

# **DESENVOLVIMENTO DE DIFUSORES ACÚSTICOS**

**LEANDRO ALBANO MARTINS DA SILVA**

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

---

Orientador: Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

SETEMBRO DE 2013

VERSÃO PARA DISCUSSÃO

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-5081446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-5081440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.*

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

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

*“I think of the acoustical palette, which consists of absorption, reflection, and diffusion, as I do the alphabet or the colors in painter’s palette. Without one of the letters or one of the colors in the spectrum, many words or scenes could not be created. It’s the same with trying to design a space without diffusion.”*

*Peter D’Antonio*



## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Carlos Silva e Maria Vieira, pela paciência, carinho, incentivo e pela luta e esforço para possibilitarem esta oportunidade de conhecimento e formação.

À Gabriela, pelo interesse e apoio no decorrer dos trabalhos do irmão.

À Iolanda, pela força e carinho nos momentos precisos.

Ao Orientador e Professor Doutor António Pedro de Oliveira Carvalho, pela disponibilidade demonstrada, pela ajuda e pela oportunidade de desenvolver um tema que se revelou interessante ao longo desta jornada.

Ao Engenheiro António Costa, por toda a disponibilidade e ajuda demonstrada nos ensaios realizados no Laboratório de Acústica.

À empresa Castelhana & Ferreira e ao Engenheiro Ricardo Patraquim pela colaboração neste trabalho e por toda a ajuda e disponibilidade prestada.

Aos meus colegas e amigos da FEUP e do ISEP que partilharam comigo esta jornada de aprendizagem.

Aos meus amigos de longa data e companheiros de casa, pela preocupação, apoio e incentivo na conclusão deste capítulo.



## RESUMO

Uma sala e a sua qualidade acústica devem ser o suporte para o conforto das pessoas e das atividades nas quais estão envolvidas. O som ouvido na maioria dos ambientes é a combinação do som direto, proveniente diretamente da fonte, e do som indireto, proveniente das reflexões nas superfícies da envolvente ou dos objetos presentes no meio. Desta forma, um dos pontos centrais da Acústica de Edifícios é como controlar estas reflexões indiretas que afetam a forma como se percebe o som. Dispersando as reflexões primárias, os efeitos especulares tais como coloração, deslocamento da imagem sonora, aspereza e brilho acústico podem ser mitigados. Os difusores acústicos apresentam-se, assim, como uma solução técnica de revestimento das superfícies, apropriada para promover uma dispersão uniforme da energia sonora e garantir a qualidade acústica de habitações e espaços fechados.

Nesta perspetiva, o presente trabalho visa o estudo, desenvolvimento e avaliação de um elemento de correção acústica que incremente as reflexões difusas que contribuem para a obtenção de um maior conforto acústico nas habitações e espaços fechados, mantendo os aspetos funcionais destes espaços. O difusor acústico desenvolvido em colaboração com a empresa *Castelhano & Ferreira, S.A.*, pretende assumir um papel importante no desempenho acústico no interior de salas, potenciando a difusão e a homogeneidade do campo sonoro no interior das mesmas, minimizando de certa forma o recurso à absorção acústica que provoca a redução da energia sonora quando aplicada em demasia.

No seguimento da revisão de literatura, incidindo na identificação, avaliação e comunicação do estado de conhecimento na área de reflexões difusas e do campo difuso necessário à compreensão do comportamento acústico das diferentes superfícies difusoras, são identificadas as metodologias de dimensionamento e avaliação dos difusores acústicos, contemplando a definição da dimensão, da forma, da quantidade de elementos e do material a utilizar para a produção de um modelo de difusor.

Após o dimensionamento e construção do protótipo foi realizada a avaliação do desempenho acústico do difusor recorrendo a dois ensaios distintos realizados em laboratório (câmaras acústicas):

- Ensaio CDS (Coeficiente de Dispersão Simplificado) para a determinação do coeficiente de dispersão (scattering) por simplificação do método da ISO 17497-1;
- Ensaio HCS (Homogeneidade do Campo Sonoro) para a determinação da homogeneidade do campo sonoro e da influência dos difusores no mesmo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Acústica de edifícios, correção acústica, difusores acústicos, difusão, coeficiente de dispersão, homogeneidade do campo sonoro.



**ABSTRACT**

A room and its acoustic quality should support the comfort of the people and activities in which they are involved. The sound heard in most environments is the combination of the direct sound, coming directly from the source, and indirect sound from reflections on the surrounding surfaces or objects. Hence, one of the central topics in room acoustics is how to manipulate these indirect reflections that affect the way sound is perceived. By diffusing early reflections, specular effects such as coloration, image shifting, harshness and acoustic glare can be mitigated. Diffusers are presented as well as a surface treatment technical solution to promote even scattered energy coverage and ensure room and enclosed spaces acoustics quality.

The present work is to study, develop and evaluate an element of acoustic treatment that increases the diffuse reflections contributing to achieve a greater acoustic comfort in rooms and closed spaces, while maintaining the functional aspects of these spaces. The acoustic diffuser developed in collaboration with the company *Castelhano & Ferreira, S.A.*, intends to play an important role in the acoustic performance of rooms, enhancing the diffusion and homogeneity of the sound field, minimizing the use of absorption that remove some acoustic energy when applied in an excessive area.

Following the literature review, focusing on the identification, evaluation and communication of the diffuse reflections and diffuse field state of art, necessary for an understanding of different diffusing surfaces acoustic behavior, methodologies are identified to design, predict, measure, and quantify sound diffusing surfaces, considering the definition of the size, shape, number of elements and materials used to create a diffuser model.

After the design and construction of a prototype the acoustic performance of the diffuser was evaluated using two different tests performed in the laboratory (acoustic chambers):

- SDC Test (Simplified Dispersion Coefficient) for determining the scattering coefficient (scattering) by simplifying the method of ISO 17497-1;
- USF Test (Uniformity of Sound Field) to determine the homogeneity of the sound field and characterize the degree of diffusion a surface produces.

**KEYWORDS:** Room Acoustics, acoustic treatment, diffusers, diffusion, scattering coefficient, even scattered energy, acoustic performance.



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	i
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1.2. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS.....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	3
<b>2 NOÇÕES BASE DA ACÚSTICA EM EDIFÍCIOS</b> .....	<b>5</b>
2.1. ACÚSTICA EM EDIFÍCIOS .....	5
2.1.1. INTRODUÇÃO .....	5
2.1.2. PROPAGAÇÃO DO SOM EM ESPAÇOS FECHADOS .....	6
2.1.3. ENERGIA SONORA REFLETIDA .....	6
2.2. CORREÇÃO ACÚSTICA .....	7
2.2.1. INTRODUÇÃO .....	7
2.2.2. ABSORÇÃO SONORA .....	8
2.2.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO .....	9
2.2.4. REFLEXÃO E DIFUSÃO.....	11
2.2.5. CAMPO DIFUSO .....	11
<b>3 DIFUSÃO E DISPERSÃO</b> .....	<b>13</b>
3.1. INTRODUÇÃO .....	13
3.2. CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA .....	13
3.3. PRINCÍPIOS BÁSICOS DOS DIFUSORES.....	14
3.3.1. O QUE É UM DIFUSOR? .....	14
3.3.2. COMO É DISPERSADO O SOM PELO DIFUSOR?.....	16
3.3.3. DIFUSÃO EM SALAS PEQUENAS .....	17
3.3.4. ONDE DEVEM SER POSICIONADOS OS DIFUSORES? .....	18

