



**FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

# **Análise de painéis difusores acústicos em 2D e 3D**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na  
Especialidade de Construções

Autor

**Vitor Gonçalo Gomes Lagoa**

Orientadores

**Luís Manuel Cortesão Godinho**

**Diogo Manuel Rosa Mateus**

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

**Coimbra, Janeiro, 2016**

## **AGRADECIMENTOS**

Ao longo do meu percurso académico, quero agradecer a todos os meus familiares, amigos e colegas que me apoiaram.

Agradecer igualmente aos meus orientadores Luís Godinho e Diogo Mateus, que me ajudaram e foram tão importantes na realização deste trabalho.

Desejo novos e grandes desafios ao longo da minha vida.

## RESUMO

O estudo do condicionamento acústico interior, de um espaço fechado, depende sobretudo da geometria do espaço, do tipo de revestimentos interiores e do recheio (mobiliário e ocupação), e visa a obtenção de um ambiente acústico adequado ao seu volume e às suas funções e/ou o controlo de ruído no seu interior. Para a generalidade das salas este estudo baseia-se na forma da sala e no equilíbrio entre revestimentos refletores, geralmente lisos (com reflexão especular), e revestimentos de elevada absorção sonora. Contudo, para algumas situações específicas, como acontece por exemplo com algumas salas de espetáculos, salas de música, estúdios de gravação e igrejas, para além destes dois tipos de revestimentos é geralmente relevante a introdução de revestimentos refletores irregulares de elevada dispersão (difusores acústicos). Para este tipo de espaços e para salas de geometria desfavorável, a minimização dos chamados “defeitos acústicos” da sala é conseguida através da aplicação, por vezes exagerada, de materiais de elevada absorção, tornando as salas demasiado absorventes. Com a aplicação de difusores acústicos em locais específicos da sala, em alternativas a uma parte significativa dos materiais de elevada absorção sonora, é possível evitar os referidos “defeitos acústicos”, tornando a sala mais ajustada à sua função (com maior vivacidade).

Neste contexto, pretende-se com o presente trabalho o estudo de painéis difusores acústicos, assente sobretudo em metodologias de análise experimental, nomeadamente através da aplicação da norma ISO 17497-2 e documento AES-4id-2001. Neste trabalho, para além de uma breve revisão do estado da arte, procedeu-se à avaliação de coeficientes de difusão sonora, obtidos através de ensaios experimentais em câmara semi-anecoica, aplicada a difusores acústicos específicos a 2D e 3D.

## ABSTRACT

The study of the interior acoustic conditioning in an enclosed space, depends mainly on the geometry of space, the type of interior cladding and filling (furniture and occupation), and aims to achieve a suitable acoustic environment of their volume and their functions and/or noise control inside. For the majority of rooms this study is based on the shape of the room and the balance between reflective coatings generally flat (with specular reflection), and high sound-absorbing coatings. However, for some specific situations, as for example with some concert halls, music halls, recording studios and churches, in addition to these two types of coatings is usually relevant the introduction of irregular reflectors of high dispersion coatings (acoustic diffuser). For this type of unfavorable geometry spaces and rooms, minimization of so-called "acoustic defects" of the room is achieved by applying sometimes exaggerated, of superabsorbent material, making too absorbent rooms. With the application of acoustic diffusers in specific places in the room, on alternatives to a significant portion of high sound absorption materials, it can avoid these "acoustic defects", making the most suitable room to its function (with greater vividness).

In this context , it is intended with this work the study of acoustic diffuser panels, based mainly on methodologies of experimental analysis, in particular through the application of ISO 17497-2 standard and AES- 4id -2001 document. In this work, as well as a brief review of the state of the art, proceeded to the evaluation of sound diffusion coefficients obtained through experimental trials in semi- anechoic chamber, applied to specific acoustic diffuser 2D and 3D.

## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Enquadramento ao tema .....	1
1.2	Resumo dos Capítulos.....	3
2	Acústica de salas .....	4
2.1	Conceitos Gerais.....	4
2.1.1	Acústica de espaços fechados .....	4
2.1.2	Parâmetros habituais .....	5
2.1.2.1.	Nível da pressão sonora (SPL).....	5
2.1.2.2.	Tempo de Reverberação (Tr).....	6
2.1.2.3.	Coeficiente de difusão (d) .....	6
2.2	Soluções Convinientes de Condicionamento acústico .....	7
2.2.1	Efeito do formato da sala de estudo na acústica.....	7
2.2.2	Tipos de materiais.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.2.3	Localização de materiais difusores .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
3	Utilização de difusores acústicos .....	11
3.1	Normas e Parâmetros .....	11
3.1.1	Normas para determinar o coeficiente de difusão.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
3.1.2	Método de tentar obter diretamente o coeficiente de difusão .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
3.2	Simulação Computacional.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
3.3	Exemplo de Difusão do Som .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
3.3.1	Difusores em formato de pirâmide.....	16
3.3.2	Difusores Semicilíndricos .....	18
3.3.3	Painel de Rotação de 360º .....	19
3.3.4	Difusor ativo .....	20
3.4	Difusores de Schroeder.....	21
3.4.1	Difusores MLS .....	22
3.4.2	Difusores QRD.....	25

---

3.4.2.1.	Difusores unidimensionais QRD .....	25
3.4.2.2.	DIFUSORES BIDIMENSIONAIS QRD .....	31
3.4.3	Difusores PRD .....	33
3.5	Campo Próximo e Campo Afastado .....	34
3.6	Campos Total.....	36
4	Experiência Laboratorial.....	39
4.1	Caraterísticas do local dos ensaios .....	39
4.2	Caraterísticas dos painéis em estudo .....	40
4.2.1	Caraterísticas dos painéis em estudo QRD (2D) .....	40
4.2.2	Caraterísticas dos painéis 3D em estudo .....	43
4.3	Regras laboratoriais a cumprir .....	45
4.4	Processamento dos dados .....	47
4.4.1	Fonte e recetor .....	47
4.4.2	Ensaio a 2D e 3D .....	48
4.5	Determinação da resposta polar .....	52
4.6	Coeficiente de difusão .....	52
4.6.1	Determinação do Coeficiente de difusão normalizado.....	53
5	Apresentação e discussão dos resultados.....	54
5.1	Resultados obtidos .....	54
5.1.1	Resultados obtidos (PAINEIS 2D) .....	54
5.1.2	Resultados obtidos (PAINEIS 3D) .....	57
5.2	Considerações finais e conclusões.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	62
ANEXO A – PAINEL QRD_60.....		1
ANEXO B – PAINEL QRD_30.....		1
ANEXO C – PAINEL QRD_30_2 .....		1
ANEXO D – PAINEL QRD_30_4I.....		1
ANEXO E – PAINEL QRD_30_4D.....		1
ANEXO F – PAINEL P.....		1
ANEXO G – PAINEL CR.....		1
ANEXO H – PAINEL ABR.....		1

---

---

H.1	– Painel a 0º .....	1
H.2	– Painel a 90º.....	1
ANEXO I	– PAINEL MR .....	1
I.1	– Painel a 0º .....	1
I.2	– Painel a 90º.....	1
ANEXO J	– PAINEL PBA .....	1
J.1	– Painel a 0º .....	1
J.2	– Painel a 90º.....	1
ANEXO L	– PAINEL DE SUPERFICIE LISA.....	1

## Índice de Figuras

Figura 2.1 – Representação da escala da pressão sonora em Pascal [Pa] e nível sonoro em Decibel [dB] (RF@). .....	5
Figura 2.2 – Representação do tempo de reverberação (Tadeu et al, 2010).....	6
Figura 2.3 – (Esq.) Simulação da propagação do som nos vários formatos das salas acústicas. (Dir.) Registo das respostas impulsivas das várias salas acústicas .....	8
Figura 3.1 – Medidos balões polares 3D. esquerda 2.5kHz, incidência normal. 1.25kHz; direita, ripas aleatórios , 60º som incidente (Rindel, n.d). .....	12
Figura 3.2 – Parede côncava e difusor otimizado de amplitude modulada (Rindel, n.d) .....	12
Figura 3.3 – Comparação de som disperso em 2 kHz por superfícies côncavas e otimizadas com fonte no eixo e receptor no ponto focal (Rindel, n.d).....	13
Figura 3.4 – Mapa de contorno de coeficiente de difusão de difusores hemisféricos, para um intervalo de 500 Hz a 3150 Hz (Kim et al, 2011) .....	14
Figura 3.5– Difusores projetados usando otimização (Rindel, n.d) .....	16
Figura 3.6– Representação de pirâmides refletoras inseridas na parede.....	17
Figura 3.7– Representação de pirâmides refletoras inseridas no teto do palco Beethoven, Bonn, Alemanha .....	18
Figura 3.8– (Esq) Comparação entre as áreas de cobertura associadas com um refletor plano e a uma superfície convexa de um difusor semicilíndrico. (Dir) Exemplo de um difusor semicilíndrico (Isbert, 1998) .....	19
Figura 3.9 – Prismas de rotação: a) diversas combinações entre os três prismas destinada a alcançar acústica variável. b) prismas comerciais mostrando a face difusora (esquerda) e a face de absorção (direita) (modelo triffusor de RPG Diffusor Systems, Inc, distribuido por Audio Sintesis, S.L.) (Isbert, 1998) .....	20
Figura 3.10 – Exemplo de um difusor ativo (Meireles, et al, 2008). .....	21
Figura 3.11– Níveis de espalhamento de um difusor de Schroeder (Esquerda) e de um difusor Plano (Direito) .....	22
Figura 3.12– Difusores MLS: a) perfil de um difusor com indicação da direção da onda incidente e as direções em que a energia refletida é máxima; b) diagrama de difusão de frequência de projeto (Isbert, 1998). .....	24
Figura 3.13– Diagrama de difusão: a) difusor MLS da figura 2.14, diagrama de difusão de dupla frequência do projeto anterior; b) superfície plana e lisa (Isbert, 1998). .....	24
Figura 3.14– Difusores MLS instalados nas paredes laterais da Sala Pléyel, Paris (França): a) amostra de uma unidade; b) corte longitudinal da sala com a indicação dos difusores (Isbert, 1998). .....	25
Figura 3.15– Difusores unidimensionais QRD (Isbert, 1998).....	26

Figura 3.16– Difusão produzida por um difusor unidimensional QRD de uma onda sonora incidente com um ângulo de 45° em relação à superfície (Isbert, 1998). .....	26
Figura 3.17– Perfis de 3 difusores unidimensionais QRD para: a) N=7; b) N=19; c) N=43 (Isbert, 1998). 27	
Figura 3.18– Diagrama de difusão correspondente a um difusor unidimensional QRD de um período com N=23 (Isbert, 1998).....	28
Figura 3.19– Respostas Polares de difusores QRD (N=7) a 3000 Hz para diferentes períodos. Esquerda: 1 período; Meio: 6 períodos; Direita: 50 períodos. ....	30
Figura 3.20– Vista do palco Joseph Meyerhoff Symphony Hall, Baltimore (USA), com difusores unidimensionais QRD instalados na região periférica da mesma e detalhe de três conjuntos de difusores.....	31
Figura 3.21– Exemplo de difusor bidimensional QRD (Isbert, 1998) .....	31
Figura 3.22– Difusão produzida por u difusor bidimensional QRD de uma onda sonora incidente com um ângulo de 45° em relação à superfície (Isbert, 1998). .....	32
Figura 3.23– Perfil de um difusor PRD com g=2 e p=11 (2 períodos) (Isbert, 1998) .....	33
Figura 3.24– Diagrama de difusão correspondente a um difusor PRD (incidência normal) (Isbert, 1998) .....	34
Figura 3.25 – Resposta polar de um painel plano quadrado com várias distâncias entre fonte-recetor 35	
Figura 3.26– Resposta temporal para uma reflexão especular associada a um refletor plano (esq.) e uma reflexão difusa (dir.) (Meireles, et al, 2008). .....	37
Figura 3.27 – 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. ....	38
Figura 3.28– Resposta espaciais e temporais para uma superfície difusora (AES-4id-2001, 2001). ....	38
Figura 4.1 – Local do ensaio .....	39
Figura 4.2– Representação das medições e localização dos aparelhos na sala acústica .....	40
Figura 4.3 – Introdução do microfone ao longo do ensaio (Microfone 1: 50° ; Microfone 2: 60°).....	40
Figura 4.4 – Painel QRD_60 .....	41
Figura 4.5 – Representação das medições em centímetros dos poços do QRD_60 <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
Figura 4.6– Painel QRD_60 (Esq) e QRD_30 (Dir) .....	41
Figura 4.7 – Representação das medições em centímetros dos poços do QRD_30 <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
Figura 4.8 – Painel QRD_30_2l .....	42

---

Figura 4.9 – Painel QRD_60 (Esq.) e Painel QRD_30_4I (Dir.) .....	42
Figura 4.10 – Painel QRD_30_4D .....	42
Figura 4.11 – Painel P .....	42
Figura 4.12 – Painel CR.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figura 4.13– Painel ABR (0º) e Painel ABR (90º).....	43
Figura 4.14 – Painel PBA (0º) e Painel PBA (90º) .....	43
Figura 4.15 – Painel MR (0º) e Painel MR (90º).....	43
Figura 4.16 – Dimensões em centímetros do Painel MR (0º).....	44
Figura 4.17 – Painel de Superfície Lisa .....	44
Figura 4.18 – Painel ABR (Esq.) e Painel PBA (Dir.) .....	44
Figura 4.19 – Painel ABR (Esq.) e Painel PBA (Dir.) .....	45
Figura 4.20– Painel ABR (Esq.) e Painel PBA (Dir.).....	45
Figura 4.21 – Representação da zona especular .....	46
Figura 4.22 – Respostas polares para um difusor 1D (esquerda) e 2D (direita) (Meireles, et al, 2008)	48
Figura 4.23 – Goniometro, para medições de 2 dimensões (esq) e 3 dimensões (dir) (AES-4id-2001,2001). .....	49
Figura 4.24 – Etapas do processo de procedimento de determinação dos impulsos de resposta fonte-receptor relativos a um produto difusor.....	50
Figura 4.25 – Etapas do processo de procedimento de determinação do coeficiente de difusão .....	51
Figura 5.1 – Coeficiente de difusão para os cinco ensaios realizados para o QRD_60 .....	54
Figura 5.2 – Coeficiente de difusão para QRD_30 e o QRD_60.....	55
Figura 5.3 – Coeficiente de difusão para os módulos de escala 1:2 realizados.....	56
Figura 5.4 – Coeficiente de difusão para o QRD_30 e os painéis de superfície, à escala 1:2.....	57
Figura 5.5 – Coeficiente de difusão dos quatro painéis a 0º em estudo.....	58
Figura 5.6 – Coeficiente de difusão dos quatro painéis a 90º em estudo.....	59
Figura 5.7 – Resposta polar do painel MR em 3D à frequência 2000 H....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figura A.1 – Registo de dados obtidos dos vários microfones .....	A-1
Figura A.2 – Respostas Polares das frequências 125 a 4000 Hz .....	A-2
Figura A.3 – Coeficientes de difusão .....	A-2
Figura B.1 – Respostas Polares das frequências 125 a 4000 Hz .....	B-1
Figura C.1 – Respostas Polares das frequências 125 a 4000 Hz .....	C-1
Figura D.1 – Respostas Polares das frequências 125 a 4000 Hz .....	D-1

---

---

Figura E.1 – Respostas Polares das frequências 125 a 4000 Hz .....	E-1
Figura F.1 – Respostas Polares das frequências 125 a 4000 Hz.....	F-1
Figura G.1 – Respostas Polares das frequências 125 a 4000 Hz .....	G-1
Figura H.1 – Respostas Polares das frequências 125 a 4000 Hz .....	H-1
Figura H.2 – Respostas Polares das frequências 125 a 4000 Hz .....	H-1
Figura I.1 – Respostas Polares das frequências 125 a 4000 Hz .....	I-1
Figura I.2 – Respostas Polares das frequências 125 a 4000 Hz .....	I-1
Figura J.1 – Respostas Polares das frequências 125 a 4000 Hz .....	J-1
Figura J.2 – Respostas Polares das frequências 125 a 4000 Hz .....	J-1
Figura L.1 – Respostas Polares das frequências 125 a 4000 Hz.....	L-1

## Índices de Quadros

Quadro 3.1– Profundidades das diversas reentrâncias para o número primo $N = 7$ .....	27
Quadro 3.2– Sequência bidimensional de resíduos quadráticos bidimensionais $sm, n$ para $N=7$ .....	32
Quadro 3.3– Sequência $sn$ correspondete a $g=3$ e $p=7$ .....	33

## SIGLAS

$c$  – velocidade de propagação do som

$p$  – pressão normal

$\rho$  – massa volúmica

$D_{max}$  – maior dimensão do difusor

$r_1$  – é a distância entre a fonte e o ponto de referência

$r_2$  – é a distância entre o recetor e o ponto de referência

$\lambda$  – comprimento de onda

$f$  – frequência

$c$  – velocidade da onda sonora

$h_1(t)$  – resposta de fundo com difusor

$h_2(t)$  – resposta de fundo sem difusor

$h_3(t)$  – impulso de resposta fonte – recetor

$h_4(t)$  – deconvolução da resposta do difusor

$(L_i)$  – nível de intensidade sonora

## **SIMBOLOGIA**

ISO – International Organization for Standardization

MLS – maximum-length sequences (inglês); Sequência de sinal de máximo comprimento

QRD - Quadratic Residue Diffusers (inglês); difusores residuais quadráticos (português)

PRD ("Primitive-Root Diffusor")

FFT – Fast Fourier Transform (inglês); Rápida Transformada de Fourier (português)

BEM – Border Element Method (inglês); Método de Elementos Fronteira (Português)

FEM – Método Elemento Finito

FDTD – Diferenças finitas no domínio de tempo

RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

RPG - Reflection Fase Grating (inglês)

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Enquadramento ao tema

O som é uma das características que facilita a compreensão e a identificação o que se encontra ao redor. Apesar de fácil identificação, o som apresenta uma profundidade complexa, quanto ao seu comportamento. O comportamento do som na habitação e na área de trabalho, aprofundado nas zonas de atuações musicais, como estúdios, concertos, atuações de orquestras, necessita de uma maior distinção, para identificar sons graves e sons agudos, de um modo claro e transparente. Esta é uma área de estudo, que nos últimos anos tem vindo a ganhar um maior interesse. É necessário aprofundar este assunto, no sentido de melhorar esteticamente (configuração de painéis), assim como melhorar a confortabilidade, ao não presenciar ecos e outros sons fora do espaço onde a pessoa se encontra, evitando assim, o desconforto ocorrido nos vários locais. Outra situação é ajudar o som que provem da fonte sonora, a alcançar um local, onde inicialmente não era audível (zona sombra).

“O som percebido nos vários ambientes não é mais do que uma mistura complexa e heterogénea de ondas sonoras, que se combinam e propagam de infinitos modos.” (Meyers, et al, 2008).

A perceção do som pode acontecer de duas formas:

Pelo som direto em que o som proveniente da fonte é recebida pelo recetor sem nenhum obstáculo pelo caminho. No caso de se encontrar algum obstáculo, o som é refletido na superfície antes de alcançar o recetor, sendo este um som indireto.

A onda sonora contem uma energia que se dissipa ao longo do seu percurso. Ao atingir uma superfície, podem acontecer três situações: ou é absorvida, ou transmitida, ou refletida. Por vezes poderão ocorrer simultaneamente os três fenómenos. Desta forma o uso de painéis, “guia” essa energia, de maneira mais desejada para o espaço em estudo.

Muitas vezes, o condicionamento acústico interior é confundido com isolamento acústico. Este tema é conceptualmente diferente, no que diz respeito ao conjunto de práticas, visando a obtenção de atenuação de transmissão correta do ruído, entre as diferentes áreas. No final do século XIX, especificamente em 1877, o físico Inglês Lord Rayleigh publicou um livro, com o título de “Teoria do Som”, contendo os fundamentos teóricos desta ciência e ainda hoje serve como referência. No entanto, as explicações fornecidas sobre acústica dum espaço, estavam limitados a generalidades dos seguintes tipos:

" Em relação à acústica dos edificios públicos, há vários pontos que permanecem neutros."  
“...muitas vezes torna-se necessário colocar carpetes ou cortinas para absorver o som. Em

alguns casos, a presença de audiência, é suficiente para alcançar o efeito desejado." Não é, portanto surpreendente, que fosse complicado ter um espaço com ótimas condições acústicas, se não havia critérios ou bases para alcançar esse patamar. Um exemplo é o de Charles Garnier, o arquiteto da ópera de Garnier de Paris, que em 1880 fez as seguintes declarações:

"É lamentável que o ruído e eu nunca nos entendemos. Eu tive grande dor por não dominar esta ciência estranha. ... Eu li livros e conversei com especialistas; em nenhum lado encontrei uma luz para me guiar;"

De um modo geral, o estudo da acústica dos edifícios deve passar por uma análise articulada segundo quatro vertentes da acústica: o isolamento a sons aéreos; o isolamento de ruídos de percussão; o condicionamento acústico interior; e a minimização do ruído produzido por equipamentos mecânicos do edifício. O estudo do condicionamento acústico interior, de um espaço fechado, onde se enquadra a presente tese, são geralmente relevantes a geometria do espaço, o tipo de revestimentos interiores e do recheio (mobiliário e ocupação). Este estudo visa a obtenção de um ambiente acústico adequado ao volume e às suas funções do espaço, quando se pretende atingir um elevado nível de conforto acústico, mas também pode permitir um controlo e minimização de ruído no interior desse espaço.

Para alguns espaços específicos com necessidades de elevado conforto acústico interior, garantindo simultaneamente alguma vivacidade (pouca absorção sonora), como acontece, por exemplo, em salas de espetáculos, salas de música, estúdios de gravação e igrejas, são variáveis relevantes a forma do espaço e as características de absorção, de reflexão e de difusão sonora dos elementos da envolvente e do recheio do espaço. É geralmente necessário estabelecer um equilíbrio entre materiais de elevada absorção sonora e materiais refletores, não só os constituídos por superfícies lisas (com reflexões especulares) como os constituídos por superfícies irregulares de elevada dispersão (difusores acústicos). O desempenho destes difusores acústicos pode ser avaliado a partir da análise dos coeficientes de difusão sonora.

