar livre. Parte 1: Cálculo da absorção sonora atmosférica”. Estes valores estão disponíveis em tabelas para algumas condições de temperatura, no entanto, podem genericamente ser calculados da seguinte forma:

$$\alpha = 8,686 f^2 \left(\left[1,84 \times 10^{11} \left(\frac{pa}{pr} \right)^{-1} \times \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{1}{2}} \right] + \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-\frac{5}{2}} \times \{ 0,01275 \left[\exp \left(\frac{-2239,1}{T} \right) \right] \left[f_{rO} + \left(\frac{f^2}{f_{rO}} \right) \right]^{-1} + 0,1068 \left[\exp \left(\frac{-3352,0}{T} \right) \right] \left[f_{rN} + \left(\frac{f^2}{f_{rN}} \right) \right]^{-1} \} \right) \quad (20)$$

Em que α é o coeficiente de atenuação dos sons puros (dB/m), f é a frequência (Hz), p_a é a pressão atmosférica ambiente (KPa), p_r é a pressão atmosférica ambiente de referência (KPa) e igual a 101,325 KPa, T é a temperatura atmosférica ambiente (K), T_0 é a temperatura atmosférica de referência (K) igual a 293,15 K, f_{rO} é a frequência de relaxação do oxigénio (Hz) e f_{rN} é a frequência de relaxação do azoto (Hz).

Os valores de f_{rO} e f_{rN} podem ser obtidos da seguinte forma:

$$f_{rO} = \frac{p_a}{p_r} (24 + 4,04 \times 10^4 h \frac{0,02+h}{0,391+h}) \quad (21)$$

$$f_{rN} = \frac{p_a}{p_r} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-\frac{1}{2}} \times (9 + 280h \exp \left\{ -4,170 \left[\left(\frac{T}{T_0} \right)^{-\frac{1}{3}} - 1 \right] \right\}) \quad (22)$$

Em que, $\exp$ representa a base e dos logaritmos neperianos elevado à potência indicada entre parêntesis, h_r é a humidade relativa (%) e h é a fração molar do vapor de água (%) e pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$h = h_r \left(\frac{p_{sat}}{p_r} \right) \left(\frac{p_a}{p_r} \right) \quad (23)$$

Em que p_{sat} é a pressão de vapor saturante (KPa), sendo que o quociente entre p_{sat} e p_r é dado por:

$$\frac{p_{sat}}{p_r} = 10^C \quad (24)$$

Sendo C dado por:

$$C = -6,8346 \left(\frac{T_{01}}{T} \right)^{1,261} + 4,6151 \quad (25)$$

Para um valor de T_{01} igual a 273,16 K, que representa a temperatura isotérmica no ponto triplo.

O coeficiente de absorção da energia refletida de forma especular é dado pela equação a seguir apresentada.

$$\alpha_{especular} = 55.3 \frac{V}{S} \left(\frac{1}{c_4 T_4} - \frac{1}{c_3 T_3} \right) - \frac{4V}{S} (m_4 - m_3) \quad (26)$$

Em que c_3 é a velocidade do som no ar (m/s) durante a medição de T_3 , c_4 é a velocidade do som no ar (m/s) durante a medição de T_4 , m_3 é a energia do coeficiente de atenuação no ar (m^{-1}) durante a medição de T_3 e m_4 é a energia do coeficiente de atenuação no ar (m^{-1}) durante a medição de T_4 .

Obtidos os coeficientes referidos é possível proceder ao cálculo do coeficiente de espalhamento através da expressão:

$$s = \frac{\alpha_{especular} - \alpha_s}{1 - \alpha_s} = 1 - \frac{E_{especular}}{E_{total}} \quad (27)$$

O coeficiente de espalhamento da base poderá igualmente ser calculado pela expressão a seguir apresentada:

$$s_{base} = 55.3 \frac{V}{S} \left(\frac{1}{c_3 T_3} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - \frac{4V}{S} (m_3 - m_1) \quad (28)$$

Sob condições ideais os tempos de reverberação T_1 e T_3 deveriam ser iguais, no entanto a geometria não perfeita da base, que possa levar a uma não completa simetria, pode encurtar o valor de T_3 . Assume-se que este erro existe igualmente com a amostra presente.

Existem várias energias envolvidas neste processo, nomeadamente, a energia refletida de forma especular, a energia difusa e a energia total (soma da energia especular e difusa).

As energias de reflexão referidas são dadas pelas seguintes expressões:

$$E_{especular} = (1 - \alpha_s)(1 - s) \equiv (1 - \alpha_{especular}) \quad (29)$$

$$E_{total} = 1 - \alpha_s \quad (30)$$

$$E_{difusa} = E_{total} - E_{especular} = E_{total} - E_{total} \times s \quad (31)$$

Onde, $E_{especular}$ é a energia refletida de forma especular, E_{total} é a energia total refletida, E_{difusa} é a energia refletida de forma difusa, α_s é o coeficiente de absorção sonora, $\alpha_{especular}$ é o coeficiente aparente de absorção associado à energia refletida de forma especular e s é o coeficiente de espalhamento para incidência aleatória.

A estimativa da precisão das medições efectuadas poderá ser realizada através do cálculo do desvio padrão. Para cada um dos quatro tempos de reverberação determinados durante o processo (T_1 , T_2 , T_3 e T_4) poderão ser cálculos os desvios padrão associados (δ_1 , δ_2 , δ_3 e δ_4) através da seguinte expressão:

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(T_i - \bar{T})^2}{N(N-1)}} \quad (32)$$

Em que N é o número de medições do tempo de reverberação e $\bar{T}$ a média espacial da câmara reverberante dada por:

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (33)$$

O desvio padrão associado ao coeficiente de absorção da energia total incidente e da energia refletida e forma especular é dado por:

$$\delta_{\alpha_s} = \frac{55,3V}{cS} \sqrt{\left(\frac{\delta_2}{T_2}\right)^2 + \left(\frac{\delta_1}{T_1}\right)^2} \quad (34)$$

$$\delta_{\alpha_{\text{especular}}} = \frac{55,3V}{cS} \sqrt{\left(\frac{\delta_4}{T_3}\right)^2 + \left(\frac{\delta_4}{T_3}\right)^2} \quad (35)$$

O desvio padrão associado ao coeficiente de espalhamento é então dado por:

$$\delta_s = \left| \frac{\alpha_{\text{especular}} - 1}{1 - \alpha_s} \right| \sqrt{\left(\frac{\delta_{\alpha_{\text{especular}}}}{\alpha_{\text{especular}} - 1} \right)^2 + \left(\frac{\delta_{\alpha_s}}{1 - \alpha_s} \right)^2} \quad (36)$$

O nível de confiança a 95% para o coeficiente de espalhamento deverá ser estimado como duas vezes o seu desvio padrão.

4.2.4. ESPAÇO E AMOSTRAS – CARACTERÍSTICAS E EXIGÊNCIAS

Em seguida serão referidos alguns aspetos importantes na garantia das condições ideais para a correta execução do ensaio, ao nível do espaço (câmara reverberante) e das amostras:

- As medições à escala real deverão ser realizadas em bandas de um terço de oitava, com largura de banda entre os 100 Hz e os 5000 Hz; Para medições à escala (factor 1:N) a largura de banda deverá estar compreendida entre $N \times 100$ Hz e $N \times 5000$ Hz;
- A câmara reverberante deverá ser o mais invariante possível em termos de condições físicas (elementos difusores em posições fixas), de temperatura e humidade (podem ter grande influência nas medições, principalmente nas altas frequências). A norma ISO 354 indica que o volume da câmara deverá ser de pelo menos 150 m^3 , com um valor ideal a rondar os 200 m^3 para a construção de novas câmaras. Para volumes superiores a 500 m^3 , e devido à absorção do ar, poderá não ser possível medir a absorção para altas frequências, o que também terá influências na medição da difusão. A forma da câmara deverá cumprir a seguinte condição: $lmáx < 1.9V^{1/3}$, em que $lmáx$ é o comprimento da maior recta contida nos limites da câmara, em metros, e V o volume da câmara em m^3 .
- Segundo a ISO 17497, volume da câmara reverberante deverá ser superior a $200 \times N^{-3} \text{ m}^3$ (em que N é o factor de escala da amostra);

- A área equivalente de absorção da câmara reverberante vazia (A_1) incluindo a atenuação do ar deve ser inferior a $0,30 \times V^{2/3} \text{ m}^2$;
- A mesa rotativa utilizada no ensaio deve apresentar uma base circular rígida com simetria em relação ao eixo de rotação. A dimensão da base circular deve corresponder à dimensão máxima da amostra. Nenhuma parte da mesa rotativa deve estar a uma distância inferior a $N^{-1} \times 1 \text{ m}$ das paredes da câmara. O valor do coeficiente de espalhamento da base sem amostra deverá igualmente ser medido e não deverá exceder os valores constantes na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores dos Coeficientes de Espalhamento da Base da Mesa Rotativa por frequência ^[16]

Frequência (f/N), Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630
Coeficiente de Espalhamento da Base (s_{base})	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.10

Frequência (f/N), Hz	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Coeficiente de Espalhamento da Base (s_{base})	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.10

- A área das amostras deverá ser suficientemente grande para poder proporcionar medições precisas. A amostra deverá ser circular e apresentar um diâmetro superior a $N^{-1} \times 3 \text{ m}$. Alternativamente a amostra poderá ser quadrangular com aresta de dimensão mínima igual a $N^{-1} \times 2,65 \text{ m}$. Para este último caso a base deverá ter um diâmetro mínimo igual a $N^{-1} \times 3,75 \text{ m}$ e a amostra deverá ser encastrada na base para evitar situações de reflexões nos bordos e por isso sobrestimação dos valores dos coeficientes de espalhamento (figura 4.18);

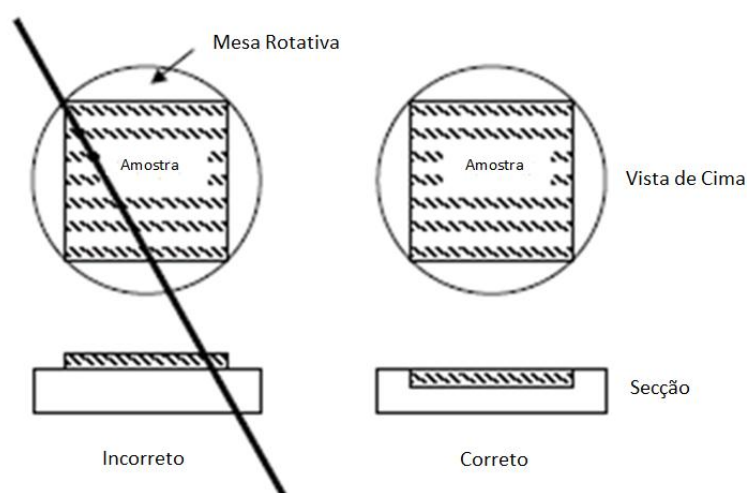


Fig. 4.18 - À esquerda a amostra não incorporada na mesa rotativa (incorrecto) e à direita a amostra incorporada na mesa rotativa (correto). ^[1]

- Tendo em atenção de que este ensaio se baseia em superfícies rugosas, as relações entre as dimensões das rugosidades e da amostra são muito importantes para a obtenção de resultados fiáveis. Nesse sentido tem todo o interesse que a profundidade estrutural das rugosidades (h) seja suficientemente inferior à dimensão da amostra, e por isso à dimensão da mesa rotativa (d), respeitando a relação: $h \leq d/16$ (figura 4.19).

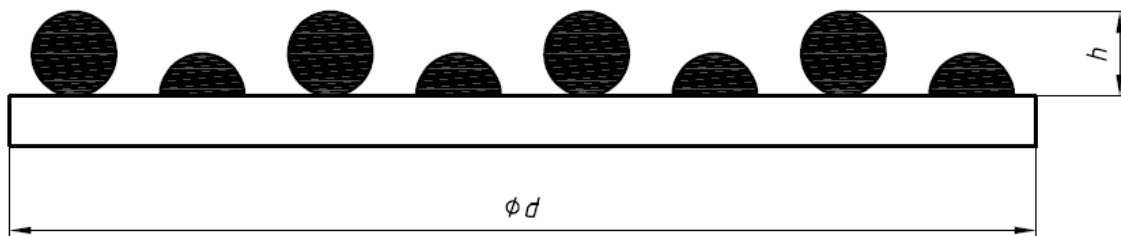


Fig. 4.19 – Definição da Profundidade Estrutural. ^[16]

- A superfície perimetral da amostra de teste deve ser o mais suave e rígida possível. O perímetro não deve ser coberto por um rebordo rígido de altura constante e todas as aberturas que possam existir devem ser devidamente seladas;
- Se a amostra de teste tem simetria rotacional então esta deverá ser colocada na mesa rotativa com um desfaseamento em relação ao centro rotacional da mesa de pelo menos uma distância de $d/8$, em que d é o diâmetro da mesa rotativa;
- O coeficiente de absorção da amostra de teste não deverá ser superior a 0,50 sob o risco de pôr em causa a determinação correcta do coeficiente de espalhamento.

De salientar mais uma vez a extrema importância de garantir que a amostra seja circular ou então que esteja encastrada na mesa rotativa, para assegurar uma medição realista dos coeficientes de espalhamento das amostras. Estudos realizados por Gomes ^[30] demonstram o impacto bastante significativo que as reflexões nos bordos da amostra têm nos resultados dos coeficientes de espalhamento. A figura 4.20 ilustra duas amostras colocadas sobre a mesa rotativa: a da esquerda é uma amostra quadrangular, que pela sua reduzida espessura é como se estivesse encastrada na mesa, enquanto a amostra da direita é circular, apresentando igualmente reduzida espessura.

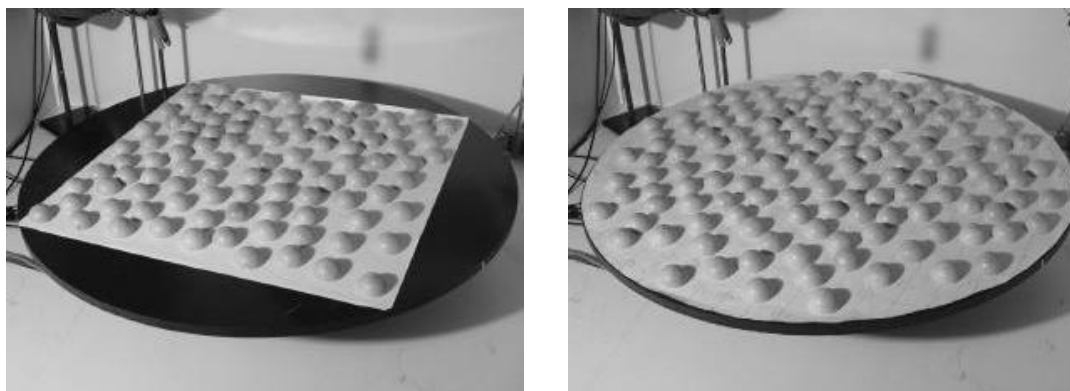


Fig. 4.20 – Amostra quadrada sobre a mesa rotativa à esquerda e amostra circular à direita. ^[30]

A mesma amostra quadrada colocada sobre uma placa da mesma dimensão mas com 1,5 cm de altura pode ser vista na figura 4.21.

Os resultados da medição dos coeficientes de espalhamento obtidos por Gomes podem ser visualizados na figura 4.22.

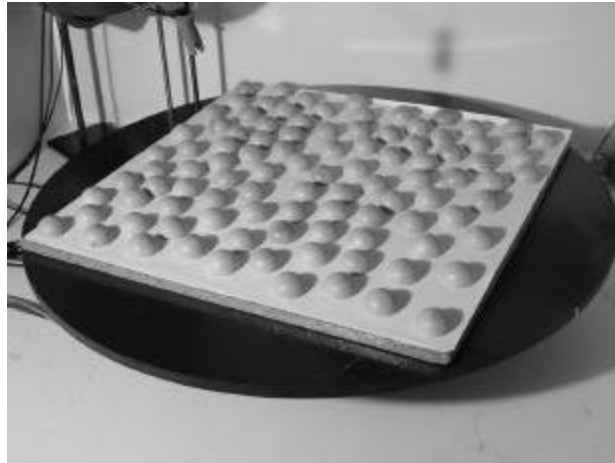


Fig. 4.21 – Amostra quadrada apoiada sobre uma placa com 1,5 cm de altura. ^[30]

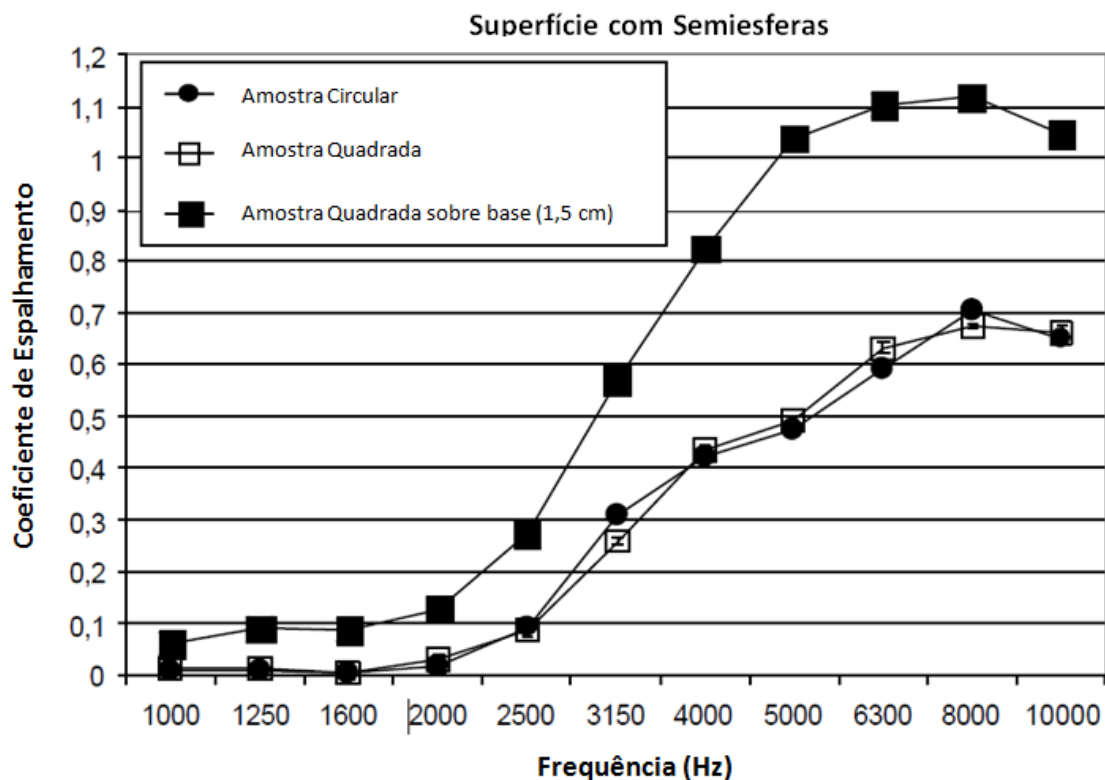


Fig. 4.22 – Coeficientes de Espalhamento para uma amostra circular, uma amostra quadrada e uma amostra quadrada sobre uma base com 1,5 cm de altura. ^[30]

A análise da figura 4.22 permite constatar que entre as amostras circular e quadrada planas não existem diferenças significativas nos coeficientes de espalhamento obtidos. Pelo contrário, entre as duas amostras referidas e a amostra quadrada apoiada sobre uma base quadrangular com 1,5 cm de altura, existem grandes diferenças. Tal como referido anteriormente, a existência de bordos nas amostras potencia o aumento irrealista dos coeficientes de espalhamento, e tal pode ser constatado na figura 4.22 onde, por exemplo, na frequência dos 8.000 Hz para a amostra circular e quadrada o coeficiente de espalhamento tem um valor na ordem dos 0.7, enquanto para a amostra quadrada sobre a base tem um coeficiente superior à unidade, o que é impossível do ponto de vista físico.

Para facilitar a perceção e organização dos futuros ensaios para a obtenção dos coeficientes de difusão e espalhamento foi elaborado um tutorial explicativo das diferentes fases de cada um destes ensaios (consultar Anexo A2).

Na realização deste tutorial o autor pretendeu organizar de forma mais simples, prática e estruturada as principais fases e aspetos a ter em conta nos procedimentos laboratoriais destes ensaios, oferecendo as informações essenciais a quem pretende realizá-los e apresentando uma leitura mais fácil e intuitiva quando comparado com as normas.

5

MONTAGEM LABORATORIAL E DISCUSSÃO DA PROBLEMÁTICA ASSOCIADA

5.1. COEFICIENTE DE DIFUSÃO

5.1.1. CARACTERIZAÇÃO DO ESPAÇO E MATERIAL

A preparação deste ensaio decorreu numa das câmaras reverberantes da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. As dimensões da câmara poderão ser consultadas em anexo (Anexo A3).

Na câmara foram colocados os seguintes instrumentos:

- Amostra de Teste;
- 4 Microfones;
- 1 Fonte Sonora Semi-Omnidirecional;
- *Software* de Cálculo – Pulse e MatLab.

A Amostra de Teste utilizada nesta montagem é o modelo Multifuser DC2 da Vicoustic. Cada painel tem a forma quadrangular e uma aresta igual a 60 cm. Tendo em atenção que cada painel corresponde apenas a um período, e para assegurar o cumprimento do número mínimo de períodos a que se refere a norma AES-4id 2001, são para este ensaio utilizados quatro painéis. A figura 5.1 ilustra uma imagem do painel Multifuser DC2.

Os microfones utilizados (Figura 5.2) são da marca Bruel & Kjaer, de $\frac{1}{4}$ de polegada, modelo 4190.

As fontes sonoras utilizadas (Figura 5.3) são semi-omnidirecionais e da marca JBL, modelo EON15 G2.

O equipamento disponível para a receção e tratamento de dados é o Pulse da Bruel & Kjaer, versão 10.15 (Figura 5.4). Este programa tem como base a análise de ruídos e vibrações fornecendo os dados e respostas sonoras em tempo real para posterior tratamento. É comum recorrer-se a outros programas de cálculo, especialmente o MatLab, para uma análise e tratamento de dados mais completa.

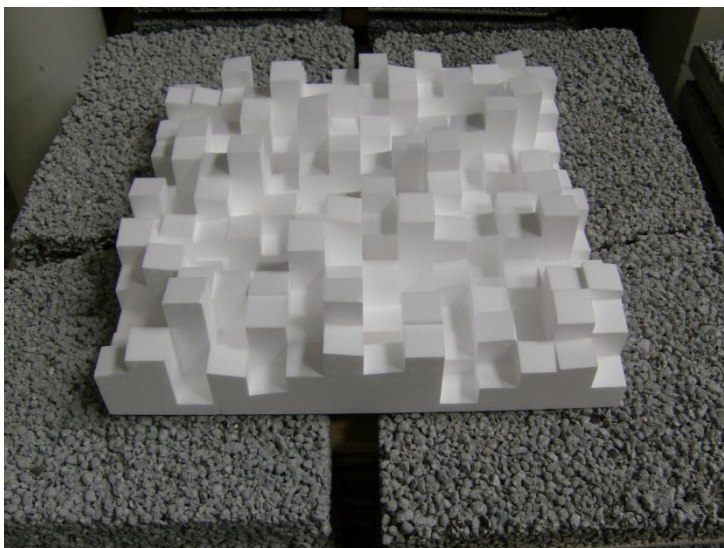


Fig. 5.1 – Painel Difusor Multifuser DC2 da Vicoustic.

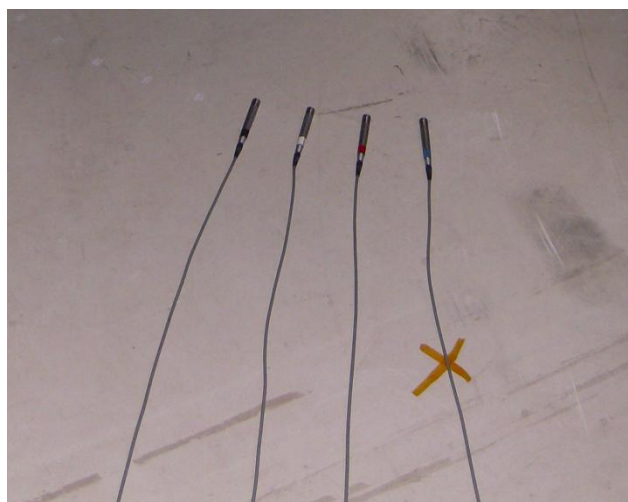


Fig. 5.2 – Microfones.



Fig. 5.3 – Fontes Sonoras.

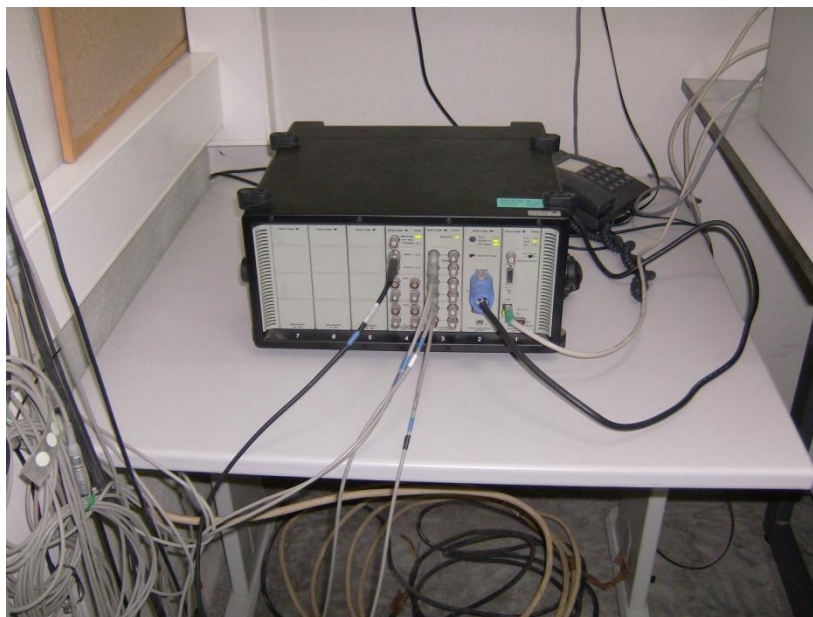


Fig. 5.4 – Pulse da Brüel & Kjær.