3.3.5.	A QUE DISTÂNCIA DEVERÁ ESTAR COLOCADO O OUVINTE? .....	19
3.3.5.1.	Campo sonoro dispersado .....	19
3.3.5.2.	Campo sonoro total .....	20
<b>3.4.</b>	<b>APLICAÇÕES DOS DIFUSORES.....</b>	<b>21</b>
<b>3.5.</b>	<b>MEDIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS REFLEXÕES DIFUSAS E DISPERSÃO.....</b>	<b>23</b>
3.5.1.	Introdução .....	23
3.5.2.	Coeficiente de difusão .....	23
3.5.3.	Coeficiente de dispersão .....	24
<b>4</b>	<b>DIFUSORES ACÚSTICOS .....</b>	<b>27</b>
<b>4.1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>27</b>
<b>4.2.</b>	<b>DIFUSORES DE SCHROEDER.....</b>	<b>27</b>
4.2.1.	INTRODUÇÃO.....	27
4.2.2.	DIFUSORES DE SEQUÊNCIA DE COMPRIMENTO MÁXIMO (MLS) .....	31
4.2.3.	DIFUSORES QUADRÁTICOS (QRD) .....	32
4.2.4.	DIFUSORES DE SEQUÊNCIA DE RAIZ PRIMITIVA (PRD) .....	33
4.2.5.	OUTRAS SEQUÊNCIAS.....	33
4.2.6.	ESQUEMAS DE MODULAÇÃO E CONSTRUÇÃO FRACTAL.....	34
4.2.7.	DIFUSORES BIDIMENSIONAIS (HEMISFÉRICOS) .....	34
4.2.8.	DIFUSORES DE SCHROEDER OTIMIZADOS E DIFUSORES ESCALONADOS ( <i>STEPPED</i> ).....	35
<b>4.3.</b>	<b>DIFUSORES GEOMÉTRICOS.....</b>	<b>36</b>
4.3.1.	INTRODUÇÃO.....	36
4.3.2.	SUPERFÍCIES PLANAS.....	36
4.3.3.	SUPERFÍCIES TRIANGULARES E PIRAMIDAIS.....	37
4.3.4.	SUPERFÍCIES CURVAS .....	38
4.3.5.	SUPERFÍCIES CURVAS OTIMIZADAS.....	39
4.3.6.	SUPERFÍCIES FRACTAIS.....	41
<b>4.4.</b>	<b>SUPERFÍCIES HÍBRIDAS.....</b>	<b>42</b>
4.4.1.	INTRODUÇÃO.....	42
4.4.2.	DIFUSORES HÍBRIDOS PLANOS.....	43
4.4.3.	DIFUSORES HÍBRIDOS CURVOS .....	43

<b>4.5. DIFUSORES ATIVOS.....</b>	<b>45</b>
<b>5 DESENVOLVIMENTO DAS SOLUÇÕES – DIMENSIONAMENTO E CARACTERIZAÇÃO .....</b>	<b>47</b>
<b>5.1. PRIMEIRO MODELO PROPOSTO.....</b>	<b>47</b>
5.1.1. INTRODUÇÃO.....	47
5.1.2. DIMENSIONAMENTO DO MODELO .....	47
5.1.3. ANÁLISE DA PROPOSTA.....	49
<b>5.2. SEGUNDO MODELO PROPOSTO.....</b>	<b>50</b>
5.2.1. INTRODUÇÃO.....	50
5.2.2. DIMENSIONAMENTO DO MODELO .....	50
5.2.3. ANÁLISE DA PROPOSTA.....	62
<b>5.3. SEGUNDO MODELO COM AS ALTERAÇÕES PROPOSTAS – MODELO FINAL .....</b>	<b>63</b>
<b>5.4. FABRICO DOS PROTÓTIPOS .....</b>	<b>65</b>
<b>6 ENSAIOS E MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>67</b>
<b>6.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>67</b>
<b>6.2. COEFICIENTES DE DIFUSÃO E DISPERSÃO.....</b>	<b>68</b>
6.2.1. COEFICIENTE DE DIFUSÃO .....	68
6.2.1.1. Definição .....	68
6.2.2. COEFICIENTE DE DISPERSÃO .....	70
6.2.2.1. Definição .....	70
6.2.2.2. Princípio .....	71
6.2.2.3. Metodologia.....	72
<b>6.3. MOTIVOS PARA NÃO SE AVALIAR O COEFICIENTE DE DIFUSÃO.....</b>	<b>74</b>
<b>6.4. ENSAIOS REALIZADOS.....</b>	<b>75</b>
6.4.1. OBJETIVOS.....	75
6.4.2. ENSAIO CDS – DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DISPERSÃO SIMPLIFICADO .....	76
6.4.2.1. Objetivo .....	76
6.4.2.2. Requisitos do ensaio.....	76
6.4.2.3. Procedimento de teste .....	79

6.4.2.4.	Resultados .....	82
6.4.2.5.	Análise dos resultados .....	84
6.4.3.	ENSAIO HCS – DETERMINAÇÃO DA HOMOGENEIDADE DO CAMPO SONORO .....	86
6.4.3.1.	Objetivo .....	86
6.4.3.2.	Requisitos do ensaio.....	86
6.4.3.3.	Procedimento de teste e medição .....	87
6.4.3.4.	Resultados .....	91
6.4.3.5.	Análise dos resultados.....	92
<b>6.5.</b>	<b>ANÁLISE GLOBAL.....</b>	<b>96</b>

## **7 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS..... 97**

<b>7.1.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>97</b>
-------------	------------------------	-----------

<b>7.2.</b>	<b>DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....</b>	<b>98</b>
-------------	--------------------------------------	-----------

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 101**

### **ANEXOS**

**ANEXO A – RELATÓRIOS DE SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO ACÚSTICO DAS SUPERFÍCIES DO DIFUSOR NO PROGRAMA AFMG**

**ANEXO B – REGISTOS E FOLHAS DE CÁLCULO DO ENSAIO CDS (COEFICIENTE DE DISPERSÃO SIMPLIFICADO)**

**ANEXO C – REGISTOS E FOLHAS DE CÁLCULO DO ENSAIO HCS (HOMOGENEIDADE DO CAMPO SONORO)**

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Campo direto e campo reverberado [4].	6
Figura 2.2 - Resposta temporal e espacial para três superfícies diferentes: absorvora, refletora e difusora [5].	8
Figura 2.3 – Tempo de reverberação [4].	9
Figura 3.1 – Primeiro mecanismo de reflexão difusa – rugosidade da superfície.	14
Figura 3.2 – Segundo mecanismo de reflexão difusa - difração pelos bordos [7].	14
Figura 3.3 – Terceiro mecanismo da reflexão difusa – difusor numérico [1].	15
Figura 3.4 – Construção de Huygens para uma onda plana refletida por uma superfície plana (acima) e por uma superfície curva (abaixo) [1].	15
Figura 3.5 – Construção de Huygens para uma onda plana refletida num difusor de Schroeder simplificado [1].	16
Figura 3.6 – Esquerda – resposta polar de um difusor 1D; Direita – resposta polar para um difusor 2D [9].	16
Figura 3.7 – Representação de uma reflexão especular (acima) e uma reflexão difusa (abaixo) [10].	17
Figura 3.8 – Importância relativa de três tratamentos acústicos em salas de reprodução de som (estúdios de gravação e home theatres) [1].	17
Figura 3.9 – Esquema da Reflection Free Zone (área sombreada) de uma sala de controlo (régie) [5].	18
Figura 3.10 – Tempo de resposta de uma sala antes e depois do tratamento acústico [12].	19
Figura 3.11 – Resposta em função do tempo e da frequência para uma reflexão especular isolada (A e B) e para uma reflexão difusa isolada (C e D). A janela de tempo usada na transformada de Fourier para gerar a resposta por frequência é indicada por duas linhas verticais em (C) [5].	20
Figura 3.12 – Resposta em função do tempo e da frequência para o campo sonoro total consistindo no som direto e na reflexão especular (A e B) e no som direto e na reflexão difusa (C e D) [5].	21
Figura 3.13 – Estúdio de gravação Blackbird em Nashville, EUA [13].	22
Figura 3.14 – Difusores de Schroeder no Michael Fowler Centre, Nova Zelândia [14].	22
Figura 3.15 – Difusores de Schroeder num home theater [10].	23
Figura 3.16 – Goniómetro para um difusor 1D [15].	24
Figura 3.17 – Resposta do impulso para duas posições diferentes da mesa rotativa a 100, 500 e 2000 Hz [11].	25
Figura 4.1 – Esquerda - design original do difusor de Schroeder [10]. Meio – níveis de dispersão de um difusor de Schroeder. Direita - níveis de dispersão de uma superfície plana [1].	28
Figura 4.2 – Secção transversal de um difusor residual quadrático (QRD) com $N=7$ [1].	29
Figura 4.3 – Resposta polar de um difusor residual quadrático ( $N=7$ ), numa frequência de 3000 Hz, para três números de períodos diferentes. À esquerda um período, no meio seis períodos e na direita 50 períodos [1].	30
Figura 4.4 – Secção de um difusor MLS, de período $N=7$ [1].	31
Figura 4.5 – Resposta polar de um difusor MLS $N=7$ na sua frequência de projeto. — difusor MLS $N=7$ ; — superfície plana [1].	32
Figura 4.6 – Aplicação de um conjunto de difusores QRD no Nicholas Music Center, EUA [19].	32
Figura 4.7 – Dispersão provocada por um difusor de raiz primitiva (PRD), um difusor de raiz primitiva modificado (CDMPRD) e uma superfície plana, para uma incidência normal e uma frequência de projeto de 500 Hz [20].	33
Figura 4.8 – Resposta polar de um difusor QRD (B) e a resposta polar ideal para um difusor de modulação aperiódica (C) [19].	34