Uma das pessoas que deu um grande passo na criação de um painel difusor foi Manfred Schroeder, que ajudou bastante a progredir nesta área. Nos seus painéis encontram-se “poços” de igual largura ao longo do painel, mas que dão para modificar a profundidade dos vários “poços”, melhorando o comportamento de difusão.

Este trabalho vai focar-se no estudo da difusão acústica do som, onde se quer estudar o coeficiente de difusão, que mede a uniformidade com que o som é refletido no painel.

## **1.2. Resumo dos Capítulos**

No capítulo 2 são abordados conceitos, parâmetros e algumas soluções convenientes quanto ao estudo da difusão.

No capítulo 3 são apresentados alguns exemplos de difusores já ensaiados. Com esses exemplos procura-se entender o comportamento do som e das capacidades dos difusores.

No capítulo 4 vai falar-se com maior detalhe das características laboratoriais a serem cumpridas pelo ISO 17497-2, para a realização dos vários difusores utilizados e estudados.

No capítulo 5 apresentam-se os resultados dos difusores estudados e as conclusões a que se chega relativamente ao trabalho experimental realizado.

## **2. Acústica de salas**

### **2.1. Conceitos Gerais**

#### **2.1.1. Acústica de espaços fechados**

Na análise acústica de um edifício normalmente são estudadas três situações.

Uma delas é o estudo da propagação do som que passa de uma sala para a seguinte em onde o som, no seu percurso, se depara com o isolamento acústico presente na parede divisória. Outra é a propagação do som no interior da sala em estudo, em que são feitas correções acústicas. E por último o estudo da propagação do som por percussão (ESTT@). Neste trabalho apenas é realizado o estudo da propagação do som no interior do espaço fechado.

O estudo das condições acústicas de um espaço fechado tem como objetivo a obtenção de um ambiente sonoro agradável e/ou redução dos níveis de ruído. Normalmente para a obtenção de um ambiente sonoro agradável algumas das seguintes medidas apresentadas podem ajudar a atingir esse objetivo (Silva e Carvalho, 2013):

O ajustamento da duração do tempo de reverberação dos recintos à sua utilização;

Uma adequada distribuição do som no interior dos vários espaços fechados (sem grandes variações nos níveis sonoros);

A inteligibilidade dos sons no interior de cada espaço, que pode ser melhorada caso se elimine as hipóteses de ecos múltiplos;

A redução da coloração sonora;

A diminuição das reflexões especulares.

## 2.1.2. Parâmetros habituais

### 2.1.2.1. Nível da pressão sonora (SPL)

Para expressar a magnitude do campo sonoro ( $\lambda$ ), é estudada a pressão sonora. A gama de pressões sonoras a que o ouvido humano é sensível é muito alargada, tornando-se portanto pouco prática quando utilizada na sua unidade Pascal (Pa). Por esta razão se converte a escala linear de pressão sonora Pascal (Pa), numa escala logarítmica de nível de pressão sonora em decibel (dB), sendo a unidade decibel utilizada para medir fisicamente os níveis sonoros.

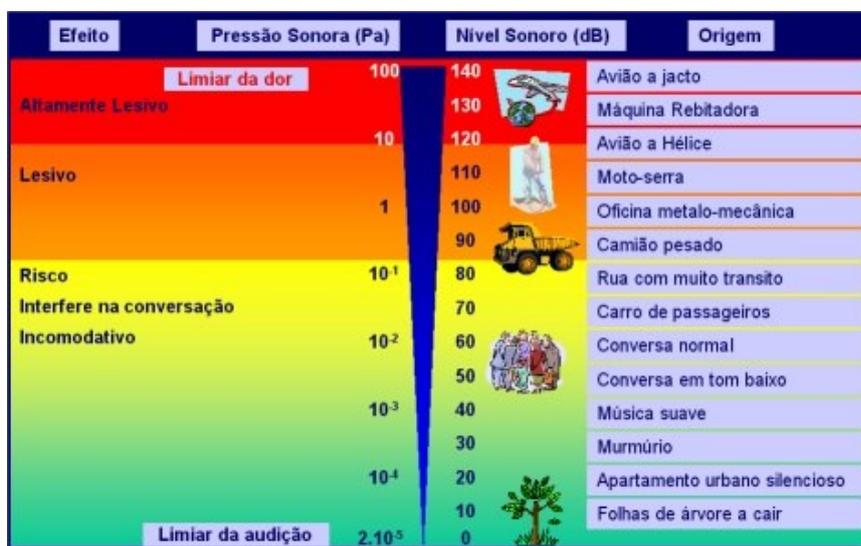


Figura 2.1 – Representação da escala da pressão sonora em Pascal [Pa] e nível sonoro em Decibel [dB] (RF@).

Para se trabalhar com níveis de pressão relacionamos a sua frequência e a sua amplitude. A utilização dos limiares auditivos tem como objetivo que todos os sons audíveis sejam representados. O som, portanto, está ligado aos valores de diferença de pressão do ar, por isso, medimos a amplitude de um som em unidades de pressão.

$$L = 20 * \log\left(\frac{p}{p_0}\right) [dB] \quad (\text{Eq.2.1})$$

$p$  – pressão sonora [Pa]

$p_0$  – pressão sonora de referência  $2 \times 10^{-5}$  [Pa]

$L$  - nível de pressão [dB]

### 2.1.2.2. Tempo de Reverberação ( $T_r$ )

O tempo de reverberação é o parâmetro mais utilizado na avaliação da qualidade acústica em salas fechadas. Sendo o tempo de reverberação um parâmetro simples e direto na sua determinação (Silva e Carvalho, 2013).

No espaço em estudo a fonte sonora, em funcionamento, cria ondas sonoras que podem ser de origem direta ou refletida. As ondas diretas atingem o recetor sem obstáculos no seu caminho desde a fonte sonora. Os sons refletidos atingem o ouvinte, após reflexões (única ou múltiplas) em superfícies existentes na sala. A onda direta é acompanhada de ondas refletidas que chegam sucessivamente ao ouvido do recetor. Ao longo do tempo as ondas chegam ao recetor mais fracas devido ao contacto com outras superfícies e objetos no seu percurso, o som pode ser refletido ou absorvido. No seu trajeto parte da sua energia também se perde pelo efeito da absorção do ar. (Silva e Carvalho, 2013)

Desde a partida do som da fonte sonora, este passa por várias reflexões, chegando a desaparecer por completo. Esse intervalo de tempo (em segundos), identifica-se como o tempo de reverberação ( $T_r$ ). Normalmente considera-se o tempo que demora ao nível de pressão sonora, a diminuir 60 dB, após a paragem instantânea da fonte sonora. (Silva e Carvalho (2013)

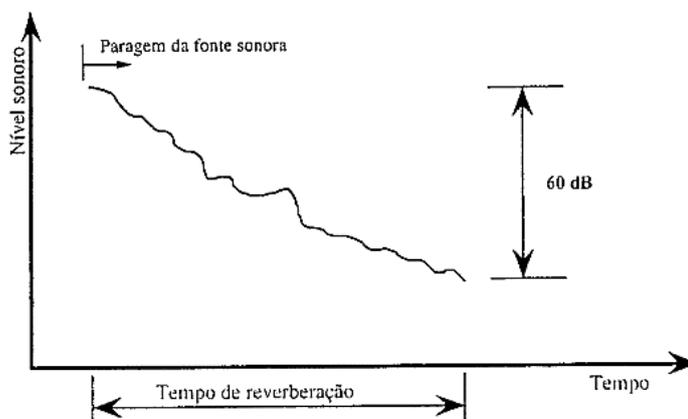


Figura 2.2 – Representação do tempo de reverberação (Tadeu et al, 2010)

### 2.1.2.3. Coeficiente de difusão (d)

Na avaliação e quantificação do desempenho do difusor presente são realizadas medições para conhecer o seu desempenho. Os difusores são avaliados por coeficientes definidos pela comunidade internacional, que permitem conhecer o desempenho das superfícies difusoras: o coeficiente de difusão (d) e o coeficiente de dispersão (s). Sendo que neste trabalho só se realizaram estudos do coeficiente de difusão. A metodologia da determinação do coeficiente

em estudo está definida na norma AES 4id-2001, que se refere à caracterização e medição da uniformidade da difusão, provocada por uma superfície e na norma internacional ISO 17497-2. Será apresentado com detalhe a fórmula e os parâmetros necessários para a sua obtenção no capítulo 3.

## **2.2. Condicionamento Acústico Interior**

### **2.2.1. Efeito da forma da sala**

O autor (Bistafa, n.d) mostra na figura 2.3 (Esq.), exemplos de formatos diferentes de uma sala acústica (retangular, leque e elíptica), com a mesma área de  $518 \text{ m}^2$  e sem tratamento de difusão, simulando a propagação sonora bidimensional, numericamente, pelo método das diferenças finitas, equações diferenciais da continuidade e da quantidade de movimento em duas dimensões.

Na figura 2.3 (Esq.), as circunferências a preto localizam a fonte e a branco o recetor, na sala acústica. Ao comparar-se a propagação das ondas nas várias salas, apresentam-se comportamentos bem diferentes entre elas. Na sala retangular, o número de ondas sonoras aumenta ao longo do tempo, enquanto na sala em leque e elíptica, há uma tendência à concentração e ao desenvolvimento de ondas “defeituosas”. Na sala elíptica, encontram-se as ondas mais focadas na fonte e depois no recetor, alternado ao longo da simulação.

A figura 2.3 (Dir.) apresenta as respostas impulsivas no recetor, antes do tratamento da difusão. Enquanto que na sala retangular as reflexões são densas e com decaimento, nas salas elípticas e de leque as reflexões são dispersas e alternadas. Após a adição do material difusor, em todas as salas as respostas impulsas apresentam um comportamento denso e suave.

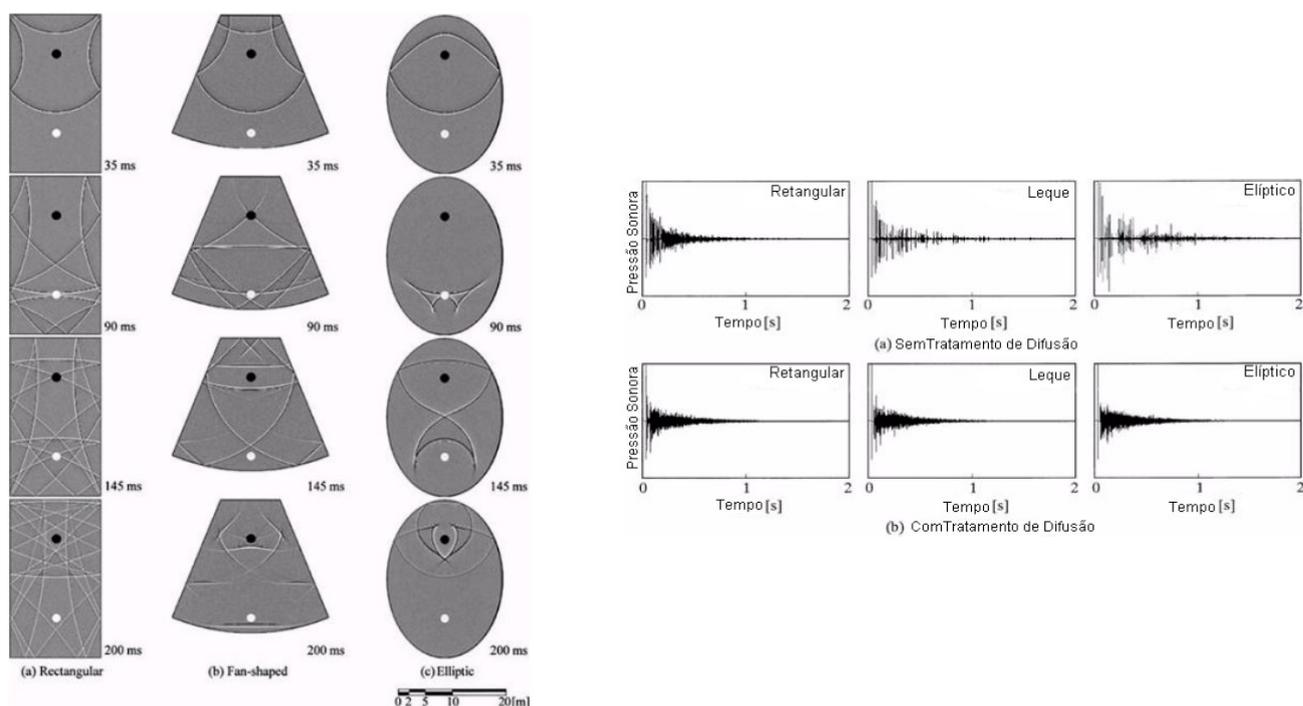


Figura 2.3 – (Esq.) Simulação da propagação do som nos vários formatos das salas acústicas. (Dir.) Registo das respostas impulsivas das várias salas acústicas

### 2.2.2. Materiais absorventes

A escolha do material depende de alguns fatores, tais como a aparência visual, o peso e a absorção acústica. Hoje em dia os efeitos ambientais, têm uma relevância adicional na escolha dum material adequado.

Todos os materiais absorvem uma certa quantidade de energia sonora, tendo uns maior absorção que outros. Os de maior absorção são os materiais porosos ou fibrosos (mais eficazes para altas frequências 1600 Hz a 6400 Hz), membranas (mais eficaz nas baixas frequências 100 Hz a 400 Hz) e os ressoadores (mais eficaz nas médias frequências). (Tadeu et al, 2010)

Nos materiais porosos a absorção ocorre nos orifícios do material, e o ar que se encontra em contato neles, propaga a energia da onda sonora, que vai ser transformada em energia de calor.

Os materiais ressoadores são constituídos de um painel perfurado, que está afastado da parede ou pavimento, onde vai ser instalado. A onda ao entrar no orifício do ressoador, caso a frequência da onda seja semelhante à do ressoador, inicia-se um movimento de oscilação, em que parte da energia sonora incidente é dissipada.

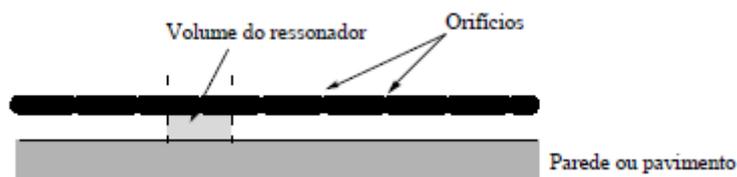


Figura 2.4 – Exemplo de um ressonador (Tadeu et al, 2010)

A membrana é constituída por uma placa flexível, afastada da parede com o auxílio de apoios que os separa. A absorção do som acontece com o movimento da membrana (placa), que ao incidir na placa, provoca o movimento vibratório que dissipa a energia sonora. A energia sonora será transformada em energia cinética, que vai ser dissipada devido aos apoios e ao atrito presente entre a base e a placa.

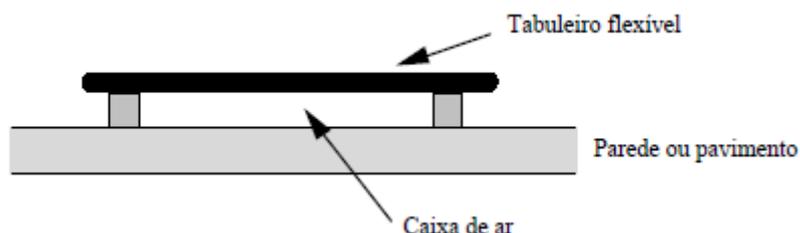


Figura 2.5 – Exemplo de uma membrana (Tadeu et al, 2010)

Outra possibilidade é usar materiais mistos absorventes, que serão uma “fusão” com os materiais falados anteriormente, de modo a que este material tenha um alcance que abranja um maior número de frequências em estudo. Ressonadores agrupados em que são utilizados diferentes ressonadores, com absorção para diferentes frequências, estes aumentam o coeficiente de absorção. Outra hipótese é usar o material poroso a funcionar como uma membrana, ou uma placa com orifícios a servir de membrana. Outro exemplo é uma placa com orifícios que serve de membrana.

### 2.2.3. Materiais refletores

Como regra geral, os materiais absorventes estão colocados nas partes superiores das paredes e no teto. Todas as outras superfícies devem ser cobertas com material refletor, tipo madeira ou gesso cartonado, perfeitamente aderente ao mesmo. Às vezes pode ser suficiente utilizar como acabamento, gesso ou material semelhante.

Os materiais difusores podem encontrar-se em vários locais da sala, quer preenchendo completamente uma área da parede ou simplesmente parte dela. Ou preencher a sala por completo em todas as paredes e teto. Alguns exemplos estão descritos ao longo do capítulo 3, apresentando tipos diferentes de formatos e materiais, em vários espaços fechados.

### 3. Difusores acústicos

#### 3.1. Normas e Parâmetros

Um dos desafios numa sala acústica é desenvolver superfícies difusoras, que complementam a arquitetura contemporânea. Na arquitetura clássica este aspeto era solucionado através de estátuas, colunas e relevo da ornamentação.

Um elemento-chave para permitir a compreensão do desenho do difusor é o coeficiente de difusão, para permitir a avaliação de espalhamento superficial. Os coeficientes de difusão desenvolvidos facilitaram o projeto através de otimização numérica. Isso permitiu que a paleta de superfícies com desempenhos acústicos definidos possam ser expandidos.

O coeficiente de difusão é uma medida da uniformidade no campo livre, espalhada na distribuição polar. As respostas polares podem ser facilmente medidas, utilizando técnicas de MLS ou prevista, utilizando métodos de elementos de contorno. Uma abordagem de auto correlação testa a similaridade espacial das distribuições polares. Esta abordagem de auto correlação é resumida numa equação simples, que permite que o coeficiente de difusão seja facilmente calculado (Rindel, n.d).

O método publicado num documento de informação padrão, Audio Engineering Society AES-4ID-2001 ou se preferir a norma ISO 17497-2, resume as conclusões do grupo de trabalho.

As superfícies de teste são avaliadas em termos da sua capacidade de dispersar a energia do som, de maneira uniforme, ao longo de uma resposta polar, quer seja medida num único plano, ou ao longo de um hemisfério inteiro.

Assume-se que uma difusão completa ocorre, quando todas as posições de medições da resposta polar recebem a mesma energia dispersa.

A figura 3.1 apresenta exemplos de balões polares medidos, e mostra que o painel horizontal é o ideal para difundir o som refletido.

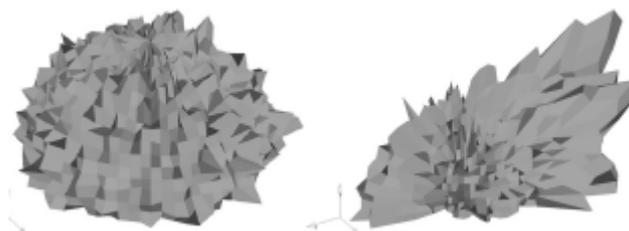


Figura 3.1 – Medidos balões polares 3D. esquerda 2.5kHz, incidência normal. 1.25kHz; direita, ripas aleatórios, 60° som incidente (Rindel, n.d).

A pesquisa por Cox e D' Antonio produziu métodos de previsão precisos, para dispersar a partir de difusores com base em métodos de elementos de contorno (BEM) (Cox e D'Antonio, 2009). De tal forma que habilitou o projeto do difusor, rompeu com as restrições de difusores de Schroeder, para fornecer uma maior variedade de profundidades e curvas no difusor (Rindel, n.d). Usando técnicas numéricas e de otimização e métodos de previsão, um arquiteto ou projetista pode selecionar uma forma adaptada, de modo que o difusor proporcione a difusão necessária.

A otimização da forma em curva foi usada para minimizar a focalização pela parede côncava usando uma geometria baseado numa onda modulada da amplitude. A parede côncava e a curva otimizada estão apresentados na Figura 3.2. A comparação entre a dispersão do som pelas superfícies otimizadas é mostrado na Figura 3.3.

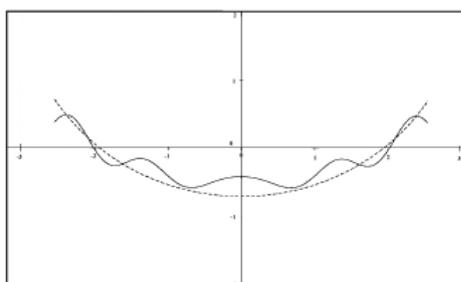


Figura 3.2 – Parede côncava e difusor otimizado de amplitude modulada (Rindel, n.d)

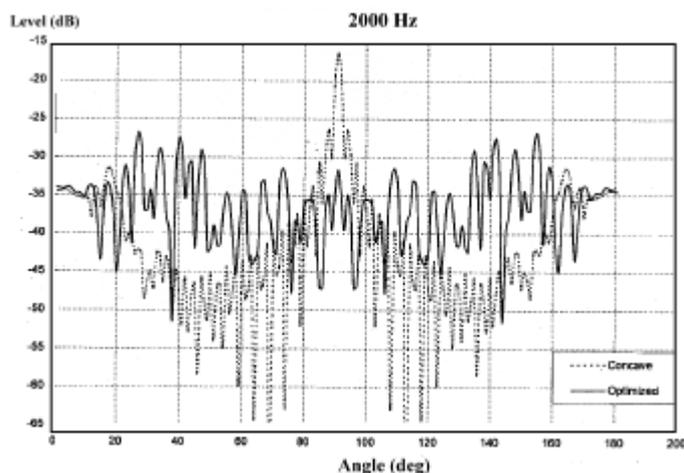


Figura 3.3 – Comparação de som disperso em 2 kHz por superfícies côncavas e otimizadas com fonte no eixo e receptor no ponto focal (Rindel, n.d)

(Kim et al, 2011) estudaram o coeficiente de difusão de um perfil difusor 3D (hemisférico). No seu estudo o coeficiente de difusão foi pouco sensível quanto à altura estrutural. Foram quantificadas as características difusoras, em condições laboratoriais, o coeficiente de difusão, para avaliar a uniformidade da primeira reflexão.