5.1.2. PROCEDIMENTO DE MONTAGEM E MEDIÇÃO

Seguindo as exigências referidas na norma AES-4id-2001, os microfones encontram-se distanciados de 1 m da amostra, enquanto as fontes sonoras estão a 2 m dos microfones. Os microfones estão colocados de 5° em 5°, num total de 37 posições, o que perfaz um semicírculo de 180°. As fontes, colocadas a 2 m de distância, encontram-se posicionadas, uma de cada vez, nos ângulos -90°, -55°, 55° e 90°. Como são quatro as amostras a ensaiar optou-se pela colocação de duas no chão e duas por cima dessas, tal como ilustra a figura 5.5.

O esquema de montagem referido pode ser consultado na figura 5.6.

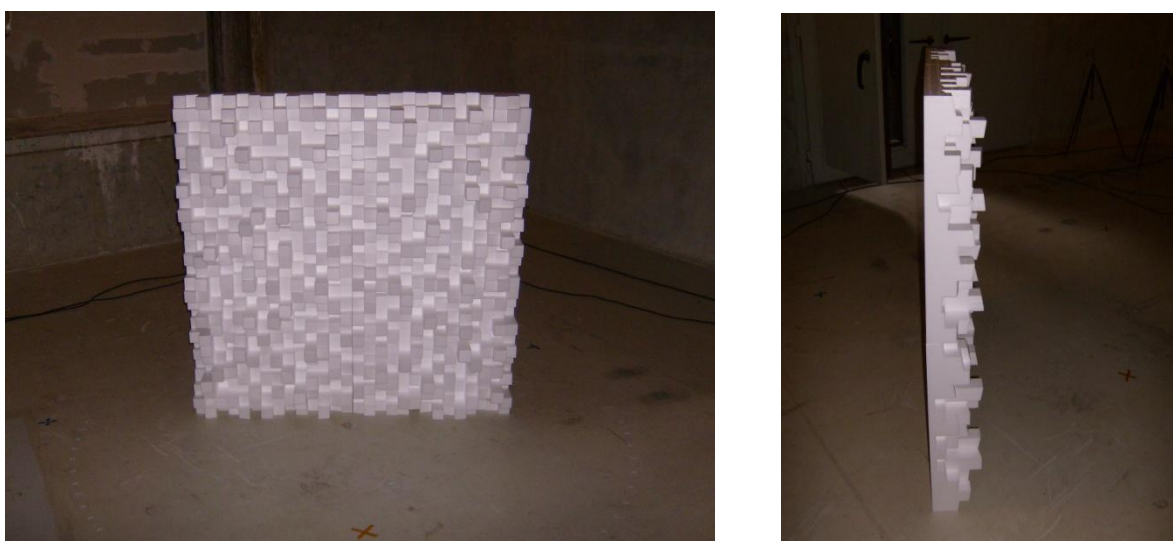


Fig. 5.5 – Colocação dos Painéis Difusores.

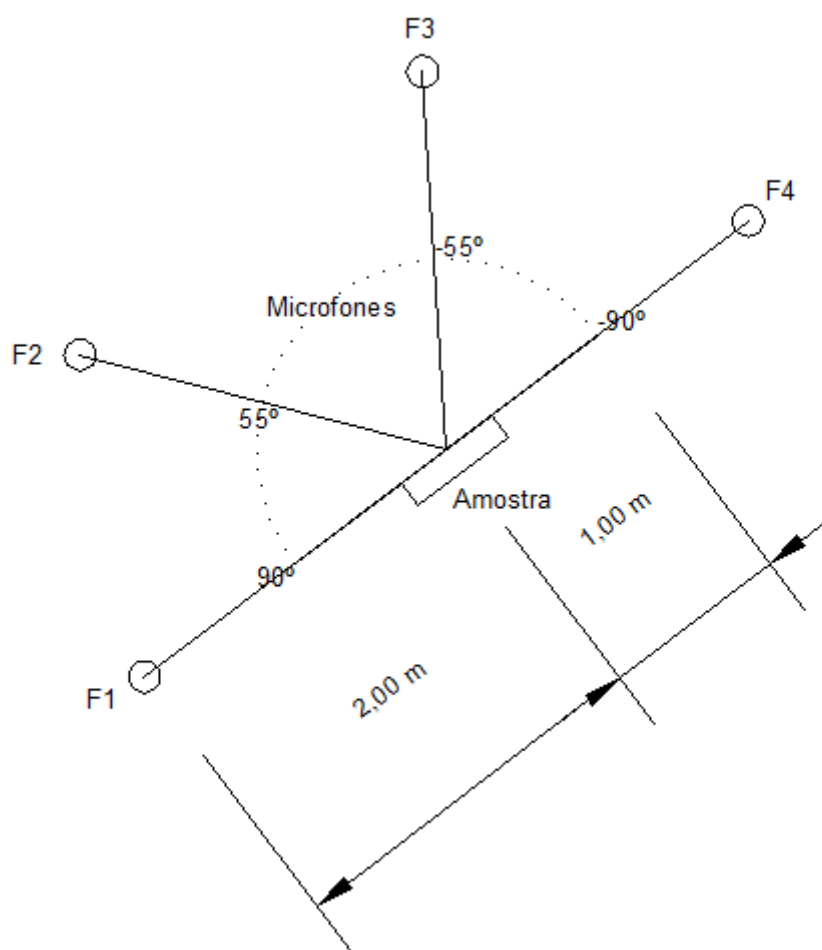


Fig. 5.6 – Esquema de montagem do ensaio para determinação do coeficiente de difusão.

A fonte sonora emite um sinal pseudo-aleatório, associado a um ruído branco, durante um curto espaço de tempo de tal forma a que possa imitar um ruído impulsivo, que contém todas as bandas de frequências que interessa analisar. A intensidade da fonte sonora é de aproximadamente 100 dB. Como estão disponíveis 4 microfones eles serão colocados inicialmente nas posições de 0°, 5°, 10° e 15°, junto ao chão. A fonte sonora é colocada inicialmente a 90°. Emite-se o ruído e registam-se as respostas impulsivas obtidas para cada microfone, tentando-se isolar numa janela temporal específica as reflexões provenientes do painel. Essas respostas serão posteriormente analisadas tendo em vista a obtenção dos valores das intensidades sonoras L_i . Depois de registados estes valores colocam-se os microfones nas posições seguintes: 20°, 25°, 30° e 35° e repete-se o processo de emissão e receção de sinal. Esta metodologia prossegue até que se meçam todas as respostas impulsivas nas 37 posições de microfone. Em seguida coloca-se a fonte nas restantes posições (55°, -55° e -90°) e para cada uma delas repete-se o processo mencionado.

A seguir apresentam-se várias figuras que evidenciam o processo de medição.

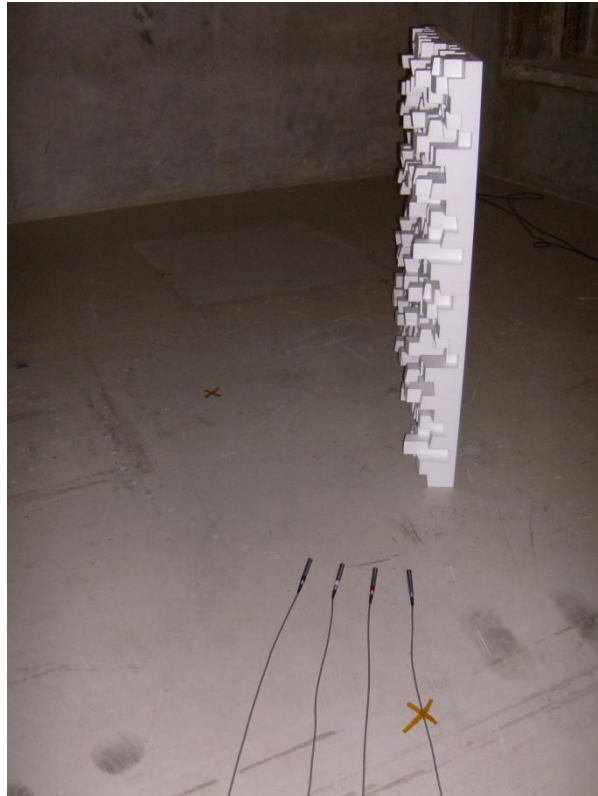


Fig. 5.7 – Ensaio para determinação do coeficiente de difusão: colocação dos microfones nos ângulos 0° , 5° , 10° e 15° .



Fig. 5.8 – Ensaio para determinação do coeficiente de difusão: colocação dos microfones nos ângulos 0° , 5° , 10° e 15° e fonte a 55° .

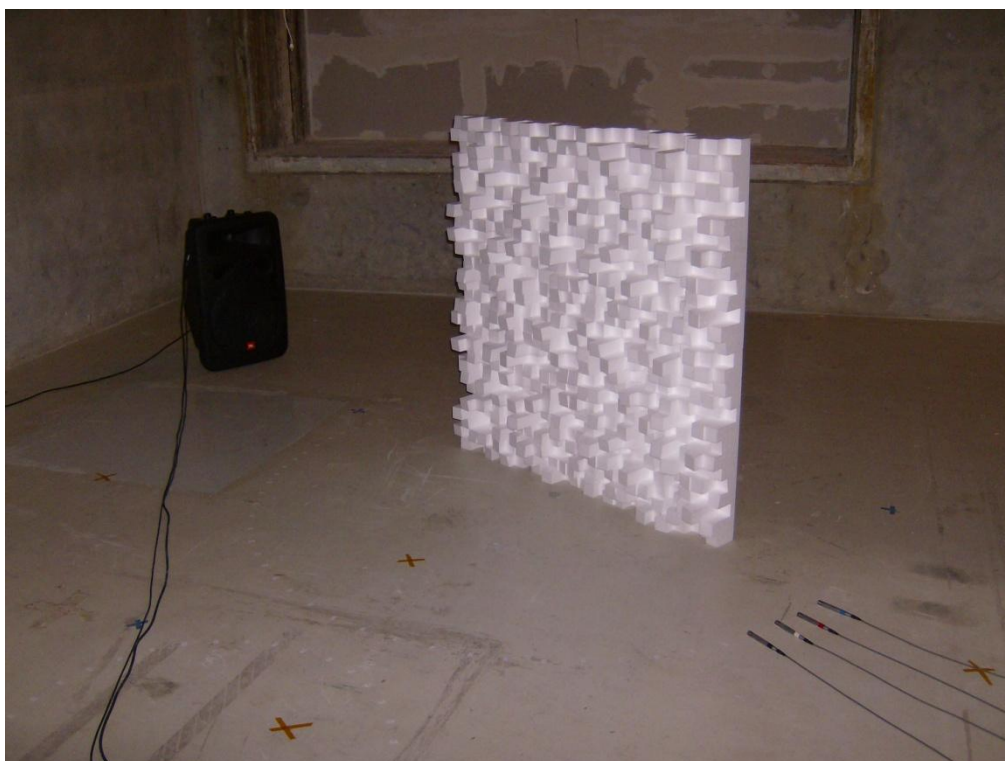


Fig. 5.9 – Ensaio para determinação do coeficiente de difusão: colocação dos microfones nos ângulos 0° , 5° , 10° e 15° e fonte a -90° .

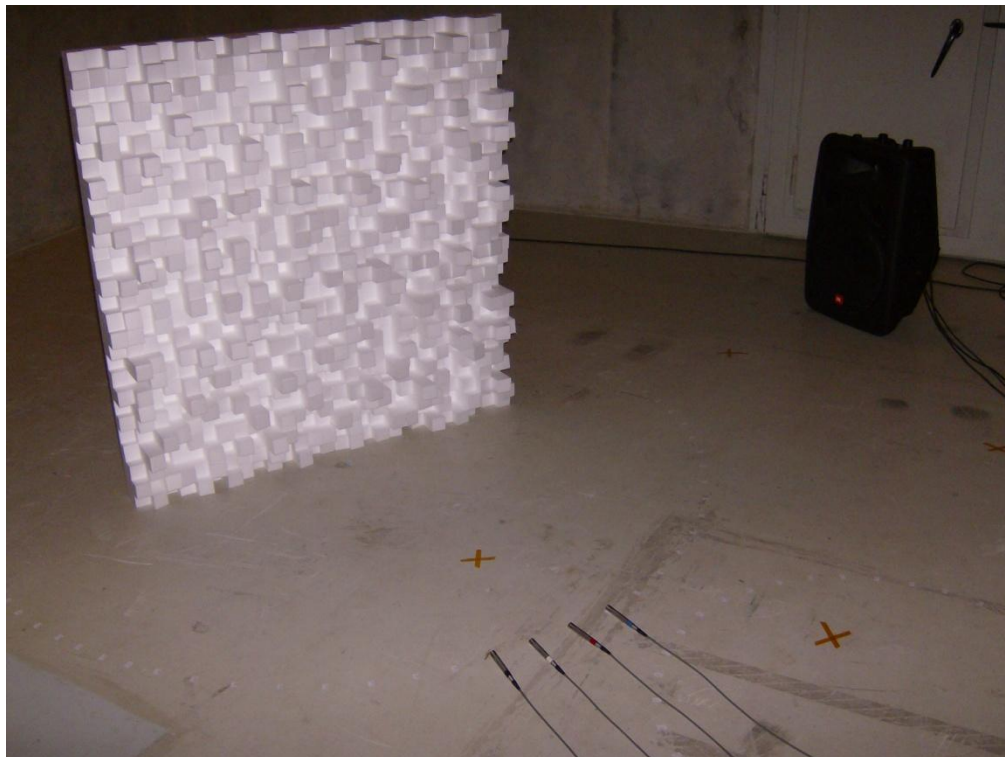


Fig. 5.10 – Ensaio para determinação do coeficiente de difusão: colocação dos microfones nos ângulos 75° , 80° , 85° e 90° e fonte a 90° .

Em seguida procede-se a execução do ensaio, tal e qual como anteriormente referido, mas agora colocando uma amostra plana de referência com as mesmas dimensões da amostra de teste utilizada. Isto permitirá obter os coeficientes de difusão para esta amostra (coeficientes de difusão de referência), para que se possa proceder ao cálculo dos coeficientes de difusão normalizados através das expressões de cálculo definidas no capítulo 4.

Para a determinação do coeficiente de difusão, quer para a amostra de teste quer para a amostra plana de referência, foi elaborada uma folha de cálculo que pode ser consultada no Anexo A4 (Cálculo do Coeficiente de Difusão).

5.1.3. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

O coeficiente de difusão deverá ser apresentado para cada banda de terço de oitava numa tabela devidamente organizada. Os valores dos coeficientes deverão ser arredondados a duas casas decimais. Na representação gráfica os diversos pontos de medição deverão estar unidos por segmentos de linha retos. Na abcissa deverão aparecer as frequências, em bandas de terço de oitava e em escala logarítmica, enquanto nas ordenadas os respetivos valores dos coeficientes de difusão, entre 0 e 1 (escala linear). As frequências utilizadas deverão estar na proporção usada em termos de escala para a amostra em estudo (f/N). A razão entre a distância de ordenadas 0-1, para a distância de abcissas de cinco oitavas, deve ser de dois terços.

Deverão também aparecer, apenas como informação adicional, os valores dos coeficientes de difusão para as superfícies planas de referência.

O relatório de ensaio deverá incluir as seguintes informações:

- a) – Conformidade com a norma AES-4id;
- b) – Nome e Morada do Laboratório de Ensaios;
- c) – Nome do Produtor e Informações sobre os produtos;
- d) – Nome e Morada da Organização ou pessoa que requereu os ensaios;
- e) – Data do Teste;
- f) – Descrição da Amostra de Teste com cortes esquemáticos;
- g) – Escala da Amostra de teste relativamente ao tamanho real;
- h) – Coordenadas da fonte e recetores;
- i) – Método de Medição (Plano Simples, Planos Múltiplos, Hemisférico);
- j) – Para operações de medição em planos simples ou múltiplos indicar planos utilizados;
- k) – Detalhar a técnica de medição ou previsão utilizada para a obtenção das respostas polares;
- l) – Se aplicável, elaborar uma tabela ou formulação mostrando as correções das distâncias usadas para cada recetor (verificação da janela temporal – 1.5.3);

- m) – Uma tabela e gráfico dos coeficientes de difusão obtidos versus bandas de frequência em terços de oitava.

5.1.4. VERIFICAÇÕES REGULAMENTARES

Existem diversas exigências regulamentares, definidas essencialmente na AES-4id-2001, e que já foram abordadas no capítulo 4, que têm de ser cumpridas e verificadas para que os ensaios possam ser validados e registados conforme a norma.

Apresenta-se em seguida todas as verificações necessárias:

- **Câmara Reverberante:** grande o suficiente para permitir isolar as reflexões provenientes da amostra em estudo; com superfície de apoio (chão) com um coeficiente de reflexão da pressão sonora superior a 0.99; deverá ser suficientemente larga para garantir que os efeitos de reflexão dos bordos estão, pelo menos, 40 dB abaixo do sinal detetado na janela de interesse; equipamentos de medição não estejam a uma distância superior a um quarto do comprimento de onda da amostra de teste.

Verificado!

- **Número Mínimo de Períodos:** $N \geq 4$ (=) $N = 4$

Verificado!

- **Fonte Sonora:** semi-omnidirecional com variações aceitáveis de ± 2 dB em magnitude e $\pm 20^\circ$ em fase em relação a uma superfície de referência plana.

Verificado!

- **Microfones:** devem ter todos a mesma sensibilidade independentemente da direccionalidade sonora com variações aceitáveis de ± 1 dB em magnitude e $\pm 20^\circ$ em fase.

Verificado!

- **Rácio sinal-para-ruído (S/N):** seja, em relação a uma superfície de referência plana, pelo menos de 40 dB (ruído de fundo sem microfone).

Verificado!

5.1.5. PREVISÃO DE RESULTADOS

Já vários autores tiveram a oportunidade de ensaiar produtos à difusão sonora, sendo o coeficiente de difusão um dos parâmetros mais interessantes tendo em vista esta análise. Neste subcapítulo serão analisados alguns destes resultados.

A figura 5.11 ilustra os resultados obtidos para os coeficientes de difusão de uma amostra composta por 3 semicilindros e as respostas polares para algumas frequências específicas.

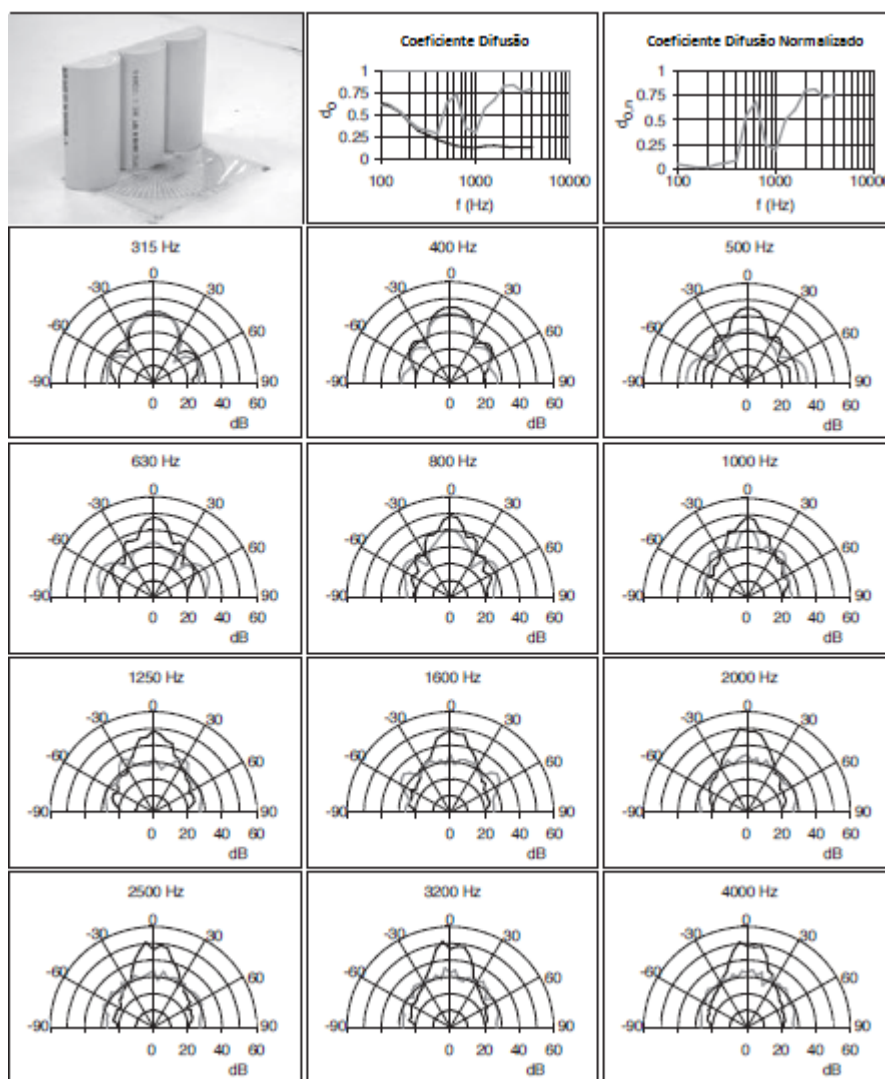


Fig. 5.11 – Resultados para os coeficientes de difusão, coeficientes de difusão normalizados com uma superfície plana de referência e respostas polares para algumas frequências específicas de uma amostra composta por 3 semicilindros, para incidência normal. Nas respostas polares a linha mais clara é referente ao difusor e a mais escura à amostra de referência. ^[1]

Na figura 5.11 é possível ver na primeira linha uma imagem da amostra em estudo; ao meio o gráfico com os resultados para os coeficientes de difusão da amostra semicilíndrica (linha mais clara) e os coeficientes de difusão de uma amostra plana de referência; no fim o coeficiente de difusão normalizado em relação aos resultados da amostra de referência.

A tendência de eficácia deste painel não é muito regular. Apresenta uma boa capacidade difusora entre os 500 Hz e 700 Hz, bem como entre os 2.000 Hz e 4.000 Hz. Para as restantes frequências os valores dos coeficientes de difusão decrescem bruscamente.

Nas restantes imagens é possível ver as repostas polares para o difusor (linha mais clara) e para a amostra de referência (linha mais escura) para determinadas frequências. Como o painel de referência

plano recebe as ondas sonoras através de incidência normal seria expectável obter os resultados apresentados na figura 5.11, em que a intensidade sonora em dB é mais evidente para o ângulo de 0°, ou seja, o ângulo de reflexão direta. A amostra difusora permite uma difusão espacial muito mais uniforme, dispersando pelos vários ângulos, e de forma muito semelhante, a energia sonora.

A periodicidade, como já referido anteriormente, apresenta grande importância na correta quantificação da capacidade difusora de um produto. Na figura 5.12 é possível ver a variação que ocorre no coeficiente de difusão para o número de semicilindros que compõem a amostra. Se um semicilindro apresenta, de forma enganadora, coeficientes de difusão bastante elevados, um maior número de semicilindros aproxima os resultados da real capacidade difusora da amostra, já que os resultados vão convergindo cada vez mais para os mesmos valores.

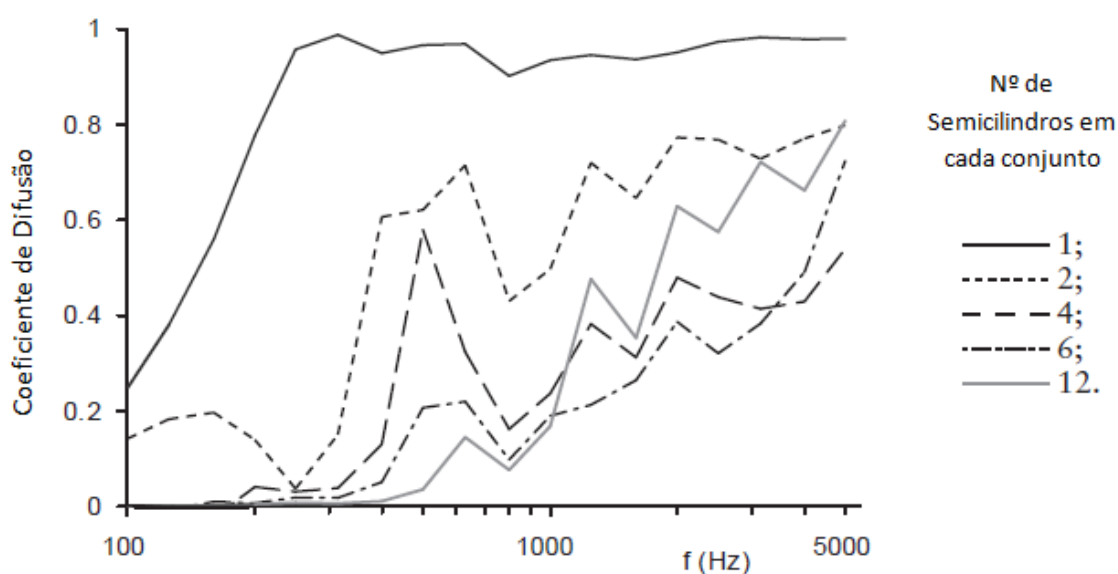


Fig. 5.12 – Resultados dos coeficientes de difusão para amostras compostas por diferente número de semicilindros.^[1]

Muitos outros resultados para outro tipo de painéis difusores foram já determinados. A figura 5.13 ilustra os resultados obtidos para os coeficientes de difusão de 4 amostras: um difusor QRD bidimensional (semelhante ao Multifuser DC2 da Vicoustic), um difusor cilíndrico, uma superfície plana e um difusor com réguas salientes (com alguma semelhança em relação ao Pulser Fuser DA da Vicoustic).