Figura 4.9 – Secção transversal de uma modulação de um esquema usando um difusor QRD $N=7$ e o seu inverso [17] .....	34
Figura 4.10 - Difusor Omnifusor 2D QRD [19].....	35
Figura 4.11 – Difusor escalonado otimizado (Optimized stepped diffuser) [18] .....	35
Figura 4.12 – Secção de uma superfície difusora com as paredes finas entre os elementos sequências (A) e uma superfície difusora sem as paredes finas (B) [21].....	35
Figura 4.13 - Resposta polar para a pressão dispersada por um painel plano para três frequências diferentes. - - - - $\lambda=20a$ ; ——— $\lambda=2a$ ; ——— $\lambda=0,2a$ , onde $a$ é a dimensão do painel [1]. .....	37
Figura 4.14 – Aplicação de painéis planos no Byron Steele High School Auditorium, EUA [22]. .....	37
Figura 4.15 – Diferentes superfícies difusoras piramidais [23]. .....	38
Figura 4.16 – Disposição de difusores piramidais no teto de um estúdio de gravação [24].....	38
Figura 4.17 – Aplicação de difusores cilíndricos numa sala [25].....	39
Figura 4.18 - Resposta polar para a pressão dispersada para um conjunto de semicilindros periódico e aperiódico. ——— aperiódico; ——— periódico [1]. .....	39
Figura 4.19 - Aplicação de difusores curvos otimizados (OptiCurve™) no Humminbirg Centre, em Toronto [26] .....	40
Figura 4.20 – Resposta polar da dispersão provocada por um difusor de superfície curva otimizada ——— e um difusor de superfície côncava ——— [17]. .....	41
Figura 4.21 – Conjunto de difusores otimizados assimétricos [1]. .....	41
Figura 4.22 – Espectro de difusão de difusores fractais comercializados pela RPG [19].....	42
Figura 4.23 – Construção de uma superfície híbrida: material absorvente poroso (esquerda), máscara perfurada (meio) e cobertura (direita) [1]. .....	42
Figura 4.24 – Respostas polares de dispersão a 3 kHz. Esquerda: difusor híbrido (BADTM). Direita: superfície plana [17]. .....	43
Figura 4.25 – Espectros de dispersão para duas superfícies (a linha fina representa uma superfície plana não absorvente). Esquerda: superfície híbrida curva. Direita: superfície híbrida plana [1]. .....	44
Figura 4.26 – Coeficiente de difusão para quatro superfícies. — — — — Refletor plano sem absorção; ••••• Superfície híbrida plana; ——— Superfície híbrida curva; ——— Difusor curvo otimizado [1] .....	44
Figura 4.27 – Difusores ativos baseados no modelo de Schroeder [28] .....	45
Figura 4.28 – Medição da resposta polar de dispersão para dois difusores e uma superfície plana. (A) 500 Hz, (B) 1000 Hz: ———, difusor de Schroeder passivo; •••••, difusor de Schroeder ativo; ———, superfície plana [27].....	46
Figura 5.1- Esquema de fabrico do protótipo do difusor A (perfurações cilíndricas).....	48
Figura 5.2 - Esquema de fabrico do protótipo do difusor B (saliências cilíndricas).....	48
Figura 5.3 (esq) - Protótipo do difusor A e Figura 5.4 (dir) - Protótipo do difusor B. ....	48
Figura 5.5 - Aplicação num esquema modular (2x2) dos difusores A e B, na parede posterior de uma sala. ....	49
Figura 5.6 – Segundo modelo de difusor proposto para realização do protótipo. ....	50
Figura 5.7 – Processo de dimensionamento do segundo modelo proposto. ....	51
Figura 5.8 - Resposta polar de um difusor 2D [29]. ....	52
Figura 5.9 - Sequência quadrática residual para os números primos de 5 a 19. ....	52
Figura 5.10 - Matriz sequencial para o difusor quadrático residual 15x15 (sequências escolhidas na direção-x e -z).....	53
Figura 5.11 - Matriz sequencial para o difusor quadrático residual 15x15, com um período realçado. 55	

Figura 5.12 - Matriz sequencial para o difusor quadrático residual 15x15, com as séries escolhidas em realce. ....	56
Figura 5.13 - Sequência [1 2 5 3 3 5 2 1 2 5 3 3 5 2 1] denominada Line A2 e a sequência inversa denominada Line A1. ....	56
Figura 5.14 - Sequência [4 5 1 6 6 1 5 4 5 1 6 6 1 5 4] denominada Line B2 e a sequência inversa denominada Line B1. ....	56
Figura 5.15 - Resposta polar da superfície Line A2 para as frequências 1000 e 2000 Hz com um ângulo de incidência de 0° (previsto pelo AFMG Reflex). ....	57
Figura 5.16 - Resposta polar da superfície Line A1 para as frequências 1.000 e 2.000 Hz com um ângulo de incidência de -45° (previsto pelo AFMG Reflex). ....	58
Figura 5.17 - Coeficientes de dispersão, difusão e difusão normalizado para a superfície Line A2, para uma incidência aleatória (previsto pelo AFMG Reflex). ....	59
Figura 5.18 (esq.) e Figura 5.19 (dir.) - Coeficientes de dispersão, difusão e difusão normalizado para a superfície Line A1, para uma incidência aleatória. À esquerda o ângulo de inclinação do topos 0°. À direita o ângulo de inclinação dos topos 27° e 37° (previsão com o AFMG Reflex). ....	60
Figura 5.20 – Otimização das superfícies Line A1 e Line A2 – Corte A. A vermelho, o novo limite das superfícies com a disposição aleatória das inclinações de 27° e 37° nos topos dos elementos. ....	60
Figura 5.21 - Otimização das superfícies Line B1 e Line B2 - Corte B. A vermelho, o novo limite das superfícies com a disposição aleatória das inclinações de 27° e 37° nos topos dos elementos. ....	61
Figura 5.22 – Superfícies resultantes do corte A e B. ....	61
Figura 5.23 – Matriz de distribuição final das superfícies do difusor e representação do modelo (projetado em Autocad 3D). ....	61
Figura 5.24 – Corte B. ....	62
Figura 5.25 – Diferentes vistas do segundo modelo proposto para o difusor (projetado em Autocad 3D). ....	62
Figura 5.26 - Esquema da alteração das inclinações no Corte B. A linha verde representa o corte da superfície e as circunferências vermelhas assinalam as alterações realizadas em relação à proposta anterior. ....	63
Figura 5.27 – Esquemas dos cortes finais A e B. ....	63
Figura 5.28 - Configuração final da superfície do difusor. ....	64
Figura 5.29 - Modelo final do difusor. ....	64
Figura 5.30 – Placas de fibra de madeira de média densidade – MDF [32]. ....	65
Figura 5.31 - Elementos dos cortes A e B após fresagem (fotos fornecidas pela Castelhana & Ferreira). ....	65
Figura 5.32 – Montagem do difusor – disposição ordenada das Lines (foto fornecida pela Castelhana & Ferreira). ....	66
Figura 5.33 – Vistas do protótipo final. À esquerda, vista perpendicular às linhas do difusor. À direita, vista paralela às linhas do difusor. ....	66
Figura 6.1 – Medição da resposta polar em 3D. À esquerda 2,5 kHz, difusor Skyline, incidência normal. À direita 1,25 kHz, estrutura ripada aleatória, incidência a 60° [33]. ....	68
Figura 6.2 – Esquemas de montagem laboratorial para medição do coeficiente de difusão conforme AES-4id-2001. À esquerda sistema de medição de uma superfície difusora 1D, com goniómetro 2D. À direita sistema de medição de um difusor 2D, com um goniómetro 3D [19]. ....	69
Figura 6.3 - Resumo do processo de obtenção do coeficiente de difusão (d) para uma amostra plana cf. norma AES-4id-2001 [12]. ....	70