Considerando que o coeficiente de difusão quantifica as reflexões 2D, a partir da autocorrelação da função das respostas polares, das primeiras reflexões numa câmara anecoica, realizaram investigações sistemáticas, para determinar o projeto difusor ideal para uma sala de concerto, usando difusores hemisféricos e cúbicos. Avaliaram o coeficiente de difusão, para esclarecer os usos de cada medida para o projeto do difusor. Embora os métodos de medição para ambos os coeficientes fossem padronizados, ainda há uma falta de conhecimento sobre as características reais da difusão.

A *coverage density* é definida como a relação entre a área da base da parte ondulada por unidade de área da base do painel.

Nesse estudo, o coeficiente de difusão de perfis difusores com várias alturas estruturais e densidades de abrangência, foram medidas para caracterizar o desempenho de difusão. Os resultados das medições são apresentados como materiais de referência acústica para a comunidade. Designadas diretrizes de coeficiente de difusão para casos de difusor hemisférico também são sugeridas.

A figura 3.4 mostra a comparação sistemática com a altura do difusor e a *coverage density* no coeficiente de difusão. O mapa de contorno foi criado utilizando os resultados de medição e o método gridding Kringing. A figura 3.4 sugere uma abordagem para estimar o coeficiente de difusão dos difusores hemisféricos, usando a altura estrutural e a *coverage density* sem medição. O coeficiente de difusão dos difusores hemisféricos, tende a ser aumentada por ambos, tanto pela altura estrutural e *coverage density*, mas a sua variação foi relativamente pequena.

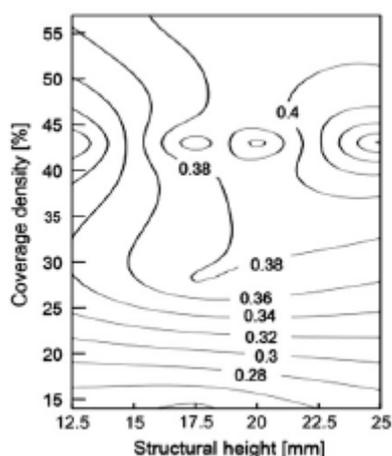


Figura 3.4 – Mapa de contorno de coeficiente de difusão de difusores hemisféricos, para um intervalo de 500 Hz a 3150 Hz (Kim et al, 2011)

Uma vez que geralmente se quer alcançar alta dispersão sem absorção, para os difusores hemisféricos examinados neste estudo, a altura estrutural dos difusores é mais importante que a *coverage density*, devido às características de absorção dos difusores.

No entanto, a seleção de altura e densidade deve ser investigada com cuidado, pois a *coverage density* determina a quantidade de dispersão. No futuro, muitos tipos de difusores devem ser medidos e estimados, para a aplicação prática do projeto do difusor.

### 3.2. Avaliação da difusão acústica

Pelo **método experimental** o desempenho dos difusores acústicos podem ser avaliados de duas formas:

Pelo coeficiente de dispersão em que indica a relação entre a energia total refletida e a energia sonora dispersa de uma forma não especular e pelo coeficiente de dispersão em que mede a uniformidade do som refletido. Para o estudo experimental apenas se determinou o coeficiente de dispersão.

Pelos **cálculos numéricos** o difusor pode ser determinado de várias maneiras:

BEM – Método Elementos Fronteira

FEM – Método Elemento Finito

FDTD – Diferenças finitas no domínio de tempo

São estes os métodos de medição necessários para obter as distribuições polares. O método mais direto é a utilização do sistema de sequência máximas de comprimento, e o tempo de propagação para extrair a energia dispersa (Rindel, n.d). As medições num único plano são relativamente simples. As medições em 3D completas são mais complicadas. Alternativamente, modelos de previsão podem ser utilizados, sendo estabelecido que Métodos de Elementos de Fronteira (BEM), dão notável precisão da previsão e apresentam menor tempo computacional.

Dentro dessa filosofia de avaliação, encontram-se alguns dos pontos fracos e fortes do método. O conceito de medir a suavidade da distribuição da energia polar é simples. No entanto, a questão da fase de frente de onda não é considerada. Um único cilindro espacialmente dispersa a energia de forma muito eficiente, mas faz isto sem a fase de dispersão, o que prova que os cilindros não são bons difusores por esta razão. O outro problema é que a distribuição polar deve ser medida num campo distante o que implica um longo caminho, alcançando mais amplamente a superfície cilíndrica.

Uma vez que a distribuição polar é obtida, é reduzida para uma única figura de mérito. Isto é feito usando a função de auto correlação circular, que mede a similaridade espacial na distribuição de energia polar. Um teste exaustivo de muitos tipos diferentes de superfície mostrou que este era o melhor coeficiente disponível. O que poderia ser potencialmente um cálculo de procedimento complexo, felizmente reduz a uma equação simples. O coeficiente de difusão, “d”, é dado por:

$$d = \left( \sum_{i=1}^n E_i \right)^2 / n \sum_{i=1}^n E_i^2 \quad (\text{Eq.3.1})$$

Onde os “E<sub>i</sub>” são os “n” energias na distribuição polar (uma amostragem de área igual é assumida aqui). O “d” é delimitada automaticamente entre “1/n” (reflexão especular) e 1 (difusão uniforme). Uma simples escala pode ser feita para tornar o delimitador entre 0 e 1.

Este coeficiente de difusão também influenciou a conceção de difusores. Muito poucos tipos de superfície têm equações de projeto simples; exceções são difusores Schroeder e alguns arcos côncavos simples. Se estes projetos difusores são visualmente desagradáveis para o arquiteto, surgem problemas em seguida. Por conseguinte, a otimização tem de ser usada para habilitar

um projeto, que é visualmente atraente e que atende aos requisitos acústicos. Dentro da otimização, uma pesquisa iterativa é feita para encontrar o melhor difusor. Por exemplo, é possível para a tarefa de um computador de encontrar uma sequência da profundidade do poço, melhorar o desempenho relativamente à sequência de resíduo quadrático.

Durante o processo de tentativa e erro, o computador prevê respostas polares, a partir da superfície, e, em seguida, reduz essas respostas, para uma única figura de mérito - o parâmetro de custo. Isto não só permite melhores sequências de profundidade a ser obtidas, como também torna possível fazer desenhos ou moldar arbitrariamente.

A única restrição é que a configuração deve ser matematicamente definível com alguns parâmetros de forma, e as respostas polares devem ser previsíveis. A figura 3.5 (esq.) mostra um exemplo de uma superfície curvada otimizada, concebida para reduzir o efeito de focagem de uma parede côncava. Na figura 3.5 (dir.) mostra a cobertura de painéis no teatro também projetados usando a otimização e a auto correlação do coeficiente de difusão.

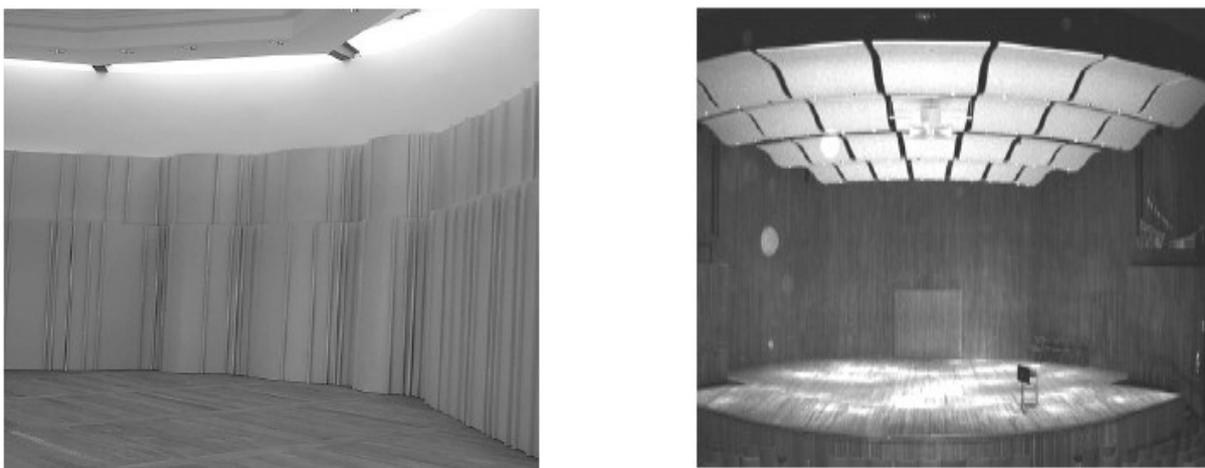


Figura 3.5– Difusores projetados usando otimização (Rindel, n.d)

### **3.3. Difusores sonoros “correntes”**

#### **3.3.1. Difusores em formato de pirâmide**

Um exemplo apresentado por (Isbert, 1998), mostra a difusão do som numa sala é realizada pela colocação de materiais desenhados, com a intenção de dispersar o som de forma uniforme nas várias direções. A difusão também é usada para eliminar certas anomalias que podem aparecer no local, como por exemplo a coloração, deslocamento da fonte de som, ecos. A

presença na parede de ornamentos, nichos, irregularidades e relevos no quarto contribuem para a difusão.

Um exemplo de difusão usado foi a inserção de um conjunto de pirâmides, à base de um material refletor, inserido numa parede como apresentado na figura 3.6.

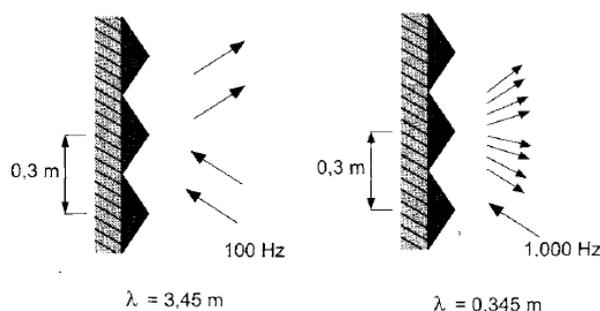


Figura 3.6– Representação de pirâmides refletoras inseridas na parede

Ao observar-se a figura 3.6, é identificado que na frequência de 100 Hz, as reflexões especulares são geradas, isto é, para os fins da onda sonora incidente é como se as pirâmides não existissem. Isto acontece porque o comprimento de onda ( $\lambda=3,45 \text{ m}$ ), é muito maior do que a dimensão máxima de cada pirâmide ( $h=0,3 \text{ m}$ ). Na frequência de 1000 Hz, o grau de difusão é evidente, uma vez que a dimensão máxima de cada pirâmide é da mesma ordem de grandeza que o comprimento de onda ( $\lambda=0,345 \text{ m}$ ).

No entanto, na prática, a energia difundida assim obtida é baixa, devido ao elevado grau de absorção que está presente. Isto significa que, para alcançar o desejado grau de difusão, é geralmente necessário dispor de superfícies difusoras adicionais.

Um exemplo de teto altamente difusor é apresentado, na figura 3.7, correspondendo ao teto na sala Beethovenhalle Bona (Alemanha)



Figura 3.7– Representação de pirâmides refletoras inseridas no teto do palco Beethoven, Bonn, Alemanha

### 3.3.2. Difusores Semicilíndricos

Outro exemplo usado são os difusores semicilíndricos que consistem num conjunto de superfícies lisas, dispostas sequencialmente de forma convexa, com um raio de curvatura inferior a cerca de 5 m, podem chegar a alcançar valores de coeficiente de difusão próximo de 1 ao longo da frequência. Para as superfícies convexas, com um raio de curvatura superior a 5 m, na realidade, atuam como refletoras de som, ou seja, como se fossem superfícies planas, de tal modo que não compensa cobrir uma grande superfície com um único semicilindro. A diferença entre ambas, é que a área de cobertura é maior e, portanto o nível associado com cada reflexão é menor (Isbert, 1998) (Bistafa, n.d).

Sendo o raio de curvatura inferior a 5 m, a área de cobertura aumenta de modo que o som refletido pode não ser centrado sobre a área pública. O refletor torna-se difusor como se demonstra na figura 3.8.

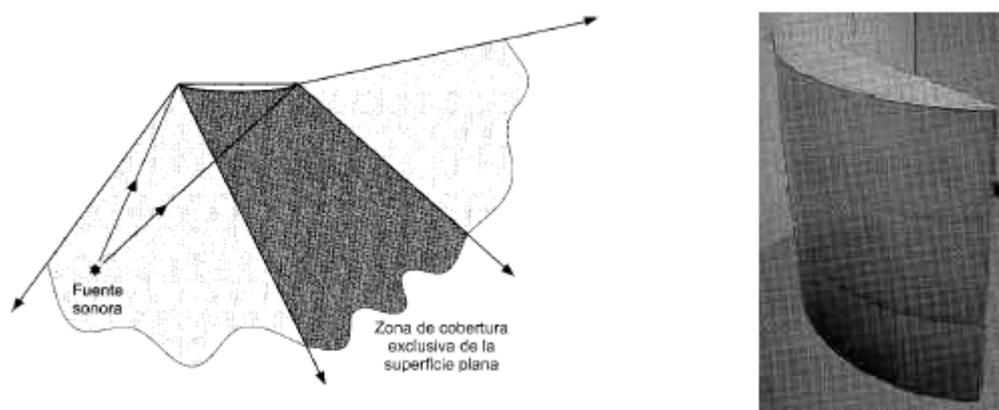


Figura 3.8– (Esq) Comparação entre as áreas de cobertura associadas com um refletor plano e a uma superfície convexa de um difusor semicilíndrico. (Dir) Exemplo de um difusor semicilíndrico (Isbert, 1998)

No caso da superfície cilíndrica, a frente de onda refletida gera uma boa dispersão espacial, mas não se trata do melhor difusor, pois não produz dispersão temporal. Mas no caso dos difusores de Schroeder, para além de gerarem dispersão espacial, também existe dispersão temporal (Bistafa, n.d).

### 3.3.3. Painel de Rotação de 360°

Outra possibilidade são painéis que podem rodar 360 graus sobre o seu eixo. Assim, quando todas as faces refletoras estão alinhadas para o sentido do recinto, a absorção é mínima, ao passo que, quando as faces absorventes estão alinhados, justamente o oposto acontece.

Com base nessa ideia, existem alguns prismas giratórios que têm uma superfície absorvente, uma refletora e uma difusora. Obviamente, a utilização de um conjunto destes elementos, num quarto, confere um elevado grau de versatilidade, uma vez que é possível realizar qualquer combinação entre eles. A figura 3.9 apresenta diferentes combinações entre três dos referidos prismas e dois prismas comerciais.

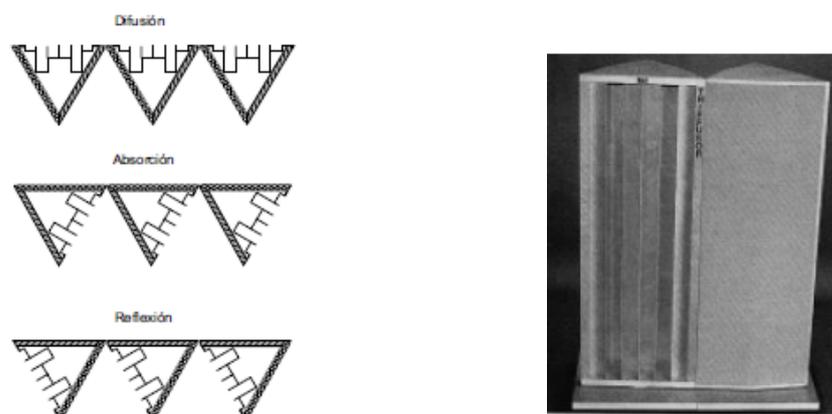


Figura 3.9 – Prismas de rotação: a) diversas combinações entre os três prismas destinada a alcançar acústica variável. b) prismas comerciais mostrando a face difusora (esquerda) e a face de absorção (direita) (modelo trifusor de RPG Diffusor Systems, Inc, distribuído por Audio Sintesis, S.L.) (Isbert, 1998)

Esta ideia foi utilizada por Peutz em 1977 na famosa sala acústica variável “Espace de Projection” pertencente a IRCAM (“Institut de Recherche et de Coordination Acoustique/Musique “), em Paris (França).

#### 3.3.4. Difusor ativo

O controlo de ruído de forma ativa tem levantado muito interesse nos últimos tempos, no entanto, esta tecnologia ainda não está 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 3.10 mostra 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. (Meireles, et al, 2008) (Cox e D'Antonio, 2009).



Figura 3.10 – Exemplo de um difusor ativo (Meireles, et al, 2008).

### 3.4. Difusores de Schroeder

Para além dos difusores falados anteriormente, também se apresentam difusores que são especificamente concebidos para funcionar como superfícies de difusão sólidas, num determinado intervalo de frequências.

Todos eles têm a sua origem na chamada teoria dos números, desenvolvida pelo alemão Manfred R. Schroeder, e são baseados em diferentes sequências matemáticas. Os seus trabalhos pioneiros contribuíram para compreender melhor este fenómeno, modular e dimensionar superfícies difusoras, com propriedades e comportamento conhecidos, permitindo uma adaptação mais personalizada e adequada aos locais em estudo. Difusores de Schroeder podem ser aproximadamente modelados, como superfícies de impedância variável, utilizando uma simples abordagem de Fourier. Tem sido conhecido durante algum tempo que um difusor Schroeder pode fornecer invulgarmente elevada absorção sobre uma larga banda de frequência. Isto é devido às ressonâncias múltiplas e a impedância descontínua da superfície criada, pelas diferentes profundidades dos poços no difusor. Na construção de um difusor de Schroeder, o elemento básico utilizado na construção de RPG ("Reflection Fase Grating"), utilizado em salas de concerto é a madeira (Isbert, 1998); (Rindel, n.d); (Meireles, et al, 2008).

Os tipos de difusores RPG mais relevantes são os seguintes:

Difusores MLS (Maximum-Length Sequences), difusores QRD (Quadratic Residue Diffusers) e Difusores PRD ("Primitive-Root Diffusor")

O RPG 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 3.11 compara a dispersão energética de um difusor plano e de um difusor de Schroeder. A difusão sonora do painel Schroeder é superior ao do painel plano. No primeiro a dispersão energética é conseguida para todas as direções de forma homogênea, tal como se pode ver pela formação dos lobos, e o comportamento que o difusor apresenta tende a seguir uma repetição associada à sequência de reentrâncias usada. No painel plano a reflexão especular é a mais evidente, já que a dispersão energética se dá praticamente segundo uma direção, que se encontra bem focada no ângulo  $0^\circ$  da resposta polar.

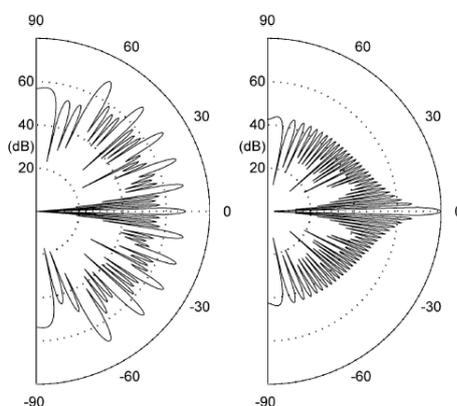


Figura 3.11– Níveis de espalhamento de um difusor de Schroeder (Esquerda) e de um difusor Plano (Direito)

As características de espalhamento sonoro de difusores podem ser atualmente obtidas numérica e experimentalmente.

### 3.4.1. Difusores MLS

Os difusores MLS ("Maximum Length Sequence") são baseados numa sequência pseudoaleatória periódica, chamada de comprimento ou "Galois", que só pode adquirir dois valores diferentes: -1 e +1.

Este elemento difusor aparenta uma superfície dentada. É criado a partir de uma superfície lisa, subdividindo-a em seções de igual largura e com base nas mesmas ranhuras com a mesma profundidade. A cada seção é atribuído um valor de sequência pseudoaleatória, de acordo com o procedimento seguinte (o inverso é igualmente correto):

Se o valor for -1, a seção de superfície correspondente permanece inalterada.

Se o valor for +1, uma ranhura é criada no espaço ocupado pela seção correspondente.

A largura  $W$  de cada seção e profundidade “ $d$ ” de cada compartimento deve afirmar:

$$W = \frac{\lambda}{2} \quad \text{e} \quad d = \frac{\lambda}{4} \quad \text{Eq.3.2 e Eq.3.3}$$

Em que  $\lambda$  é o comprimento de onda correspondente à frequência da onda de concepção do difusor.

Ou o difusor MLS pode ser dimensionado de forma binária (0;1), em que a 0 não se altera a profundidade e em 1 escava-se a profundidade específica. Um exemplo para um período de uma superfície MLS  $N = 7$  poderia ser baseada na sequência de [1, 1, 0, 1, 0, 0, 0] (Perry, 2011).

Na figura 3.12 o perfil de um difusor deste tipo é mostrado, bem como, um diagrama da distribuição de frequência desejado. Pelo diagrama de difusão entende-se a representação da energia refletida pelo difusor, em cada sentido no espaço e a cada frequência de interesse.

A gama de frequências para a qual a difusão é o ideal é apenas da ordem de uma oitava. Esta circunstância pode ser verificada observando-se o diagrama de difusão de dupla frequência da anterior (Figura 3.13a). A reflexão especular é claramente dominante e, portanto, deixa de existir difusão. Sendo o diagrama muito semelhante à da figura 3.13b), correspondente a uma superfície plana e lisa (Isbert, 1998).