Aconselha-se igualmente a consulta do Anexo C da obra “*Acoustic Absorbers and Diffuser - Theory, Design and Application*” de Trevor Cox e Peter D’António, onde figuram resultados para os coeficientes de difusão em função da frequência para diversos tipos de amostras.^[1]

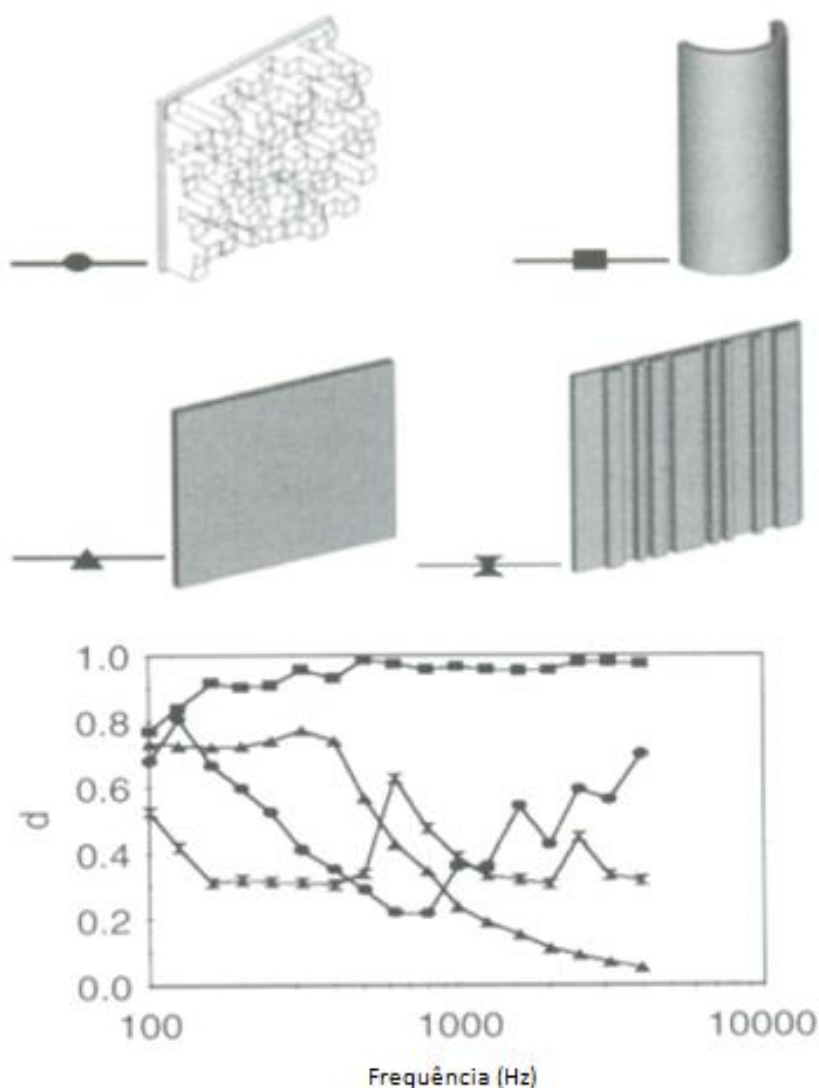


Fig. 5.13 – Resultados dos coeficientes de difusão para diferentes tipos de amostras. ^[31]

Face aos resultados obtidos na figura 5.13 alguns comentários podem ser tecidos. Em primeiro lugar, e como já anteriormente referido, os resultados obtidos para a amostra composta por apenas um semicírculo são bastante diferentes do que aqueles obtidos com um conjunto de semicilindros. A superfície plana apresenta boa difusão sonora para as baixas frequências, enquanto sofre um decréscimo muito acentuado para as médias e altas frequências. O difusor QRD bidimensional apresenta um excelente comportamento nas baixas e altas frequências, enquanto o difusor com régua salientes apresenta melhor desempenho nas médias frequências. O campo de atuação nas várias gamas de frequências, tão diferenciado entre os diversos painéis, justifica a combinação dos mesmos para a obtenção de melhores resultados no tratamento acústico de espaços.

5.2. COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO

5.2.1. CARACTERIZAÇÃO DO ESPAÇO E MATERIAL

A preparação desta montagem decorreu numa das câmaras reverberantes da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. As dimensões da câmara poderão ser consultadas em anexo (Anexo A3).

Na câmara foram colocados os seguintes instrumentos:

- Mesa Rotativa e Mesa para colocação dos painéis;
- Amostra de Teste;
- 4 Microfones, cada um apoiado sobre um tripé;
- 2 Fontes Sonoras Semi-Omnidirecionais;
- Equipamento de medição da temperatura e humidade;
- *Software* de Cálculo – Pulse e MatLab.

A mesa rotativa utilizada (figura 5.14) é feita em madeira sendo capaz de rodar manualmente sobre o seu eixo. Apresenta um diâmetro igual a 35,5 cm. Na figura apresentada a mesa encontra-se posicionada no chão da câmara reverberante com marcação, através de etiquetas autocolantes, dos ângulos de rotação (de 10° em 10°). A norma ISO 17497-1 sugere que as rotações sejam feitas de 5° em 5°, o que também é facilmente executável com a marcação referida.



Fig. 5.14 – Mesa Rotativa e marcação dos ângulos de rotação de 10° em 10°.

A mesa de suporte (Figura 5.15), produzida pela empresa de mobiliário António Alves S.A., apresenta uma reentrância com a mesma área dos painéis a ensaiar, onde os mesmos ficarão encastrados. Esta mesa é igualmente em madeira, sendo que as suas dimensões podem ser consultadas no Anexo A2, onde se encontram a planta e corte da mesma.



Fig. 5.15 – Mesa de Suporte.

A amostra de teste utilizada é composta por 25 painéis Multifuser Wood 64 à escala 1:5. Cada um destes painéis apresenta 12,5 cm x 12,5 cm, sendo que no total tem-se uma amostra com uma aresta de 63 cm. A figura 5.16 ilustra a amostra composta pelos 25 painéis referidos.



Fig. 5.16 – Amostra à escala 1:5 composta por 25 painéis Multifuser Wood 64.

Os microfones utilizados (Figura 5.17) são da marca Bruel & Kjaer, de ¼ de polegada, modelo 4190.



Fig. 5.17 – Microfones apoiados sobre Tripés.

As fontes sonoras utilizadas (Figura 5.18) são semi-omnidirecionais e da marca JBL, modelo EON15 G2.



Fig. 5.18 – Fontes Sonoras.

Para medição das temperaturas e humidades relativas foi utilizado um equipamento da marca Testo que pode ser visto na figura 5.19.



Fig. 5.19 – Equipamento de medição da temperatura e humidade relativa.

O equipamento disponível para a receção e tratamento de dados é o Pulse da Bruel & Kjaer (Figura 5.20). Este programa tem como base a análise de ruídos e vibrações fornecendo os dados e respostas sonoras em tempo real para posterior tratamento. É comum recorrer-se a outros programas de cálculo, especialmente o MatLab, para uma análise e tratamento de dados mais completa.

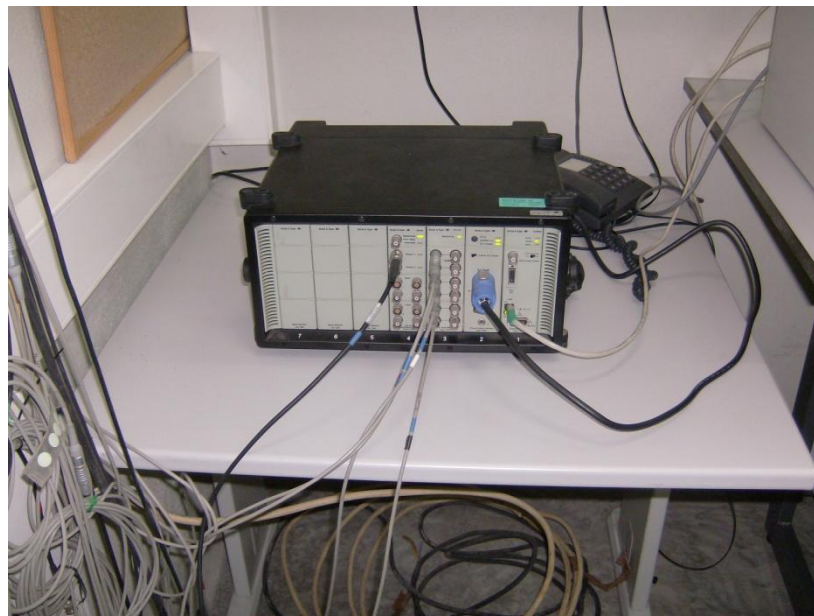


Fig. 5.20 – Pulse da Bruel & Kjaer.

5.2.2. PROCEDIMENTO DE MONTAGEM E MEDIÇÃO

Seguindo as exigências referidas na ISO 17497-1, que remete para a ISO 354, devem ser efetuados registos para diferentes posições dos microfones (pelo menos 3 – nesta montagem foram utilizados 4), que devem estar afastados entre si de pelo menos 1,5 m, colocados a 2 m da fonte sonora e pelo menos a 1 m de distância da amostra e das paredes da câmara. Quanto à fonte sonora esta deverá ser colocada em pelo menos duas posições diferentes, com distanciamentos entre si de pelo menos 3 m. Tendo em conta que está a ser utilizada uma amostra à escala 1:5 então todas estas distâncias terão de ser divididas pelo fator de escala $N = 5$. Dessa forma temos que a distância entre os microfones (M1, M2, M3 e M4) deve ser no mínimo de 0,30 m, a distância entre microfones e fonte sonora (1F e 2F) deve ser 0,40 m e ainda que a distância entre os microfones e, a amostra e paredes da câmara, seja de pelo menos 0,20 m.

Os microfones estão colocados a 0° , 90° , 180° e 270° , apoiados sobre os respetivos tripés, com uma inclinação de 45° em relação à horizontal. As fontes encontram-se aproximadamente a 225° e 315° respetivamente. As diversas posições referidas podem ser consultadas na figura 5.21.

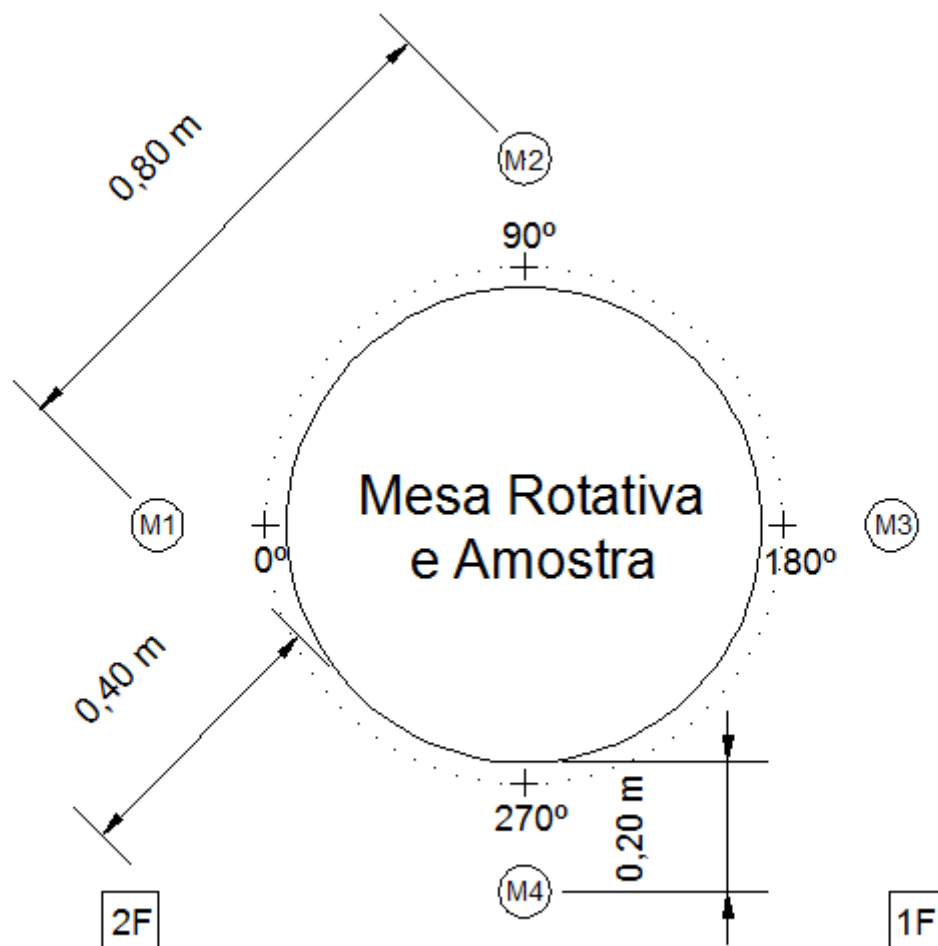


Fig. 5.21 – Esquema de Montagem do Ensaio de Espalhamento.

A fonte sonora emite um sinal pseudo-aleatório, associado a um ruído branco, durante um curto espaço de tempo de tal forma a que possa imitar um ruído impulsivo, que contém todas as bandas de frequências que interessa analisar. A intensidade da fonte sonora é de aproximadamente 100 dB. Como neste caso estamos perante o estudo de uma amostra à escala 1:5, então as frequências de interesse estarão localizadas entre 500 Hz e 25.000 Hz (à escala real as frequências de interesse estariam entre 100 Hz e 5.000 Hz, o que corresponde a dividir os valores para o estudo da amostra à escala pelo fator de escala $N=5$). Por dificuldades de receção e recolha dos valores entre 20.000 Hz e 25.000 Hz, e porque a sensibilidade dos microfones para essas gamas de frequências apresenta desvios consideráveis (na ordem dos 3,5/4,0 dB), a recolha de sinal deveria ser feita entre 100 Hz e 20.000 Hz. Ainda neste âmbito importa referir a dificuldade que poderá vir a ser sentida para a obtenção das frequências neste espectro tão alargado, podendo ser necessário gerir e equalizar as frequências de receção nas fontes sonoras para permitir obter resultados em todo o espectro pretendido.

Importa também mencionar o especial cuidado que deverá existir na colocação da amostra em cima da mesa rotativa de tal forma a que os seus eixos de rotação coincidam. Divergências neste aspeto poderão provocar erros na quantificação dos coeficientes de espalhamento.

Estando preparados e colocados todos os elementos, bem como calibrados os diversos instrumentos, poderá então proceder-se à medição dos diversos tempos de reverberação.

Para a primeira vaga de ensaios considera-se colocada a fonte F1e os 4 microfones. Numa segunda fase move-se a fonte sonora da posição F1 para F2. A ISO 354 permite que sejam utilizadas duas fontes sonoras em simultâneo desde que a diferença na potência radiada seja menor ou igual a 3 dB em cada banda de terço de oitava. Isto permite que o processo de medição seja mais expedito, não sendo necessário obter tantas curvas de decaimento (seis em vez de doze).

A primeira medição é feita para determinar o tempo de reverberação T1 que corresponde à mesa sem amostra e sem rotação. Neste sentido, temos apenas uma resposta impulsiva, que integrada convenientemente, nos permite obter T1. A figura 5.22 ilustra esta situação.



Fig. 5.22 – Medição de T1.

Em seguida coloca-se a amostra em cima da mesa rotativa, e, novamente, sem qualquer tipo de rotação faz-se a medição da reposta impulsiva detetada pelos 4 microfones e a respetiva integração para obter o tempo de reverberação T2. A figura 5.23 ilustra a montagem referida.



Fig. 5.23 – Medição de T2.

A medição dos tempos de reverberação T3 (sem amostra) e T4 (com amostra) implica a rotação da mesa rotativa. A norma sugere rotações de 5° o que equivale a 72 medições associada a uma rotação completa da mesa (figura 5.24 e 5.25).

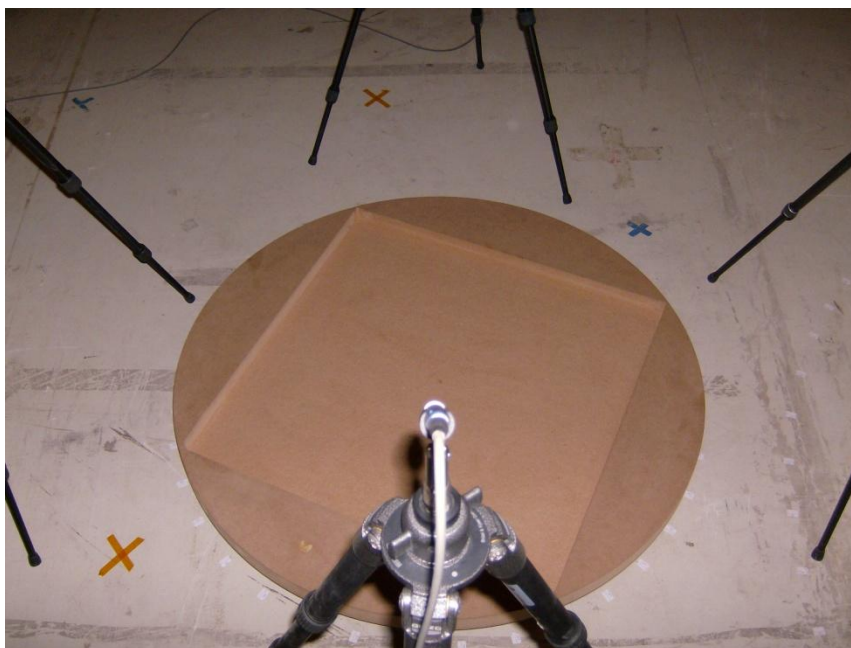


Fig. 5.24 – Medição de T3



Fig. 5.25 – Medição de T4

A cada rotação é medida uma resposta impulsiva e o processo de medição consiste basicamente em entrar na câmara, rodar a mesa 5°, sair da câmara e efetuar a medição. Este processo repete-se até efetuadas todas as medições, num total de 72 rotações. Por motivos de movimentação de ar, que podem ter algum impacto na determinação do coeficiente de espalhamento, é aconselhado, após fechar a porta da câmara reverberante, aguardar $15/N$ minutos antes de efetuar o ensaio seguinte. Sendo o fator de escala em utilização igual a 5, deverá esperar-se 3 minutos antes de prosseguir com o processo de medição.

Importa referir a morosidade associada a esta opção de rotação manual da mesa de 5° em 5°. A norma ISO 17497-1 sugere que seja adotada preferencialmente uma rotação mecânica, que torna todo este processo muito mais expedito, tal como referido anteriormente no capítulo 4. Por isso, e caso haja condições para tal, sugere-se a utilização de rotação mecânica.

Variações de temperatura e humidade podem ter grande influência nos resultados finais dos coeficientes de espalhamento, principalmente para as altas frequências, pelo que esses valores devem ser medidos a cada 4 ensaios utilizando o aparelho já mencionado.

Terminados os ensaios os dados serão tratados e os coeficientes de espalhamento poderão ser calculados com base nas expressões de cálculo definidas no capítulo 4.

Para a determinação dos diferentes resultados foram elaboradas folhas de cálculo que podem ser consultadas em anexo. A seguir apresentam-se os nomes das folhas de cálculo e a respetiva localização em anexos:

- Registo das Temperatura e Humidade Relativa (Anexo A5.1);
- Determinação de T1 (Anexo A5.2);
- Determinação de T2 (Anexo A5.3);

- Determinação de T3 (Anexo A5.4);
- Determinação de T4 (Anexo A5.5);
- Cálculo do Coeficiente de Espalhamento (Anexo A5.6).

5.2.3. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Os principais resultados finais devem ser apresentados em forma de gráficos ou tabelas os valores, para cada frequência em bandas de terço de oitava, dos coeficientes de absorção (α_s) e espalhamento (s).

Nas tabelas os resultados devem ser arredondados com a precisão de 0,01. Valores inferiores a 0 devem ser truncados e os valores superiores a 1, que podem ocorrer, devem ser convenientemente referidos.

Na representação gráfica os diversos pontos de medição deverão estar unidos por segmentos de linha retos. Na abcissa deverão aparecer as frequências, em bandas de terço de oitava e em escala logarítmica, enquanto nas ordenadas os respetivos valores do coeficiente em estudo, em escala linear. Os dois resultados devem figurar num mesmo gráfico para maior facilidade de análise e interpretação. As frequências relevantes para cada ensaio estão dependentes da escala utilizada para a amostra (f/N). A razão entre a distância de ordenadas 0-1, para a distância de abcissas de cinco oitavas, deve ser de dois terços.

O relatório de ensaio deverá incluir as seguintes informações:

- a) – Conformidade com a norma ISO 17497-1;
- b) – Nome da Organização que realizou o ensaio;
- c) – Data do Teste;
- d) – Descrição da Amostra de Teste: área da superfície, profundidade estrutural, montagem na mesa rotativa (apresentação preferencial de desenhos esquemáticos);
- e) – A forma da Câmara Reverberante, o seu tratamento à difusão, e o número e posições dos microfones e fonte sonora;
- f) – Dimensões, volume e área total das superfícies da Câmara Reverberante;
- g) – Registo da Humidade e Temperatura ambiente a cada quatro medições;
- h) – A apresentação dos resultados de acordo com o anteriormente referido;
- i) – Estimativa da precisão da medição;

5.2.4. VERIFICAÇÕES REGULAMENTARES

Existem diversas exigências regulamentares, definidas essencialmente na ISO 17497-1, e que já foram abordadas no capítulo 4, que têm de ser cumpridas e verificadas para que os ensaios possam ser validados e registados conforme a norma.

Apresenta-se em seguida todas as verificações necessárias:

- **Volume da Câmara Reverberante:** $V \geq 200 \times N^{-3} (=) 260 \geq 200 \times 5^{-3} (=) 260 \geq 2,08 (m^3)$

Verificado!

- **Forma da Câmara Reverberante:** $l_{max} < 1,9 \times V^{1/3} (=) 9,34 < 1,9 \times 260^{1/3} (=) 9,34 < 12,13 (m)$

Verificado!

- **Área de Absorção Equivalente da Sala Vazia (valor médio):** $A_1 \leq 0,30 \times V^{2/3} (=) 0,9 \leq 0,30 \times 260^{2/3} (=) 0,9 \leq 12,22$

Verificado!

- **Distância da Mesa Rotativa às Paredes da Câmara:** $l > N^{-1} \times 1,0 (=) l > 5^{-1} \times 1,0 (=) l > 0,2 (m)$

Verificado!

- **Aresta da Amostra de Ensaio (Amostra Quadrada):** $a > N^{-1} \times 2,65 (=) 0,63 > 5^{-1} \times 2,65 (=) 0,63 > 0,53 (m)$

Verificado!

- **Diâmetro da Mesa Rotativa:** $D > N^{-1} \times 3,75 (=) 0,89 > 5^{-1} \times 3,75 (=) 0,89 > 0,75 (m)$

Verificado!

- **Profundidade Estrutural da Amostra:** $h \leq \frac{d}{16} (=) 0,03 \leq \frac{0,89}{16} (=) 0,03 \leq 0,056 (m)$

Verificado!

- **Coeficiente de Absorção da Amostra:** $\alpha_s \leq 0,50$ (O valor máximo do coeficiente de absorção para o Multifuser Wood 64 é ligeiramente superior a 0,4).

Verificado!

5.2.5. PREVISÃO DE RESULTADOS

Já anteriormente outros autores desenvolveram trabalhos semelhantes a este, obtendo resultados para o coeficiente de espalhamento. Neste subcapítulo pretende-se ilustrar alguns exemplos de produtos

ensaiados e os respetivos resultados para dar ideia do tipo de conclusões que este tipo de ensaios pode dar.

Neste âmbito o trabalho realizado por Mommertz (1995) apresenta especial interesse, já que tem servido de base para comparação de muitos outros ensaios realizados por outros autores.

Na figura 5.26 surgem imagens de duas amostras utilizadas por Gomes (2002), e semelhantes às utilizadas em ensaios conduzidos por Mommertz (1995), com o intuito de testar o método e de verificar a convergência de resultados entre os dois autores.



Fig. 5.26 – Amostras utilizadas para determinação do coeficiente de espalhamento. À esquerda amostra com ripas cilíndricas e à direita amostra com semiesferas dispostas aleatoriamente sobre uma placa de suporte.^[30]

No lado esquerdo da figura anterior a amostra é composta por uma base de aresta igual a 60 cm, com uma altura de cerca de 1 cm, e com ripas cilíndricas. Pelo facto de esta amostra ser quadrangular há que ter especial atenção de que os resultados dos coeficientes de espalhamento virão afetados de um erro associado às reflexões nos bordos da amostra. Este fenómeno não era na altura conhecido, pelo que não foi efetuada nenhuma ação tendo em vista a sua correção.

Na figura do lado direito encontra-se uma amostra composta por semiesferas dispostas aleatoriamente sobre uma base circular. Ao contrário da primeira amostra, esta apresenta a geometria indicada tendo em vista a não sobrestimação dos coeficientes de espalhamento, associada às reflexões nos bordos da amostra.

Estes ensaios foram executados utilizando uma fonte sonora piezoelétrica numa banda de frequências de análise entre os 2.000Hz e 32.000 Hz.

Os resultados obtidos pelos dois autores para as duas amostras mencionadas podem ser encontrados nas figuras 5.27 e 5.28.