Figura 6.4 - Dispersão provocada por uma superfície rugosa (energia normalizada em relação à energia incidente) em que $\alpha$ - coeficiente de absorção e $s$ - coeficiente de dispersão (adaptado de [34]).	71
Figura 6.5 - Resposta impulsiva de três diferentes posições da amostra de teste (adaptado de [3, 34]).	71
Figura 6.7 – Disposição da amostra sobre mesa rotativa para medição dos impulsos sonoros cf. ISO 17497-1 para obtenção do coeficiente de dispersão ( $s$ ) [21].	72
Figura 6.8 – Disposição das fontes e dos microfones na câmara reverberante para medição dos tempos de reverberação (6 medições por posição) [21].	73
Figura 6.9 – Condições de medição para os tempos de reverberação diferentes cf. ISO 17497-1 [3]..	74
Figura 6.10 - Disposição do Ensaio CDS (Coeficiente de Dispersão Simplificado) na câmara reverberante R1 (FS – Fonte sonora, MIC – Microfone).	76
Figura 6.11 – Esquema da aresta mínima necessária para cumprimento do requisito de dimensão mínima da amostra à escala real (amarelo) e à escala 1:2 (vermelho).	77
Figura 6.12 – Amostra quadrada (oito painéis) colocada diretamente no piso da câmara reverberante (o espaço no centro deve-se à falta do nono painel não fornecido pela Castelhana & Ferreira).	78
Figura 6.13 – Material usado na medição do coeficiente de dispersão [fotos do autor].	79
Figura 6.14 – Ensaio CDS - Montagem dos equipamentos na câmara reverberante R1 e distâncias entre os equipamentos para medição dos tempos de reverberação.	80
Figura 6.15 – Ensaio CDS - Montagem experimental para a determinação do tempo de reverberação T1 (sem amostra e sem rotação).	80
Figura 6.16 – Ensaio CDS -Montagem experimental para a determinação do tempo de reverberação T2 (com amostra e sem rotação).	81
Figura 6.17 – Ensaio CDS - Montagem experimental para a determinação do tempo de reverberação T4 (com amostra e com rotação).	82
Figura 6.18 – Coeficiente de dispersão ( $s$ ) para o difusor ensaiado à escala real e à escala 1:2.	83
Figura 6.19 - Coeficientes de dispersão ( $s$ ) para dois difusores. O difusor ensaiado à escala real (pelo método simplificado e com o número insuficiente de amostras, oito painéis em vez de 25) e um difusor 2D Skyline (ensaiado por Peter D'Antonio cf. [1]).	84
Figura 6.20 - Coeficientes de dispersão ( $s$ ) para o difusor ensaiado à escala 1:2 pelo método simplificado e com número insuficiente de amostras, oito painéis em vez dos nove normativos.	85
Figura 6.21 - Coeficientes de dispersão ( $s$ ) para dois difusores. O difusor ensaiado à escala 1:2 pelo método simplificado e com número insuficiente de amostras, oito painéis em vez dos nove normativos e um difusor 2D Skyline (ensaiado por Peter D'Antonio cf. [1])	85
Figura 6.22 - Disposição do Ensaio HCS na câmara reverberante E1 transformada por aumento significativo da absorção para simular uma “sala acusticamente pequena”.	86
Figura 6.23 - Tempo de reverberação da sala na situação inicial (transformada com mais absorção).	86
Figura 6.24 – Disposição dos oito difusores na parede frontal da câmara reverberante E1 (foto do autor).	87
Figura 6.25 – Material e equipamento usado na medição do aumento do grau de difusão numa sala pequena (HCS) (fotos do autor).	88
Figura 6.26 – Ensaio HCS - Montagem dos equipamentos na câmara reverberante E1 transformada em sala acusticamente pequena.	88
Figura 6.27 - Comparação do nível sonoro para cinco diferentes tempos de emissão do sinal sonoro na sala E1.	89
Figura 6.28 – Ensaio HCS - Montagem experimental para determinação do tempo de reverberação T2, com a amostra presente na sala E1.	89

Figura 6.29 – Ensaio HCS - Montagem experimental para determinação do nível sonoro equivalente na malha definida, sem a amostra, para os tempos de 0,5 e 5 s, de emissão do estímulo sonoro. ....90

Figura 6.30 – Ensaio HCS - Montagem experimental para determinação do nível sonoro equivalente na malha definida, com a amostra (difusor), para os tempos de 0,5 e 5 s de emissão do estímulo sonoro. 90

Figura 6.31 – Ensaio HCS - Montagem experimental para determinação do nível sonoro equivalente no meio da sala, para uma amostragem de 20 medições.....91

Figura 6.32 - Análise gráfica do nível sonoro equivalente para uma emissão de 0,5 s de duração e para as frequências de 250, 500, 1000 e 2000 Hz, sendo representada a leitura do nível sonoro equivalente para cada uma das nove posições de medição. ....92

Figura 6.33 - Análise gráfica do nível sonoro equivalente para uma emissão de 5 s de duração e para as frequências de 250, 500, 1000 e 2000 Hz, sendo representada a leitura do nível sonoro equivalente para cada uma das nove posições de medição.....94



**ÍNDICE DE QUADROS**

Quadro 5.1 - Cálculo da modulação da sequência em x com a sequência em z. ....	54
Quadro 6.1 - Absorção sonora do ar, em $m^{-1}$ , em função da humidade relativa (adaptado de [39]).....	83
Quadro 6.2 - Registos da humidade relativa e da temperatura durante a realização dos ensaios . ....	83
Quadro 6.3 – Valores dos coeficientes de dispersão (s) por terço de oitava para as amostras à escala 1:1 e à escala 1:2.....	83
Quadro 6.4 - Desvio padrão do nível sonoro equivalente para uma emissão de 0,5 s de duração entre as medições efetuadas para as nove posições, com e sem os difusores ( $\Delta=COM-SEM$ ).....	93
Quadro 6.5 - Desvio padrão do nível sonoro equivalente para uma emissão de 5 s de duração entre as medições efetuadas para as nove posições, com e sem os difusores ( $\Delta=COM-SEM$ ).....	94
Quadro 6.6 - Média e desvio padrão do nível sonoro equivalente para 1 s e uma amostragem de 20 medições por microfone para o meio da sala, com e sem os difusores. ....	95
Quadro 6.7 - Média e desvio padrão do nível sonoro equivalente para 5 s e uma amostragem de 20 medições por microfone para o meio da sala, com e sem os difusores. ....	96



**SÍMBOLOS E ABREVIATURAS**

- $\varnothing_d$  - Diâmetro mínimo da amostra circular (m);
- $A_I$  - Área de absorção equivalente da sala vazia (m<sup>2</sup>);
- BEM - Modelo de elementos finitos (*boundary element model*);
- $c$  - Velocidade do som (m/s);
- CDMPRD – Sequência de Raiz Primitiva Modificada por Cox-D’Antonio;
- CDS – Coeficiente de Dispersão Simplificado;
- $d$  – Coeficiente de difusão (*diffusion coefficient*);
- $d_{máx}$  - Profundidade máxima de uma reentrância (mm);
- $d_n$  - Profundidade da reentrância (mm);
- $d_n$  - coeficiente de difusão normalizado;
- $e$  – distância da amostra às paredes da câmara (m);
- $E_{spec}$  - Energia refletida de forma especular;
- $E_{total}$  - Energia total refletida;
- $f_0$  - Frequência de projeto (Hz);
- FDTD - Métodos das Diferenças Finitas do Domínio do Tempo;
- FEA - Análise dos Elementos Finitos;
- $f_{máx}$  - Frequência máxima (Hz);
- $f_{mín}$  - Frequência mínima (Hz);
- FS – Fonte sonora;
- $h$  - Rugosidade da amostra;
- HCS – Homogeneidade do Campo Sonora;
- HR – Humidade relativa (%);
- $l$  - Dimensão mínima da aresta da amostra quadrada (m);
- LEDE - *Live End Dead End*;
- $L_{eq}$  – Nível de pressão sonora equivalente (dB);
- $L_i$  – Nível de pressão sonora (dB);
- Line A1 e A2* – Linhas do difusor dimensionadas segundo uma sequência residual quadrática (corte A);
- Line B1 e B2* – Linhas do difusor dimensionadas segundo uma sequência residual quadrática (corte B);
- $m$  - Absorção sonora do ar (m<sup>-1</sup>);
- MDF – Placa de aglomerado de madeira de média densidade (*Medium-Density Fiberboard*);
- MIC – Microfone;