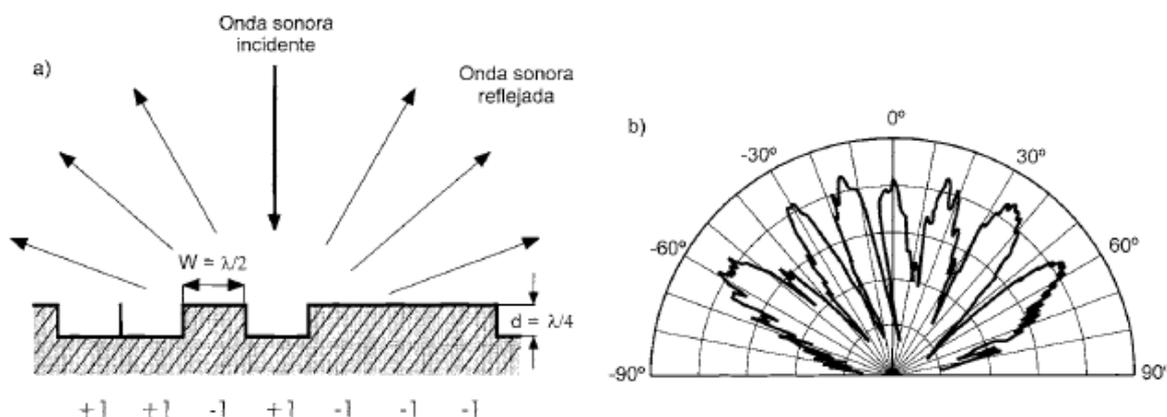


Figura 3.12– Difusores MLS: a) perfil de um difusor com indicação da direção da onda incidente e as direções em que a energia refletida é máxima; b) diagrama de difusão de frequência de projeto (Isbert, 1998).

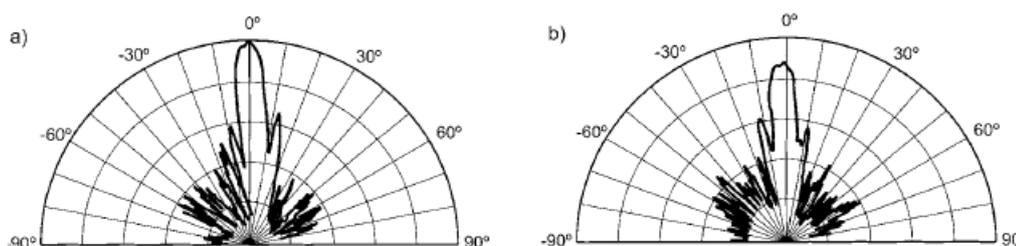


Figura 3.13– Diagrama de difusão: a) difusor MLS da figura 2.14, diagrama de difusão de dupla frequência do projeto anterior; b) superfície plana e lisa (Isbert, 1998).

Este tipo de difusor tem uma menor absorção em baixas frequências que os difusores PRD e QRD. Isto significa que, nas salas de concerto, podem ser usadas numa maior percentagem de superfície, sem implicar uma excessiva diminuição do tempo de reverberação nessas frequências (Isbert, 1998).

Na figura 3.14 mostra um exemplo de difusores MLS inseridos nas paredes laterais do Salle Pleyel, Paris (França)

Na prática, os difusores MLS são pouco utilizados.

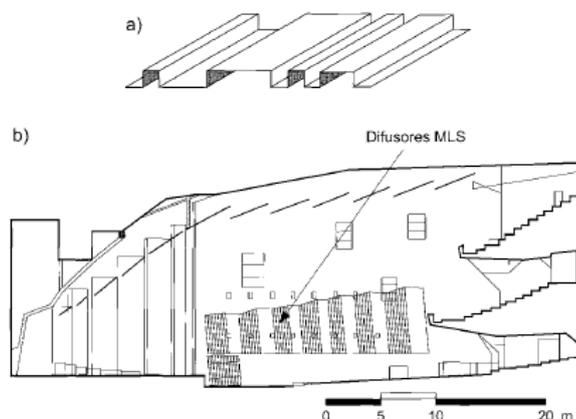


Figura 3.14– Difusores MLS instalados nas paredes laterais da Sala Pléyel, Paris (França): a) amostra de uma unidade; b) corte longitudinal da sala com a indicação dos difusores (Isbert, 1998).

### 3.4.2. Difusores QRD

Existem dois tipos de difusores de resíduo quadrático QRD (“Quadratic Residue Diffusor”): unidimensional e bidimensional.

#### 3.4.2.1. Difusores unidimensionais QRD

Na figura 3.15 encontram-se representados difusores QRD unidimensionais, que são mais utilizados a nível prático, em salas de concertos e estúdios de gravação. Consistem de uma série de faixas retangulares paralelas, de igual largura e de profundidade variável. Geralmente, as referidas ranhuras são separadas por divisórias finas e rígidas. A profundidade de cada ranhura é obtida a partir de uma sequência predeterminada matematicamente, que conduz a estruturas repetitivas (periódicas) que produzem, num determinado intervalo de frequência, uma dispersão ou difusão do som incidente em planos perpendiculares às referidas ranhuras como se vê na figura 3.16.

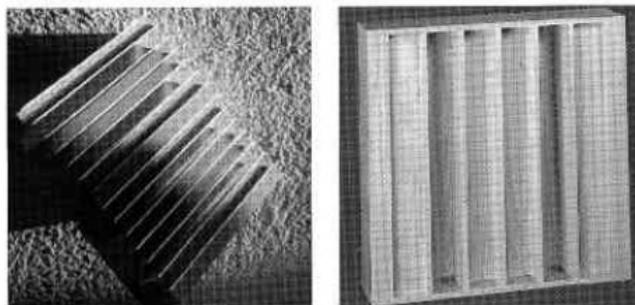


Figura 3.15– Difusores unidimensionais QRD (Isbert, 1998)

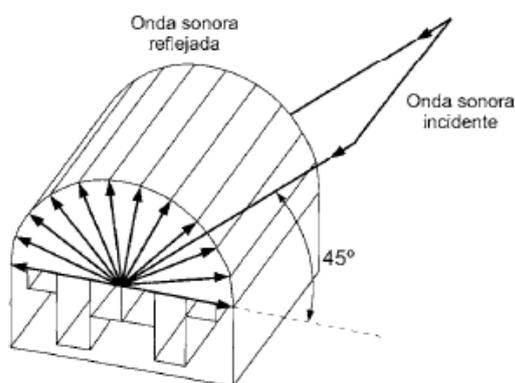


Figura 3.16– Difusão produzida por um difusor unidimensional QRD de uma onda sonora incidente com um ângulo de 45° em relação à superfície (Isbert, 1998).

O número de sequência  $s_n$  obtém-se a partir da seguinte expressão:

$$s_n = n^2 * \text{modulo } N \quad \text{Eq.3.4}$$

N – número primo (3,7,11,...)

n – número inteiro que vai de 0 até N

modulo – representa o resto não negativo, e costuma ser abreviado através da sigla “mod”

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 “modulo7” 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.

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 como demonstrado no quadro 3.1:

n (reentrância)	0	1	2	3	4	5	6	7
$n^2$	0	1	4	9	16	25	36	49
$s_n = n^2 * \text{modulo } N$	0	1	4	2	2	4	1	0

Quadro 3.1– Profundidades das diversas reentrâncias para o número primo  $N=7$

Na figura 3.17, observam-se perfis correspondentes a 1 período de três difusores unidimensionais QRD com  $N=7$ ,  $N=19$ ,  $N=43$ , respetivamente. Pode-se ver que existe simetria dentro de cada período. Os valores do quadro 3.1 apresentam os valores calculados para  $N=7$ , mas seria determinado da mesma maneira para os restantes  $N$ .

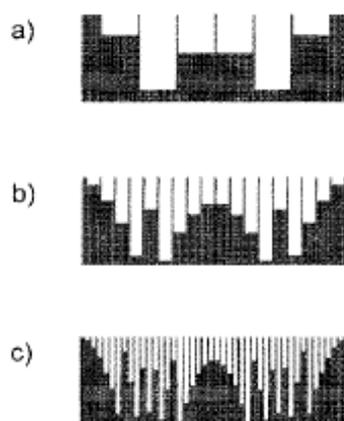


Figura 3.17– Perfis de 3 difusores unidimensionais QRD para: a)  $N=7$ ; b)  $N=19$ ; c)  $N=43$  (Isbert, 1998).

Na figura 3.18 observa-se um diagrama de difusão unidimensional QRD de um período com  $N=23$ . Comparando com a figura 3.12 do diagrama MLS, verifica-se que tem maior número de lóbulos e maior intensidade.

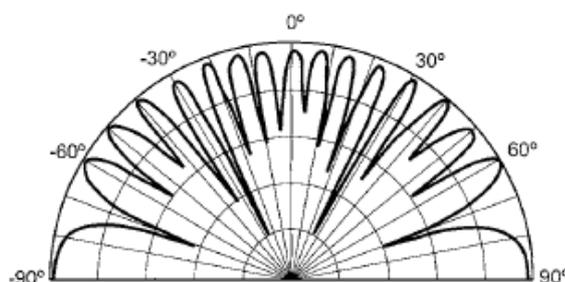


Figura 3.18– Diagrama de difusão correspondente a um difusor unidimensional QRD de um período com  $N=23$  (Isbert, 1998)

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

$$w = \frac{\lambda_{min}}{2} \quad (\text{Eq.3.5})$$

$w$  é a largura da reentrância

$\lambda_{min}$  é o mínimo comprimento de onda, dado pelo quociente entre a velocidade do som “ $c$ ” e a frequência máxima  $f_{max}$ .

A profundidade das reentrâncias  $d_n$ , pode ser obtido pela equação:

$$d_n = \frac{s_n * \lambda_0}{2 * N} \quad (\text{Eq.3.6})$$

$\lambda_0$  – comprimento de onda

$s_n$  – número de sequência

$N$  – número primo

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. A questão é saber qual o número primo aconselhável a utilizar, a profundidade e largura máxima da ranhura. A ótima difusão do som é conseguida dentro de uma respetiva gama de frequências, que está dependente das dimensões da ranhura (Meireles, et al, 2008).

Para altas frequências os comprimentos de onda associados são pequenos, logo pela expressão  $w = \frac{\lambda_{min}}{2}$  (Eq.3.5), poderia prever-se a necessidade de ter reentrâncias o mais estreito possível.

No entanto, esta afirmação não é totalmente válida, devido à questão do custo de produção e a absorção do painel. Em termos práticos é complicado e caro criar painéis com as ranhuras muito estreitas e próximas umas das outras, o que provoca um aumento da absorção.

No que diz respeito à profundidade das ranhuras, 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,  $d_{max}$ , a frequência a projetar ( $f_0$ ) pode ser obtida da seguinte forma.

$$f_0 = \frac{s_{max}}{N} \times \frac{c}{2d_{max}} \quad (\text{Eq.3.7})$$

$s_{max}$  - maior número da sequência residual quadrática

$c$  - velocidade do som

$N$  – número primo da sequência QRD

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 (Meireles, et al, 2008).

Mas ao exagerar-se na redução da largura e aumento da profundidade, vai existir absorção de som em excesso. O limite significa que a gama de frequências útil do difusor é limitada de três oitavas. Fora desta gama, o difusor tende a comportar-se como uma superfície plana, que conduz a praticamente reflexões especulares.

Outro aspeto a ter em conta é a análise da localização das chamadas frequências críticas, que reduzem a eficácia do painel como difusor.

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 colocá-las acima da frequência máxima de funcionamento do difusor, seguindo a expressão:

$$N > \frac{c}{2wf_0} \quad (\text{Eq.3.8})$$

Nos difusores de Schroeder, a periodicidade é um fator de grande relevância quanto ao seu comportamento. A figura 3.19 demonstra as respostas polares de três difusores ( $N = 7$ ) com diferentes períodos.

A imagem do lado esquerdo da figura 3.19 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. Ao aumentar o número de períodos, os lobos da resposta polar tornam-se mais próximos. De tal maneira que se tem de ponderar no número de períodos a ser utilizado, de modo a garantir a maior eficácia ao nível de difusão sonora. O ideal é utilizar um valor baixo, como por exemplo, cinco períodos, de modo a que os lobos não se encontrem demasiado próximos e apertados.

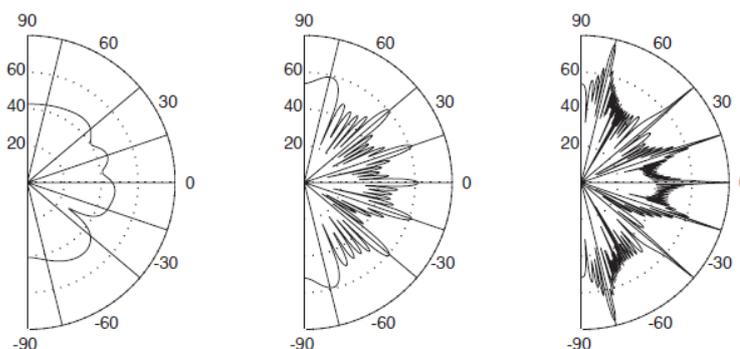


Figura 3.19– Respostas Polares de difusores QRD ( $N=7$ ) a 3000 Hz para diferentes períodos. Esquerda: 1 período; Meio: 6 períodos; Direita: 50 períodos.

Um exemplo prático na figura 3.20 em que os difusores são montados no palco do Joseph Meyerhoff Symphony Hall, em Baltimore (EUA), com o objetivo de melhorar as condições de escuta entre os músicos. Cada conjunto é composto por dois difusores, um inferior e outro superior. O primeiro disposto verticalmente, cria difusão em relação ao plano horizontal, e o segundo, com disposição horizontal, cria difusão no plano vertical.

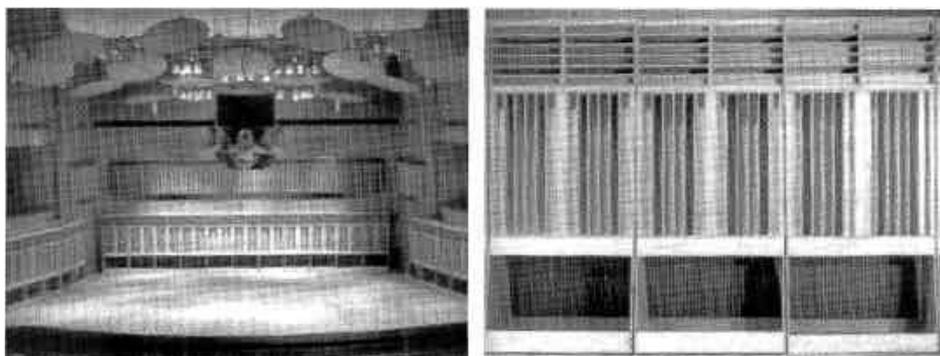


Figura 3.20– Vista do palco Joseph Meyerhoff Symphony Hall, Baltimore (USA), com difusores unidimensionais QRD instalados na região periférica da mesma e detalhe de três conjuntos de difusores.

#### 3.4.2.2. DIFUSORES BIDIMENSIONAIS QRD

Os difusores bidimensionais QRD aparecem como uma generalização do unidimensional, a fim de obter uma melhor difusão do som incidente, em todas as direções do espaço.

Em tais difusores, as ranhuras são substituídos por “furos” dispostos em paralelo, profundidade variável e, por isso, normalmente quadrada, como se apresenta na figura 3.21.

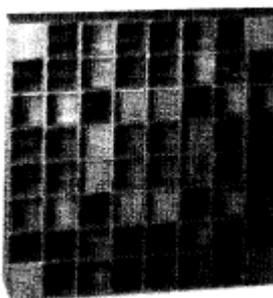


Figura 3.21– Exemplo de difusor bidimensional QRD (Isbert, 1998)

Os ângulos de difusão deixam de indicar a energia máxima refletida no mesmo plano, para indicar direções de energia máxima, localizada numa superfície semiesférica (figura 3.22).

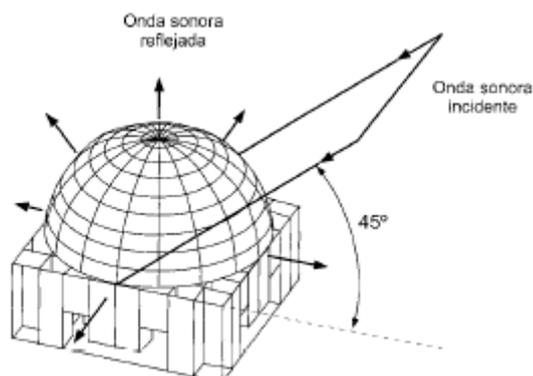


Figura 3.22– Difusão produzida por u difusor bidimensional QRD de uma onda sonora incidente com um ângulo de 45° em relação à superfície (Isbert, 1998).

As expressões utilizadas na conceção dos difusores bidimensionais são os mesmos que usados para os difusores unidimensionais, com a única exceção, de que a sequência adimensional das profundidades das cavidades é obtida a partir da expressão do gerador seguinte:

$$s_{m,n} = (m^2 + n^2) \text{ modulo } N \quad (\text{Eq.3.9})$$

$N$  – número primo (3,7,11,...)

$m$  ;  $n$  – números inteiros que vão desde 0 a ( $N-1$ )

Um exemplo é o quadro 3.2 em que se observa valores de um período da sequência de resíduo quadrático bidimensional, que corresponde a  $N=7$ :

m/n	0	1	2	3	4	5	6
0	0	1	4	2	2	4	1
1	1	2	5	3	3	5	2
2	4	5	1	6	6	1	5
3	2	3	6	4	4	6	3
4	2	3	6	4	4	6	3
5	4	5	1	6	6	1	5
6	1	2	5	3	3	5	2

Quadro 3.2– Sequência bidimensional de resíduo quadrático bidimensional  $s_{m,n}$  para  $N=7$

A profundidade das ranhuras reais é obtida através da multiplicação dos valores de sequência adimensional, pelo mesmo fator, como no caso dos difusores unidimensionais.

### 3.4.3. Difusores PRD

Difusores de raízes primitivas ou PRD ("Primitive-Root Diffusor"), são semelhantes aos difusores unidimensionais QRD, com a única diferença de que a profundidade de cada ranhura é obtida a partir de um gerador de sequências diferente. Essa sequência é obtida a partir da expressão seguinte:

$$s_n = g^n \text{ modulo } p \quad (\text{Eq.3.10})$$

$p$  – número primo (3,7,11,...)

$g$  – raiz primitiva de  $p$

$n$  – número inteiro que vai desde 1 a  $(p-1)$

modulo – operação matemática “modulo”, que retorna o resto da divisão entre  $g^n$  e  $p$

Para que  $g$  seja uma raiz primitiva de  $p$ , requer que o número de diferentes resíduos gerados através do cálculo anterior seja igual a  $p - 1$ .

A sequência resultante é periódica e de período de  $p - 1$ . Por exemplo, no quadro 3.3, identificam-se os valores de um período de sequência obtida para  $g = 3$  e  $p = 7$ .

$n$	1	2	3	4	5	6
$g^n$	3	9	27	81	243	729
$s_n = g^n \text{ mod } 7$	3	2	6	4	5	1

Quadro 3.3– Sequência  $s_n$  correspondente a  $g=3$  e  $p=7$

Na figura 3.23 observa-se o perfil correspondente a dois períodos de um difusor PRD com  $g=2$  e  $p=11$ .

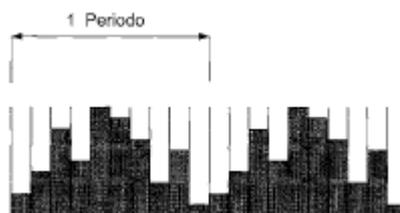


Figura 3.23– Perfil de um difusor PRD com  $g=2$  e  $p=11$  (2 períodos) (Isbert, 1998)

Pode ver-se que, ao contrário do que acontece com os difusores QRD (figura 3.17), não há simetria dentro de cada período.

As propriedades de tais difusores são muito semelhantes aos dos difusores QRD unidimensionais, exceto para o facto de que, a energia associada com reflexão especular é muito baixa.

Por exemplo, a figura 3.24 mostra o diagrama de difusão de um difusor PRD correspondente ao caso de incidência normal (direção perpendicular da superfície incidente do difusor para a onda de som).

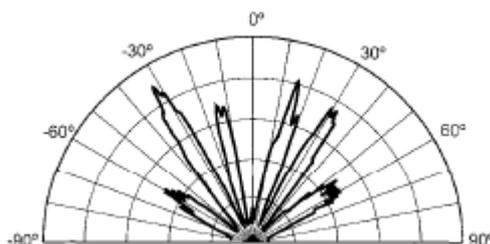


Figura 3.24– Diagrama de difusão correspondente a um difusor PRD (incidência normal) (Isbert, 1998)

Como pode ser visto, a reflexão especular é, de facto, praticamente nula. Ideal para o uso como canceladores de ecos.

Como é o caso com os difusores MLS e difusores bidimensionais QRD, os difusores PRD são pouco utilizados na prática.

### 3.5. Campo Próximo e Campo Afastado

Os valores obtidos das medições das respostas polares é influenciada pela distância presente entre a fonte e o recetor, de tal modo que contribui também para o valor do coeficiente de difusão obtido.

Um campo afastado (do inglês “Far Field”) ocorre 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. De tal modo que a variação da pressão sonora diminui quando aumenta a distância, mas no campo próximo (do inglês “Near Field”) a pressão sonora depende da distância à fonte sonora.

Na figura 3.25 mediu-se a resposta polar de várias distâncias entre o recetor e a fonte omnidirecional, ou seja, uma fonte que emite de igual forma em todas as direções, analisando a quantidade de energia difusa. Para este caso verifica-se, que quanto maior é a proximidade entre fonte e o recetor, maior o grau de difusão, em que no afastamento de 0,1 m ocorre a melhor situação em que difunde a energia em todos os sentidos, de forma semelhante e na intensidade máxima.