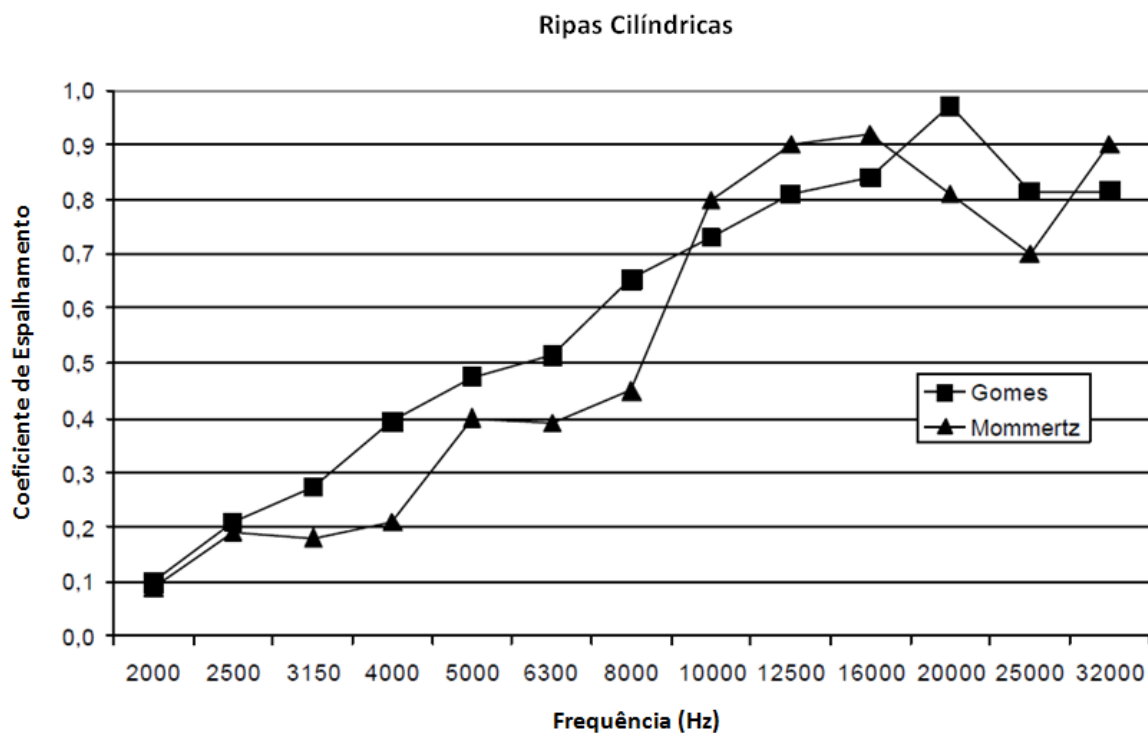


Fig. 5.27 – Coeficientes de Espalhamento obtidos por Gomes e Mommertz para a amostra de ripas cilíndricas. ^[30]

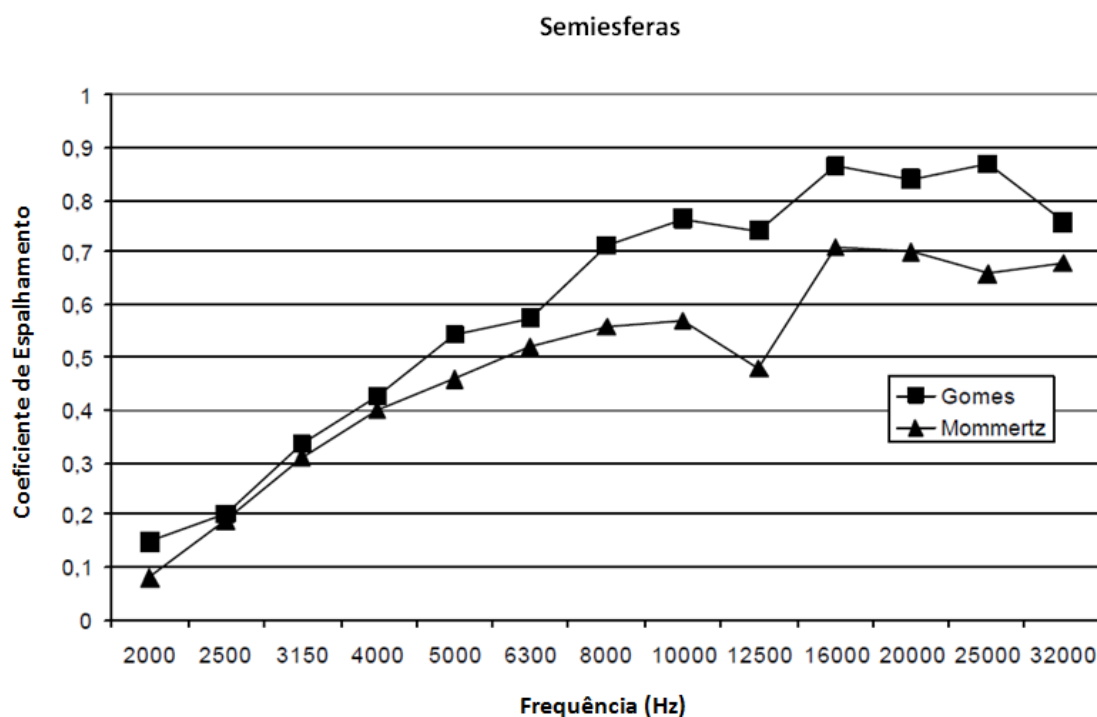


Fig. 5.28 – Coeficientes de Espalhamento obtidos por Gomes e Mommertz para a amostra de semiesferas. ^[30]

A análise das figuras 5.27 e 5.28 permite concluir que há uma evidente tendência para a reprodutibilidade deste ensaio. Para a amostra de ripas cilíndricas, e como já referido anteriormente, é expectável que os resultados apresentem uma sobrestimação dos valores dos coeficientes de espalhamento devido à contabilização das reflexões nos bordos da amostra que se intensificam pelo facto de esta ser quadrangular. Os resultados apresentam no entanto tendências semelhantes, sendo que as diferenças se poderão dever a diversos fatores como a fonte utilizada, a sensibilidade e calibração dos microfones. O procedimento de medição assume-se idêntico.

Para a amostra com semiesferas, nas mais baixas frequências os valores tendem a ser praticamente coincidentes, enquanto para as mais altas frequências se encontra maior divergência. É comum não haver grande confiança nos resultados obtidos acima de 20.000 Hz pelo facto de a estas frequências estarem associados erros com alguma significância.

O estudo do coeficiente de espalhamento de superfícies anisotrópicas pode levar à obtenção de resultados enganadores. Na figura 5.29 encontram-se os resultados obtidos para o coeficiente de espalhamento de dois painéis com características anisotrópicas. O painel da esquerda (FlutterFree[®]) trata-se de um difusor 1D, ou seja, com capacidade para difundir apenas numa direção, no caso, horizontal. O painel da direita (Skyline[®]) é hemisférico e por isso apresenta capacidade para difundir energia sonora em duas dimensões.

O painel difusor 1D apresenta capacidade de difusão numa direção, no entanto na outra, o painel não apresenta essa capacidade. Sendo assim, e para este caso, existe grande preponderância nos resultados em função do posicionamento do painel. Se porventura o coeficiente de espalhamento na direção difusora fosse igual à unidade, então seria expectável um valor nulo, ou próximo disso, na outra direção. Na mesma ordem de ideias seria expectável o painel difusor 2D apresentar um coeficiente de espalhamento a rondar os 0,5, já que é capaz de espalhar energia sonora nas duas direções, no entanto valores de 1 para este coeficiente são atingidos. A explicação para este facto está na alteração significativa que ocorre neste painel de cada vez que se executa uma rotação do mesmo. Sendo a alteração topográfica que ocorre a cada rotação bastante considerável, ao contrário do que acontece com uma amostra plana, este painel é visto como um excelente “espalhador” de energia.

Estabelecendo uma comparação com os produtos da Vicoustic com capacidade para executar difusão, já referidos no capítulo 3, será provável a obtenção de resultados semelhantes com os painéis de geometria semelhante: o painel Pulsar Fuser DA deverá assemelhar-se aos resultados do FlutterFree, enquanto os painéis Multifuser DC2, Multifuser Wood 36 e Multifuser Wood 64 porventura se assemelharão aos resultados do Skyline.

Obviamente diferenças nos resultados ocorrerão, não só pelo facto de a geometria dos painéis ser diferente, mas também pelo tipo de materiais usados que possuem, por exemplo, diferentes características de absorção.

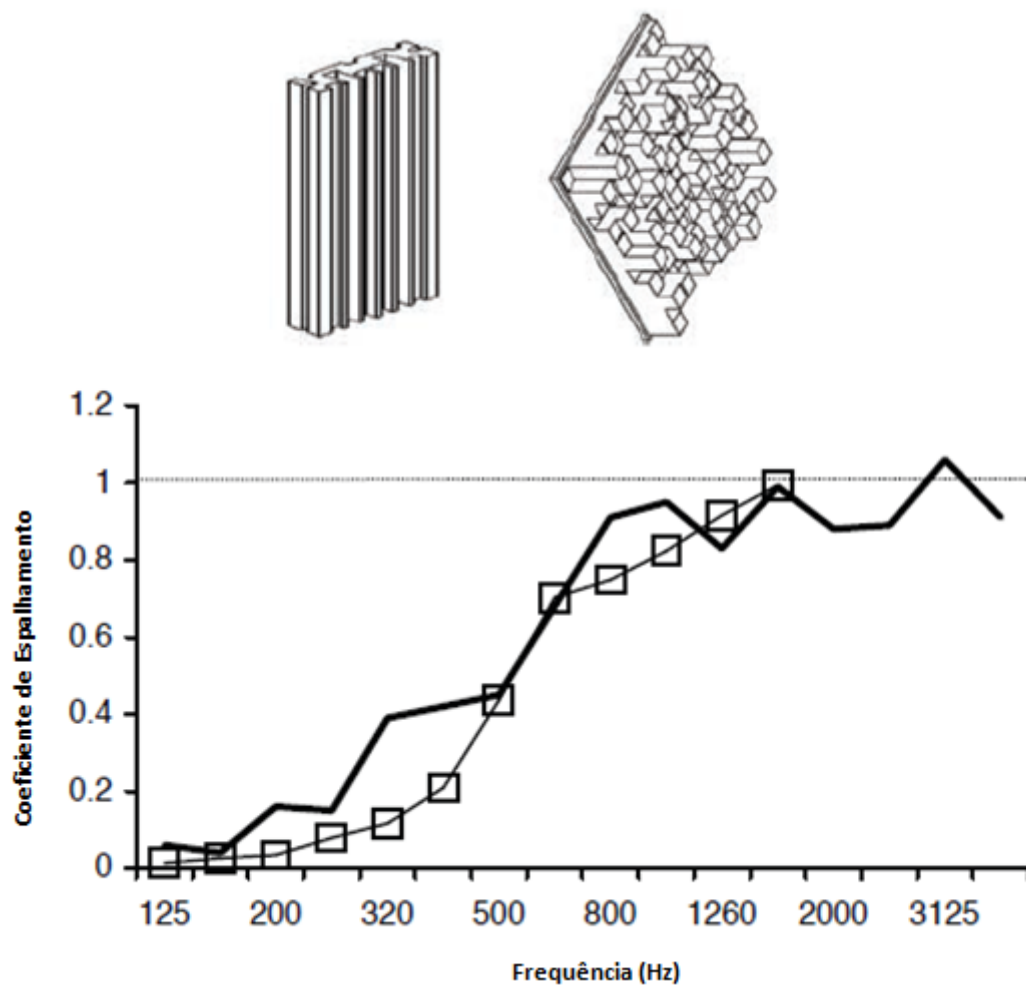


Fig. 5.29 – Coeficientes de Espalhamento para dois painéis difusores: na esquerda um painel difusor 1D (FlutterFree®) e à direita um painel difusor 2D (Skyline®).^[30]

5.3. DISCUSSÃO ASSOCIADA À PROBLEMÁTICA DOS ENSAIOS

Neste subcapítulo pretende-se discutir a metodologia dos ensaios atrás referidos, mencionando, nomeadamente, as dificuldades e complicações que surgiram durante os diversos processos. Não sendo, no entanto, objetivo deste trabalho a realização de ensaios, após a montagem dos mesmos foi feita uma primeira abordagem e estudo dos processos que poderiam conduzir a resultados.

Tanto para os ensaios de difusão como de espalhamento a grande dificuldade esteve na tentativa de recolha e tratamento do sinal. Para ambos os ensaios exigia-se um estímulo sonoro impulsivo. Este sinal de curta duração, seria idealmente um impulso de Dirac, que para além de instantâneo, dispõem de todas as frequências num espectro bastante alargado e que abrangia a zona de interesse para este estudo. No entanto, não sendo possível um impulso deste género, foi adotado um sinal pseudo-aleatório, em que se definiu um tempo de emissão muito curto, na ordem de 1 ms, que emitia igualmente em toda a banda de frequências de interesse, pelo que se assemelhava a um impulso de Dirac.

No que diz respeito ao espectro de frequências, era no ensaio de espalhamento que se tinha maiores exigências. Como já se teve oportunidade de explicar anteriormente, para este ensaio foi usada uma amostra à escala 1:5, pelo que as frequências de análise eram cinco vezes superiores à banda em escala real. Para este caso era necessário analisar um espectro que continha frequências desde os 500 Hz aos 25.000 Hz, enquanto à escala real a gama se estenderia entre os 100 Hz e os 5.000 Hz. Importa salientar que para este ensaio foram usadas amostras à escala, já que amostras à escala real exigiam condições de espaço e a elaboração de elementos auxiliares de grande dimensão, para além de que os ensaios, nestas condições, são claramente mais demorados. Esta análise em frequências bastante elevadas trouxe dificuldades nomeadamente ao nível da receção de sinal. Os microfones disponíveis tinham capacidade para analisar estímulos sonoros, sem erros significativos, até cerca dos 20.000 Hz. A partir daí o erro de leitura face à realidade era bastante significativo (3,5/4 dB) pelo que os valores deixavam de ter validade. Por essa razão a análise espectral teria de ser feita apenas entre os 500 Hz e os 20.000 Hz. Apesar de não ser respeitado o intervalo de frequências que a ISO 17497-1 referia, este aspeto não parece, na opinião do autor, muito grave tendo em conta que a análise efetuada permite obter valores reais entre os 100 Hz e os 4.000 Hz, o que está perfeitamente dentro do intervalo comum de análise e de aplicação do tipo de painéis difusores em estudo.

Outra questão que se prende com as fontes sonoras tem a ver com a capacidade que as mesmas têm de difundir energia sonora em todas as direções. Para ambos os ensaios as normas sugerem fontes omnidirecionais, ou seja, fontes com capacidade de emitir simultaneamente em todas as direções. Para estes ensaios apenas estavam disponíveis fontes semi-omnidirecionais, no entanto, como as mesmas estão dirigidas para as amostras e as distâncias fonte-recetor são reduzidas, esta diferença face à norma não parece muito significativa. Foi também necessário gerir a sensibilidade das fontes sonoras, através dos vários botões equalizadores disponíveis nas mesmas, para que estas pudessem receber toda a gama de frequências mencionadas.

No que diz respeito à receção e tratamento do sinal foi utilizado o programa Pulse da Bruel & Kjaer. Este programa teria supostamente todas as ferramentas necessárias para proceder à análise do sinal e à obtenção dos resultados necessários para a determinação dos coeficientes de difusão e espalhamento. Para o primeiro ensaio seria necessário obter valores de L_i associados ao isolamento do sinal referente às reflexões provenientes do painel difusor. Para o ensaio de espalhamento era necessário obter a resposta impulsiva para, através de processos de integração, obter os diversos tempos de reverberação necessários para este ensaio. A grande dificuldade neste processo esteve no facto de a versão do Pulse

utilizada não ter as ferramentas necessárias para se poder extrair os dados exigidos. A eventual utilização de MatLAB assume também relevância neste tipo de trabalho já que permite efetuar os cálculos mais complexos, como as integrações. O Pulse dispõe de capacidade para extrair os dados para MatLAB, mas o problema principal esteve em conseguir adquirir dados fidedignos das respostas impulsivas que se pretendiam. Desta forma não foi possível obter resultados para os coeficientes de difusão e espalhamento, que apesar de tudo, se tratava de um objetivo secundário deste trabalho, pois o principal era detalhar as metodologias de medição e adquirir o *know-how* para a realização futura destes ensaios e consequente obtenção de resultados.

Para o ensaio de difusão seria ideal a utilização de uma câmara anecóica já que esta permitiria isolar as reflexões vindas do painel muito mais facilmente. O facto de a câmara anecoica possuir paredes e tetos com grande capacidade de absorção permite enfraquecer as reflexões nesses elementos, que não têm interesse neste estudo, assegurando a obtenção de respostas impulsivas mais limpas, onde é possível destacar com maior facilidade as reflexões provenientes do painel.

Como não estava disponível uma câmara anecóica o estudo foi feito em câmara reverberante, situação aliás perfeitamente admissível pela norma AES-4id-2001.

O ensaio de espalhamento tinha igualmente dificuldades acrescidas ao nível do material que era preciso ter disponível. Em primeiro lugar, e pelo facto de o ensaio ser mais facilmente executável à escala, foi preciso produzir painéis difusores à escala 1:5. Esta operação, bastante complexa pela reduzida dimensão das peças e pela exigência de pormenores muito refinados, ficou a cargo da empresa Vicoustic. Para cumprir a área mínima de painéis que a norma ISO 17497-1 sugeria foi necessário produzir 25 painéis à escala, tendo a dimensão final do painel ficado pelos 63 cm de aresta, superior aos 53 cm exigidos pela norma. A geometria dos painéis reais era quadrangular, pelo que os painéis à escala tinham a mesma configuração. Ora a norma ISO 17497-1 exige que a amostra seja circular, ou caso não seja possível, esteja encastrada numa mesa circular. Esta exigência está associada à reflexão nos bordos das amostras que pode significativamente influenciar os resultados dos coeficientes de espalhamento. Já ao longo do trabalho, mais especificamente no capítulo 5, foi demonstrado o grande impacto que tem a utilização de amostras quadrangulares em comparação com as amostras circulares. Os erros associados são muito elevados para que este pormenor possa ser desconsiderado. Por isso, e para não ter de cortar as amostras quadrangulares, optou-se por produzir uma mesa circular, com um quadrado inscrito e embutido na mesa, com as dimensões da amostra. Esta mesa foi produzida pela empresa de mobiliário António Alves S.A..

Para além das amostras e da mesa circular, onde as mesmas ficaram encastradas, foi necessário arranjar uma mesa rotativa onde fosse possível colocar o conjunto referido. A mesa disponível dispunha de um diâmetro claramente inferior ao diâmetro da mesa circular com a amostra, facto que não tem qualquer relevância dado que a rotação se faz de forma igualmente eficaz. O principal aspeto que aqui importa realçar e que apresenta grande importância na obtenção de resultados fiáveis tem a ver com a colocação da mesa circular por cima da mesa rotativa. A primeira tem de ser colocada de tal forma a que os eixos de rotação das duas peças fiquem sobrepostos, para garantir que a peça fica exatamente no meio da mesa rotativa. A norma faz menção a este aspeto como sendo crucial e define valores para o coeficiente de espalhamento da mesa circular que têm de ser cumpridos. Estes valores não puderam obviamente ser verificados pelo facto de não ter sido possível obter valores para os coeficientes de espalhamento.

Outro aspeto, que apesar de ainda não ter as suas consequências completamente quantificadas e compreendidas, e que é referido na norma ISO 17497-1, prende-se com a movimentação de ar dentro da câmara. Vários autores afirmam que a rotação da mesa promove movimentação de ar dentro da

câmara e que essa movimentação pode ter consequências nos resultados dos coeficientes de espalhamento obtidos. Por essa razão a norma sugere que os ensaios só sejam executados 15/N minutos após o fecho da câmara. No caso do estudo atual, em que foram usadas amostras à escala 1:5, seria necessário esperar 3 minutos para se efetuar o ensaio. Esta questão dificulta ainda mais a agilidade deste processo de medição que por si só já é bastante moroso.

A realização de ensaios à escala tem associadas exigências complexas que implicam a utilização do fator de escala em diversos aspetos como as distâncias entre os elementos ou a densidade do ar no espaço onde está a ser realizado o ensaio. Se para as distâncias não existe problema, pois a única consequência é a aproximação dos diversos elementos envolvidos no ensaio, para a densidade do ar a questão já é bem mais complexa para se resolver. Como estamos a usar uma amostra à escala 1:5, teríamos de ter um espaço com uma densidade de ar cinco vezes inferior à real. Para isso seria necessário substituir o ar da câmara por outro mais leve como hélio. Essa operação é bastante complexa, principalmente quando para os ensaios de espalhamento foi usada uma câmara reverberante com 216 m³ de volume. Esta operação de substituição de um gás por outro mais leve (densidade do ar a 20 °C igual a 1,293 g/l; densidade do hélio a 20 °C igual a 0,179 g/l) a ser realizada, só faria sentido se fosse numa câmara mais pequena, com um mínimo de 1.6 m³, valor definido na norma. Para câmaras como a que foi utilizada, esta operação seria bastante complexa e dispendiosa, pelo que este aspeto da densidade do ar foi ignorado, apesar de existir uma perfeita noção sobre o erro que está a ser cometido, que no entanto, não é muito significativo.

No que diz respeito ao volume da câmara reverberante, que como já referido anteriormente é de 216 m³, a norma apenas exige um volume mínimo de 1.6 m³, não fazendo qualquer referência a valores máximos, pelo que a câmara utilizada é perfeitamente aceitável. A grande vantagem na utilização de uma câmara com estas dimensões está no facto de existir maior distância entre as paredes/tetos e os microfones/fontes sonoras, pelo que as reflexões provenientes dos primeiros são mais tardias e por isso torna-se mais fácil isolar as reflexões associadas à amostra em estudo. Esta questão aplica-se ao ensaio de difusão, em que, não sendo possível ter um espaço anecóico, interessa ter um espaço o maior possível. Para o ensaio de espalhamento, tendo em conta que estão a ser medidos tempos de reverberação não é necessário definir nenhuma janela temporal de análise.

A questão do tempo de execução dos ensaios também é um aspeto importante a esclarecer. No que diz respeito ao ensaio de espalhamento a norma faz referência a duas hipóteses para a realização do ensaio: a primeira, e mais expedita, implica ter um sistema mecânico, controlado pelo lado exterior da câmara, que permite que a mesa rotativa rode em contínuo com uma velocidade constante e regulada. Dessa forma, e até a mesa dar uma rotação completa, são emitidos vários impulsos e registadas as respetivas respostas impulsivas. No final faz-se uma média e obtém-se a resposta impulsiva final que, após processos de integração, permite obter o tempo de reverberação. A outra opção, utilizada neste trabalho, implica a medição de respostas impulsivas para rotações sucessivas de 5°, sendo o impulso final obtido pela média de todas estas medições. Este segundo processo é claramente mais demorado, sendo necessário fazer 72 medições por cada rotação completa da mesa; isto a multiplicar por dois pois existem duas medições (T2 e T4) que implicam a rotação da mesa; e ainda temos de multiplicar por dois novamente pois iremos ter duas posições de fonte diferentes. Ora só para a medição de T2 e T4 será necessário entrar e sair da câmara reverberante 288 vezes. Apesar de este processo ser claramente moroso torna-se, no entanto, mais facilmente exequível pois não exige mesas rotativas automáticas e sistemas de controlo exterior.

Outra dificuldade sentida ao longo deste trabalho prendeu-se com a leitura e interpretação das várias normas que para estes ensaios eram necessários. Muitas vezes estas apresentavam-se bastante omissas e incompletas nas descrições dos procedimentos a adotar, principalmente no que se refere ao

tratamento das respostas impulsivas e à obtenção dos resultados pretendidos. Por exemplo, no ensaio para obtenção do coeficiente de difusão, o procedimento de redução do sinal e de obtenção das repostas polares resumia-se a dois desenhos, sem que qualquer explicação escrita mais detalhada os acompanhasse, o que na opinião do autor, e sem a ajuda de outra bibliografia especializada, se tornaria bastante complicado de compreender. Por essa razão foi realizado o tutorial que pode ser encontrado no Anexo A2.

A procura por resultados de outros autores e o detalhe das medições laboratoriais para a obtenção destes coeficientes demonstrou-se como outra tarefa de complicada execução. A realização destes ensaios, em especial do ensaio de espalhamento, não foi ainda alvo de execução em muitos sítios, pelo que a informação e experiência práticas nesta área são ainda um pouco limitadas. Mas este é sem dúvida um dos aspetos mais interessantes e inovadores deste trabalho.

6

CONCLUSÃO

A acústica, como ciência aplicada à vida humana e à promoção do seu bem-estar e qualidade, tem vindo nos últimos anos a sofrer uma crescente valorização, assumindo-se hoje como fundamental no cumprimento de requisitos básicos que a sociedade, cada vez mais exigente, demanda.

Neste sentido, este trabalho surge como uma boa oportunidade de aprofundar esses mesmos conhecimentos e de contribuir para o desenvolvimento de metodologias de estudo e avaliação que permitam a obtenção de produtos e tecnologias cada vez mais apuradas e com melhores desempenhos.

A difusão surge, hoje em dia, como uma área da acústica cada vez mais valorizada e necessária. Os contributos que este fenómeno veio trazer ao tratamento de espaços, que exigem maiores exigências ao nível acústico, é notável. Por isso cada vez mais são lançados novos produtos nesta área, sendo a Vicoustic, empresa parceira no desenvolvimento desta dissertação, uma das mais proactivas a nível nacional e internacional. Esta empresa, como muitas outras, tem apostado na produção e desenvolvimento de novos produtos, com novas geometrias, tendo em vista o tratamento cada vez mais personalizado e completo dos diversos espaços. O destaque ao nível do mercado tem de ser dado, sem sombra de dúvida, aos difusores de Schroeder que, através das suas sequências residuais quadráticas, permitem obter uma infinidade de soluções com eficácia comprovada. Outros tipos de difusores, como os híbridos, que combinam funções difusoras e absorventes, são também novas soluções que prometem revolucionar a forma de conceber e tratar os espaços com necessidades acústicas.