MLS - Sequência de Comprimento Máximo;  
mod – Resto não negativo;  
n - Número da reentrância;  
N – Escala da amostra; Número primo que serve de base para gerar uma sequência residual quadrática;  
p – Pressão sonora (Pa);  
PRD - Sequência de Raiz Primitiva;  
QRD - Difusor residual quadrático (*Quadratic Residue Diffuser*);  
RFZ - *Reflection Free Zone*;  
s – Coeficiente de dispersão (*scattering coefficient*);  
 $s_{m\acute{a}x}$  - Maior número da sequência residual quadrática;  
 $s_n$  - Número da sequência;  
 $s_{n,m}$  – Elemento da matriz estrutural;  
T – Temperatura (°C);  
t – tempo (s);  
 $T_i$  – Tempo de reverberação (s);  
V - Volume da câmara reverberante (m<sup>3</sup>);  
w - Largura da reentrância (mm);  
 $\alpha$  – Coeficiente de absorção sonora;  
 $\alpha_s$  - Coeficiente de absorção;  
 $\alpha_{spec}$  - Coeficiente de absorção especular aparente;  
 $\lambda_0$  - Comprimento de onda correspondente à frequência de projeto (m);  
 $\lambda_{min}$  - Mínimo comprimento de onda (m);

# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Um difusor ideal é a superfície que causa numa onda sonora incidente de qualquer direção uma dispersão constante em todas as direções.

Ao longo dos séculos, assistiu-se a uma panóplia de mudanças no gosto arquitetónico. Essas mudanças levaram à passagem por vários estilos que conduziram a uma mudança na estética interior de salas, resultando numa mudança física na acústica de salas. Nas grandes construções e salas de espetáculos construídas antes no século XX, era comum o uso de uma ornamentação bastante trabalhada, garantindo amplas superfícies difusoras e presumivelmente um campo sonoro mais difuso. Os meados do século XX foram acompanhados de uma mudança nesse estilo de decoração. Este foi substituído por um aspeto mais simples. Muitos auditórios e salas de espetáculos, após meados do século XX, apresentam grandes superfícies planas que, sustentadas numa engenharia de progressiva precisão, levam cada vez mais a uma maior reflexão especular e menor reflexão difusa.

No sentido de melhorar o comportamento acústico das novas salas, surgiu um crescente interesse no uso de superfícies difusoras. Prontamente houve uma explosão no seu uso em estúdios musicais. Um impulsionador foi o projeto pioneiro de um difusor por parte de Schroeder, conhecido como Difusor Quadrático (QRD), que deu a possibilidade de modelar difusores com características acústicas conhecidas. Este uso foi consolidado com a aplicação bem-sucedida destes difusores por Marshall e Hyde no *Michael Fowler Centre*, na Nova Zelândia e pelo trabalho de D'Antonio que o utilizou em salas pequenas para explorar conceitos como *Live End Dead End (LEDE)* e *Reflection Free Zone (RFZ)*. A partir daí, vários estudos e experiências foram realizados, com o intuito de melhorar a resposta dos difusores. A procura de inovação nos difusores resultou em novas técnicas de modelação e otimização, dando origem a uma paleta de diferentes superfícies difusoras. D'Antonio e Cox foram dois entusiastas na abordagem deste tema, deles resultaram vários artigos e publicações na matéria, entre os quais se destaca o livro "*Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application*" [1] considerado a "bíblia" para o dimensionamento dos difusores acústicos.

Há, no entanto, muito por fazer nesta área e os últimos trabalhos têm sido desenvolvidos nas formas de quantificar o desempenho dos difusores e de se analisar a sua prestação, na procura de modelos de comportamento otimizado e numa cada vez maior integração estética.

## 1.2. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

O atual estado de arte dos difusores acústicos já contempla alguns produtos com um excelente comportamento à difusão e os conhecimentos acerca das superfícies difusoras têm sido alvo de interesse para diversos autores. No entanto este é ainda um assunto relativamente recente com muito por fazer. Nesta dissertação não se pretende criar um conceito de raiz tal como Manfred Schroeder, que se baseou numa sequência numérica para a criação do primeiro difusor que se conhece, o difusor quadrático (QRD). Nesta dissertação pretende-se contemplar o conhecimento do estado de arte dos difusores acústicos e de acordo com o estudo efetuado, dimensionar e testar um novo difusor acústico para aplicação em salas pequenas (*home theater*) em colaboração com uma empresa especializada, *Castelhano & Ferreira*.

Esta dissertação pretende assim a criação de um produto adequado à aplicação em salas pequenas. O dimensionamento do difusor acústico basear-se-á na bibliografia existente relativamente a este assunto, tendo por base os conceitos teóricos explanados por Peter D'Antonio e Trevor Cox [1]. Destinando-se a salas pequenas, o principal objetivo do dimensionamento do difusor acústico será a redução da coloração, preservando a energia, garantindo-a com um atraso (*delay*) e temporalmente dispersa, minimizando, assim, a distorção causada pela interferência com o som direto e garantir um som circundante (*surround*) passivo, através da dispersão espacial, com o intuito de se obter ambiência e envolvimento na sala.

Além do dimensionamento, outra parte importante desta dissertação prende-se com a metodologia experimental para a avaliação e quantificação do desempenho do difusor projetado. Sem medições e resultados da dispersão provocada pela superfície é impossível confiar e aplicar um difusor apenas pela sua aparência. Assim, é importante a avaliação dos coeficientes que permitem conhecer o desempenho de uma superfície difusora. Para tal serão abordados os coeficientes, atualmente definidos pela comunidade internacional, que melhor caracterizam e medem o desempenho das superfícies difusoras: o coeficiente de difusão (*diffusion-d*) e o coeficiente de dispersão (*scattering-s*). A metodologia de determinação destes coeficientes está definida na norma AES 4id-2001 [2] que se refere à caracterização e medição da uniformidade da difusão provocada por uma superfície e na norma internacional ISO 17497-1 [3] referente à medição do coeficiente de dispersão de incidência aleatória numa câmara de reverberação.

A avaliação destes coeficientes está condicionada à existência de todos os equipamentos de medição exigidos na norma e ao cumprimento de todos os requisitos normativos impostos relativos a dimensões, tempos de medição e parâmetros de avaliação. Devido à impossibilidade de cumprimento de todos estes requisitos quer devido à indisponibilidade de equipamento de medição necessário quer pela dependência da empresa para o fabrico das amostras segundo os requisitos normativos, foram definidos dois ensaios simplificados para avaliação e medição do desempenho do difusor.

De forma a determinar o coeficiente de dispersão (*s*) foi definido um ensaio simplificado com base na metodologia da norma ISO 17497-1, de forma a simplificar alguns dos requisitos normativos impostos e adaptando as condições de ensaio aos recursos disponíveis. Este ensaio foi denominado de Ensaio CDS (Coeficiente de Dispersão Simplificado).

Devido à impossibilidade de medição da resposta polar da superfície dimensionada, ou seja, o coeficiente de difusão (*d*), foi definido um ensaio que permitisse determinar o grau de homogeneidade do campo sonoro numa sala pequena provocado por um difusor, avaliando o nível de pressão sonora em diferentes pontos da sala. Este ensaio foi denominado de Ensaio HCS (Homogeneidade do Campo Sonoro).

Assim, o objetivo ao nível da avaliação do desempenho da superfície difusora passou pela definição de métodos alternativos simplificados de medição com base nos procedimentos normativos existentes. Desta forma o desempenho da superfície não pode ser diretamente comparado com outras superfícies, sendo no entanto avaliadas determinadas características da superfície difusora que possibilitam a caracterização do seu desempenho funcional.

### **1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação está organizada da seguinte forma:

No Capítulo 2 é feita uma abordagem teórica dos conceitos básicos da acústica de edifícios, abordando mais concretamente as reflexões dentro das habitações e espaços fechados de forma a permitir uma melhor compreensão da necessidade de correção acústica nestes espaços. Aqui são hierarquizados os conceitos básicos da acústica em edifícios e as formas de atuação na correção acústica.