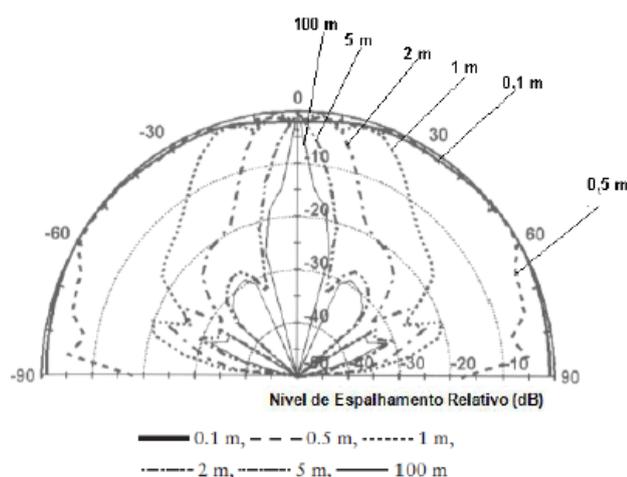


Figura 3.25 – Resposta polar de um painel plano quadrado com várias distâncias entre fonte-recetor

A análise da figura 3.25 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. Mas na realidade a superfície plana não gera dispersão temporal, sendo na realidade um mau difusor (Bistafa, n.d).

Para entender este contrassenso é pois fundamental, perceber os principais problemas que se levantam para superfícies planas. Os painéis de superfície plana não contribuem para uma boa difusão para fontes sonoras unidireccionais. Este tipo de fontes promovem reflexões diretas, segundo o mesmo ângulo de incidência, o que leva à ocorrência de ecos, coloração e deslocamento de imagem (Meireles, et al, 2008).

Como no campo próximo a resposta polar varia com a distância, a hipótese para não ocorrerem estas situações no estudo da difusão é adotar o campo afastado como método de ensaio, mesmo que muitos dos ouvintes não estejam tão longe da fonte. Ao ser usado o campo afastado, os microfones vão ser posicionados dentro da zona de reflexão direta e outros fora dela. Mas na ocorrência dessa distância ser excessiva, a norma AES-4id-2001 recomenda distâncias mais

curtas, desde que 80% dos recetores estejam fora da zona especular do difusor (AES-4id-2001,2001).

Ao usar o campo afastado, a distância da fonte ao recetor deve ser maior do que o comprimento de onda. E a distância entre os recetores e a superfície difusora deve ser menor em relação ao comprimento de onda.

A avaliação da qualidade do difusor é determinada pela quantidade de energia dispersa para o exterior da zona de reflexão direta, sendo 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, o difusor é de baixa qualidade, pois transfere pouca energia para fora da zona de reflexão direta. O oposto acontecerá se, no limite referido, o coeficiente de difusão for elevado.

Outra possibilidade é, a partir de um campo próximo, chegar a um campo afastado, a utilização de holografia acústica ou de modelos numéricos de validação, como alternativas ao processo atrás referido.

Muitas das anomalias que ocorrem nestes espaços devem-se ao facto dos recetores se encontrarem no campo próximo. Estando a fonte e o recetor muito próximos um do outro é provável a ocorrência de 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) (Meireles, et al, 2008).

Estando o difusor próximo do recetor o registo das reflexões diretas não dão tempo suficiente para ocorrer dispersão espacial e temporal. Desta forma o som direto e refletido torna-se similar e a interferência aumenta, sendo necessária a utilização do campo total (em inglês “Total Field”).

### **3.6. Campo Total**

Até aqui, para o campo sonoro próximo e afastado, só foi considerado o campo que se cria associado ao som difuso. O campo total inclui também o som direto, o que corresponde à situação mais próxima do real em qualquer espaço.

É alcançada a distância ideal, quando o recetor do som se situa entre o campo afastado e o próximo encontra uma onda com as frequências combinadas de forma organizada em relação à fonte sonora (Meireles, et al, 2008).

O campo sonoro espalhado pode ser descrito através de uma resposta temporal, espacial e por frequência. A resposta temporal descreve o nível de som refletido em função do tempo de chegada do impulso sonoro, para um dado ângulo de incidência e um dado ângulo de observação. A resposta temporal é também conhecida como resposta impulsiva (Bistafa, n.d). 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 (Meireles, et al, 2008).

A figura 3.26 apresenta a resposta temporal para a reflexão especular associada a um refletor plano (esq.) e uma reflexão difusa (dir). A resposta de frequência é adquirida usando a transformada de Fourier. Na reflexão especular apresenta-se como uma réplica ao som direto. Enquanto na reflexão difusa tem uma duração mais prolongada em relação ao som direto (Bistafa, n.d) (Meireles, et al, 2008).

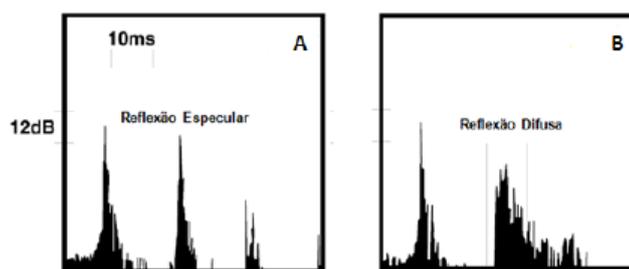


Figura 3.26– Resposta temporal para uma reflexão especular associada a um refletor plano (esq.) e uma reflexão difusa (dir.) (Meireles, et al, 2008).

Na figura 3.27 é possível ver as respostas temporais e por frequência para um campo total. Encontrando-se na zona de cima da figura o som direto mais a reflexão especular e na parte de baixo da figura, o som direto e a reflexão difusa.

Ao combinar o som direto com a reflexão especular, verifica-se que o nível de intensidade sonora é a mesma e o resultado ao nível de frequências é a criação do “comb filter”. Ocorre interferência entre o som direto e as reflexões especulares primárias sendo uma situação não recomendada. Como se pode observar no gráfico das frequências, na reflexão especular, apresenta muitos picos e quedas, numa sequência homogénea, em que as quedas indicam situações onde dois sinais se anulam.

Para o som direto combinado com uma reflexão difusa, a resposta temporal é mais prolongada no tempo, e a resposta por frequência caracteriza-se por uma sucessão irregular de picos e

quedas; é mais reduzida apresentando níveis de resposta minimizada, pois o difusor vai atrasar a chegada das primeiras reflexões, não interferindo com o som direto, sendo uma das razões do interesse do uso de difusores (Bistafa, n.d) (Meireles, et al, 2008).

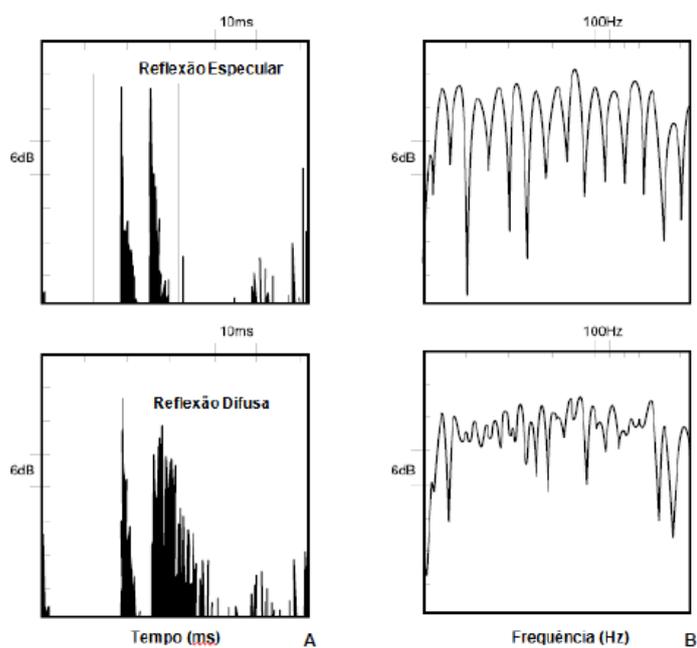


Figura 3.27 – Resposta temporal (A) e por frequência (B) para o campo total. Em cima som direto mais reflexão especular. Em baixo som direto mais reflexão difusa.

Na figura 3.28 pode ser vista a resposta temporal e espacial para superfícies com características de uma superfície difusora. Na resposta espacial do difusor o som é distribuído uniformemente nas várias direções.

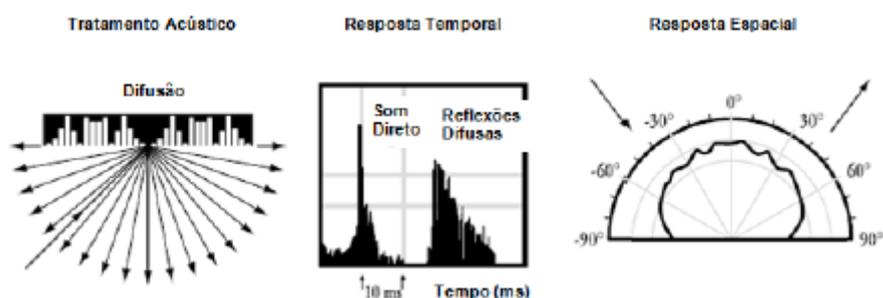


Figura 3.28– Resposta espaciais e temporais para uma superfície difusora (AES-4id-2001, 2001).

## 4. Ensaio Laboratoriais

### 4.1. Caraterísticas do local dos ensaios

Os ensaios em questão foram realizados na Faculdade Científica Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC), num espaço  $4,20 \times 3,50 \times 2,35 \text{ m}^3$  como caraterística semi anecóica low cost. Apresenta painéis absorventes nas quatro paredes e no teto, com um coeficiente de reflexão sonora não superior a 0,05 (caraterística absorvente), e o pavimento apresenta um coeficiente de reflexão sonora não inferior a 0,99 (caraterística refletora).



Figura 4.1 – Local do ensaio

Como indicado na figura 4.1 temos um altifalante numa extremidade da sala, e no lado oposto se encontrará o painel de estudo. O ensaio será realizado com o auxílio de dois microfones que vão registar o som refletido proveniente do painel. Regista-se o som num raio de 1,50 m de distância do painel, numa semicircunferência de  $180^\circ$  (começando dos  $-90^\circ$  até aos  $90^\circ$ ), registando de  $10^\circ$  em  $10^\circ$  representado na figura 4.2. Por possuir apenas dois microfones, vai ser necessário repetir o ensaio várias vezes, até se fazer os  $180^\circ$ , para se considerar um estudo completo do comportamento do painel. O ensaio funciona da seguinte forma: ao serem introduzidos os microfones nos primeiros dois ângulos iniciais (microfone 1 -  $90^\circ$  e microfone 2 -  $80^\circ$ ), durante 20 segundos, a fonte vai emitir ondas de frequência dos 100 aos 4000 Hz. O som refletido proveniente do painel será registado pelos microfones, nos ângulos em se encontram posicionados. Em cada ensaio os microfones vão subir  $20^\circ$  em relação à sua posição anterior, e será alcançado o último ensaio quando se chegar aos  $-90^\circ$ . Está apresentado na figura 4.3, uma das posições dos microfones, usados ao longo dos vários ensaios.

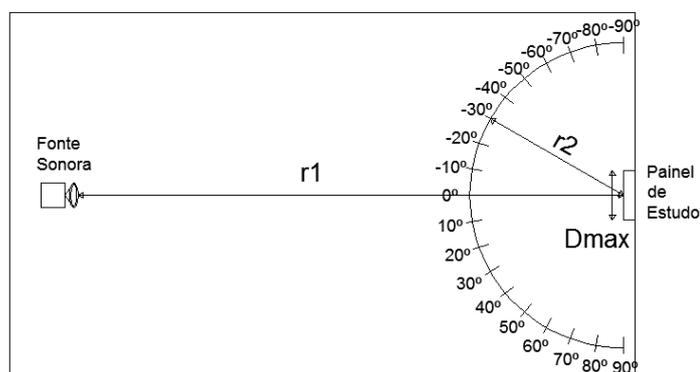


Figura 4.2– Representação das medições e localização dos aparelhos na sala acústica



Figura 4.3 – Introdução do microfone ao longo do ensaio (Microfone 1: 50° ; Microfone 2: 60°)

Realizaram-se ensaios sem o painel inserido na sala sonora e foram-se registando os seus valores como  $h_2$ . Nos restantes ensaios com os painéis de estudo, dentro da sala sonora, considerou-se como  $h_1$  os valores registados.

## 4.2. Características dos painéis em estudo

Os painéis em estudo ao longo do trabalho de dissertação estão apresentados nas fotografias seguintes, com as respetivas características e nomes.

### 4.2.1. Características dos painéis em estudo QRD (2D)

Na figura 4.4 (esq.) apresenta-se um painel QRD de 60x60 cm (QRD\_60) e as suas dimensões na figura 4.4 (dir.). A figura 4.5 (esq.) encontra-se ao lado do QRD\_60, um painel exatamente igual às dimensões dos poços, à escala 1:2 (QRD\_30), representado na figura 4.5 (dir.). Os painéis nas figuras seguintes encontram-se todas com a mesma medida do QRD\_30. Na figura

4.6 fez-se o estudo de dois painéis QRD\_30 um ao lado do outro (QRD\_30\_2I). Na figura 4.7 apresentam-se quatro painéis QRD\_30, dois na base e os outros dois em cima (QRD\_30\_4I), chegando a atingir a mesma medida que QRD\_60. A figura 4.8 encontra-se semelhante ao QRD\_30\_4I, com a diferença que dois dos painéis rodaram 90° (QRD\_30\_4D). Na figura 4.9 (esq.) e (dir.) apresentam-se superfícies lisas de pedra (painel P) e de madeira (painel CR), ambas de dimensão 30x30 cm.

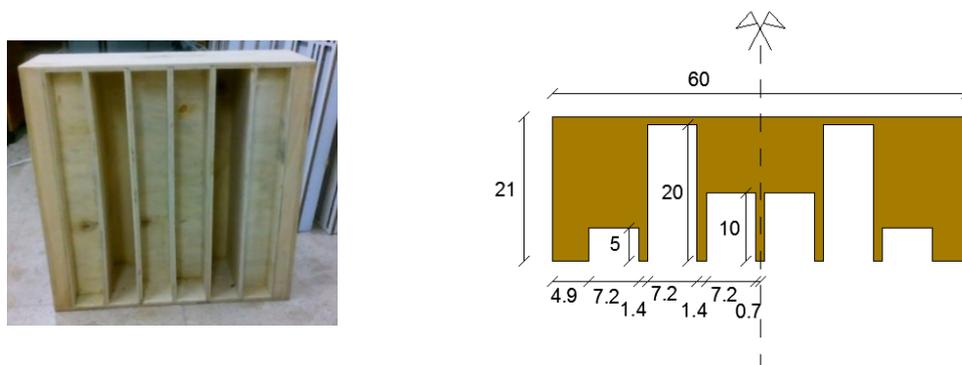


Figura 4.4 – Painel QRD\_60 (esq) e a representação das medições em centímetros dos poços do QRD\_60 (dir.)



Figura 4.5– Painel QRD\_60 (Esq.) e QRD\_30 (Dir.) (imagem à esquerda). Representação das medições em centímetros dos poços QRD\_30 (dir.).



Figura 4.6 – Painel QRD\_30\_2I



Figura 4.7 – Painel QRD\_60 (Esq.) e Painel QRD\_30\_4I (Dir.)



Figura 4.8 – Painel QRD\_30\_4D



Figura 4.9 – Painel P (esq.) e Painel CR (dir.)

#### 4.2.2. Características dos painéis 3D em estudo

Os painéis ABR (figura 4.10) e o PBA (figura 4.11) são semelhantes nas suas medidas (60x60 cm), apresentando poços inclinados. No ABR as bordas de cada poço são retas e no PBA as bordas são arredondadas, como se verifica nas figuras 4.15 a 4.17. Comparando-se, percebe-se se as bordas ajudam ou não a melhorar o comportamento da sala. No painel MR (figura 4.12), também de 60x60 cm, este apresenta uma estrutura diferente em relação ao ABR e PBA, com diferentes comprimentos nos poços e as suas faces não apresentam inclinações. Quanto ao painel da Superfície Lisa (60x60 cm) apresentado na figura 4.14, este vai servir de base, representando o formato habitual presente nas habitações.



Figura 4.10– Painel ABR (0°) e Painel ABR (90°)



Figura 4.11 – Painel PBA (0°) e Painel PBA (90°)

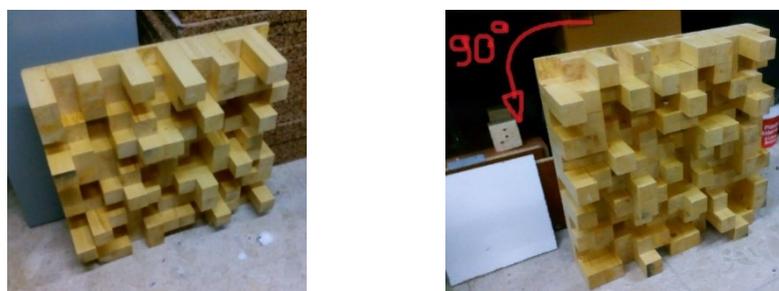


Figura 4.12 – Painel MR (0°) e Painel MR (90°)

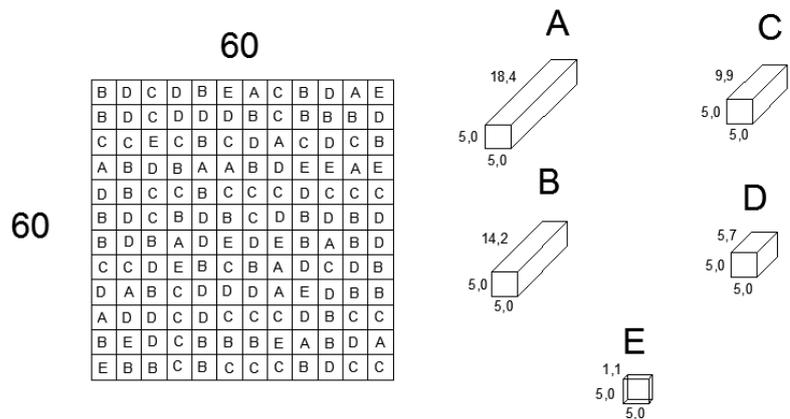


Figura 4.13 – Dimensões em centímetros do Painel MR (0°)



Figura 4.14 – Painel de Superfície Lisa



Figura 4.15 – Painel ABR (Esq.) e Painel PBA (Dir.)



Figura 4.16 – Painel ABR (Esq.) e Painel PBA (Dir.)



Figura 4.17– Painel ABR (Esq.) e Painel PBA (Dir.)

### 4.3. Regras laboratoriais a cumprir

A norma ISO 17497 – 2 requer que nas medições sejam cumpridos certos critérios.

Os difusores em estudo para se encontrarem em espaço afastado precisam de:

$$I) r \gg D_{max} \quad (\text{Eq.4.1})$$

$$II) \frac{r}{D_{max}} \gg \frac{D_{max}}{\lambda} \quad \text{sendo } r = \frac{2r_1r_2}{r_1+r_2} \text{ e } \lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{Eq.4.2})$$

$r_1, r_2$  e  $D_{max}$ , representados na figura 4.1

$$r_1 = 3,60\text{m}$$

$$r_2 = 1,50\text{m}$$

$$D_{max} = 0,60\text{m}$$

$$c = 330 \text{ m/s}$$

$$f = 4000 \text{ Hz}$$

$$\text{Logo } r = 2,12 \text{ m e } \lambda = 0,083 \text{ m}$$

$$I) 2,12 \gg 0,60 \text{ Verifica}$$

$$II) 3,53 \gg 7,27 \text{ Não Verifica}$$

De tal forma que nesta situação o que se vai fazer é verificar se a fonte e os recetores estão no campo aproximado. Para isso os ensaios vão ter de estar em condições de campo aproximado e campo afastado, para se medir o coeficiente de difusão. O campo afastado vai permitir determinar a difusão, enquanto o campo aproximado verifica a presença de anomalias.

Para saber se se encontram no campo afastado, numa sala de ensaio com pequenas dimensões, deve garantir-se que 80% dos microfones estejam fora da zona angular de reflexão especular, através das medidas  $r_1$ , usadas nos ensaios. Com a distância de  $r_1$  rodou-se 180° a partir da posição do painel, sendo que, depois é traçada uma linha no ponto mais afastado do painel, na nova linha  $r_1$ . Ligando-se esse ponto a um dos cantos do painel em estudo, estende-se a linha até alcançar a posição angular, de onde se encontra os microfones. Traçando uma segunda reta no canto oposto do painel encontra-se o segundo ângulo, chegando a identificar a área na figura 4.18, a zona de reflexão angular. Encontrando-se 81% fora da zona especular.

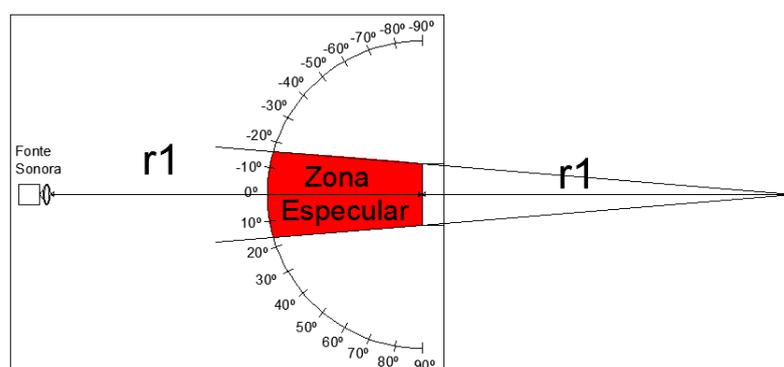


Figura 4.18 – Representação da zona especular

Os coeficientes de difusão podem ser medidos utilizando um goniómetro de 1:10, numa câmara de teste, com base nas especificações de AES- 4ID -2001, como mostrado na figura 4.20 (Kim et al, 2011).

Utilizou-se o MLS que foi adotado como a fonte de som, estando localizado a 3,60 m do ponto de referência da amostra, num ângulo de incidência normal de 90°. Os recetores foram localizados a 1,5 m de referência do ponto da amostra num plano semicircular.