A grande vantagem da difusão está no facto de esta permitir tratar espaços acústicos sem que se perca energia sonora. Salas de espetáculo onde decorrem concertos são um exemplo flagrante da vantagem na utilização deste fenómeno, já que permitem distribuir mais uniformemente a energia pelo espaço, sem que se perca a claridade e percepção do som. Conseguem-se assim obter espaços acusticamente muito mais eficazes que permitem vivenciar experiências auditivas muito mais enriquecedoras.

A necessidade de clarificar o fenómeno da difusão e de permitir comparar a qualidade e eficácia das diversas soluções, levou à procura de coeficientes caracterizadores com vista a esse fim. Nesse sentido, surgiu o estudo de dois coeficientes, já devidamente esclarecidos e enquadrados: o coeficiente de difusão e o coeficiente de espalhamento. Como a análise e o tipo de informações que cada um destes coeficientes dá é diferente, mas complementar, é muito importante, na análise de um determinado produto, entrar em linha de conta com os dois para se perceber verdadeiramente a sua capacidade difusora.

O grande objetivo deste trabalho era pois detalhar e perceber quais as metodologias laboratoriais envolvidas no cálculo destes coeficientes e perceber quais os painéis da empresa Vicoustic passíveis de sofrer este tipo de estudos. Esse objetivo foi plenamente atingido, ficando apenas em aberto a

concretização dos ensaios para obtenção de resultados para os coeficientes de difusão e espalhamento, que permitam uma caracterização mais completa dos diversos produtos.

A obtenção desses mesmos coeficientes esbarrou com dificuldades técnicas ao nível dos programas de cálculo disponíveis, que tal como já foi referido no capítulo anterior, não possuíam as ferramentas necessárias para obtenção e tratamento das respostas impulsivas a analisar. Para além disso, muitas outras questões e dificuldades se levantaram na execução destes ensaios tais como: o estímulo sonoro impulsivo utilizado, a sensibilidade dos microfones e fontes sonoras para abranger todo o espectro de frequências de interesse, a omnidirecionalidade das fontes, as condições ao nível do espaço de ensaio (câmara reverberante vs câmara anecoica), as dificuldades associadas à produção das amostras à escala, bem como da mesa circular de suporte e da mesa rotativa, as questões ao nível da simetria de eixos de rotação para garantir o perfeito equilíbrio e rotação da amostra, a movimentação do ar associada ao movimento da mesa rotativa, a densidade do ar no interior da câmara, o volume desta última, o tempo de medição e execução do ensaio, a interpretação de normas e a procura por resultados de outros autores.

Com este trabalho pela primeira vez na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto se desenvolveram processos e esforços na tentativa de realizar ensaios de espalhamento e pela primeira vez se seguiu a nova metodologia definida na AES-4id-2001 para determinação do coeficiente de difusão. As dificuldades sentidas são pois comuns neste tipo de trabalhos, já que não existe qualquer tipo de experiência acumulada e todos os processos e metodologias mencionadas são novidade. Pode-se pois concluir que este trabalho apresenta um grau de sensibilidade muito elevado, sendo que a sua execução exige uma série de cuidados e condições especiais para que se possam obter resultados válidos e credíveis. A montagem e disponibilidade de todos esses processos e cuidados não é pois de fácil obtenção e exige bastante tempo de preparação, tempo esse que excede claramente aquele disponível para a execução desta dissertação.

Por todos estes motivos o presente trabalho apresenta-se como uma base muito importante de preparação deste tipo de ensaios, para que no futuro possam vir a ser realizados na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto sem limitações e com a qualidade de execução necessária para a obtenção de resultados credíveis e reconhecidos pela comunidade nacional e internacional, que cada vez mais está interessada nesta área particular da Acústica.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J. Cox, Trevor, D'António, Peter, *Acoustic Absorbers and Diffuser - Theory, Design and Application*, 2ª edição, Taylor & Francis, Londres e Nova Iorque, 2009.
- [2] J. Cox, Trevor, *Acoustic Diffusers: The Good, The Bad and The Ugly*. Proceedings of the Institute of Acoustics, Salford.
- [3] J. Cox, Trevor, D'António, Peter, *Technical Bulletin on the Application of Diffusion in Critical Listening Rooms- Theory, Design and Application*, RPG Diffusor Systems, Inc Upper Marlboro, MD, 2003.
- [4] J. Cox, Trevor, D'António, Peter, *Engineering art: the science of concert hall acoustics*, Interdisciplinary Science Reviews, Vol. 28, Nº. 2, 2003, pág. 120-121, Maney for the Institute of Materials, Minerals and Mining.
- [5] Rathsam, Jonathan and Wang, Lily M., *A Review of Diffuse Reflections in Architectural Acoustics*", Architectural Engineering - Faculty Publications, Nº 14, 2006, University of Nebraska – Lincoln.
- [6] Schoeder, M. R., *Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls: more lateral sound diffusion*, Journal of the Acoustical Society of America, 65, 1979, 958–963.
- [7] D'António, Peter, Konnert, J., *The QRD diffractal: a new one- or two-dimensional fractal sound diffusor*, Journal of the Audio Engineering Society, 40, 1992, 113–129.
- [8] Angus, J. A. S., *Using grating modulation to achieve wideband large area diffusers*, Applied Acoustics, 60, 2000, 143–165.
- [9] Lam, Y. W., *On the parameters controlling diffusion calculation in a hybrid computer model for room acoustic prediction*, proc. IoA(UK), 16, 1994, 537-544.
- [10] Hodgson, M., *Evidence of diffuse surface reflections in rooms*, J.Acoust.Soc.Am., 89, 1991, 765-771.
- [11] Vorländer, M., *International round robin on room acoustical computer simulations*, proc 15th ICA, II, 1995, 689-692.
- [12] J. Cox, Trevor, D'António, Peter, *Surface Characterization for room acoustic modelling and design*, International Symposium on Room Acoustic: Design and Science 2004, Salford & Upper Marlboro, M.D..
- [13] J. Cox, Trevor, *Designing curved diffusers for performance spaces*, J.Audio Eng.Soc., 44(5), 1996, 354-364.
- [14] Mommertz, E., Vorländer, M., *Measurement of scattering coefficients of surfaces in the reverberation chamber and in the free field*, proc. 15th ICA, II, 1995, 577-580.
- [15] Mommertz, E., Vorländer, M., *Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients*, Applied Acoustics, 60, 2000, 187-200.
- [16] ISO 17497-1:2004, *Acoustics – sound-scattering properties of surfaces. Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room*.
- [17] Hargreaves, T. J., J. Cox, Trevor, Lam, Y. W., D'Antonio, Peter, *Surface diffusion coefficients for room acoustics: free field measures*, J.Acoust.Soc.Am., 108(4), 2000, 1710-1720.

- [18] AES-4id-2001, *AES Information document for room acoustics and sound reinforcement systems – characterisation and measurement of surface scattering uniformity*, J.Audio Eng.Soc., 49, 2001, 149-165.
- [19] J. Cox, Trevor, D'Antônio, Peter, *Diffusor application in rooms*, Applied Acoustics, 60(2), 2000, 113-142.
- [20] Bork, I., *A comparison of room simulation software – the 2nd round robin on room acoustical computer simulation*, Acustica, 86, 2000, 943–956.
- [21] Dalenbäck, B-I., *The importance of diffuse reflection in computerized room acoustic prediction and auralization*, proc. IoA(UK), 17, 1995, 24-34.
- [22] Lam, Y. W., *Diffuse reflection modeling methods*, J.Acoust.Soc.Am., 100, 1996, 2181-2192.
- [23] Sítio da Internet (<http://www.worldwideticketing.com/images/concerts/musikverein/grosser-musikvereinssaal-7.jpg>). 18/02/2012.
- [24] Sítio da Internet (http://www.bthumm.de/www/artists/neudecker/img/07_01l.jpg). 18/02/2012.
- [25] Sítio da Internet (<http://www.vicoustic.com/VN/default.asp>). 20/02/2012.
- [26] J. Cox, Trevor, D'Antônio, Peter, *Two Decades of Sound Diffusor Design and Development, Part 1: Applications and Design*, J. Audio Eng. Soc., vol. 46, No. 11, Novembro de 1998.
- [27] J. Cox, Trevor, D'Antônio, Peter, *Two Decades of Sound Diffusor Design and Development, Part 2: Applications and Design*, J. Audio Eng. Soc., vol. 46, No. 12, Dezembro de 1998.
- [28] D'Antônio, Peter, Konnert, J., *The Reflection Phase Grating Diffusor: Design Theory and Application*, J. Audio Eng. Soc., vol. 32, 1984.
- [29] ISO 354:2003, *Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room*.
- [30] Gomes, Márcio Henrique de Avelar, *Determination of the acoustical random-incidence scattering coefficient*, Florianópolis, Setembro de 2002.
- [31] Bistafa, Sylvio R., *Difusão sonora em salas: paradigmas do passado e estado da arte*, I Seminário Música Ciência Tecnologia: Acústica Musical, Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia Mecânica.
- [32] Sítio da Internet (<http://www.vicoustic.com/VN/Musicbroadcast/vipInfo.asp?Id=6>). 26-06-2012

ANEXO A1.1

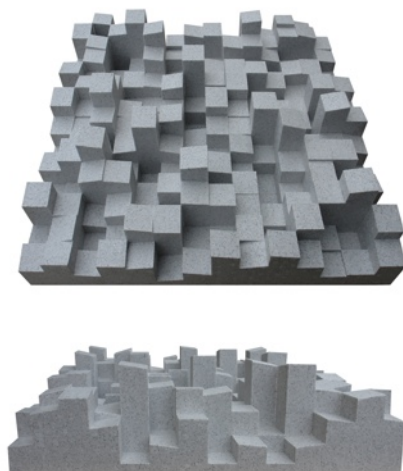
Multifuser DC2

MULTIFUSER DC2

PREMIUM | STUDIO Line

Ref. - V00002
EAN13 - 5600217588886

Box - 71 x 61.5 x 61.5 cm
Weight - 6.8 Kg
Each panel - 60 x 60 x 14.7 cm
Units per box - 6



Fi Fi room - Korea

FEATURES Multifuser DC2

Multifuser DC2 is a bi-dimensional diffusion panel that is frequently applied to walls or ceilings, providing multi-reflection on both vertical and horizontal planes in sound critical spaces. It performs on high frequencies, brightening and clarifying sound. Made from high density quality EPS (Expanded Polystyrene), Multifuser DC2 is notable not only for its effective performance in solving problems like lack of speech intelligibility or music definition, but also for its attractive design that fits perfectly in any kind of room.

- High efficiency - 2 dimensional primitive root diffuser top surface angle.- Easy to install
- Can be painted with water-based paints
- 6 units per box

APPLICATIONS Multifuser DC2

Listening Rooms, Home Theaters, Recording and Broadcast Studios, Post Production Studios, Performance Spaces, Rehearsal Rooms, Conference and Teleconference Rooms, Public Spaces, Auditoriums, etc.

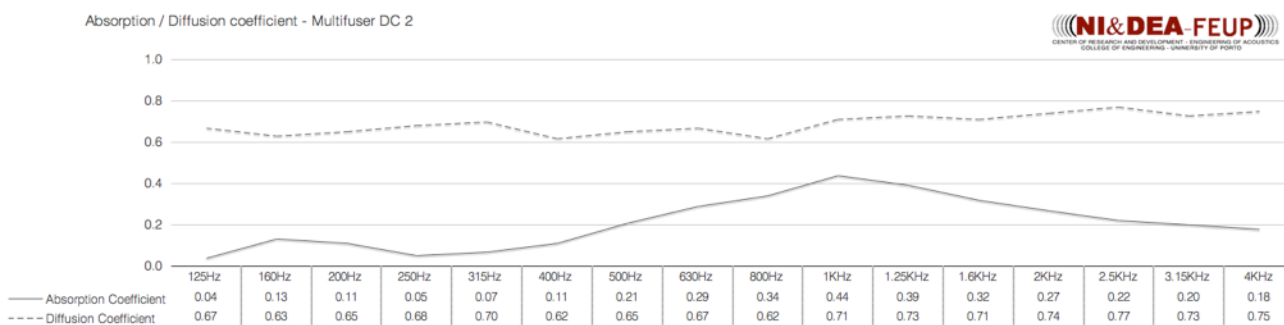
TECHNICAL INFORMATION Multifuser DC2

Material: EPS (Expanded Polystyrene)

Fire Rating: M1

Installation: Adhesive Flexi Glue

PERFORMANCE Multifuser DC2



ANEXO A1.2

Multifuser Wood 36

MULTI FUSER WOOD 36



PREMIUM Line

Light Brown: Ref. - V00470
Black: Ref. - V00474
White: Ref. - V00475

Box - 59,5 x 29,9 x 10,8 cm
Weight - 11,5 Kg
Each panel - 59,5 x 59,5 x 7,5 cm
Units per box - 1



Black



White



Light Brown



Hi Fi Room - Swiss

PERFORMANCE SPECIFICATION Multifuser Wood 36

Made from solid wood, the new diffuser is perfect for use in venues such as concert halls, hi-fi rooms and recording studios, where effective diffusion is often required, without too much absorption occurring at the same time. With its striking angled surface, the two-dimensional diffuser is based on a QRD sequence combined with changing reflection techniques (a result of the angled surface). The panel itself is made in two parts. Each part can be rotated in different directions so that a uniform, omni-directional scattering of sound is achieved, with particularly effective diffusion of mid and low frequencies. Multifuser Wood 36 works between 470Hz and 10kHz. As well as its acoustic efficiency, the panel's attractive appearance makes it suitable for use in a range of settings. Available in Light Brown, Black and White finishes.

FEATURES Multifuser Wood 36

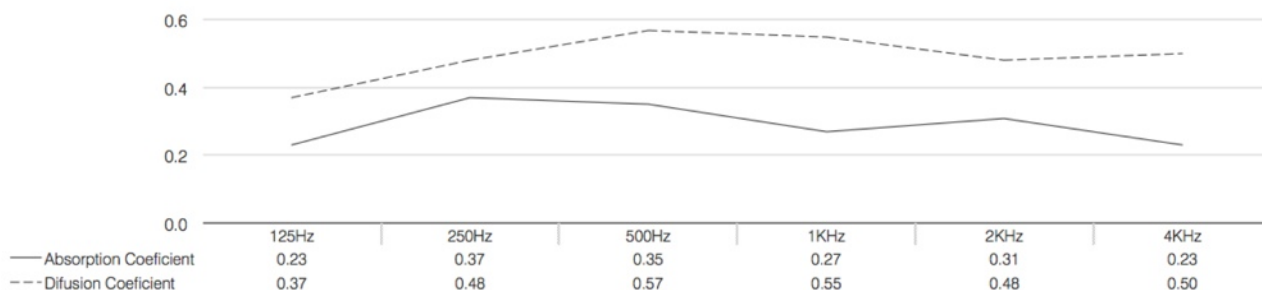
- QRD sequence combined with changing reflection techniques 2D - Diffusion
- 3 colours available: Black, White, Light Brown
- Quality construction that will work on walls. Made entirely of wood.
- Mechanical wood suspension system + Adhesive

APPLICATIONS Multifuser Wood 36

Listening Rooms, Home Theaters, Recording and Broadcast Studios, Post Production Studios, Performance Spaces, Rehearsal Rooms, Conference and Teleconference Rooms, Public Spaces, Auditoriums, etc.

PERFORMANCE Multifuser Wood 36

Absorption / Diffusion coefficient Multifuser Wood 36



ANEXO A1.3

Multifuser Wood 64

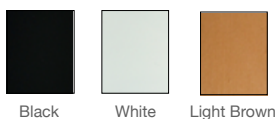
MULTI FUSER WOOD 64



PREMIUM Line

Light Brown: Ref. - V00469
Black: Ref. - V00472
White: Ref. - V00473

Box - 59,5 x 29,9 x 15,8 cm
Weight - 17,5 Kg
Each panel - 59,5 x 59,5 x 13,5 cm
Units per box - 1



Hi Fi Room - Denmark

PERFORMANCE SPECIFICATION Multifuser Wood 64

Made from solid wood, the new diffuser is perfect for use in venues such as concert halls, hi-fi rooms and recording studios, where effective diffusion is often required, without too much absorption occurring at the same time. With its striking angled surface, the two-dimensional diffuser is based on a QRD sequence combined with changing reflection techniques (a result of the angled surface). The panel itself is made in two parts. Each part can be rotated in different directions so that a uniform, omni-directional scattering of sound is achieved, with particularly effective diffusion of mid and low frequencies. Multifuser Wood 64 works between 310Hz and 8kHz. As well as its acoustic efficiency, the panel's attractive appearance makes it suitable for use in a range of settings. Available in Light Brown, Black and White finishes.

FEATURES Multifuser Wood 64

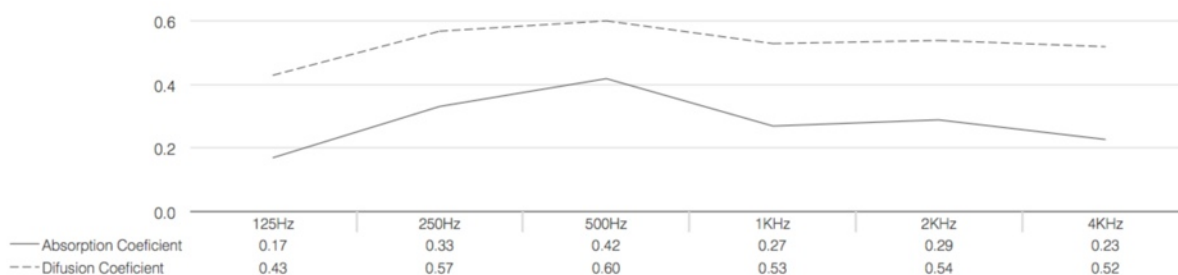
- QRD sequence combined with changing reflection techniques 2D - Diffusion
- 3 colours available: Black, White, Light Brown
- Quality construction that will work on walls. Made entirely of wood.
- Mechanical wood suspension system + Adhesive

APPLICATIONS Multifuser Wood 64

Listening Rooms, Home Theaters, Recording and Broadcast Studios, Post Production Studios, Performance Spaces, Rehearsal Rooms, Conference and Teleconference Rooms, Public Spaces, Auditoriums, etc.

PERFORMANCE Multifuser Wood 64

Absorption / Difusion coefficient Multifuser Wood 64



ANEXO A1.4

Poly Fuser QR

POLY FUSER QR

PREMIUM Line

Cherry: Ref. - V00272
EAN13 - 5600301840999

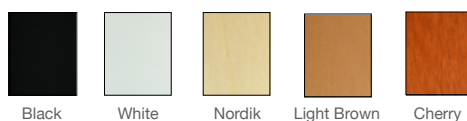
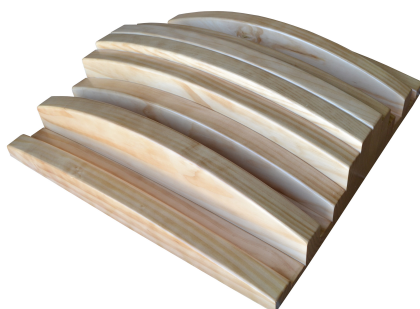
Light Brown: Ref. - V00273
EAN13 - 5600301841026

Nordik: Ref. - V00274
EAN13 - 5600301841033

Black: Ref. - V00275
EAN13 - 5600301841002

White: Ref. - V00276
EAN13 - 5600301841019

Box - 65 x 65 x 20.5 cm
Weight - 18 Kg
Each panel - 59.7 x 59.7 x 13 cm
Units per box - 1



Rehearsal - Portugal

PERFORMANCE SPECIFICATION Poly Fusor QR

Creating effective and controlled diffusion within a specific frequency range has always been one of the greatest challenges for acousticians. With regard to this, Vicoustic has developed an optimal curve that creates an elliptical diffuser producing effective scattering.

- Poly Fuser QR is made entirely of wood. A quadratic residue sequence is combined with a curve allowing diffusion pattern in 2 dimensions (effective between 400Hz and 5kHz).

When the diffuser is placed in a vertical position, the quadratic residue sequence will effect / determine the diffusion on the horizontal axis. The curve will effect / determine the diffusion on the vertical position.

- Because Poly Fuser QR is made entirely of wood, greater diffusion effects can be achieved at lower frequencies.

- Diffusion is an excellent solution for comb filtering problems, response cancellation and slap echo problems. In addition, diffusion gives a sense of spaciousness to music by addressing the issues without over-deadening the acoustic.

- Designed for hi-fi rooms, venues, houses of worship, conference centers and music rehearsal spaces, or any other space where acoustic treatment may be required.

FEATURES Poly Fusor QR

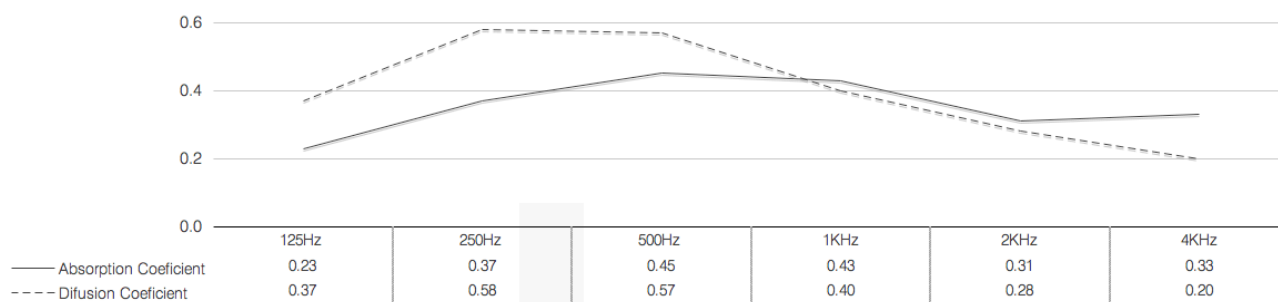
- 11 quadratic residue sequence diffuser design 1st Axis + Poli Cylindrical design 2nd Axis
- 5 colours available: Black, White, Light Brown, Nordic and Cherry
- Quality construction that will work on walls. Made entirely of wood.
- Mechanical wood suspension system + Adhesive

APPLICATIONS Poly Fusor QR

Listening Rooms, Home Theaters, Recording and Broadcast Studios, Post Production Studios, Performance Spaces, Rehearsal Rooms, Conference and Teleconference Rooms, Public Spaces, Auditoriums, etc.

PERFORMANCE Poly Fusor QR

Absorption / Difusion coefficient Poly Fusor QR



ANEXO A1.5

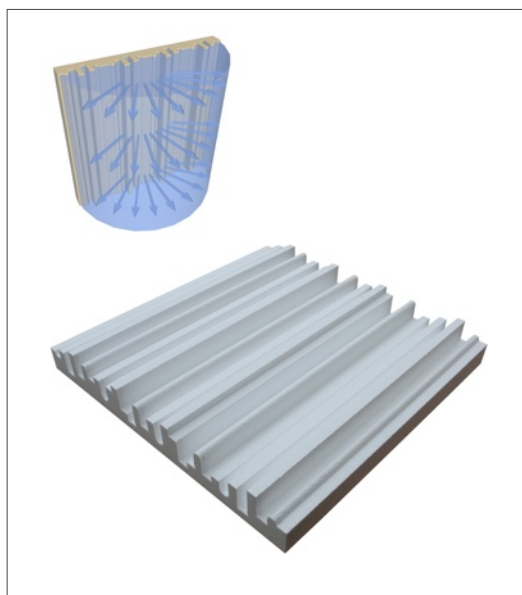
Pulser Fuser DA

PULSAR FUSER DA



STUDIO Line

Ref. - V00001
EAN13 - 5600217588008
Box - 63 x 63 x 62 cm
Weight - 9.4 Kg
Each panel - 60 x 60 x 7,5 cm
Units per box - 12



FEATURES Pulsar Fuser DA

Constructed from high quality EPS (Expanded Polystyrene), Pulsar Fuser DA represents an extraordinary compromise between price and quality. Designed to perform on high frequencies, the panels work exclusively on unidirectional fields, providing vertical or horizontal multi-reflection, especially when applied together in different positions, on back walls, side walls or ceilings.

Pulsar Fuser DA panels achieve remarkable performance in Home Cinema's sweet spots and stereo imaging, allowing you to experience a more defined sound. The panels are also adaptable to your room's own ambience, with the option of using water-based paint to create new and personalized styles.

- Modulated QRD sequence (non linear surface); - Can be painted with water-based paint; - Easy to install (Do it yourself)

APPLICATIONS Pulsar Fuser DA

Listening Rooms, Home Theaters, Recording and Broadcast Studios, Post Production Studios, Performance Spaces, Rehearsal Rooms, Conference and Teleconference Rooms, Public Spaces, Auditoriums, etc.