Os pontos-chave relativamente à difusão extraídos da literatura estão condensados no Capítulo 3. Estes permitem uma melhor compreensão do processo da difusão, da necessidade de intervenção neste campo em diferentes salas, o que são os difusores, qual a melhoria introduzida por estes, onde podem ser aplicados e quais os parâmetros que permitem avaliar o seu desempenho.

No Capítulo 4 é descrito o estado de arte atual relativamente ao tipo de difusores existentes. É feita uma abordagem desde o difusor pioneiro de Schroeder que deu origem a uma sucessão de modificações, baseadas em diferentes sequências numéricas e são abordados os difusores geométricos e as modificações possíveis através da otimização. Aqui também são descritos os difusores mais recentes, os híbridos e os ativos, que permitem uma maior abrangência na gama do campo sonoro, quer por incorporação de absorção ou elementos ativos que expandem a gama das frequências de atuação.

No Capítulo 5 é feita a condução pelo processo de desenvolvimento e caracterização da solução. Aqui é explicado o processo que conduziu à obtenção da solução final, as premissas consideradas e são justificadas as opções relativamente ao dimensionamento matemático da superfície e relativamente aos materiais e geometria adotados. São apresentados os diversos modelos propostos, indicadas as condicionantes de cada modelo proposto, é apresentado o contacto com a empresa e as suas condicionantes ao nível do dimensionamento da superfície proposta. São também indicadas todas as alterações realizadas aos modelos inicialmente propostos devido a condicionantes de fabrico. No final é apresentado o modelo final obtido.

No Capítulo 6 é abordada a metodologia experimental para obtenção dos coeficientes de difusão e dispersão, coeficientes que caracterizam o desempenho de um difusor, são apresentadas duas metodologias diferentes para avaliação do desempenho acústico do protótipo dimensionado, o ensaio de determinação do coeficiente de dispersão simplificado (CDS) e o ensaio de determinação da homogeneidade do campo sonoro (HCS). São apresentados os procedimentos de teste efetuados para cada um destes ensaios e são demonstrados os resultados obtidos. Desta forma é caracterizada a difusão obtida pelo protótipo fabricado e são analisados os resultados obtidos.

Uma opinião geral de todo o trabalho efetuado nesta dissertação é apresentada no Capítulo 7, sendo também indicados possíveis desenvolvimentos futuros no seguimento do trabalho aqui efetuado.



# 2

## NOÇÕES BASE DA ACÚSTICA EM EDIFÍCIOS

### 2.1. ACÚSTICA EM EDIFÍCIOS

#### 2.1.1. INTRODUÇÃO

O estudo da acústica de um determinado local passa pela análise conjunta de fontes de produção de som, dos meios de propagação e dos elementos recetores. As fontes de produção do som podem distinguir-se pela sua potência, a forma como irradiam energia sonora e o seu conteúdo em frequência.

A produção de um som pode assemelhar-se à criação de uma perturbação em determinado espaço físico. Na tentativa de se estabelecer o equilíbrio existe irradiação de energia resultando a propagação do som. O meio de propagação (sólido, líquido ou gasoso) define a velocidade deste processo. Este processo seria simplificado caso a energia sonora se pudesse irradiar em todas as direções sem limitações de espaço (em termos matemáticos dir-se-ia em espaço infinito). Contudo, existem barreiras constituídas pela existência de diferentes materiais, onde as velocidades de propagação do som são diferentes, verificam-se fenómenos de reflexão, difração e transmissão.

Ao recetor chega o resultado de todo este complexo sistema de fenómenos. O recetor por sua vez comporta-se como um sistema, constituído por filtros que eliminam determinados componentes do som.

No estudo da acústica aplicada a edifícios é frequente considerar três situações distintas:

- O estudo da propagação de sons entre dois espaços limitados por uma separação física, frequentemente denominado isolamento sonoro. O isolamento sonoro entre dois locais depende preferencialmente da massa e da estanquidade dos vários elementos que separam os dois locais.
- O estudo da propagação do som por via sólida. Os sons ou ruídos de percussão são provenientes de choques ou de outras solicitações mecânicas aplicadas diretamente nos elementos de construção. Estes sons propagam-se acompanhados de vibrações da própria construção.
- O estudo da propagação do som no interior de um espaço fechado, frequentemente denominado de correção acústica ou do condicionamento acústico do local. Este estudo visa dotar estes espaços fechados (por exemplo auditórios) de características adequadas para a obtenção de um ambiente acústico conveniente ao destino do espaço. Nesta análise a

geometria do espaço e o tipo de revestimento interior existente são variáveis deste processo. É desta forma este o estudo de real interesse para o desenvolvimento deste trabalho.

### 2.1.2. PROPAGAÇÃO DO SOM EM ESPAÇOS FECHADOS

Teoricamente ao ar livre, em campo livre e para uma fonte pontual, a diminuição do nível sonoro é reduzido em 6 dB sempre que a distância à fonte é duplicada. No entanto, esta situação raramente se verifica na realidade. Normalmente, as ondas sonoras encontram sempre obstáculos onde parte da energia incidente é absorvida e parte é refletida. Desta forma, a referida diminuição apresenta um valor geralmente inferior a 6 dB. Contudo, no caso da propagação a grandes distâncias, devido à dissipação de energia no ar é possível obter reduções no nível de pressão superiores a 6 dB.

Na propagação em espaços fechados ou semifechados o nível sonoro num determinado ponto resulta da energia sonora diretamente incidente nesse ponto e da energia refletida pelos obstáculos existentes. A relação entre a energia sonora absorvida e a energia sonora incidente nos obstáculos é designada de coeficiente de absorção ( $\alpha$ ). Da energia sonora absorvida uma parte é dissipada sendo a restante transmitida pelo obstáculo para outros locais. No caso específico da acústica em edifícios os obstáculos à propagação das ondas sonoras são, em geral, as paredes, pavimentos e tetos dos edifícios.

### 2.1.3. ENERGIA SONORA REFLETIDA

As ondas sonoras ao incidirem nas superfícies envolventes são sujeitas a fenómenos de reflexão. O Campo refletido contribui desta forma para o campo sonoro de um espaço fechado. A quantidade de energia sonora refletida depende das características da superfície envolvente. Se as superfícies envolventes desse espaço são lisas, pesadas e rígidas, características da maior parte das paredes e pisos utilizados na habitações (pesadas, duras e cobertas por revestimentos refletoras), o campo sonoro criado é reverberante. Consequentemente, o campo sonoro criado depende em grande parte do campo reverberado, para além do campo direto. Se as referidas superfícies forem cobertas por materiais esponjosos, a quase totalidade da energia incidente é absorvida, e nesse caso o espaço é denominado de “sala morta” (ou anecóica). Neste caso só existe campo direto, pelo que a quebra ao nível sonoro é de 6 dB sempre que a distância à fonte duplica. Relativamente ao campo sonoro no interior de um espaço fechado, quando uma fonte sonora começa a emitir, verifica-se um aumento do campo sonoro, até à existência de uma densidade de energia constante. Num compartimento de pequeno volume, com superfícies interiores refletoras, as perdas de energia são desprezáveis e a potência absorvida na envolvente é próxima da potência da fonte, obtendo-se um campo próximo de difuso. Em termos esquemáticos, a acústica interior de um espaço fechado pode ser representada de acordo com a Figura 2.1.

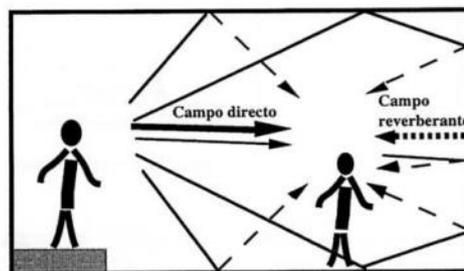


Figura 2.1 – Campo direto e campo reverberado [4].

Em termos de comodidade acústica tanto pode ser desagradável uma “sala morta” como uma “sala reverberante”. Para manter o ambiente sonoro agradável é necessário analisar de forma correta a energia que deverá ser refletida pela envolvente, em função do destino a dar a essa sala. Este tipo de análise é designado de Correção Acústica.

## 2.2. CORREÇÃO ACÚSTICA

### 2.2.1. INTRODUÇÃO

A caracterização rigorosa do campo sonoro que se estabelece num espaço fechado, na presença de uma fonte sonora, não é tarefa simples. Requer um complexo tratamento físico-matemático e envolve variáveis que são de difícil quantificação, tais como as características de dissipação de energia sonora no ar e na envolvente e propriedades de reflexão da envolvente. Para se efetuar uma adequada correção acústica não é suficiente conhecer as características absorventes dos materiais utilizados nem a volumetria do espaço. Torna-se necessário atender ao comportamento das reflexões que se instalam no interior de uma sala e às propriedades de difusão e reflexão das superfícies se forma a dotar o espaço de características acusticamente adequadas.