#### 4.4. Processamento dos dados

##### 4.4.1. Fonte e recetor

A fonte é usada para irradiar a superfície de ensaio, e os microfones de medição das posições radiais em frente da superfície, gravando a resposta de impulso de pressão. O microfone converte as ondas sonoras em elétricas, em que a membrana presente no recetor ao deformar-se com a variação de pressão, transmite um sinal elétrico (Mendes, 2014). As posições dos microfones normalmente traçam um semicírculo ou hemisfério, para um único plano (plano 2D) ou medição esférica (plano 3D) respetivamente. Assim que as respostas ao impulso de pressão são medidas, o tempo de seleção é usado para separar as reflexões do som incidente. O método seguido para medir as respostas de impulso, será usando a sequência de sinal máximo de comprimento (MLS) (Cox e D'Antonio, 2009).

Um outro método de avaliação de difusidade da superfície global de quartos é utilizando modelagem por computador e medições de campo. Isto é realizado com um par de microfones; um microfone de frente e outro na parede traseira do quarto. Desta forma é possível eliminar o som direto e as reflexões especulares iniciais. Sendo possível prever os níveis de condição difusa, comparando diretamente esse valor com os níveis de som não difusa. Fica claro o quanto o som difuso afeta a sala em estudo. A diferença de parâmetros acústicos numa posição depende da condição da superfície da sala (Rindel, n.d).

No valor dos parâmetros acústicos, o primeiro microfone (M1), voltado para a frente da sala, apresenta valores acima do valor do segundo microfone (M2), porque o M2 não regista o som direto, estando este situado de frente para a parede traseira do quarto. Quanto mais difusas se apresentarem as superfícies, maior é o valor registado por M2. De modo que a diferença entre os dois microfones depende da difusão presente nas superfícies (Rindel, n.d).

O critério de avaliação,  $\Delta x$  da difusidade da superfície é o seguinte:

$$\Delta x = x(M1) - x(M2) \quad (\text{Eq.4.3})$$

O  $x(M1)$  é o valor do parâmetro acústico obtido a partir do microfone voltado para o palco e  $x(M2)$  é o valor do parâmetro acústico obtido do microfone da parede traseira do palco.

#### 4.4.2. Ensaio a 2D e 3D

Num difusor unidimensional (1D), apresentado na figura 4.19 (esq.), o som é disperso em forma de um semicírculo, na direção de variação de fase ou amplitude, e é refletido com o mesmo ângulo de incidência. Num difusor bidimensional (2D), (figura 4.19 (dir.)), a energia é uniformemente dispersa, representando-se em forma de metade de uma 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 do difusor bidimensional dispersar energia de forma omnidirecional, este espalha metade da energia quando comparado com um difusor 1D (Meireles, et al, 2008).

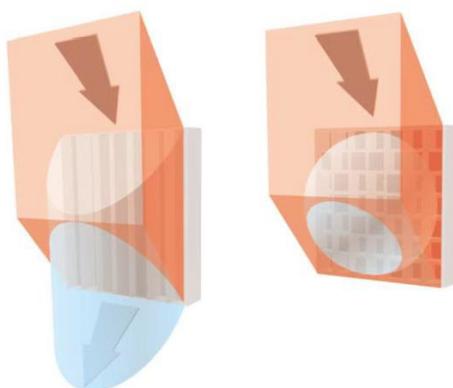


Figura 4.19 – Respostas polares para um difusor 1D (esquerda) e 2D (direita) (Meireles, et al, 2008)

As medições da resposta polar podem ser realizadas utilizando o goniómetro 2D. Os microfones encontram-se em torno do difusor, formando um semicírculo, como mostra a figura 4.20 (esq.), e que é usado nos painéis 1D e que apresentam a reflexão num plano. Nos painéis 2D, em que o difusor tem múltiplos planos de reflexão, um goniómetro 3D é recomendado num sistema hemisférico, como mostra a figura 4.20 (dir.). O único microfone presente percorre toda a sua extensão, sendo colocado normalmente por cima do painel em estudo. Outra solução é colocar um microfone num braço mecânico e que vai rodar em torno do difusor (Cox e D'Antonio, 2009) (Bistafa, n.d). Pelo facto do sistema de medição hemisférica ser difícil de trabalhar e dispendioso de construir, não foi usado neste trabalho. A opção usada foi rodar os painéis como já foi explicado no capítulo 4.2.2.

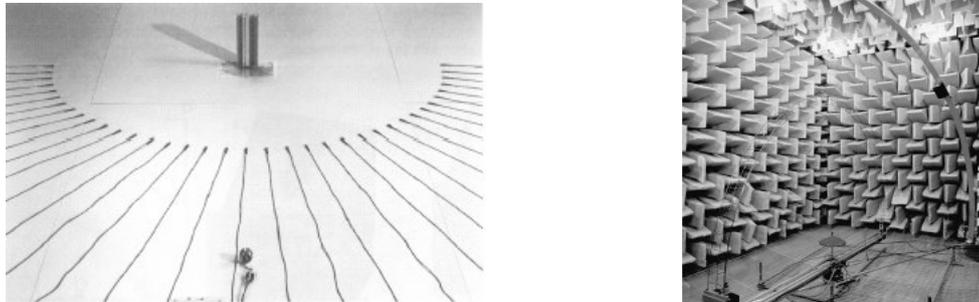
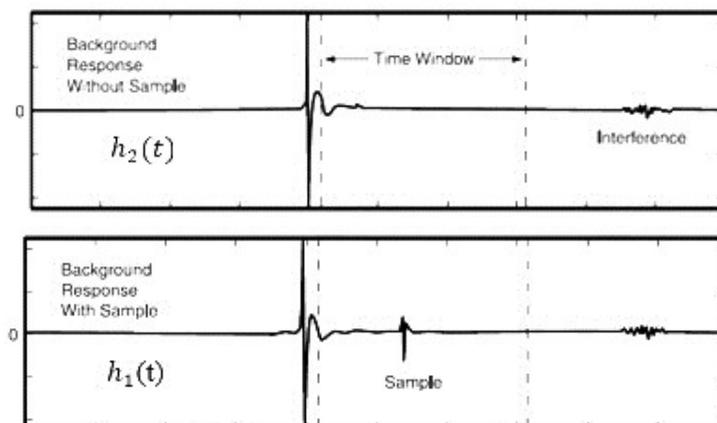


Figura 4.20 – Goniometro, para medições de 2 dimensões (esq) e 3 dimensões (dir) (AES-4id-2001,2001).

Os dados e os passos necessários para a obtenção do coeficiente de difusão requerem o procedimento das seguintes etapas.

- 1º Realizar os ensaios sem o painel presente ( $h_2(t)$ );
- 2º Ensaio com painel presente ( $h_1(t)$ );  $h_1(t) - h_2(t)$
- 3º Calcular o valor de  $h_4(t)$ ;
- 4º Determinar as respostas polares ao longo da frequência;
- 5º Gráfico do coeficiente de difusão;

Através desse valor com uma FFT (Fast Fourier Transform) vai-se calcular  $h_4(t)$  pela fórmula representada abaixo.



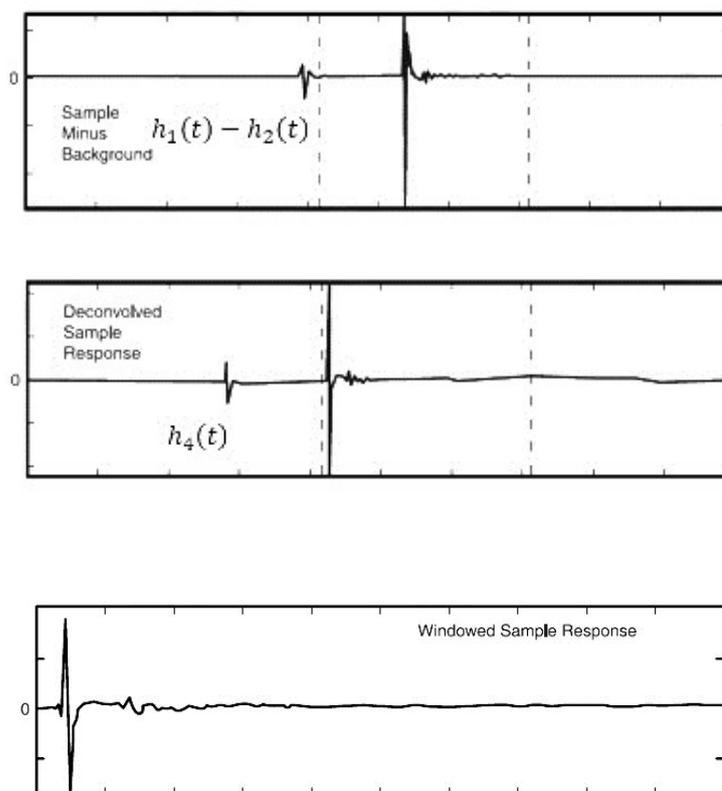


Figura 4.21 – Etapas do processo de procedimento de determinação dos impulsos de resposta fonte-recetor relativos a um produto difusor

$$h_4(t) = IFT \left( \frac{FT(h_1(t) - h_2(t))}{FT(h_3(t))} \right) \quad (\text{Eq.4.4})$$

O IFT e FT representam a transformação de Fourier e a transformação inversa de Fourier.

A figura 4.22 mostra os passos a seguir para determinar as respostas polares (Cap.4.5) e os coeficientes de difusão (Cap.4.6), nas várias frequências em estudo, com os valores obtido na figura 4.21

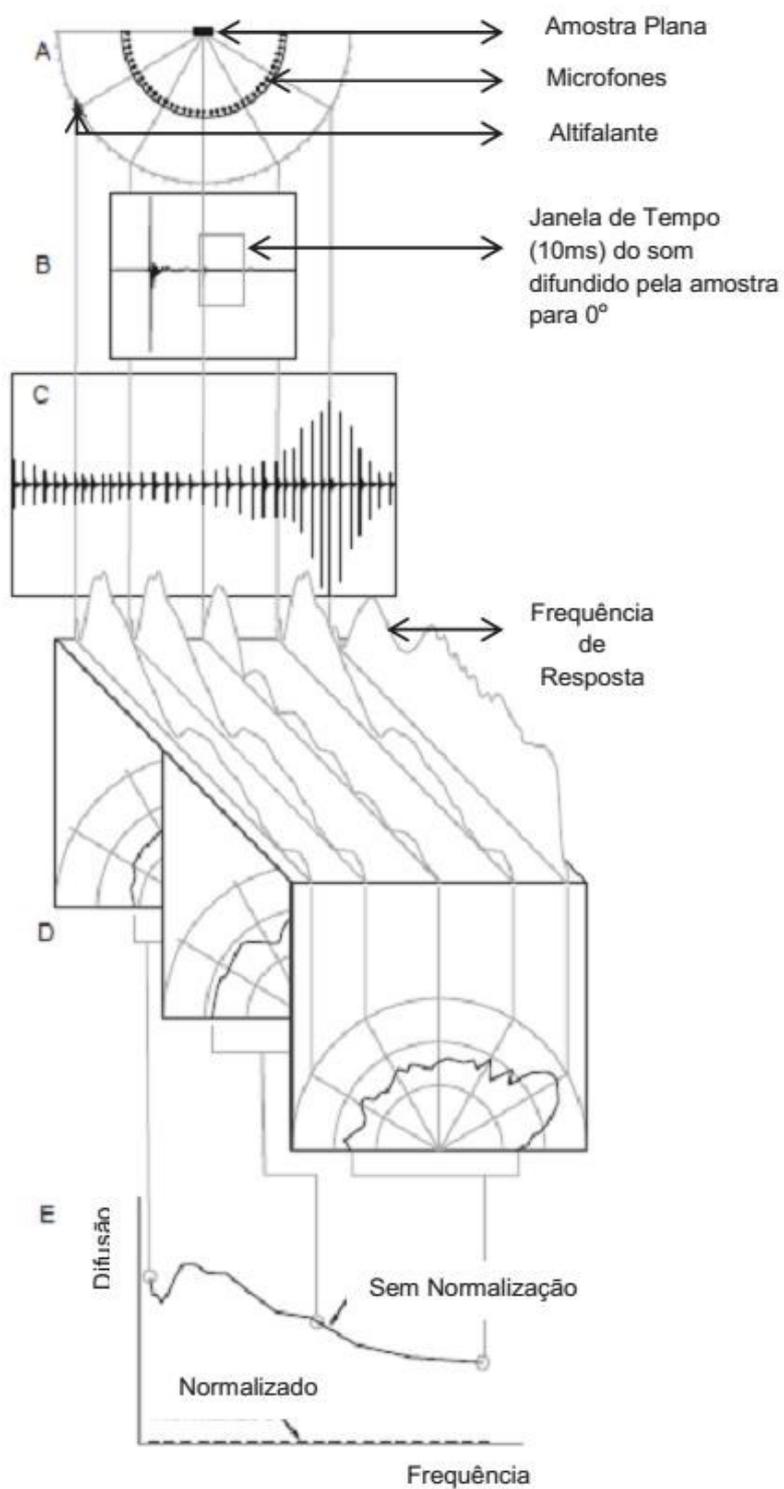


Figura 4.22 – Etapas do processo de procedimento de determinação do coeficiente de difusão

#### 4.5. Determinação da resposta polar

De modo a compreender o desempenho do difusor é necessário compreender igualmente como a superfície reflete o som, estudando o comportamento de como a energia dispersa é espacialmente distribuída. Ao estudar num ângulo de incidência, em um terço de oitava, a resposta polar é caracterizada com essa distribuição espacial (Cox e D'Antonio, 2009).

Um difusor ideal apresenta uma resposta polar, que é invariável relativamente ao ângulo de incidência, ao ângulo de observação e à frequência (dentro da sua largura de banda operacional) (Cox e D'Antonio, 2009).

Feitos os registos dos vários impulsos de resposta da fonte ao recetor, dos vários microfones no painel em estudo, através do processamento computacional, usando o método dos elementos fronteira (BEM), são obtidas as respostas polares.

Ao serem 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  $r_2 = 3,60m$  e  $r_1 = 1,50m$ , o valor corrigido para o nível de intensidade sonora ( $L_i$ ) é dado pela equação:

$$L_i = L'_i + \varepsilon 10 \log_{10} \left( \frac{r}{6,67} \right) \quad (\text{Eq.4.5})$$

r – calculado no cap.4.3

$\varepsilon$  – igual a 1 se for modulação dimensional; igual a 2 se for modulação tridimensional;

A razão desta correção é o facto dos painéis não refletirem o som, com a formação de ondas esféricas ou cilíndricas.

De seguida, pelo método dos elementos fronteira (BEM) calculam-se as respostas polares.

#### 4.6. Coeficiente de difusão

Durante o ensaio estão presentes possíveis reflexões residuais que não interessam. O ajuste da janela temporal vai isolar as reflexões, devido ao painel presente. São identificados o tempo mais curto e o tempo mais longo da reflexão no painel. O tempo mais curto pode ser identificado por considerações geométricas, enquanto o tempo maior deverá incluir reflexões de primeira ordem, para garantir a obtenção da resposta completa da amostra. A observação visual do gráfico do impulso de resposta é também útil no isolamento das reflexões de interesse.

As considerações que levaram ao coeficiente de difusão proposto são descritos na bibliografia Cox e António. O coeficiente de difusão é derivado da função de auto correlação da resposta polar, medida num semicírculo ou num hemisfério e tem o símbolo “d”. Ela pode tomar valores entre 0 e 1, sendo  $d = 1$  que a resposta polar é completamente uniforme.

Para a determinação do coeficiente de difusão é usada uma função de auto correlação por meio da norma AES-4id-2001. A função de auto correlação espacial apresenta um valor alto se a superfície espalhar uniformemente a energia (Bistafa, n.d). Com a fonte sonora e os microfones nas várias posições, com a mesma área de medição, em frequências de um terço de oitava, tem-se o coeficiente de difusão direcional, determinado pela seguinte equação:

$$d_{\theta} = \frac{(\sum_{i=1}^n 10^{L_i/10})^2 - \sum_i^n (10^{L_i/10})^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n (10^{L_i/10})^2} \quad (\text{Eq.4.6})$$

$\theta$  – Ângulo de incidência

$L_i$ - Pressão sonora obtidos na resposta polar

$n$  – número de recetores

Os métodos de medição podem ser utilizados para as amostras de teste, quer na escala real ou numa relação de escala apropriada (exemplo 1:10).

#### 4.6.1. Determinação do Coeficiente de difusão normalizado

O valor obtido dado pela expressão acima (eq. 4.4) é um valor “bruto”, que apresenta incongruências e dificuldades na interpretação dos resultados. Por isso vai ser normalizado o coeficiente de difusão, comparando com os valores de uma superfície lisa, através da seguinte equação (Rindel, n.d):

$$d_{\theta,n} = \frac{d_{\theta} - d_{\theta,r}}{1 - d_{\theta,r}} \quad (\text{Eq.4.7})$$

$d_{\theta}$ - Coeficiente do painel ensaiado

$d_{\theta,r}$ - Coeficiente de difusão para o painel de superfície lisa, com dimensão igual ao painel ensaiado em  $d_{\theta}$

O coeficiente de difusão obtido representa a média dos valores de coeficiente de difusão direcional normalizado, para cada banda de um terço de oitava.

## 5. Apresentação e discussão dos resultados

### 5.1. Resultados obtidos

#### 5.1.1. Resultados obtidos (PAINEIS 2D)

Aqui se apresentam os valores dos coeficientes de difusão, obtidos experimentalmente dos painéis apresentados no capítulo 4.2.1.

A figura 5.1 apresenta os valores registados dos vários ensaios realizados no QRD\_60. Verificou-se que, ao longo da frequência, existiu uma sequência de picos e quedas, nos valores do coeficiente de difusão, em relação aos vários ensaios. Com a exceção de no início do ensaio se encontrar alguma diferença entre eles, ainda significativa, o que pode ser devido às condições ambientais da sala ou um erro inicial da leitura do aparelho. Vai diminuindo a sua diferença ao longo da frequência, ficando com um comportamento cada vez mais próximo do mesmo difusor, o que aparenta não interferir, ao longo do estudo, das restantes frequências, apresentando valores semelhantes. Dando a ideia, que em geral os resultados obtidos do ensaio são sempre os mesmos, repetindo as vezes necessárias.

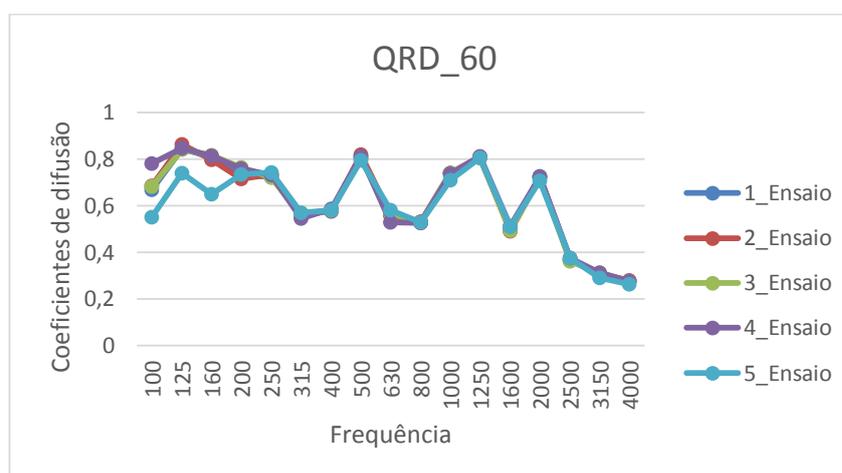


Figura 5.1 – Coeficiente de difusão para os cinco ensaios realizados para o QRD\_60

Na figura 5.2 comparou-se o QRD\_60 e QRD\_30 apesar de semelhantes, mas com escalas diferentes. Na frequência baixa apresentam alguma diferença, mas a partir da frequência 315 Hz começam a aproximar os seus valores, ficando cada vez com um intervalo de diferença, do valor do coeficiente de difusão cada vez menor. O QRD\_60 atinge um valor máximo do

coeficiente de difusão de 0,85 e o QRD\_30, com um coeficiente de 0,88. É possível usar os QRD de escala reduzida com valores aproximados da escala real.

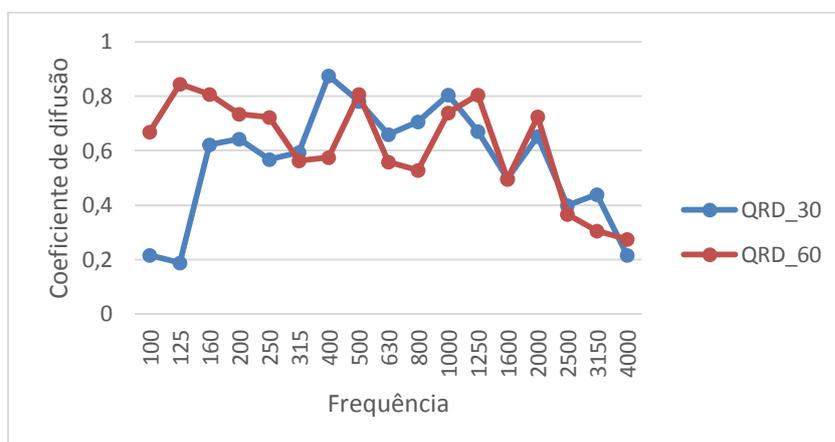


Figura 5.2 – Coeficiente de difusão para QRD\_30 e o QRD\_60

Na figura 5.3 estudaram-se os vários painéis QRD realizados à escala 1:2. Na frequência mínima até a frequência 250, todos com a exceção do QRD\_30 chegam a atingir um valor baixo do coeficiente de difusão de 0,4. Em geral o QRD\_30 apresenta melhores valores de coeficiente em relação aos outros painéis estudados. Tendo isso em conta, o QRD\_30\_2I e QRD\_30\_4I apresentam semelhantes valores, de modo que a adição de mais dois painéis QRD\_30 no QRD\_30\_2I, tornando-os no QRD\_30\_4I, o que não trouxe melhoria significativa para compensar a adição desses painéis. Chegando o QRD\_30\_4I a atingir um valor máximo do coeficiente de difusão de 0,89 e o QRD\_30\_2I atinge um máximo de 0,87. O QRD\_30\_4D em comparação com os restantes não compensa ter rodado dois dos painéis QRD\_30 a 90° (figura 4.10).