TECHNICAL INFORMATION Pulsar Fuser DA

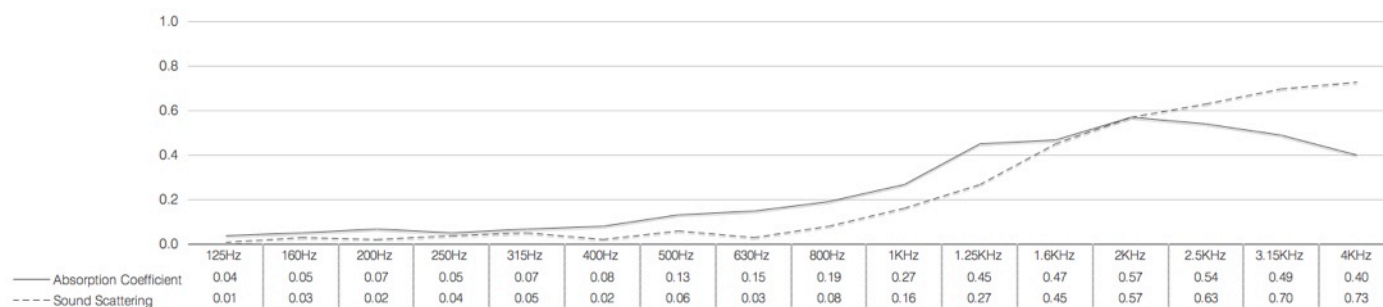
Material: EPS (Expanded Polystyrene)

Fire Rating: M1

Installation: Adhesive Flexi Glue

PERFORMANCE Pulsar Fuser DA

Absorption / Sound Scattering - Pulsar Fuser DA



ANEXO A1.6

Poly Wood Fuser

POLY WOOD FUSER



PREMIUM Line

Cherry: Ref. - V00005
EAN13 - 5600217588909

Light Brown: Ref. - V00006
EAN13 - 5600217588916

Nordik: Ref. - V00007
EAN13 - 5600217588923

Black: Ref. - V00270
EAN13 - 5600301841057

White: Ref. - V00271
EAN13 - 5600301841040

Box - 69.5 x 625 x 245 cm

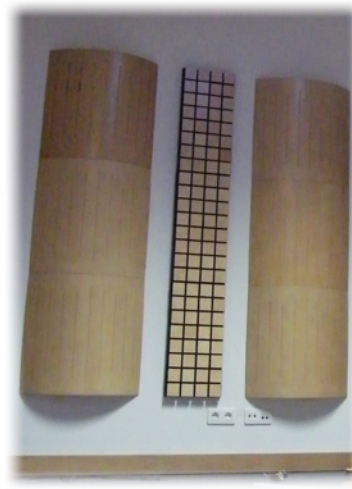
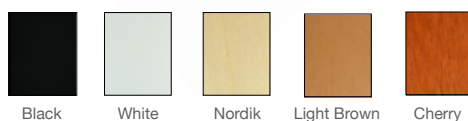
Weight (Cherry, Light Brown, Nordik) - 7.5 Kg

Weight (Black) - 9.5 Kg

Weight (White) - 8.5 Kg

Each panel - 59.7 x 59.7 x 13 cm

Units per box - 6



Studio - Portugal

FEATURES Poly Wood Fuser

Creating effective and controlled diffusion within a particular design frequency has always been one of the greatest challenges facing acousticians. Vicoustic is proud to present the Poly Wood Fuser, a specially designed panel based on an optimal curve, which creates an elliptical diffuser to effectively scatter unwanted frequencies.

The panel's fiberboard elliptical membrane has a controlled density, allowing an infinite diffusion pattern (effective from 300Hz to 12 kHz), which breaks up standing waves and flutter-echo effects.

The panel's acoustic foam interior serves two purposes: dampening the membrane's diffusion effect and acting as a broadband absorber for medium-low frequencies.

APPLICATIONS Poly Wood Fuser

Listening Rooms, Home Theaters, Recording and Broadcast Studios, Post Production Studios, Performance Spaces, Rehearsal Rooms, Conference and Teleconference Rooms, Public Spaces, Auditoriums, etc.

TECHNICAL INFORMATION Poly Wood Fuser

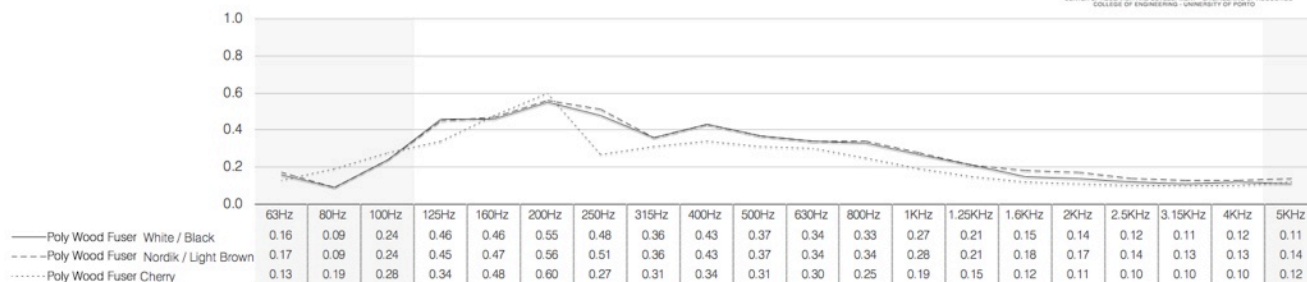
Material: Acoustic Foam and Wood

Installation: Adhesive Flexi Glue

PERFORMANCE Poly Wood Fuser

Absorption coefficient - accordance with the Standards EN - ISO 354

NI&DEA FEUP
CENTER OF RESEARCH AND DEVELOPMENT - ENGINEERING OF ACOUSTICS
SCHOOL OF ENGINEERING - UNIVERSITY OF PORTO



ANEXO A1.7

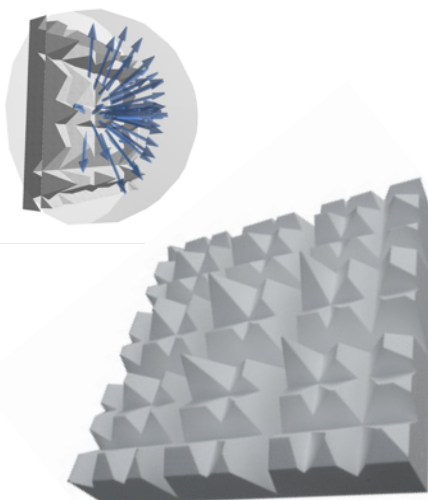
Super Fuser Spyke 2

SUPER FUSER SPYKE 2



STUDIO Line

Ref. - V00004
 EAN13 - 5600217588893
 Box - 63 x 63 x 62 cm
 Weight - 7.4 Kg
 Each panel - 60 x 60 x 12.5 cm
 Units per box - 6



Studio - Portugal

FEATURES Super Fuser Spyke 2

Manufactured in high quality EPS (Expanded Polystyrene), the Super Fuser Spyke 2 works as a sound energy redirector, fixing frequent room problems such as speech intelligibility and musical imprecision. Applied on ceilings to treat medium and high frequencies, our Super Fuser Spyke 2 redistributes sound across the room, generating a more uniform listening ambience. Thanks to its mathematical geometry, Super Fuser Spyke 2 works in a more moderate way, compared with common diffusion products, avoiding excessive flutter. Its effective performance, aesthetic design, easy of installation and attractive price make Super Fuser Spyke 2 a top seller.

APPLICATIONS Super Fuser Spyke 2

Listening Rooms, Home Theaters, Recording and Broadcast Studios, Post Production Studios, Performance Spaces, Rehearsal Rooms, Conference and Teleconference Rooms, Public Spaces, Auditoriums, etc.

TECHNICAL INFORMATION Super Fuser Spyke 2

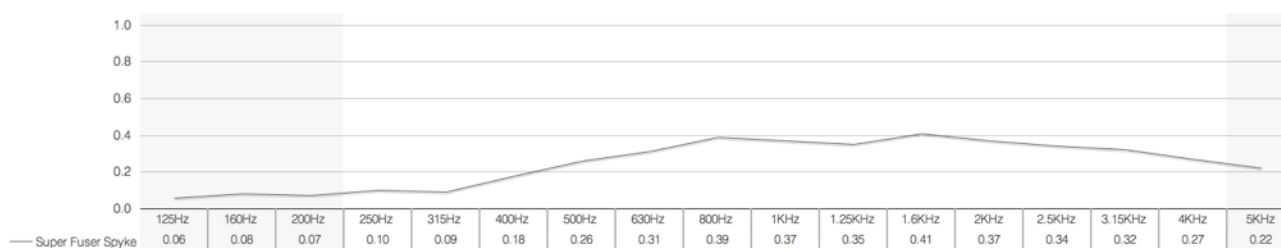
Material: EPS (Expanded Polystyrene)

Fire Rating: M1

Installation: Adhesive Flexi Glue

PERFORMANCE Super Fuser Spyke 2

Absorption coefficient - accordance with the Standards EN - ISO 354



ANEXO A1.8

Wave Wood

WAVE WOOD

PREMIUM Line

Cherry: Ref. - V00073
EAN13 - 5600217588329

Black: Ref. - V00074
EAN13 - 5600301840517

White: Ref. - V00075
EAN13 - 5600301840524

Light Brown: Ref. - V00076
EAN13 - 5600217588978

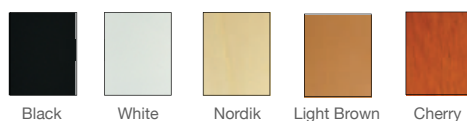
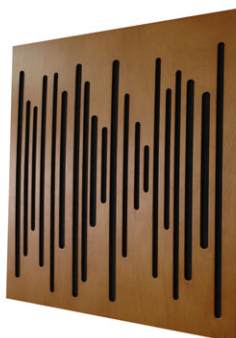
Nordik: Ref. - V00077
EAN13 - 5600217588985

Box - 63 x 63 x 62 cm

Weight - 13.5 Kg

Each panel - 59.7 x 59.7 x 6.2 cm

Units per box - 10



Black

White

Nordik

Light Brown

Cherry



Church - Lebanon

FEATURES Wave Wood

The Wave Wood panel represents one of the strongest Vicoustic solutions in terms of the Absorption and Reflection Control System*.

This is an ideal solution to those who search balanced sound ambiances that simultaneously control the exceeding energy in a room, and still maintain a living and bright sound.

***ARCS - Absorption and Reflection Control System.** The ARCS system is the Vicoustic's research model, in the area of absorption and diffusion combination solutions. Therefore, it includes the study, combination and appliance of the best foam and wood properties allied with the design of non linear sequential cavities. The system presumes the optimal balance between the absorption area and the reflecting surface.

APPLICATIONS Wave Wood

Listening Rooms, Home Theaters, Recording and Broadcast Studios, Post Production Studios, Performance Spaces, Rehearsal Rooms, Conference and Teleconference Rooms, Public Spaces, Auditoriums, etc.

TECHNICAL INFORMATION Wave Wood

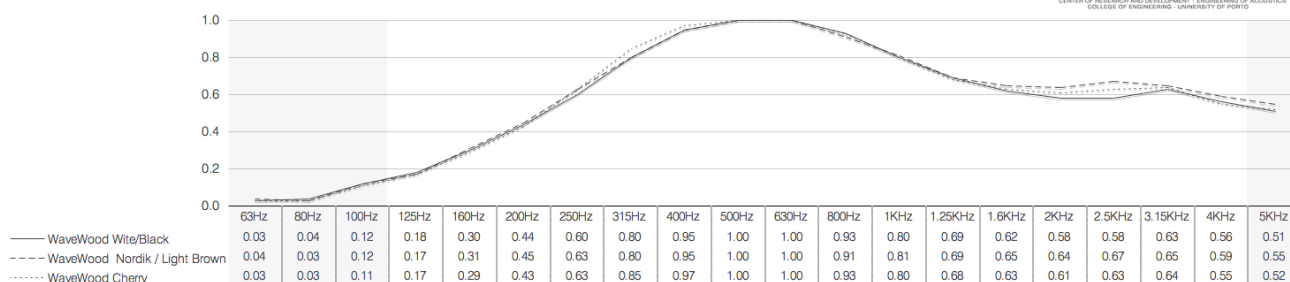
Material: Acoustic Foam and Wood

Fire Rating: Acoustic Foam - M1

Installation: Adhesive Flexi Glue

PERFORMANCE Wave Wood

Absorption coefficient - accordance with the Standards EN - ISO 354



NI&DEA FEUP
CENTER OF RESEARCH AND DEVELOPMENT - ENGINEERING OF ACOUSTICS
COLLEGE OF ENGINEERING - UNIVERSITY OF PORTO

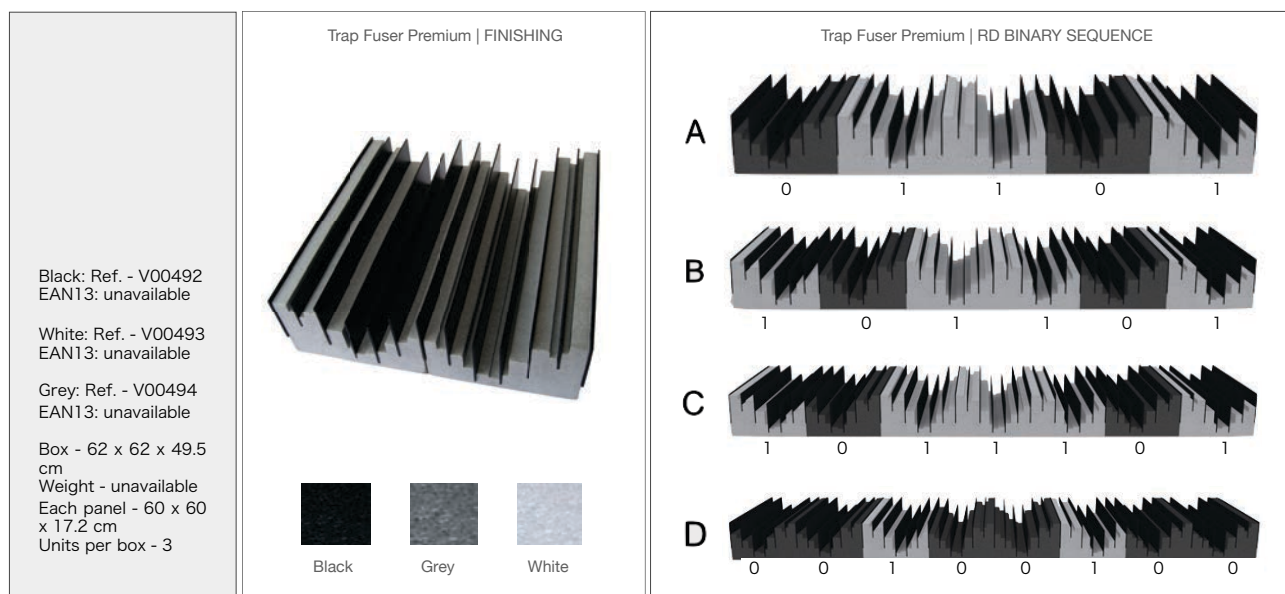
ANEXO A1.9

Trap Fuser Premium

TRAP FUSER PREMIUM



PREMIUM Line



FEATURES Trap Fuser Premium

Manufactured from high quality EPS (Expanded Polystyrene), the Trap Fuser Premium is a unidirectional panel that controls sound reflections in two different ways – absorption and diffusion. Its hybrid structure allows sound energy to either be trapped in the cavities, or scattered by the plain surfaces. Usually applied for the treatment of mid or high frequencies, the Trap Fuser Premium is a Quadratic Residue Diffuser and the additional wooden applications physically divide the different depths, based on the QRD mathematical theory. The additional wood decreases the absorption effect of the panel and the diffusion function becomes the main behavior. Designed for a range of frequencies between 550 Hz to 5KHz.

In many practical applications, especially those that require a large area of diffusion treatment, it is common to repeat a same diffuser, so as to introduce periodicity into a sequence. This will concentrate the reflection energy in the diffraction orders of the grating and result in a narrower diffusion pattern.

The innovation with the Trap Fuser Premium lies in the freedom to position the panel's two halves and create random sequences. By rotating these diffusers in different directions, you can achieve combinations of patterns that are not only appealing to the eye but also extremely efficient when the aim is diffusing sound in a particular area.

- Easy to Install (concept "Do It Your Self"), can be painted with water-based paints.

APPLICATIONS Trap Fuser Premium

Listening Rooms, Home Theaters, Recording and Broadcast Studios, Post Production Studios, Performance Spaces, Rehearsal Rooms, Conference and Teleconference Rooms, Public Spaces, Auditoriums, etc

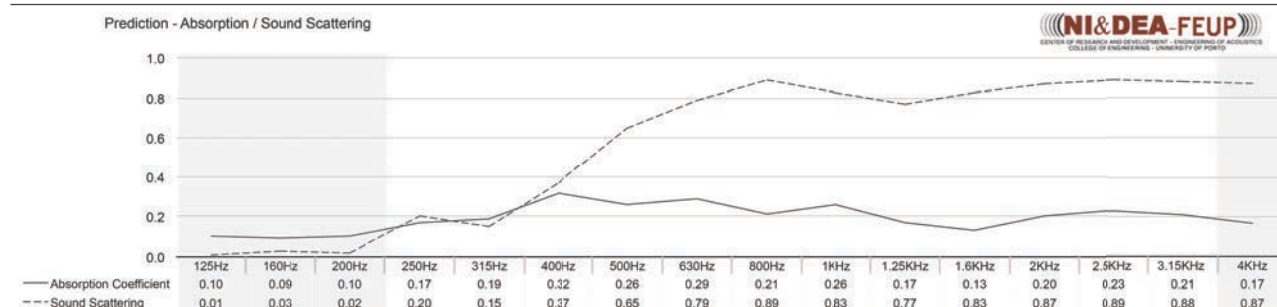
TECHNICAL INFORMATION Trap Fuser Premium

Material: EPS (Expanded Polystyrene)

Fire Rating: M1

Installation: Adhesive Flexi Glue

PERFORMANCE Trap Fuser Premium



ANEXO A2

TUTORIAL: QUANTIFICAÇÃO DO FENÓMENO DA DIFUSÃO ATRAVÉS DA MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO E DO COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO

TUTORIAL: Quantificação do Fenómeno da Difusão através da medição do Coeficiente de Difusão e do Coeficiente de Espalhamento

Pedro Meireles (Orientador: Prof. Rui Calejo Rodrigues)

1 – COEFICIENTE DE DIFUSÃO (AES-4id)

1.1 – Âmbito e Objetivos

A norma AES-4id-2001 fornece orientações para a caracterização da uniformidade de espalhamento produzido por superfícies, a partir de medições ou previsões de diversas respostas polares. O principal objetivo é pois a quantificação do espalhamento através de um coeficiente de difusão. Este coeficiente não é mais do que uma medida quantitativa da qualidade de produtos difusores. A sua utilização permite assim classificar estes produtos no que diz respeito à sua capacidade difusora. Poderá também ser indicado para o desenvolvimento de modelos geométricos para diversos espaços acústicos. É no entanto importante salientar que o coeficiente de difusão não se destina a ser usado cegamente como base para os algoritmos correntes de difusão ou em modelos acústicos geométricos. O coeficiente de difusão caracteriza o som refletido a partir de uma superfície, tendo em conta a uniformidade da resposta polar por ela criada. As informações constantes no documento detalham uma metodologia de caracterização em campo livre.

1.2 – Material

- **Câmara Anecóica ou Câmara Reverberante**
- **Amostras de Teste;**
- **Microfones;**
- **Fonte Sonora;**
- ***Software* de Cálculo.**

1.3 – Disposição e Características do Material

1.3.1 – Câmara Anecóica ou Câmara Reverberante

A Câmara Anecóica deverá apresentar um coeficiente de reflexão da pressão sonora das paredes não superior a 0,05, o que é equivalente a um coeficiente de absorção superior a 0,9975. Caso não esteja disponível uma câmara anecoica, poderá ser usada uma câmara reverberante que deverá apresentar elevadas dimensões, de tal forma a que se possam isolar

apenas os impulsos sonoros referentes às reflexões nas amostras, e por isso evitar o estudo de reflexões que ocorram nas paredes da câmara.

1.3.2 – Instalação de um verdadeiro Campo Afastado

Nas condições ideais de medição deverá garantir-se a criação de um campo afastado de tal forma que

$$1) \quad r \gg D_{max} \quad (1)$$

$$2) \quad r/D_{max} \gg D_{max}/\lambda \quad (2)$$

$$3) \quad r = 2 \times r_1 \times r_2 / (r_1 + r_2) \quad (3)$$

Em que r representa a distância entre fonte e recetor ao ponto de referência, D_{max} é a maior dimensão do difusor, λ o comprimento de onda, r_1 é a distância entre fonte e ponto de referência, r_2 é a distância entre recetor e ponto de referência (figura 1.1).

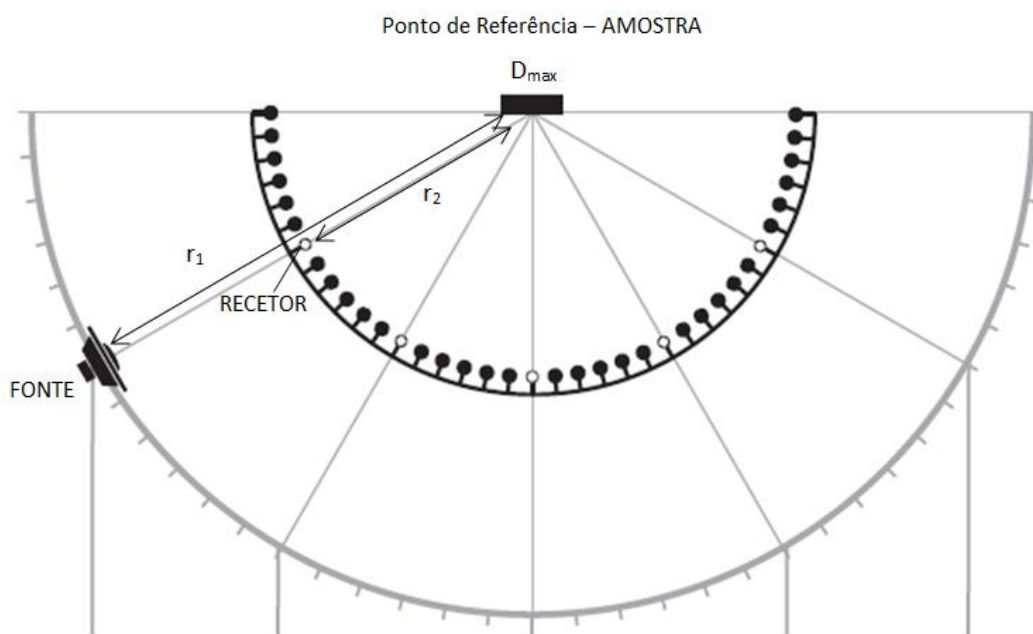


Fig. 1.1 – Esquema de Montagem para obtenção de um Campo Afastado. ^[1]

Se não for possível instalar um verdadeiro campo afastado por constrangimentos de espaço então deverão adotar-se as medidas referidas no ponto 1.3.2.

1.3.3 – Instalação de um Campo Afastado aproximado

Caso não seja possível instalar um verdadeiro campo afastado tal como referido em 1.3.1, então deverá garantir-se que 80% dos microfones estejam colocados fora da zona de reflexão especular. Para esta situação a distância entre a fonte e o ponto de referência deve, por exemplo, ser de 10 m e o semicírculo ou hemisfério de recetores deve apresentar um raio de 5 m (figura 1.2). Poderão ser adotados valores mais pequenos (escala 1:5 por exemplo).

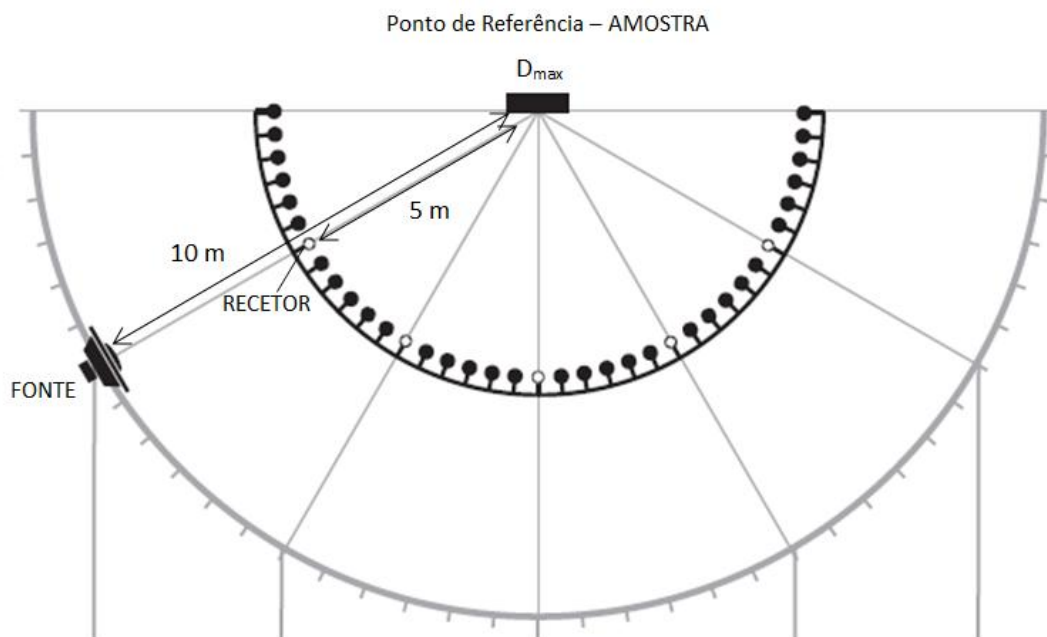


Fig. 1.2 – Esquema de Montagem para obtenção de um Campo Longínquo aproximado. ^[1]

1.3.4 – Disposição dos Recetores (Microfones) e Fontes Sonoras (Altifalantes)

Os recetores (37 microfones) deverão ser dispostos ao longo do semicírculo indicado nas figuras 1.1 e 1.2, com um espaçamento angular de 5° entre eles. Isto perfaz um semicírculo com 180°.

Em alternativa à implantação dos 37 microfones poderá também ser utilizado um sistema móvel que permita a movimentação de um microfone pelas diversas posições.