O estudo das condições de conforto acústico no interior de um espaço fechado (correção acústica) visa a obtenção de um ambiente sonoro agradável e /ou redução dos níveis de ruído. A obtenção de um ambiente sonoro agradável requer em regra geral [4]:

- 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

As condições de conforto acústico no interior de um espaço fechado são determinadas essencialmente pelo tratamento acústico aplicado nas paredes da envolvente do espaço e no teto. O som que é ouvido num espaço fechado é determinado pelo som direto e pelas reflexões indiretas provenientes das superfícies e objetos no interior do espaço. O controlo das reflexões recorrendo à absorção sonora tem vindo a ser usado há mais de cem anos, desde que Sabine correlacionou o tempo de reverberação com o coeficiente de absorção. De facto, o termo superfície acústica quase se tornou sinónimo de superfície absorvente. No entanto, o facto é que existem três tipos de superfícies acústicas diferentes:

- Superfície absorvente;
- Superfície refletora;
- Superfície difusora.

Na Figura 2.2 é apresentada a resposta temporal e espacial das três superfícies: uma superfície absorvente que atenua o som incidente, uma superfície refletora que redireciona o som incidente e uma superfície difusora que distribui uniformemente o som incidente.

Desde que surgiu a necessidade de correção acústica de espaços fechados, o recurso às superfícies absorventes dominou o dimensionamento acústico destes espaços, devido à sua disponibilidade e acessibilidade. Já as superfícies difusoras apenas apresentam uma maior recorrência no dimensionamento de grandes salas de espetáculos, pois existe aí um maior detalhe nas características acústicas pretendidas, recorrendo-se à totalidade da paleta acústica para a obtenção do melhor conforto acústico. De facto, uma correção acústica efetiva apenas é atingida quando usada uma combinação apropriada de superfícies absorventes, refletoras e difusoras.

Desta forma é importante saber de que forma se pode melhorar a utilização simultânea destas superfícies, conhecer as superfícies absorventes e difusoras correntes, como medir e caracterizar o desempenho destas superfícies e saber definir onde e como usar cada uma delas.

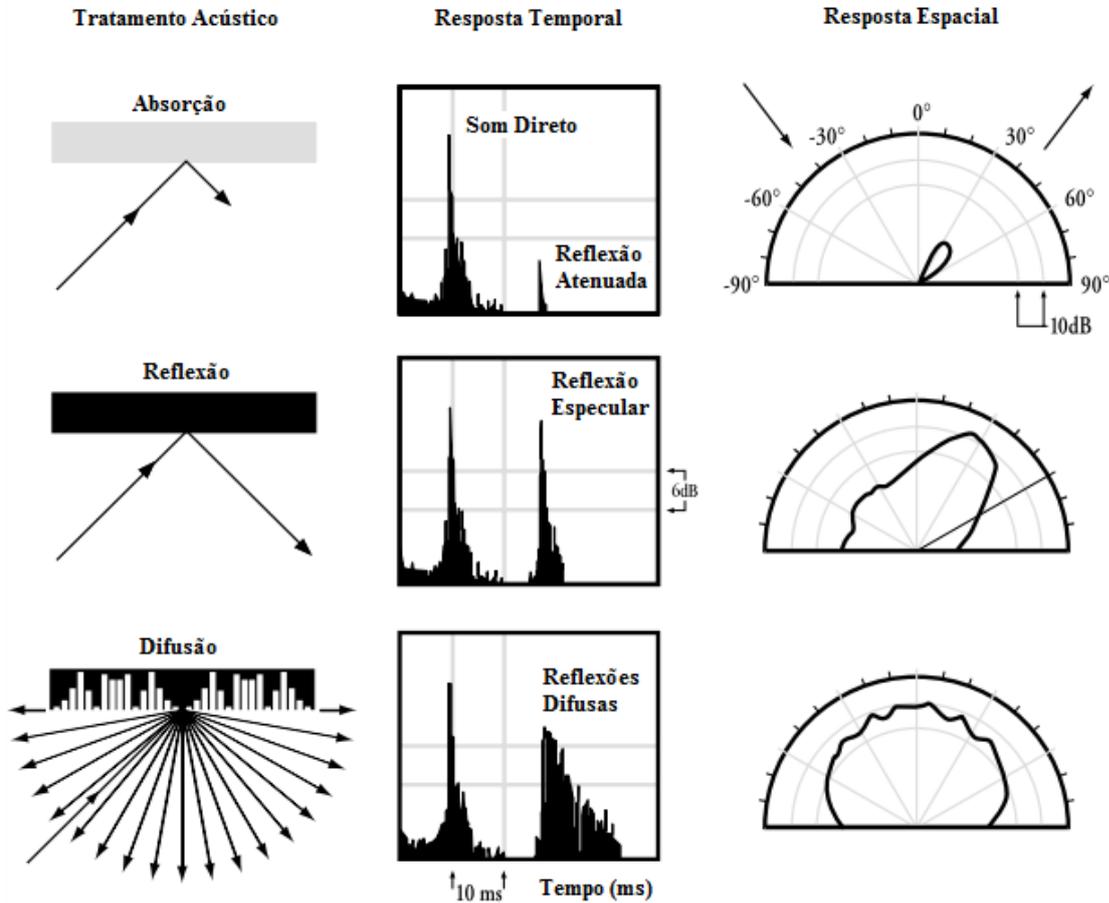


Figura 2.2 - Resposta temporal e espacial para três superfícies diferentes: absorvora, refletora e difusora [5].

### 2.2.2. ABSORÇÃO SONORA

Absorção sonora é a propriedade que possuem certos materiais de poderem transformar parte da energia sonora que sobre eles incide em outra qualquer modalidade de energia, geralmente a térmica. Chama-se, coeficiente de absorção sonora e designa-se por  $\alpha$  (alfa) a razão entre uma quantidade de energia sonora que é absorvida por determinado material e aquela que sobre ele incide

O coeficiente de absorção sonora varia pois entre 0 e 1, sendo que um material muito refletor (por exemplo, mármore polido) apresenta absorção sonora quase nula (0,01 ou 0,02), enquanto uma abertura (porta ou janela aberta) absorve 100% do som que lhe incide. Os materiais ditos “absorventes” apresentam  $\alpha$  superior a 0,5.

Para um dado material, o coeficiente de absorção sonora varia com o ângulo de incidência e com a frequência do som incidente.

Todos os materiais absorvem energia sonora em maior ou menor quantidade. Entre os materiais com maior capacidade de absorção é habitual distinguirem-se três grandes categorias de superfícies absorventes: as superfícies porosas, os ressoadores e as membranas.

A absorção sonora processa-se através do amortecimento das ondas sonoras que se propagam através do interior do material, sendo benéfico que a impedância específica existente seja próxima da impedância do meio (ar) onde ocorre a propagação. As mais comuns são as superfícies porosas, tipicamente aplicadas como revestimento de superfícies e fabricadas em painéis de fibra de vidro, lã de rocha ou poliéster. Estas superfícies absorvem o som convertendo a energia sonora em calor, devido ao movimento do ar contido nos pequenos orifícios do material que provoca um efeito de viscosidade. Um segundo mecanismo envolve a ressonância de uma pequena massa de ar num orifício com um grande volume de ar por trás funcionando como mola. De forma a reduzir a energia sonora e a alargar a banda de frequências de atuação pode ser colocado material absorvente nas cavidades, junto à entrada onde a velocidade é máxima. Este mecanismo de absorção é normalmente utilizado em painéis de madeira perfurados e blocos de betão com ranhuras. A última opção é uma membrana absorvente sendo a absorção do som conseguida através da dissipação da energia sonora no movimento da membrana. Um aspeto importante diferenciador de cada uma destas superfícies absorventes é que cada uma tem uma gama de frequências limitada na qual garantem uma absorção efetiva.

### 2.2.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

O tempo de reverberação é o parâmetro mais utilizado na avaliação da qualidade acústica interior de espaços fechados. A preferência pelo tempo de reverberação resulta, essencialmente, da facilidade da sua utilização e da não existência de outro critério tão eficaz e simultaneamente simples de ser determinado.