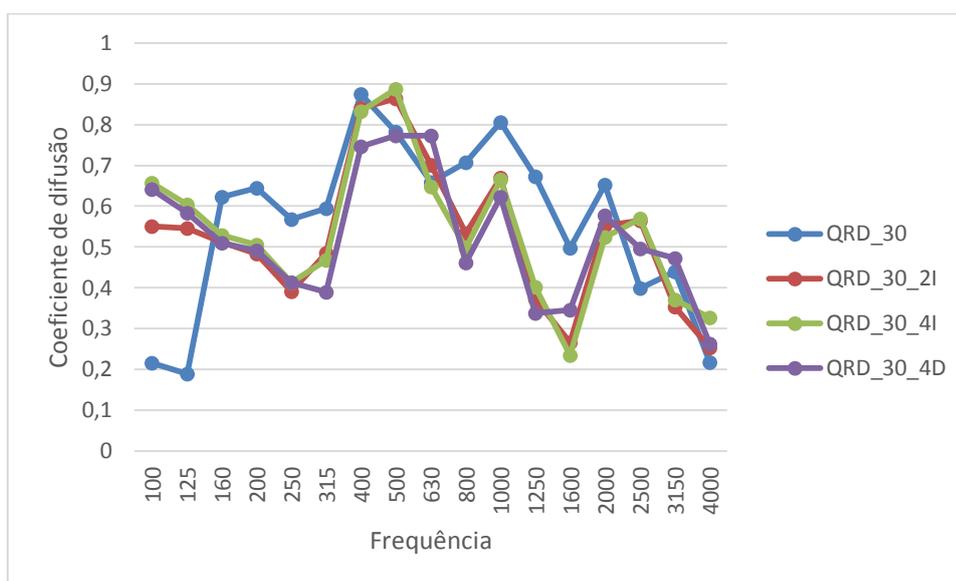


Figura 5.3 – Coeficiente de difusão para os módulos de escala 1:2 realizados

Na figura 5.4 comparou-se o QRD\_30 com os dois painéis de superfície estudados (Painel P e CR). Compreende-se que os valores de coeficiente de difusão apresentados dão a entender que o QRD\_30 tem um comportamento de difusão bem mais eficaz que os restantes, como já era de esperar. Quanto aos painéis P (pedra) e CR (madeira), como são superfícies lisas e não configuradas, para um comportamento difusor, apresentam um comportamento descendente, quanto aos valores dos coeficientes de difusão. Comparando as duas superfícies lisas quanto à sua composição material, apesar de serem de materiais diferentes, os seus valores não são muito diferentes, mas o painel P apresenta valores ligeiramente mais altos.

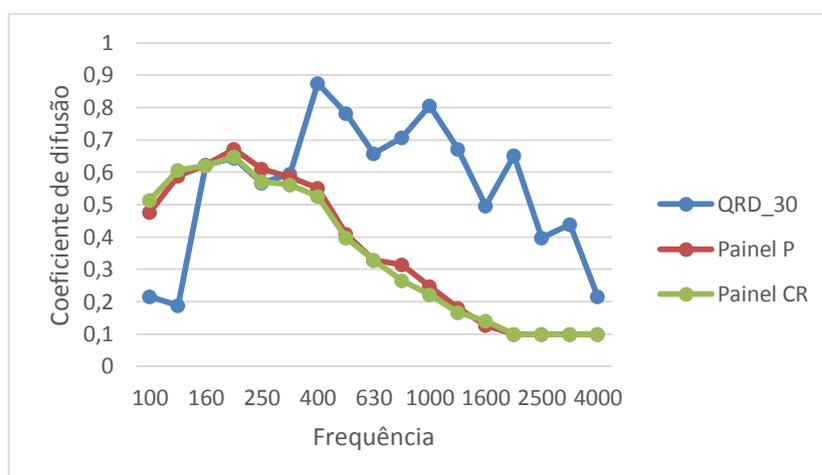


Figura 5.4 – Coeficiente de difusão para o QRD\_30 e os painéis de superfície, à escala 1:2

### 5.1.2. Resultados obtidos (PAINÉIS 3D)

Aqui se apresentam os valores obtidos experimentalmente dos coeficientes de difusão, dos painéis do capítulo 4.2.2. Por não ter sido possível usar o goniómetro 3D, foi utilizado o goniómetro 2D para a experiência laboratorial, comparando a superfície lisa com os vários painéis a  $0^\circ$  e a  $90^\circ$  como já indicado no capítulo 4.2.2.

Na figura 5.5 encontram-se os valores dos coeficientes de difusão registados para os painéis ABR, PBA e MR a  $0^\circ$  e o painel de superfície lisa. No início do estudo da frequência de 100 a 630 Hz, têm sempre um valor aproximado de cerca de 0,04 de diferença entre o que se encontra mais alto e mais baixo. Mas a partir dos 630 Hz encontra-se o painel com melhor comportamento difusor, sendo ele o painel MR, atingindo um valor máximo de 0,79. Comparando o painel PBA e ABR ao longo da frequência, o painel PBA apresenta melhores valores de difusão, dando a entender que tendo as bordas arredondadas há uma contribuição para o aumento da difusão. Tal como já demonstrado na figura 5.4, a superfície lisa apresenta um valor decrescente, quanto ao valor do coeficiente de difusão, ao longo da frequência.

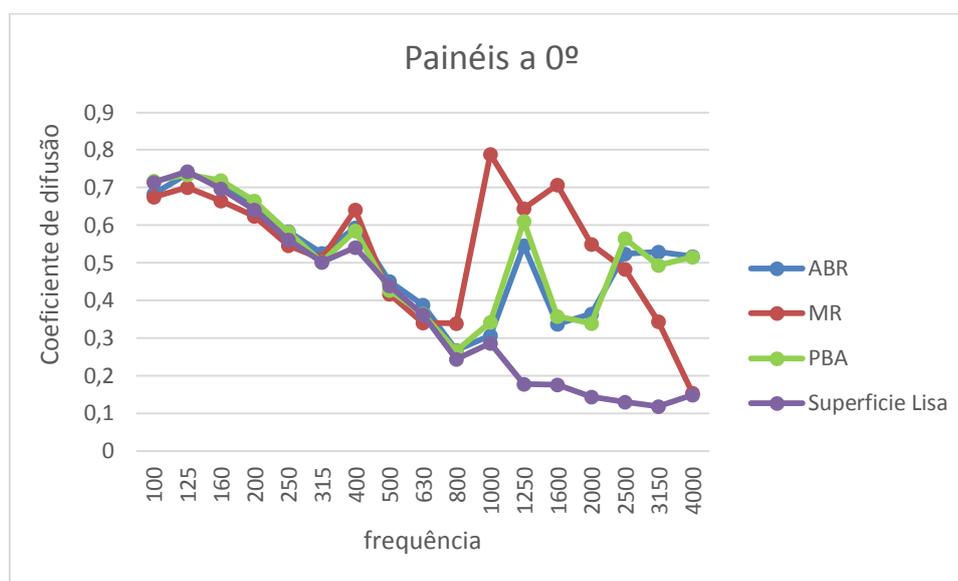


Figura 5.5 – Coeficiente de difusão dos quatro painéis a 0º em estudo

Na figura 5.6 estão apresentados os dados obtidos com a superfície lisa e os painéis PBA, MR e ABR a 90º. Como a superfície lisa não altera ao rodar, simplesmente apresenta os mesmos valores que obtidos a 0º. Em grande parte das frequências o painel MR apresenta valores mais satisfatórios, em relação aos restantes, chegando a atingir um coeficiente máximo de 0,67. Comparando o PBA e o ABR, quanto à questão das bordas das faces serem arredondadas ou retas, apesar de não apresentarem uma diferença muito grande, o PBA com as bordas arredondadas, apresenta em média melhores valores. Apesar do painel ABR atingir o valor mais alto de 0,78, ao longo da frequência, normalmente é ultrapassado pelos outros painéis em estudo, sendo o seu valor máximo atingido no início da frequência.

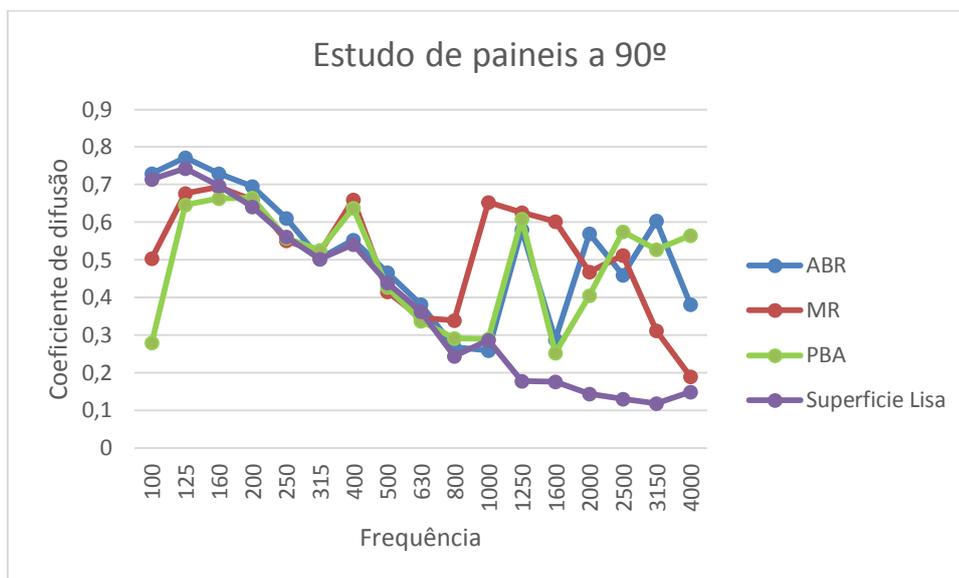


Figura 5.6 – Coeficiente de difusão dos quatro painéis a 90° em estudo

Como não foi possível usar o goniómetro 3D, com os valores obtidos pelo goniómetro 2D do painel MR a 0° e a 90°, tentou-se a simulação em 3D da resposta polar à frequência 2000 Hz.

## 6. Considerações finais e conclusões

As pesquisas feitas e os ensaios realizados com os difusores, refletem para uma realidade bem presente na atualidade, e da necessidade da sua aplicação em espaços fechados, razão pela qual são necessários estudos aprofundados sobre os mesmos.

A norma ISO 17497-2 estabelece um coeficiente de difusão, que classifica o desempenho dos difusores corretamente e destina-se a avaliar a qualidade do difusor. Ao serem avaliados os difusores, há uma melhor compreensão do papel de difusão em espaços fechados, assim como se assegura que os difusores cumpram as especificações quantitativas.

Nos vários ensaios com o QRD\_60, como já se concluiu atrás, eles apresentam pouca variabilidade. Ainda assim pode ter ocorrido, erro humano ao ser introduzido o microfone, ao longo dos vários ângulos de estudo. Da discrepância dos valores recolhidos, no início da frequência, nos 100 Hz, a razão poderá ser do som indireto, ou da sensibilidade dos aparelhos.

No QRD\_30 e QRD\_60, sendo estes painéis semelhantes esteticamente, mas com escalas diferentes, o seu comportamento apresenta semelhanças ao longo da frequência, quanto ao estudo do coeficiente de difusão.

No estudo dos vários módulos na longevidade da frequência estudada, o QRD\_30 apresenta melhores resultados. Comparando entre o QRD\_30\_4I e o QRD\_30\_4D conclui-se que é preferível não rodar os módulos, como se fez para o QRD\_30\_4D. Os painéis QRD\_30\_4I e QRD\_30\_2I apresentam bastantes semelhanças nos valores obtidos, sendo preferível usar um difusor de 2 módulos (QRD\_30\_2I), em vez de optar por um difusor de 4 módulos, como por exemplo o QRD\_30\_4I.

Ao comparar os diferentes materiais dos painéis, os valores dos coeficientes de difusão que o Painel P e Painel CR apresentam, mostram que materiais diferentes têm uma pequena contribuição para a difusão.

Os painéis 3D, até à frequência 630 Hz, apresentam valores de coeficiente de difusão muito semelhantes, tanto a 0° como a 90°. A melhor maneira de se saber qual o melhor painel, depende das frequências, que se quer melhorar, na sala em estudo. De modo que para, os painéis aqui ensaiados, no intervalo de frequência de 630 a 2000 Hz, é o MR e dos 2000 a 4000 Hz, é o PBA.

Em trabalhos futuros, se for possível, deve-se utilizar o sistema de ensaios em 3 dimensões (figura 4.20 (dir.)), repetir os ensaios dos painéis ABR, ML e PBA e comparar se a diferença é grande, entre os valores obtidos neste trabalho. Fazer outros ensaios com painéis de superfície côncava, híbridos, difusores ativos, painéis difusores com poços com uma superfície redonda (Cox e D'Antonio, 2009) (Meireles, et al, 2008). Comparar um ensaio com metade ou com uma percentagem do difusor “bloqueado” por uma parede, ou outro material, como por exemplo lã, papel, cortiça, ou usar outro material no difusor sem ser madeira.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AES-4id-2001 (2001). “AES information document for room acoustics and sound reinforcement systems – characterisation and measurement of surface scattering uniformity.” Journal of the Audio Engineering Society.

Afonso, M., Godinho, L., Mateus, D. (2014). “Estudo numérico de painéis difusores acústicos.” Tese de Dissertação, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Coimbra.

Bistafa, S. (n.d.) “Difusão Sonora em Salas: Paradigmas do Passado e Estado da Arte”. Escola Politécnica da USP – Departamento de Engenharia Mecânica.

Cox, T., D’Antonio, P. (2009). “Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application.” Taylor & Francis, 2nd Edition.

Isbert, A. (1998). “Diseño acústico de espacios arquitectónicos”. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya.

ISO (2005). “Acoustic – Sound scattering properties of surfaces – Part 2: Measurement of the directional diffusion coefficient in a free field”. ISO 2002.

Kim, Y., Jang, H., Jeon, J. (2011) “Characterizing diffusive surfaces using scattering and diffusion coefficients”. Applied Acoustics 72 (2011), 899-905.

Meireles, P. Castro, J. Rodrigues, R. (2008). “Estudo do Fenómeno da Difusão Sonora – Soluções à Base de Painéis Difusores”. Dissertação de Mestre em Engenharia Civil – Especialização em Construção Civil. Faculdade de Engenharia da Faculdade do Porto.

Mendes, P. (2014). Apontamentos da disciplina Acústica Aplicada. Faculdade Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Perry, T. (2011). “The Lean Optimization of acoustic diffusers: Design by artificial Evolution, Time Domain Simulation and Fractals”. ELEC 498 – Honours Thesis. University of Victoria Faculty of Engineering.

Rindel, J. (n.d) “Scattering in Room Acoustics and the Related Activities in ISSO and AES”. Technical University of Denmark.

Silva, L., Carvalho, A. (2013) “Desenvolvimento de difusores acústicos”. Dissertação de Mestre em Engenharia Civil – Especialização em Construção Civil. Faculdade de Engenharia da Faculdade do Porto.

Tadeu, A., *et al.*, "Acústica Aplicada" Sebenta de apoio à disciplina: DEC-FCTUC, 2010

ESTT@. [http://www.estt.ipt.pt/download/disciplina/2959\\_\\_acusedif\\_fc\\_parte1.pdf](http://www.estt.ipt.pt/download/disciplina/2959__acusedif_fc_parte1.pdf) . Escola Superior de Tecnologia de Tomar [no capítulo 2.1.1.]

RF@. <http://www.prof2000.pt/users/eta/ruído.htm> Riscos Físicos - Ruído [no cap 2.1.1]

## ANEXO A – PAINEL QRD\_60

Resultados de um dos ensaios repetidos para o QRD\_60

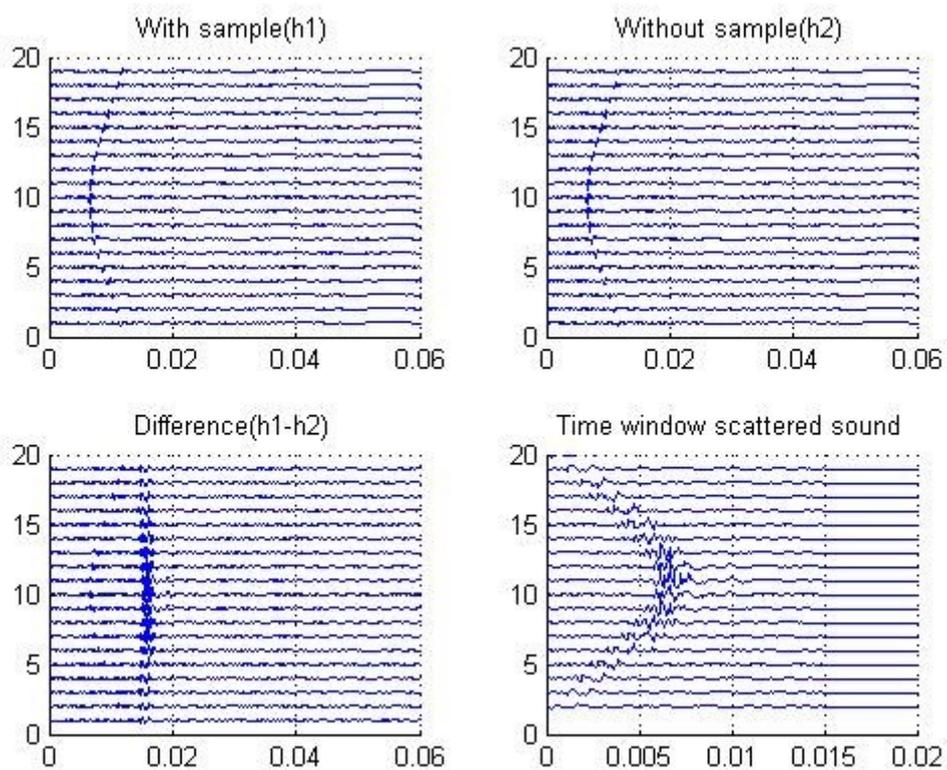


Figura A.1 – Registo de dados obtidos dos vários microfones

Cima Esq. Ensaio com amostra (h1)

Cima Dir. Ensaio sem amostra (h2)

Baixo Esq. (h1-h2)