Para a obtenção do coeficiente de difusão para incidência aleatória as fontes sonoras deverão ser colocadas com diferenças angulares máximas de 10°, formando um semicírculo como o já referido. Quando as medições estão limitadas a dificuldades ao nível do tempo de medição, por simplificação deverão ser determinados os coeficientes de difusão direcionais para os ângulos de incidência normal e de 55°.

1.3.5 – Fonte Sonora (Altifalante) e Recetores (Microfones)

No que diz respeito à fonte sonora, esta deverá ser omnidireccional com variações aceitáveis de ± 2 dB em magnitude e $\pm 20^\circ$ em fase em relação a uma superfície de referência plana. Os recetores (microfones) devem ter todos a mesma sensibilidade independentemente da direccionalidade sonora com variações aceitáveis de ± 1 dB em magnitude e $\pm 20^\circ$ em fase.

1.3.6 – Suporte para a Amostra, Altifalante e Recetores

As amostras de teste, os microfones e os altifalantes deverão ser colocados sobre uma superfície totalmente refletora. Este facto faz com que o espaço de medição seja na verdade semi-aneecóico (para utilização em câmara anecoica). A superfície deverá ter um coeficiente de reflexão da pressão sonora de pelo menos 0.99 e deverá ser suficientemente larga para garantir que os efeitos de reflexão dos bordos estão, pelo menos, 40 dB abaixo do sinal detetado na janela de interesse. Para garantir a medição de todas as frequências, sem que reflexões destrutivas o impeçam, a fonte e os recetores deverão estar suficientemente próximos da superfície refletora. Nesse sentido existe a regra de considerar que os equipamentos de medição não estejam a uma distância superior a um quarto do comprimento de onda da superfície refletora.

1.4 – Amostra de Teste

As amostras a ensaiar deverão ser completas de tal forma a que possam ser medidos todos os efeitos associados à rugosidade e reflexão nos bordos da amostra. Por isso o ideal será colocar toda a estrutura em estudo. Caso isso não seja possível, devido às elevadas dimensões, deverão ser cumpridas exigências relativamente ao número de períodos a utilizar para garantir a obtenção de resultados fiáveis. Nesse sentido deverá garantir-se um mínimo de 4 períodos completos, sendo que a utilização de maior número de períodos permitirá uma melhor aproximação da real resposta polar e da percepção dos lobos criados. Se o objetivo não é atender aos efeitos de periodicidade, mas conhecer apenas a difusão de uma unidade, então basta ensaiar um painel.

1.5 – Procedimento de Medição (Ensaio e Resultados)

1.5.1 – Impulso de Resposta Altifalante - Microfone

O primeiro passo passa por determinar o impulso recebido por cada microfone para cada ângulo de difusão. Nesta primeira fase coloca-se o altifalante na câmara anecóica na posição em que o difusor estará colocado em fases posteriores, sendo este direcionado no mesmo alinhamento axial que cada um dos microfones, para cada ângulo de espalhamento. Neste sentido são colocados 37 microfones, espaçados de 5° , o que perfaz um “semicírculo” de 185° . Desta forma são medidas as respostas de cada microfone,

correspondendo por isso a 37 ângulos. É comum efectuarem-se duas vezes estas medições, e por isso um total de 74 registos. Um exemplo deste registo ($h_3(t)$) pode ser visto na figura 1.3.

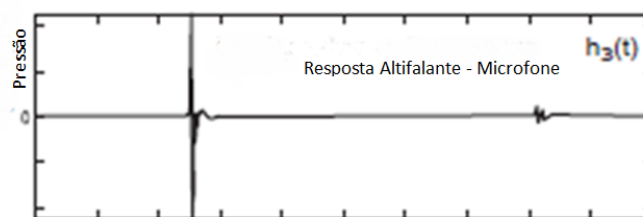


Fig. 1.3 – Impulso de resposta Altifalante – Microfone. ^[1]

1.5.2 – Resposta de Fundo sem difusor

Nesta fase o altifalante é colocado na sua posição de origem sem qualquer difusor presente. O que se pretende é obter a resposta, para cada um dos 37 ângulos, ao som produzido pelo altifalante, sem que este sofra qualquer tipo de rotação para acompanhar o eixo de cada microfone. Como se pretende fazer este registo para cada ângulo, ou seja, para cada um dos 37 microfones, então este faz-se de forma sequencial, ligando-se em cada medição apenas o microfone correspondente ao ângulo de medição pretendido, mantendo os outros desligados. A figura 1.4 ilustra os resultados deste procedimento ($h_2(t)$), encontrando-se destacado um intervalo com limites tracejados, a chamada janela temporal, que corresponde a um intervalo de 10ms, onde se isolam as reflexões relevantes.

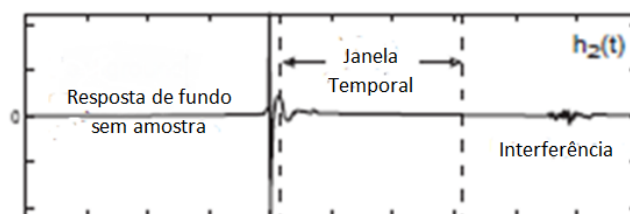


Fig. 1.4 – Resposta de Fundo sem difusor. ^[1]

1.5.3 – Resposta de Fundo com difusor

Repete-se o procedimento anterior mas com o difusor presente na câmara anecóica ($h_1(t)$).

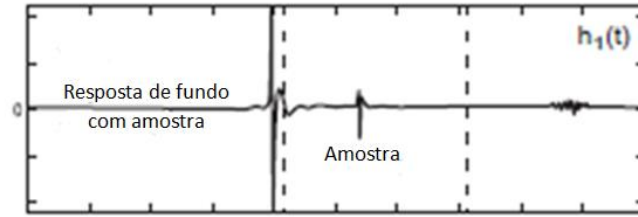


Fig. 1.5 – Resposta de Fundo sem difusor. ^[1]

1.5.4 – Isolamento da Resposta do Difusor

Nesta fase subtrai-se ao registo de fundo com difusor o registo de fundo sem difusor, ou seja, $h_1(t) - h_2(t)$. Com isto isola-se a resposta do difusor (figura 1.6).

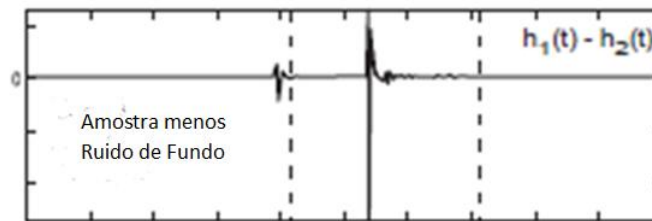


Fig. 1.6 – Isolamento da Resposta do Difusor. ^[1]

1.5.5 – Deconvolução da Resposta do difusor

Nesta fase é possível estabelecer uma correlação entre todos os resultados anteriores, utilizando processos de deconvolução e transformações de Fourier. É precisamente a partir deste resultado $h_4(t)$ que o processo prosseguirá.

$$h_4(t) = IFT \left\{ \frac{FT[h_1(t) - h_2(t)]}{FT[h_3(t)]} \right\} \quad (4)$$

FT e IFT representam, respectivamente, a transformação de Fourier e a transformação inversa de Fourier.

A figura 1.7 permite perceber qual o sinal obtido e a ampliação da janela temporal de 10 ms.

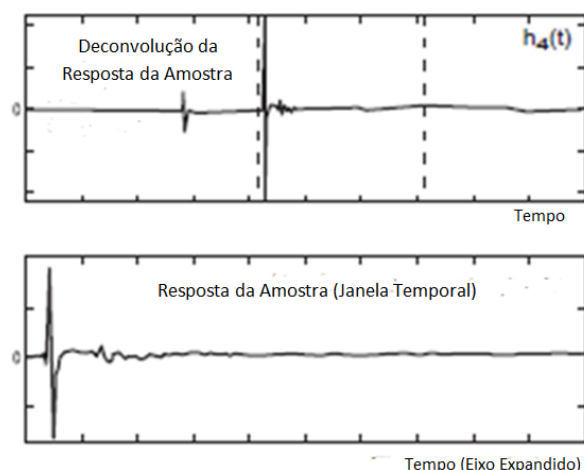


Figura 1.7 – Deconvolução da Resposta do Difusor. ^[1]

1.5.6 – Obtenção das Frequências de Resposta

A aplicação das transformadas de Fourier aos impulsos de resposta permitem obter as frequências de resposta para cada microfone, ou seja, para cada um dos 37 ângulos em estudo.

Em seguida para a obtenção das respostas polares somam-se as frequências de resposta em 1/3 de banda de oitava, obtendo-se assim as intensidades sonoras L_i .

Processando as respostas polares é possível obter os coeficientes de difusão para cada frequência – ver 1.5.8. Todo este processo está resumido na figura 1.8.

Importa referir que os processos elucidados na figura 1.8 são normalmente realizados por *software* específico, que de forma automática permite obter os valores das intensidades sonoras registadas por cada microfone para a partir daí se proceder ao cálculo dos coeficientes de difusão. Desta forma basta fazer o ensaio para as posições de fonte e microfone já indicadas utilizando a amostra de teste e uma amostra plana de referência.

Se forem utilizadas um conjunto de distâncias fonte-recetor (r_1 - r_2) diferentes, os níveis de intensidade sonora (L'_i) devem ser corrigidos para permitir o espalhamento esférico e cilíndrico.

Para um valor de r_1 e r_2 , respectivamente iguais a 10 e 5, o valor corrigido para o nível de intensidade sonora (L_i) é dado por:

$$L_i = L'_i + \varepsilon \times 10 \log_{10} \frac{r}{6.67} \quad (5)$$

Em que r representa a relação de r_1 e r_2 já anteriormente explicitada. O valor de ε será igual a 1 se for usada uma modulação bidimensional e igual a 2 se for usada uma modulação tridimensional.

Apesar de tudo as variações de distâncias deverão ser evitadas, realizando as medições segundo um arco. A aplicação desta correcção deve-se ao facto de as amostras de teste não refletirem o som com a formação de ondas esféricas ou cilíndricas.

A obtenção das respostas polares é feita à custa de modelos computacionais o método dos elementos finitos, método do elemento limite ou métodos mais rápidos como a difração de Fresnel.

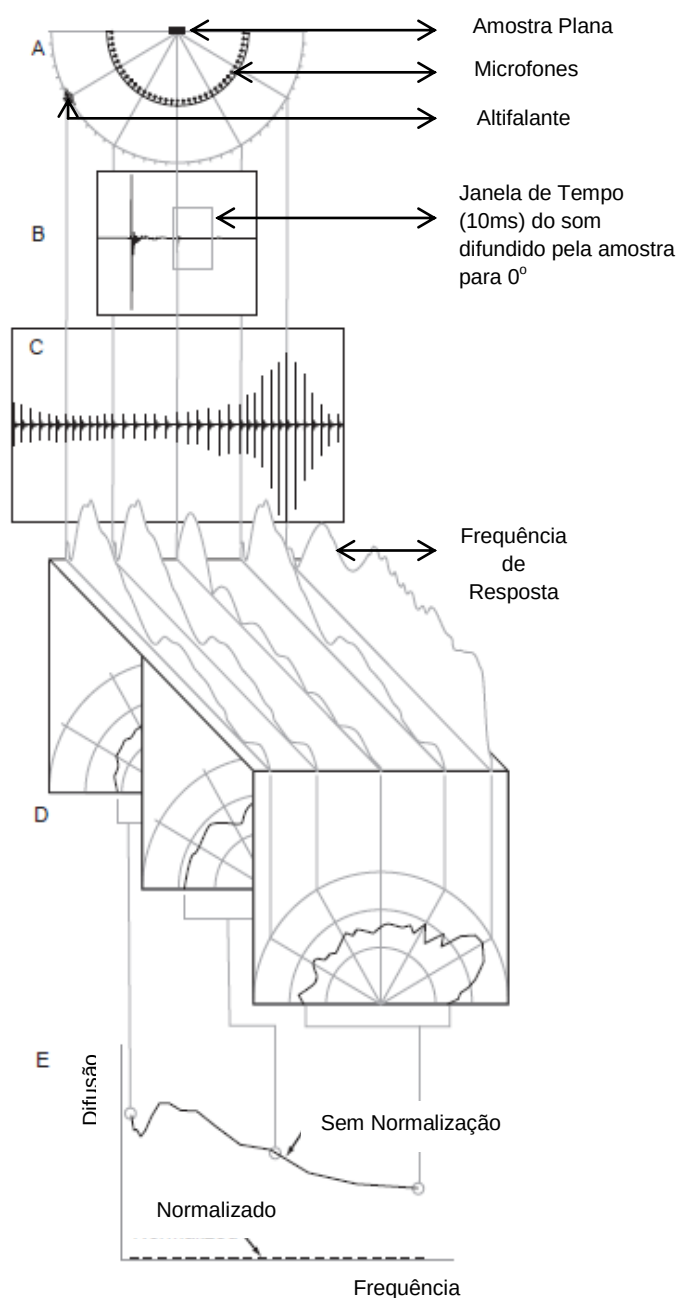


Figura 1.8 – Resumo do processo para obtenção do coeficiente de difusão para uma amostra plana. ^[1]

1.5.7 – Verificação da Janela Temporal

A janela temporal utilizada nestas medições tem como objetivo isolar as reflexões associadas à amostra em estudo, removendo reflexões residuais que não tenham interesse. A sua determinação é feita considerando o tempo mais curto e mais longo das reflexões de interesse. O tempo mais curto pode ser obtido através de considerações geométricas, enquanto o tempo mais longo deverá abranger mais do que as reflexões de primeira ordem para garantir a obtenção da resposta completa da amostra. A inspecção visual do gráfico do impulso de resposta é também muito útil no isolamento das reflexões de interesse.

Ainda para a janela temporal deverá ser assegurado que o rácio sinal-para-ruído (S/N) seja, em relação a uma superfície de referência plana, pelo menos de 40 dB.

O valor de S/N é dado pela expressão a seguir apresentada:

$$S/N = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\int_T [h_1(t) - h_2(t)]^2 dt}{\int_T h_2^2(t) dt} \right\} \quad (6)$$

Em que T é a janela temporal adoptada.

O valor de S/N deverá ser determinado para cada banda de terço de oitava.

Após a definição da janela temporal é necessário aplicar uma transformação de Fourier e obter, para cada frequência na banda de interesse, o nível de intensidade em terço de oitava L' , em decibéis.

1.5.8 – Determinação do Coeficiente de Difusão Normalizado

Para a determinação do coeficiente de difusão é usada uma função de autocorrelação. Para uma fonte sonora fixa e em que cada posição de cada recetor recebe impulsos da mesma área de medição, para frequências em terços de oitava, tem-se então que o coeficiente de difusão direccionado determinado por autocorrelação é dado por:

$$d_\theta = \frac{(\sum_{i=1}^n 10^{L_i/10})^2 - \sum_{i=1}^n (10^{L_i/10})^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n (10^{L_i/10})^2} \quad (7)$$

Em que θ é o ângulo de incidência, L_i é um conjunto de valores de pressão sonora em decibéis obtidos da resposta polar e n é o número de recetores.

O valor para o coeficiente de difusão obtido a partir da expressão (8) é um valor “bruto” na medida em que apresenta algumas incongruências e dificuldades na interpretação dos resultados. Por isso existe a necessidade de normalizar este coeficiente (através a relação dos resultados com os obtidos para um refletor plano). O coeficiente de difusão normalizado pode pois ser obtido através da expressão que se a seguir se apresenta:

$$d_{\theta,n} = \frac{d_{\theta} - d_{\theta,r}}{1 - d_{\theta,r}} \quad (8)$$

Em que d_{θ} é o coeficiente de difusão de uma amostra de teste e $d_{\theta,r}$ o coeficiente de difusão para uma superfície lisa de referência da mesma dimensão que a amostra de teste.

O valor final do coeficiente de difusão deverá corresponder à média dos valores obtidos para os coeficientes de difusão direcionais normalizados, para cada banda de terço de oitava.

Quando os recetores não recebem impulsos da mesma área de medição haverá que efectuar o cálculo do coeficiente de difusão direcional através da expressão a seguir apresentada:

$$d_{\theta} = \frac{(\sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} N_i)^2 - \sum_{i=1}^n (10^{L_i/10})^2}{(\sum_{i=1}^n N_{i-1}) \sum_{i=1}^n N_i (10^{L_i/10})^2} \quad (9)$$

Em que N_i é um valor proporcional à área de medição do recetor i , e pode ser calculado da seguinte forma:

$$N_i = \frac{A_i}{A_{min}} \quad (10)$$

$$A_i = \frac{4\pi}{\Delta\varphi} \sin^2\left(\frac{\Delta\theta}{4}\right) \quad \theta = 0^\circ \quad (11)$$

$$A_i = 2\sin(\theta)\sin\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) \quad \theta \neq 0^\circ, |\theta| \neq 90^\circ \quad (12)$$

$$A_i = \sin\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) \quad |\theta| = 90^\circ \quad (13)$$

Em que $\Delta\varphi$ e $\Delta\theta$ são o azimute e elevação entre dois recetores adjacentes, tratando-se de espaçamentos angulares com normalmente 5° . A_{min} é o valor mais baixo dos A_i para i de 1 a n .

1.6 – Apresentação dos Resultados

O coeficiente de difusão deverá ser apresentado para cada banda de terço de oitava numa tabela devidamente organizada. Os valores dos coeficientes deverão ser arredondados a duas casas decimais. Na representação gráfica os diversos pontos de medição deverão estar unidos por segmentos de linha rectos. Na abcissa deverão aparecer as frequências, em bandas de terço de oitava e em escala logarítmica, enquanto nas ordenadas os respectivos valores dos coeficientes de difusão, entre 0 e 1 (escala linear). As frequências utilizadas deverão estar na proporção usada em termos de escala para a amostra em estudo (f/N). A razão entre a distância de ordenadas 0-1, para a distância de abcissas de cinco oitavas, deve ser de dois terços.

Deverão também aparecer, apenas como informação adicional, os valores dos coeficientes de difusão para as superfícies planas de referência.

O relatório de ensaio deverá incluir as seguintes informações:

- a) – Conformidade com a norma AES-4id;
- b) – Nome e Morada do Laboratório de Ensaios;
- c) – Nome do Produtor e Informações sobre os produtos;
- d) – Nome e Morada da Organização ou pessoa que requereu os ensaios;
- e) – Data do Teste;
- f) – Descrição da Amostra de Teste com cortes esquemáticos;
- g) – Escala da Amostra de teste relativamente ao tamanho real;
- h) – Coordenadas da fonte e recetores;
- i) – Método de Medição (Plano Simples, Planos Múltiplos, Hemisférico);
- j) – Para operações de medição em planos simples ou múltiplos indicar planos utilizados;
- k) – Detalhar a técnica de medição ou previsão utilizada para a obtenção das respostas polares;
- l) – Se aplicável, elaborar uma tabela ou formulação mostrando as correcções das distâncias usadas para cada recetor (verificação da janela temporal – 1.5.3);
- m) – Uma tabela e gráfico dos coeficientes de difusão obtidos versus bandas de frequência em terços de oitava.

2 – COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO (ISO 17497 - 1)

2.1 – Âmbito e Objetivos

A norma ISO 17497-1:2004 especifica uma metodologia laboratorial de medição do coeficiente de espalhamento, com incidência aleatória, em função da rugosidade da superfície em estudo. As medições são levadas a cabo numa câmara reverberante, podendo ser adoptado uma escala real ou um modelo à escala reduzida. Este ensaio tem como principal objetivo fornecer dados que permitam descrever a quantidade de energia que é refletida de forma não especular. Os resultados obtidos podem ser utilizados para comparar diversos produtos e proceder a cálculos de conceção e dimensionamento de espaços acústicos.

Importa salientar que o método referido na ISO 17497-1:2004 produz resultados qualitativos e não quantitativos, uma vez que esta não se destina a caracterizar a uniformidade espacial do espalhamento de uma superfície, mas antes o rácio entre a energia espalhada de forma não especular e a energia total.

2.2 – Material

- **Câmara Reverberante**
- **Amostras de Teste;**
- **Microfones;**
- **Fonte Sonora;**
- **Suporte para a Amostra – Mesa Rotativa;**
- **Software de Cálculo.**

2.3 – Disposição e Características do Material

2.3.1 – Câmara Reverberante

A câmara reverberante deverá ser o mais invariante possível em termos de condições físicas (elementos difusores em posições fixas), de temperatura e humidade (podem ter grande influência nas medições, principalmente nas altas frequências). A norma ISO 354 indica que o volume da câmara deverá ser de pelo menos 150 m³, com um valor ideal a rondar os 200 m³ para a construção de novas câmaras. Para volumes superiores a 500 m³, e devido à absorção do ar, poderá não ser possível medir a absorção para altas frequências, o que também terá influências na medição da difusão. A forma da câmara deverá cumprir a seguinte condição: $l_{máx} < 1.9V^{1/3}$, em que $l_{máx}$ é o comprimento da maior reta contida nos limites da câmara, em metros, e V o volume da câmara em m³.

Segundo a ISO 17497, volume da câmara reverberante deverá ser superior a $200 \times N^{-3}$ m³ (em que N é o factor de escala da amostra).

A área equivalente de absorção da câmara reverberante vazia (A_1) incluindo a atenuação do ar deve ser inferior a $0,30 \times v^{2/3}$ m².

2.3.2 – Disposição das Fontes e Recetores Sonoros

A forma de colocação das fontes sonoras e recetores é a mesma que a referida na norma ISO 354. No que diz respeito aos recetores, ou seja, os microfones, estes devem ser omnidireccionais. Devem ser efetuados registos para diferentes posições dos microfones afastadas entre si de pelo menos 1,5 m, a 2 m da fonte sonora e pelo menos a 1 m de distância da amostra e das paredes da câmara. Quanto à fonte sonora esta deverá igualmente ser omnidireccional e deverão ser registadas várias posições para a mesma, espaçadas de pelo menos 3 m. Pelo menos 12 curvas de decaimento independentes devem ser registadas, pelo que o produto entre as posições dos recetores e da fonte deverá ser sempre superior a 12. A ISO 354 exige que pelo menos 3 posições para os recetores e 2 posições para a fonte sejam registadas. A utilização, em simultâneo, de mais que uma fonte sonora é possível, desde que a diferença na potência radiada seja menor ou igual a 3 dB em cada banda de terço de oitava. Para esta última situação o número de curvas de decaimento pode ser reduzido a seis.

2.3.3 – Fonte Sonora (Sinal MLS)

Para a execução deste método é comum utilizarem-se sinais periódicos pseudo-aleatórios, tal como o MLS (*Maximum Length Sequence*), fazendo-se a chamada análise da resposta impulsiva, em que basicamente se estuda a evolução temporal da resposta sonora observada num ponto do compartimento, resultante da emissão de um impulso MLS noutro ponto do compartimento. Para outras informações mais detalhadas sobre o sinal de teste consultar a ISO 354.

2.3.4 – Suporte para a Amostra – Mesa Rotativa

A mesa rotativa utilizada no ensaio deve apresentar uma base circular rígida com simetria em relação ao eixo de rotação. A dimensão da base circular deve corresponder à dimensão máxima da amostra. Nenhuma parte da mesa rotativa deve estar a uma distância inferior a $N^{-1} \times 1$ m das paredes da câmara. O valor do coeficiente de espalhamento da base sem amostra deverá igualmente ser medido e não deverá exceder os valores constantes na tabela 2.1. A determinação do coeficiente de espalhamento da base poderá ser vista em 2.6.6.

Tabela 2.1 – Valores dos Coeficientes de Espalhamento da Base da Mesa Rotativa por frequência
[2]

Frequência (f/N), Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630
Coeficiente de Espalhamento da Base (S_{base})	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.10

Frequência (f/N), Hz	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Coefficiente de Espalhamento da Base (S_{base})	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.10

2.4 – Amostra de Teste

A área das amostras deverá ser suficientemente grande para poder proporcionar medições precisas. A amostra deverá ser circular e apresentar um diâmetro superior a $N^{-1} \times 3$ m. Alternativamente a amostra poderá ser quadrangular com aresta de dimensão mínima igual a $N^{-1} \times 2,65$ m. Para este último caso a base deverá ter um diâmetro mínimo igual a $N^{-1} \times 3,75$ m e a amostra deverá ser encastrada na base para evitar situações de reflexões nos bordos e por isso sobrestimação dos valores dos coeficientes de espalhamento (figura 2.1).

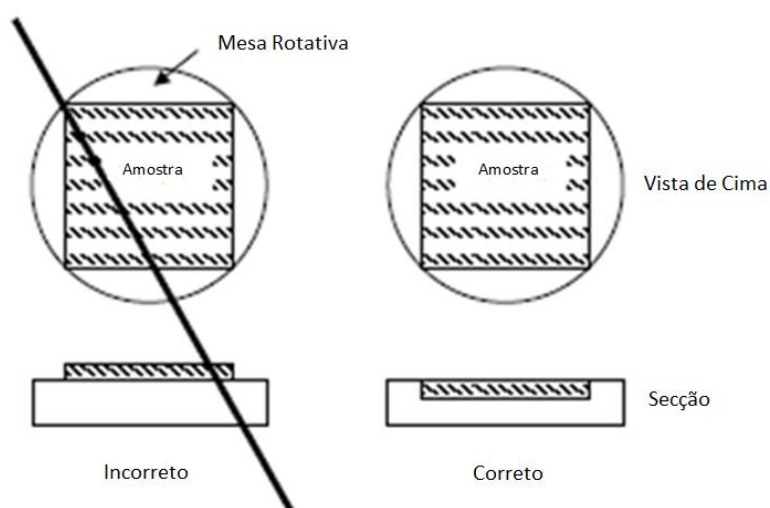


Fig. 2.1 - À esquerda a amostra não incorporada na mesa rotativa (incorreto) e à direita a amostra incorporada na mesa rotativa (correto).^[1]

Tendo em atenção de que este ensaio se baseia em superfícies rugosas, as relações entre as dimensões das rugosidades e da amostra são muito importantes para a obtenção de resultados fiáveis. Nesse sentido tem todo o interesse que a profundidade estrutural das rugosidades (h) seja suficientemente inferior à dimensão da amostra, e por isso à dimensão da mesa rotativa (d), respeitando a relação: $h \leq d/16$ (figura 2.2).