Baixo Dir. Tempo de recolha do som difuso

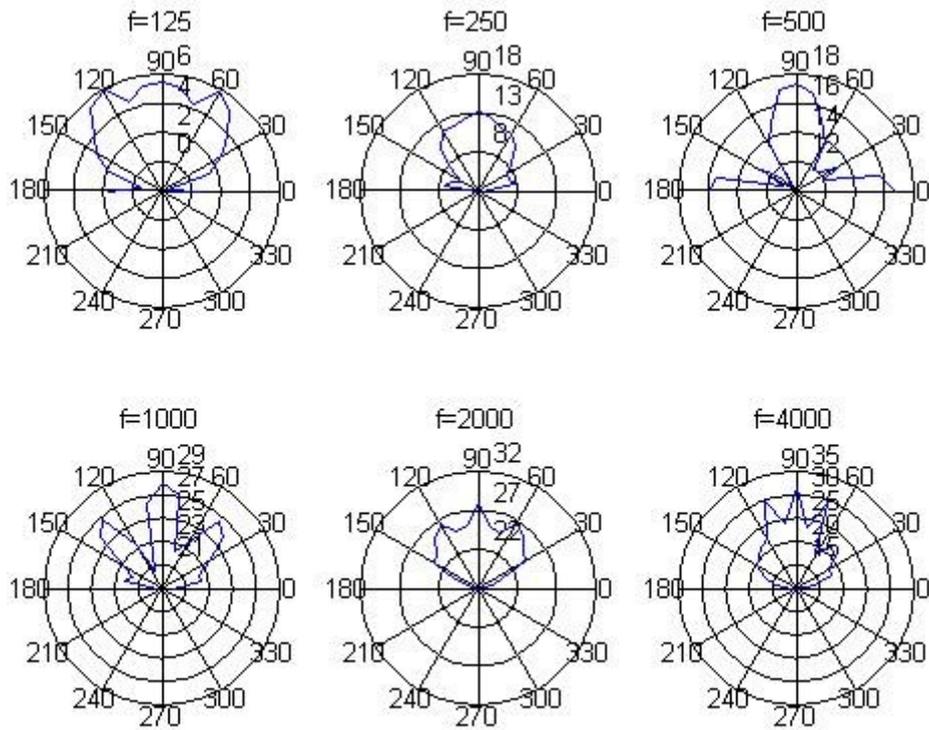


Figura A.2 – Respostas Polares das frequências 125 a 4000 Hz

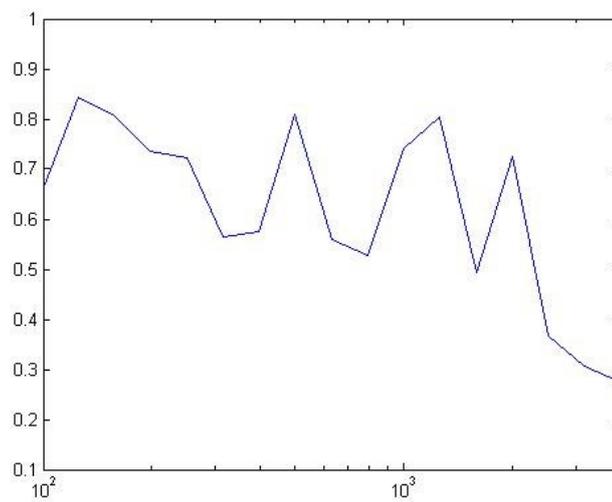


Figura A.3 – Coeficientes de difusão

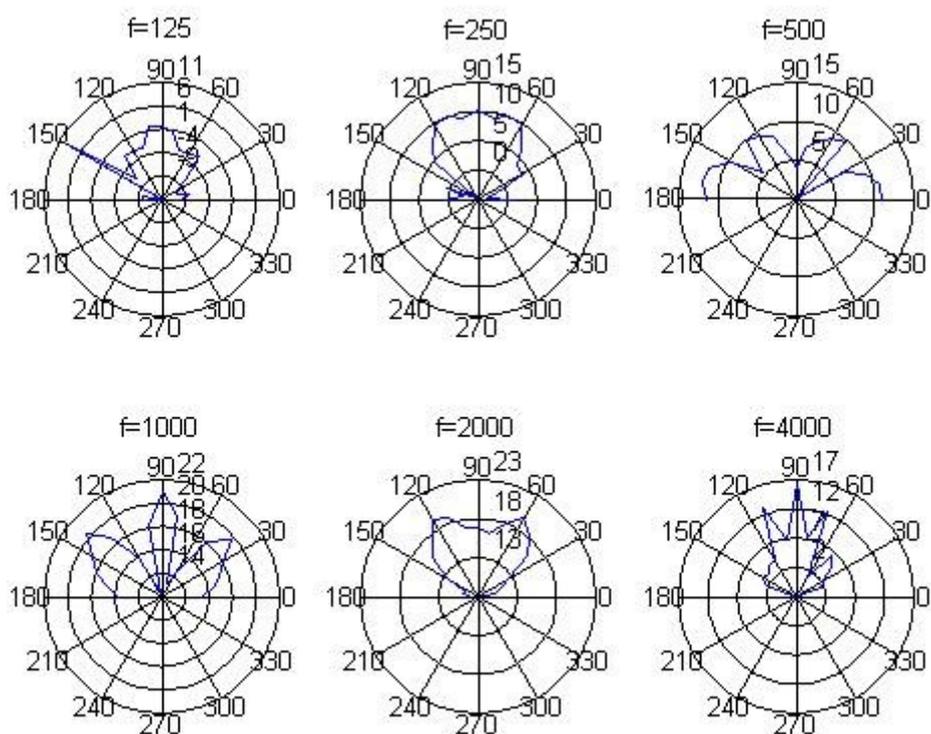
**ANEXO B – PAINEL QRD\_30**

Figura B.4 – Respostas Polares das frequências 125 a 4000 Hz

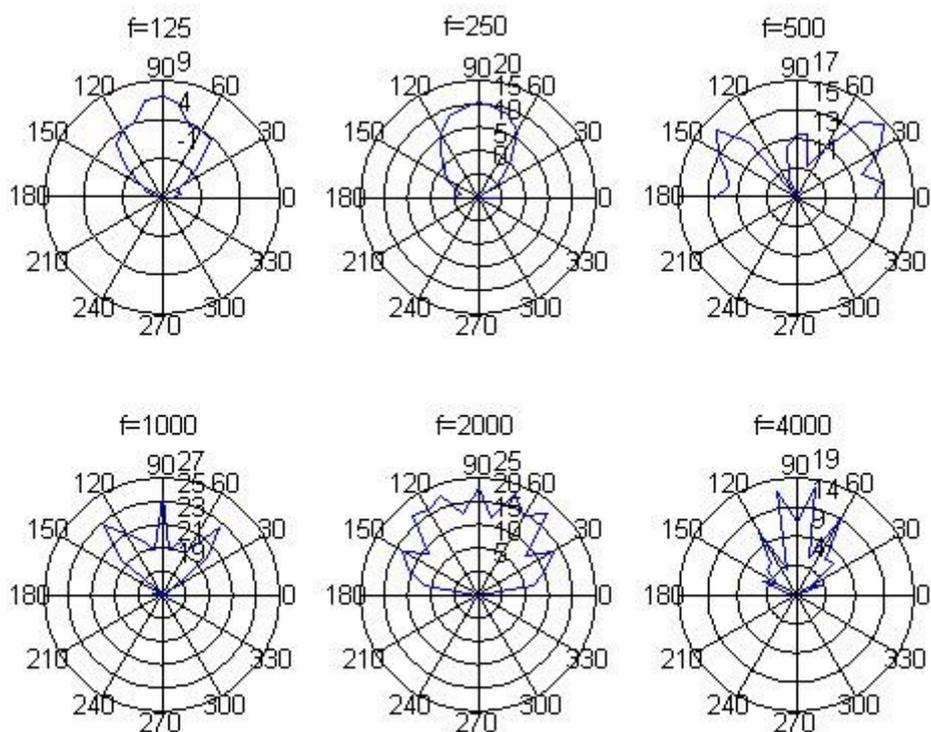
**ANEXO C – PAINEL QRD\_30\_2**

Figura C.5 – Respostas Polares das frequências 125 a 4000 Hz

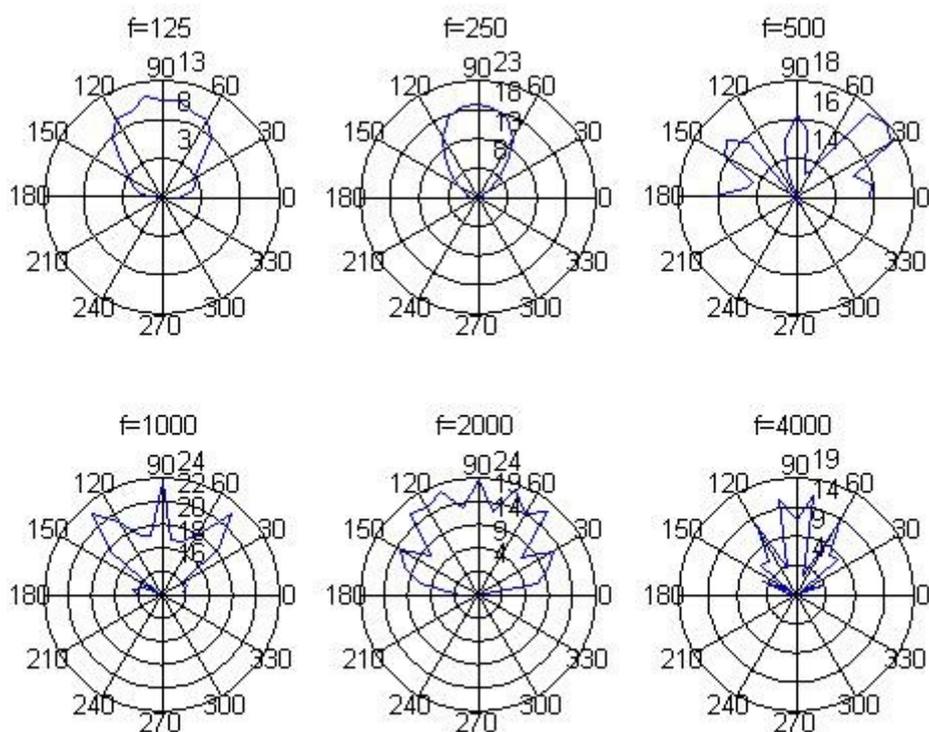
**ANEXO D – PAINEL QRD\_30\_4I**

Figura D.6 – Respostas Polares das frequências 125 a 4000 Hz

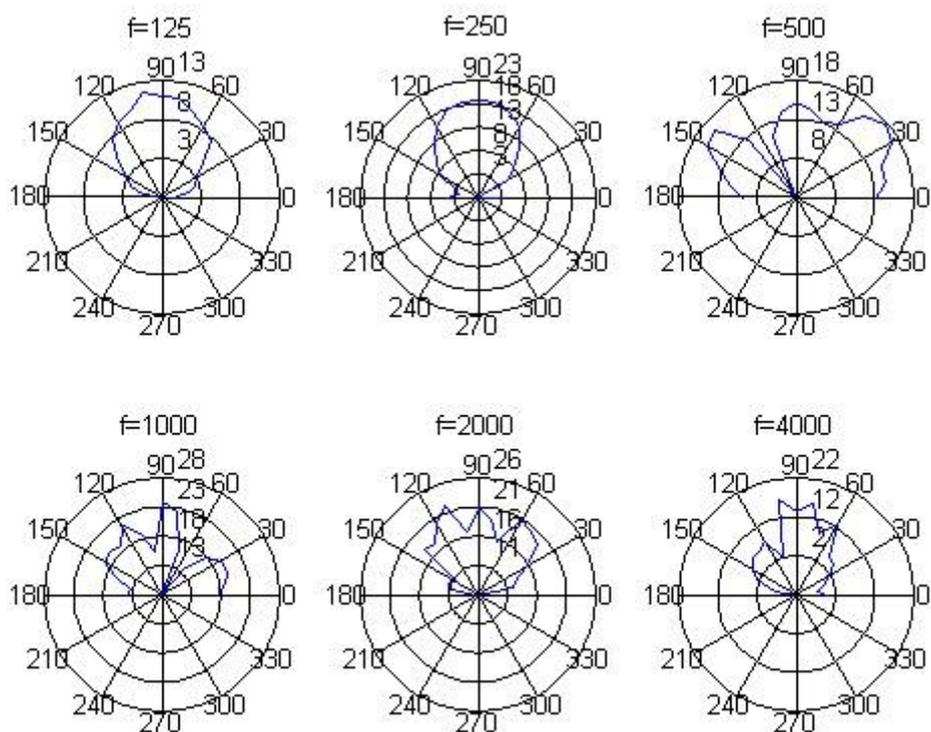
**ANEXO E – PAINEL QRD\_30\_4D**

Figura E.7 – Respostas Polares das frequências 125 a 4000 Hz

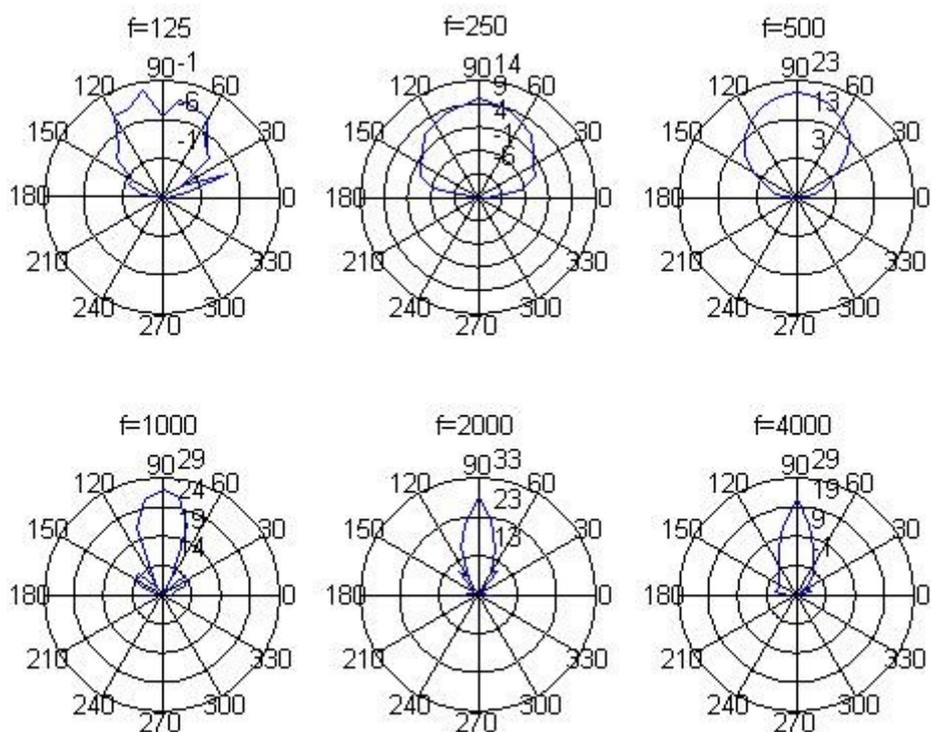
**ANEXO F – PAINEL P**

Figura F.8 – Respostas Polares das frequências 125 a 4000 Hz

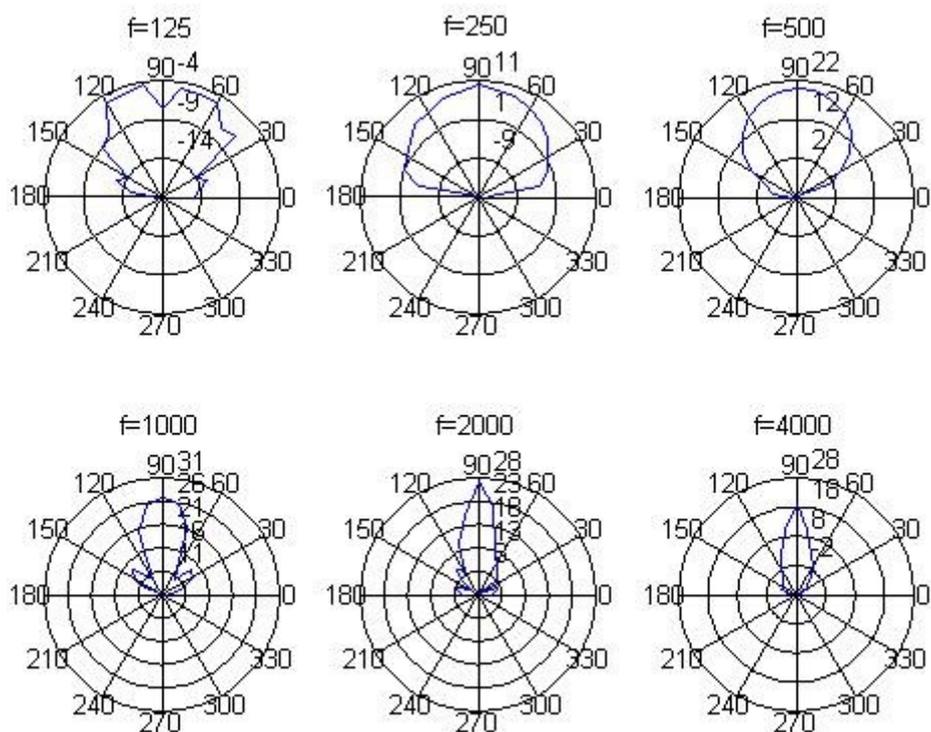
**ANEXO G – PAINEL CR**

Figura G.9 – Respostas Polares das frequências 125 a 4000 Hz

## ANEXO H – PAINEL ABR

### H.1 – Painel a 0°

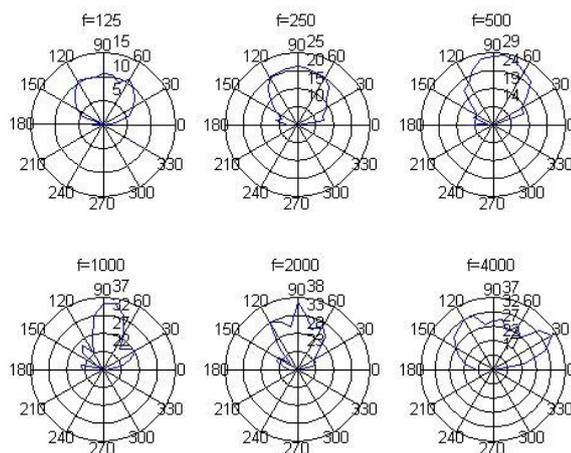


Figura H.1 – Respostas Polares das frequências 125 a 4000 Hz

### H.2 – Painel a 90°

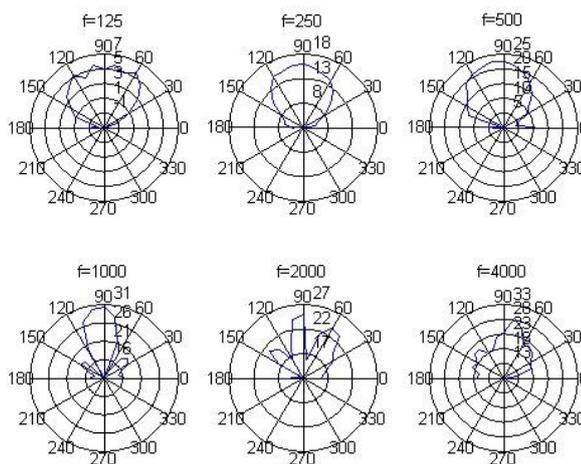


Figura H.2 – Respostas Polares das frequências 125 a 4000 Hz

## ANEXO I – PAINEL MR

### I.1 – Painel a 0°

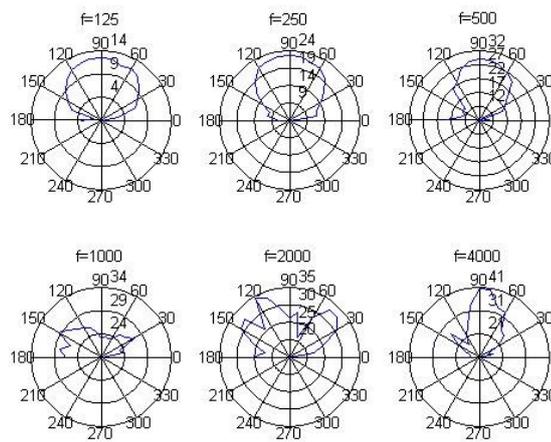


Figura I.1 – Respostas Polares das frequências 125 a 4000 Hz

### I.2 – Painel a 90°

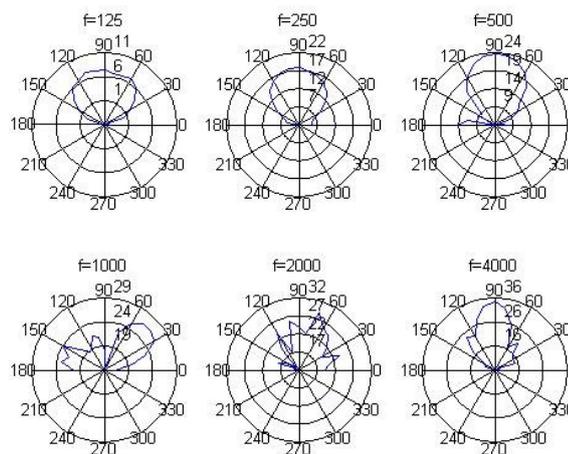


Figura I.2 – Respostas Polares das frequências 125 a 4000 Hz

## ANEXO J – PAINEL PBA

### J.1 – Painel a 0°

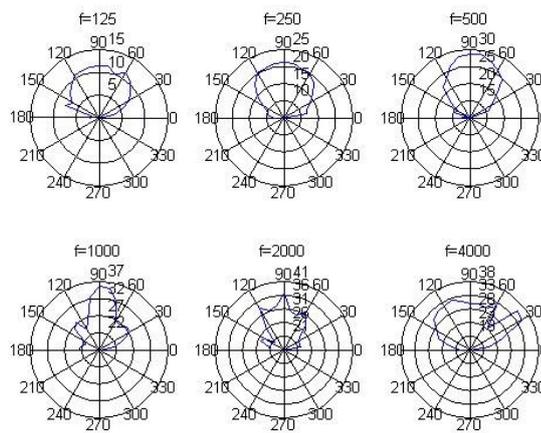


Figura J.1 – Respostas Polares das frequências 125 a 4000 Hz

### J.2 – Painel a 90°

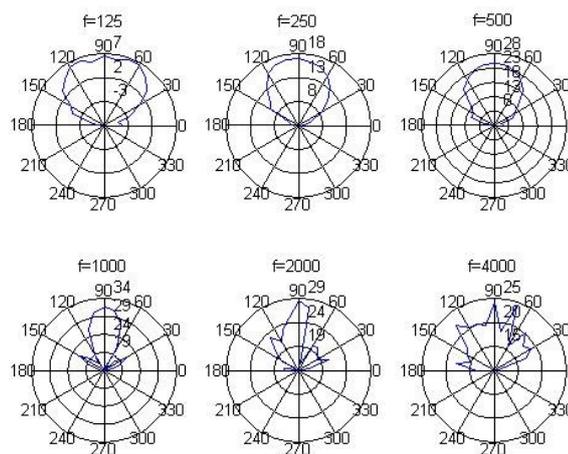


Figura J.2 – Respostas Polares das frequências 125 a 4000 Hz

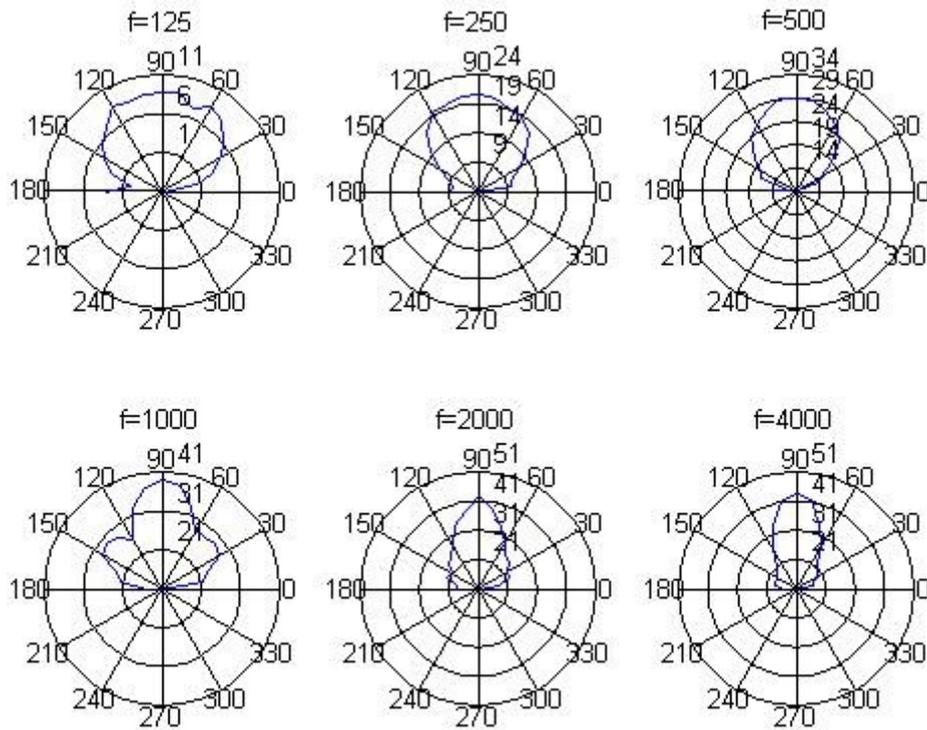
**ANEXO L – PAINEL DE SUPERFICIE LISA**

Figura L.1 – Respostas Polares das frequências 125 a 4000 Hz