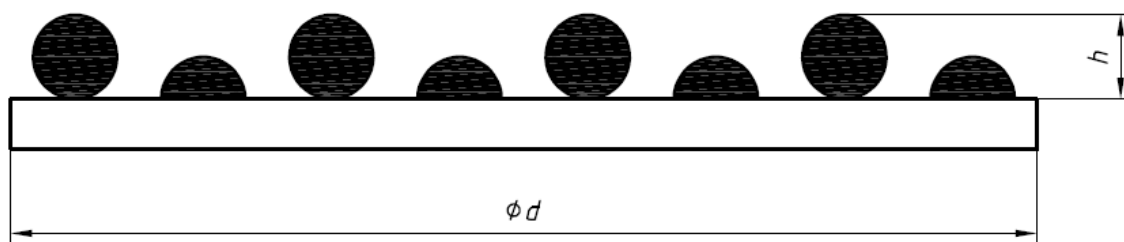


Fig. 2.2 – Definição da Profundidade Estrutural. [2]

A superfície perimetral da amostra de teste deve ser a mais suave e rígida possível. O perímetro não deve ser coberto por um rebordo rígido de altura constante e todas as aberturas que possam existir devem ser devidamente seladas.

Se a amostra de teste tem simetria rotacional então esta deverá ser colocada na mesa rotativa com um desfasamento em relação ao centro rotacional da mesa de pelo menos uma distância de $d/8$, em que d é o diâmetro da mesa rotativa;

O coeficiente de absorção da amostra de teste não deverá ser superior a 0,50 sob o risco de pôr em causa a determinação correta do coeficiente de espalhamento.

2.5 – Outros Aspectos

Para evitar erros de medição associados à movimentação de ar é comum que os ensaios não se iniciem antes de 15/N minutos, depois de se sair da sala e fechar a porta.

As medições deverão ser realizadas o mais rapidamente possível por causa das possíveis flutuações de temperatura que possam vir a ocorrer. Este aspeto é de fácil execução em amostras à escala, no entanto em amostras à escala 1:1 é necessário que a rotação da mesa se faça lentamente. Desta forma medições à escala real são muito demoradas e com dificuldades acrescidas a nível logístico, uma vez que são necessárias mesas rotativas de dimensões consideráveis. Por todas estas razões é facilmente perceptível a preferência por ensaios com amostras à escala.

Variações de temperatura e humidade podem ter grande influência nos resultados finais dos coeficientes de espalhamento, principalmente para as altas frequências, pelo que esses valores devem ser medidos antes e depois, a cada quatro ensaios.

Reduzir a atenuação do ar conduz a medições mais precisas, através da substituição de ar por hélio.

As medições à escala real deverão ser realizadas em bandas de um terço de oitava, com largura de banda entre os 100 Hz e os 5000 Hz; Para medições à escala (fator 1:N) a largura de banda deverá estar compreendida entre $N \times 100$ Hz e $N \times 5000$ Hz.

A avaliação das respostas impulsivas é realizada através do método da integração da resposta impulsiva tal como referido na ISO 354. O limite de integração deve ser fixado em -30 dB e a avaliação do tempo de reverberação deve-se situar entre -5 dB e -20 dB.

2.6 – Procedimento de Medição (Ensaio e Resultados)

2.6.1 – Ensaio

O processo inicia-se com a medição dos impulsos sonoros, usando a técnica já referida conforme a ISO 354, sem e com a amostra de teste, sem que a mesa rotativa esteja em movimento, obtendo-se, respetivamente, os tempos de reverberação T1 e T2. Nesta fase é necessário efetuar pelo menos 6 medições, através de duas posições para a fonte e três posições para o microfone. A forma de colocação das fontes sonoras e recetores é a mesma que a referida na norma ISO 354. No que diz respeito aos recetores, ou seja, os microfones, estes devem ser omnidirecionais. Devem ser efetuados registos para diferentes posições dos microfones afastados entre si de pelo menos 1,5 m, a 2 m da fonte sonora e pelo menos a 1 m de distância da amostra e das paredes da câmara. Quanto à fonte sonora esta deverá igualmente ser omnidirecional e deverão ser registadas várias posições para a mesma, espaçadas de pelo menos 3 m. As dimensões referidas deverão, no caso de estar a ser utilizada uma amostra à escala, ser dadas pelo fator de escala N .

O tempo de reverberação corresponde à média aritmética dos diversos tempos de reverberação determinados para cada posição.

Para cada posição fonte-recetor é gerado e recebido um sinal periódico pseudo-aleatório de forma contínua, enquanto a mesa rotativa está em funcionamento. A duração total da medição deverá ser igual ao tempo correspondente a uma volta completa da mesa rotativa.

Poderão também, em alternativa, para cada posição fonte-recetor, ser realizadas n medições com a amostra rodada entre cada medição de $360^\circ/n$. O valor de n deverá estar entre 60 e 120, sendo 72 um valor comum, correspondendo a variações angulares de 5° .

O sinal utilizado deverá ser sempre o mesmo em todas as medições para assegurar a homogeneidade e igualdade nos resultados obtidos. Para obter uma resposta que não dependa do tempo, é necessário efetuar uma média com sintonia de fase (*phase-locked*) das n medições. Este processo poderá ser feito através da média das respostas dos impulsos de pressão ou através da média dos sinais recebidos antes de calcular as respostas dos impulsos de pressão.

Estas medições feitas com a mesa rotativa em funcionamento e sem a amostra permitem determinar o tempo de reverberação T3. Com a mesa rotativa em funcionamento e a amostra presente obtém-se o tempo de reverberação T4.

A tabela 2.2 resume as diversas medições para os tempos de reverberação que necessitam de ser realizadas. A figura 2.3 ilustra o procedimento de medição.

Tabela 2.2 – Valores dos Coeficientes de Espalhamento da Base da Mesa Rotativa por frequência
[2]

Tempo de Reverberação	Amostra de Teste	Mesa Rotativa
T1	Ausente	Sem Rotação
T2	Presente	Sem Rotação
T3	Ausente	Com Rotação
T4	Presente	Com Rotação

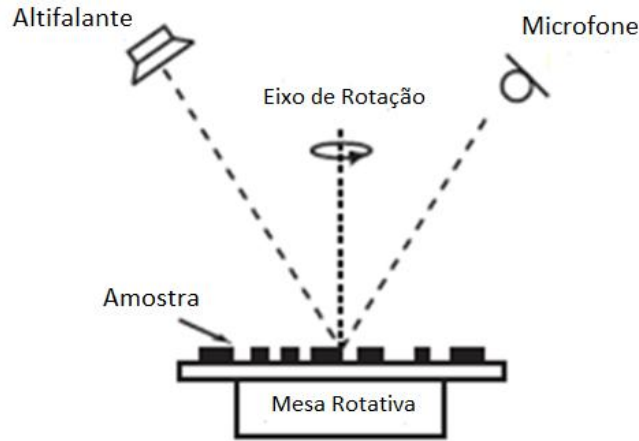


Fig. 2.3 – Esquema de Medição do Coeficiente de Espalhamento. ^[1]

2.6.2 – Cálculo do Coeficiente de Absorção da Energia Total Incidente (α_s)

A partir dos valores dos quatro tempos de reverberação determinados é possível calcular os coeficientes de absorção da energia total incidente, α_s .

$$\alpha_s = 55.3 \frac{V}{S} \left(\frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - \frac{4V}{S} (m_2 - m_1) \quad (14)$$

Em que V é o volume da câmara reverberante (m^3), S é a área da amostra de teste (m^2), c_1 é a velocidade do som no ar (m/s) durante a medição de T_1 , c_2 é a velocidade do som no ar (m/s) durante a medição de T_2 , m_1 é a energia do coeficiente de atenuação no ar (m^{-1}) durante a medição de T_1 e m_2 é a energia do coeficiente de atenuação no ar (m^{-1}) durante a medição de T_2 .

De referir que os parâmetros c (m/s) e m (m^{-1}) poderão ser calculados da seguinte forma:

$$c = 343,2 \sqrt{\frac{273,15+t}{293,15}} \quad (15)$$

Em que t é a temperatura do ar em graus celsius.

$$m = \frac{\alpha}{10 \log e} \approx \frac{\alpha}{4.343} \quad (16)$$

Em que α é o coeficiente de atenuação da pressão sonora. O valor de α é colocado em dB/m, sendo que o resultado do quociente tem a unidade de metros recíprocos m^{-1} .

Os valores de α são retirados da norma NP 4361- 1: 1997, “Atenuação do som na sua propagação ao ar livre. Parte 1: Cálculo da absorção sonora atmosférica”. Estes valores

estão disponíveis em tabelas para algumas condições de temperatura, no entanto, podem genericamente ser calculados da seguinte forma:

$$\alpha = 8,686f^2 \left(\left[1,84 \times 10^{11} \left(\frac{pa}{pr} \right)^{-1} \times \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{1}{2}} \right] + \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{-5}{2}} \times \{ 0,01275 \left[\exp \left(\frac{-2239,1}{T} \right) \right] \left[f_{rO} + \left(\frac{f^2}{f_{rO}} \right)^{-1} + 0,1068 \left[\exp \left(\frac{-3352,0}{T} \right) \right] \left[f_{rN} + \left(\frac{f^2}{f_{rN}} \right)^{-1} \right] \} \right) \quad (17)$$

Em que α é o coeficiente de atenuação dos sons puros (dB/m), f é a frequência (Hz), pa é a pressão atmosférica ambiente (KPa), pr é a pressão atmosférica ambiente de referência (KPa) e igual a 101,325 KPa, T é a temperatura atmosférica ambiente (K), T_0 é a temperatura atmosférica de referência (K) igual a 293,15 K, f_{rO} é a frequência de relaxação do oxigênio (Hz) e f_{rN} é a frequência de relaxação do azoto (Hz).

Os valores de f_{rO} e f_{rN} podem ser obtidos da seguinte forma:

$$f_{rO} = \frac{pa}{pr} (24 + 4,04 \times 10^4 h^{\frac{0,02+h}{0,391+h}}) \quad (18)$$

$$f_{rN} = \frac{pa}{pr} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{-1}{2}} \times (9 + 280h \exp \left\{ -4,170 \left[\left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] \right\}) \quad (19)$$

Em que, $\exp$ representa a base e dos logaritmos neperianos elevado à potência indicada entre parêntesis e h é a fração molar do vapor de água (%) e pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$h = h_r \left(\frac{p_{sat}}{p_r} \right) \left(\frac{pa}{pr} \right) \quad (20)$$

Em que p_{sat} é a pressão de vapor saturante (KPa), sendo que o quociente entre p_{sat} e p_r é dado por:

$$\frac{p_{sat}}{p_r} = 10^C \quad (21)$$

Sendo C dado por:

$$C = -6,8346 \left(\frac{T_{01}}{T} \right)^{1,261} + 4,6151 \quad (22)$$

Para um valor de T_{01} igual a 273,16 K, que representa a temperatura isotérmica no ponto triplo.

2.6.3 – Cálculo do Coeficiente de Absorção da Energia Refletida de forma Especular ($\alpha_{especular}$)

$$\alpha_{especular} = 55.3 \frac{V}{S} \left(\frac{1}{c_4 T_4} - \frac{1}{c_3 T_3} \right) - \frac{4V}{S} (m_4 - m_3) \quad (23)$$

Em que c_3 é a velocidade do som no ar (m/s) durante a medição de T_3 , c_4 é a velocidade do som no ar (m/s) durante a medição de T_4 , m_3 é a energia do coeficiente de atenuação no ar (m^{-1}) durante a medição de T_3 e m_4 é a energia do coeficiente de atenuação no ar (m^{-1}) durante a medição de T_4 .

2.6.4 – Cálculo do Coeficiente de Espalhamento para incidência aleatória

$$s = \frac{\alpha_{especular} - \alpha_s}{1 - \alpha_s} = 1 - \frac{E_{especular}}{E_{total}} \quad (24)$$

2.6.5 – Cálculo do Coeficiente de Espalhamento da base

O coeficiente de espalhamento da base poderá igualmente ser calculado pela expressão a seguir apresentada:

$$s_{base} = 55.3 \frac{V}{S} \left(\frac{1}{c_3 T_3} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - \frac{4V}{S} (m_3 - m_1) \quad (25)$$

Sob condições ideais os tempos de reverberação T_1 e T_3 deveriam ser iguais, no entanto a geometria não perfeita da base, que possa levar a uma não completa simetria, pode encurtar o valor de T_3 . Assume-se que este erro existe igualmente com a amostra presente.

2.6.6 – Cálculo da Energia Refletida de Forma Especular, Energia Difusa e Energia Total

Existem várias energias envolvidas neste processo, nomeadamente, a energia refletida de forma especular, a energia difusa e a energia total (soma da energia especular e difusa).

As energias de reflexão referidas são dadas pelas seguintes expressões:

$$E_{especular} = (1 - \alpha_s)(1 - s) \equiv (1 - \alpha_{especular}) \quad (26)$$

$$E_{total} = 1 - \alpha_s \quad (27)$$

$$E_{difusa} = E_{total} - E_{especular} = E_{total} - E_{total} \times s \quad (28)$$

Onde, $E_{especular}$ é a energia refletida de forma especular, E_{total} é a energia total refletida, E_{difusa} é a energia refletida de forma difusa, α_s é o coeficiente de absorção sonora, $\alpha_{especular}$ é o coeficiente aparente de absorção associado à energia refletida de forma especular e s é o coeficiente de espalhamento para incidência aleatória.

2.6.7 – Precisão dos Resultados

Para cada um dos quatro tempos de reverberação determinados durante o processo (T_1 , T_2 , T_3 e T_4) poderão ser cálculos os desvios padrão associados (δ_1 , δ_2 , δ_3 e δ_4) através da seguinte expressão:

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(T_i - \bar{T})^2}{N(N-1)}} \quad (29)$$

Em que N é o número de medições do tempo de reverberação e $\bar{T}$ a média espacial da câmara reverberante dada por:

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (30)$$

O desvio padrão associado ao coeficiente de absorção da energia total incidente e da energia refletida e forma especular é dado por:

$$\delta_{\alpha_s} = \frac{55,3V}{cS} \sqrt{\left(\frac{\delta_2}{T_2^2}\right)^2 + \left(\frac{\delta_1}{T_1^2}\right)^2} \quad (31)$$

$$\delta_{\alpha_{especular}} = \frac{55,3V}{cS} \sqrt{\left(\frac{\delta_4}{T_3^2}\right)^2 + \left(\frac{\delta_4}{T_3^2}\right)^2} \quad (32)$$

O desvio padrão associado ao coeficiente de espalhamento é então dado por:

$$\delta_s = \left| \frac{\alpha_{especular} - 1}{1 - \alpha_s} \right| \sqrt{\left(\frac{\delta_{\alpha_{especular}}}{\alpha_{especular} - 1}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{\alpha_s}}{1 - \alpha_s}\right)^2} \quad (33)$$

O nível de confiança a 95% para o coeficiente de espalhamento deverá ser estimado como duas vezes o seu desvio padrão.

2.7 – Apresentação dos Resultados

Os principais resultados finais devem ser apresentados em forma de gráficos ou tabelas os valores, para cada frequência em bandas de terço de oitava, dos coeficientes de absorção (α_s) e espalhamento (s).

Nas tabelas os resultados devem ser arredondados com a precisão de 0,01. Valores inferiores a 0 devem ser truncados e os valores superiores a 1, que podem ocorrer, devem ser convenientemente referidos.

Na representação gráfica os diversos pontos de medição deverão estar unidos por segmentos de linha rectos. Na abcissa deverão aparecer as frequências, em bandas de terço de oitava e em escala logarítmica, enquanto nas ordenadas os respetivos valores do coeficiente em estudo, em escala linear. Os dois resultados devem figurar num mesmo gráfico para maior facilidade de análise e interpretação. As frequências relevantes para cada ensaio estão dependentes da escala utilizada para a amostra (f/N). A razão entre a distância de ordenadas 0-1, para a distância de abcissas de cinco oitavas, deve ser de dois terços.

O relatório de ensaio deverá incluir as seguintes informações:

- a) – Conformidade com a norma ISO 17497-1;
- b) – Nome da Organização que realizou o ensaio;
- c) – Data do Teste;
- d) – Descrição da Amostra de Teste: área da superfície, profundidade estrutural, montagem na mesa rotativa (apresentação preferencial de desenhos esquemáticos);
- e) – A forma da Câmara Reverberante, o seu tratamento à difusão, e o número e posições dos microfones e fonte sonora;
- f) – Dimensões, volume e área total das superfícies da Câmara Reverberante;
- g) – Registo da Humidade e Temperatura ambiente a cada quatro medições;
- h) – A apresentação dos resultados de acordo com o anteriormente referido;
- i) – Estimativa da precisão da medição;

Bibliografia

AES-4id-2001, *AES Information document for room acoustics and sound reinforcement systems – characterisation and measurement of surface scattering uniformity*, J.Audio Eng.Soc., 49, 2001, 149-165.

ISO 17497-1:2004, *Acoustics – sound-scattering properties of surfaces. Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room*.

NP 4361- 1: 1997, *Atenuação do som na sua propagação ao ar livre. Parte 1: Cálculo da absorção sonora atmosférica*.

J. Cox, Trevor, D'António, Peter, *Acoustic Absorbers and Diffuser - Theory, Design and Application*, 2ª edição, Taylor & Francis, Londres e Nova Iorque, 2009.

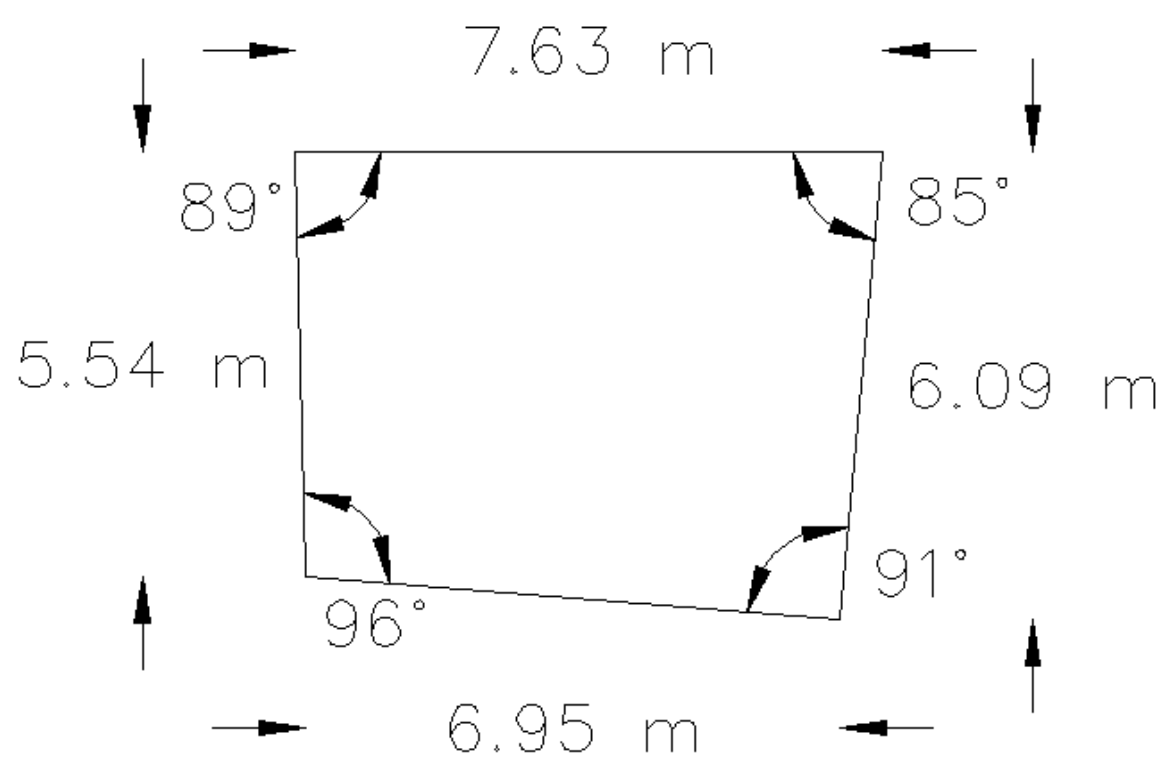
Referências:

[1] J. Cox, Trevor, D'António, Peter, *Acoustic Absorbers and Diffuser - Theory, Design and Application*, 2ª edição, Taylor & Francis, Londres e Nova Iorque, 2009.

[2] ISO 17497-1:2004, *Acoustics – sound-scattering properties of surfaces. Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room*.

ANEXO A3

Dimensões da Câmara Reverberante



ANEXO A4

Cálculo do Coeficiente de Difusão

[illegible][illegible]

Nota: A tabela apresentada não se apresenta completa pretendendo apenas dar noção da sua constituição.

ANEXO A5.1

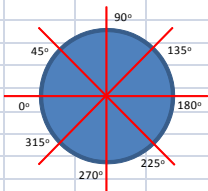
Registo da Temperatura e Humidade Relativa

Medição	Intervalo	Temperatura (°C)	Humidade Relativa (%)
TR referência	-		
T1	-		
T2	-		
T3	0° - 30°		
	40° - 70°		
	80° - 110°		
	120° - 150°		
	160° - 190°		
	200° - 230°		
	240° - 270°		
	280° - 310°		
	320° - 350°		
Valor Médio			
T4	0° - 30°		
	40° - 70°		
	80° - 110°		
	120° - 150°		
	160° - 190°		
	200° - 230°		
	240° - 270°		
	280° - 310°		
	320° - 350°		
Valor Médio			

ANEXO A5.2

Determinação de T1

COEFICIENTE ESPALHAMENTO																																							
Intensidade Fonte	100	dB																																					
1F - 1ª Posição Fonte	135	graus (°)																																					
2F - 2ª Posição Fonte	315	graus (°)	TR (s)	Amostra	Rotação																																		
1M - 1ª Posição Micro	0	graus (°)	T1	NÃO	NÃO																																		
2M - 2ª Posição Micro	90	graus (°)	T2	SIM	NÃO																																		
3M - 3ª Posição Micro	180	graus (°)	T3	NÃO	SIM																																		
4M - 4ª Posição Micro	270	graus (°)	T4	SIM	SIM																																		
T1																																							
RESULTADOS																																							
Rotação da Mesa	Frequências (Hz)																																						
	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz	12500 Hz	16000 Hz	20000 Hz															
0°																																							
5°																																							
10°																																							
15°																																							
20°																																							
25°																																							
30°																																							
35°																																							
40°																																							
45°																																							
50°																																							
55°																																							
60°																																							
65°																																							
70°																																							
75°																																							
80°																																							
85°																																							
90°																																							
95°																																							
100°																																							
355°																																							
360°																																							
RESULTADOS																																							
T1 médio por frequência																																							



Inclinação Horizontal sempre a 45°

Nota: A tabela apresentada não se apresenta completa pretendendo apenas dar noção da sua constituição.

ANEXO A5.3

Determinação de T2

COEFICIENTE ESPALHAMENTO																								
Intensidade Fonte	100	dB																						
1F - 1ª Posição Fonte	135	graus (°)																						
2F - 2ª Posição Fonte	315	graus (°)	TR (s)	Amostra	Rotação																			
1M - 1ª Posição Micro	0	graus (°)	T1	NÃO	NÃO																			
2M - 2ª Posição Micro	90	graus (°)	T2	SIM	NÃO																			
3M - 3ª Posição Micro	180	graus (°)	T3	NÃO	SIM																			
4M - 4ª Posição Micro	270	graus (°)	T4	SIM	SIM																			
T2																								
RESULTADOS																								
Rotação da Mesa	Frequências (Hz)																							
	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz	12500 Hz	16000 Hz	20000 Hz
0º																								
5º																								
10º																								
15º																								
20º																								
25º																								
30º																								
35º																								
40º																								
45º																								
50º																								
55º																								
60º																								
65º																								
70º																								
75º																								
80º																								
85º																								
90º																								
95º																								
100º																								
355º																								
360º																								
RESULTADOS																								
T2 médio por frequência																								

Inclinação Horizontal sempre a 45°

Inclinação Horizontal sempre a 45°

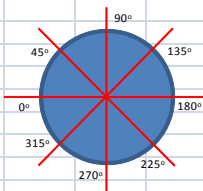
Nota: A tabela apresentada não se apresenta completa pretendendo apenas dar noção da sua constituição.

ANEXO A5.4

Determinação de T3

COEFICIENTE ESPALHAMENTO		
Intensidade Fonte	100	dB
1F - 1ª Posição Fonte	135	graus (°)
2F - 2ª Posição Fonte	315	graus (°)
1M - 1ª Posição Micro	0	graus (°)
2M - 2ª Posição Micro	90	graus (°)
3M - 3ª Posição Micro	180	graus (°)
4M - 4ª Posição Micro	270	graus (°)
T3		

																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													</
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	----



Inclinação Horizontal sempre a 45°

Nota: A tabela apresentada não se apresenta completa pretendendo apenas dar noção da sua constituição.

ANEXO A5.5

Determinação de T4

[illegible]

Inclinação Horizontal sempre a 45°

Nota: A tabela apresentada não se apresenta completa pretendendo apenas dar noção da sua constituição.

ANEXO A5.6

Cálculo do Coeficiente de Espalhamento

[illegible]