As ondas sonoras que se criam num compartimento onde existe uma fonte sonora em funcionamento podem ser de origem direta ou refletida. As ondas diretas atingem o recetor após um percurso em linha reta desde a fonte sonora. Os sons refletidos atingem o ouvinte após reflexões (únicas ou múltiplas) em superfícies existentes na sala.

A onda direta é acompanhada de uma sequência de ondas refletidas que chegam sucessivamente ao ouvido do recetor. À medida que elas chegam vão-se tornando cada vez mais fracas não só pelas consecutivas absorções que sofrem em cada reflexão em superfícies da envolvente e móveis, mas também pelo efeito da absorção do ar.

Denomina-se assim tempo de reverberação ( $T_r$ ) ao intervalo de tempo (medido em segundo) que um qualquer som demora a extinguir-se por completo, após múltiplas reflexões. Por definição é o tempo em que o nível de pressão sonora demora a decair 60 dB após a paragem instantânea da fonte sonora.

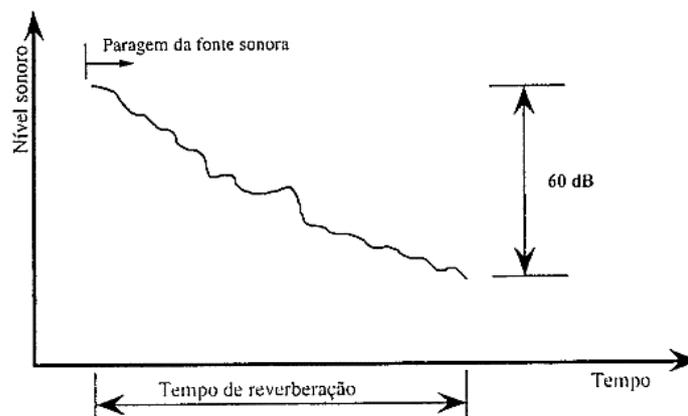


Figura 2.3 – Tempo de reverberação [4].

Contudo só raramente as condições práticas permitem obter um decaimento de 60 dB pois o ruído de fundo irá sobrepor-se antes da extinção do som emitido. Assim, o mais habitual é tentar obter só um decaimento de 30 dB (ou até mesmo só 20 dB) e extrapolar o decaimento assim obtido para se obter o tempo de reverberação. Nestes casos o tempo de reverberação assim obtido denomina-se de  $T_{30}$  (ou  $T_{20}$ ).

O tempo de reverberação num a sala tem um duplo e antagónico efeito:

- Aumenta o nível sonoro, por acréscimo do som refletido ao som direto, o que é um efeito favorável;
- Mascara os sons diretos, pois o som refletido sobrepõe-se ao som direto, o que é um efeito desfavorável.

O efeito mais importante de um tempo de reverberação excessivo é a redução da inteligibilidade da palavra. Tal deve-se a que o baixo nível sonoro de emissão das consoantes e o seu curto período de duração são suplantados pelo “rasto sonoro” de vogais imediatamente antecedentes (que são emitidas a nível mais elevado e com maior duração).

Em salas para música, o tempo de reverberação tem de ser um pouco superior ao das salas para a palavra. Isto, pois as peças musicais soam habitualmente melhor se existir um mínimo de reverberação de modo a que as notas não sejam entendidas com uma excessiva clareza.

Dentro dos diversos estilos e períodos musicais, há diferenças assinaláveis nos valores considerados ideais para o tempo de reverberação. Desde os valores mais baixos para ópera até aos mais elevados para a música sinfónica romântica.

O tempo de reverberação está intimamente relacionado com as condições geométricas e com as características de absorção sonora do recinto. Locais como grandes igrejas ou pavilhões gimnodesportivos dispõem habitualmente de elevados tempos de reverberação (4 a 6 s) enquanto estúdios de gravação se situam no extremo oposto (por exemplo 0,4 s).

Atendendo às díspares consequências da reverberação é útil ter conhecimento dos valores ideais do tempo de reverberação para as diferentes funções ou atividades dos locais permitindo a definição de um balizamento para estes valores em concordância com a especificidade do local. Durante muitos anos assumiu-se que os tempos de reverberação ideais para as diversas funções eram dependentes do volume do local, no entanto, essa metodologia já caiu em desuso para a maioria dos locais.

Nas baixas frequências, muitas salas (especialmente as mais pequenas) são dominadas por ondas estacionárias em algumas frequências características que fazem surgir a típica imagem de decaimento ondulante. Tal é devido à criação de modos próprios.

De todos os caminhos que as ondas sonoras seguem dentro de um compartimento, haverá alguns que se repetirão para formar modos próprios de vibração. Em certas frequências, as ondas seguindo tais caminhos chegarão pois em fase a qualquer ponto.

Um modo próprio está pois associado com percursos de propagação “coincidentes” das ondas sonoras que se repetem no tempo. Essas ondas, usando o mesmo percurso mas em direções opostas, produzem ondas estacionárias com nodos e ventres. Nesse caso haverá ressonância e existirão zonas da sala com pequenas amplificações e atenuações face à média. Este efeito é tanto mais evidente quanto a sala tenha dimensões próximas da cúbica e com pouca ou nenhuma difusão.

#### 2.2.4. REFLEXÃO E DIFUSÃO

A acústica de salas focaliza-se na propagação do som em compartimentos onde a condutividade do som é limitada em todos os lados por paredes, teto e piso. Estas superfícies geralmente refletem uma certa fração da energia sonora incidente nelas. Outra fração da energia é “absorvida”, isto é, extraída do campo sonoro no interior da sala, quer por conversão em calor quer por transmissão para o exterior através da envolvente. É exatamente esta combinação das várias componentes refletidas que é responsável para a complexidade do campo sonoro numa sala.

As leis da reflexão do som aqui referidas abordam apenas a reflexão em paredes ilimitadas. No entanto qualquer bordo livre, de uma parede ou painel, vai dispersar parte da energia sonora em todas as direções. O mesmo acontece quando a onda sonora atinge outro qualquer objeto de dimensão limitada, tal como um pilar ou uma irregularidade na parede que não seja muito pequena comparada com o comprimento de onda do som [6]. Aqui surge o fenómeno que será de enorme relevância para a abordagem dos seguintes capítulos, a difusão sonora.

A difusão sonora é o processo no qual a energia sonora incidente é uniformemente dispersada de forma a garantir envolvimento sonoro, espalhamento constante e remover o brilho acústico causado pelas fortes reflexões especulares.

A distribuição de som no interior de um espaço fechado, em termos ideais deveria ser uniforme, de modo a que o som produzido junto das fontes sonoras atingisse todos os pontos do espaço (possíveis recetores), com a mesma intensidade e sem distorções. Na realidade, a distribuição de pressão sonora apresenta variações espaciais, sobretudo numa sala de grande volumetria. Estas variações, quando muito acentuadas, podem ser atenuadas fazendo uso de superfícies difusoras distribuídas pelo espaço, escolhidas de forma criteriosa.

De uma forma genérica, uma boa solução acústica passa habitualmente pela colocação de materiais ou elementos de construção refletoras junto da zona de emissão de sons, pela colocação de elementos difusores nas posições das primeiras reflexões especulares e pela colocação de materiais de revestimento e/ou outros elementos absorventes nas zonas mais afastadas de emissão [4].

#### 2.2.5. CAMPO DIFUSO

Numa sala fechada, o campo sonoro típico não consiste numa única onda sonora. Este é composto por muitas destas ondas cada uma com a sua amplitude, fase e direção particulares. Para se determinar o efeito de uma parede num campo sonoro tão complicado deve-se considerar o efeito de cada onda separadamente e em seguida adicionar todas as pressões sonoras. Impondo determinados pressupostos, pode-se recorrer a algumas simplificações que permitem afirmações gerais sobre o efeito de uma parede refletora. Se as fases das ondas incidentes numa parede são aleatoriamente distribuídas, pode-se desprezar todas as relações devido à fase das ondas e os efeitos de interferência causados pelas mesmas. Posteriormente, é suficiente adicionar ou determinar a média das suas energias que é igual ao quadrado das pressões das ondas sonoras elementares. Assumindo que as intensidades do som incidente são distribuídas uniformemente sobre todas as direções possíveis, cada elemento de ângulo sólido emite a mesma energia por segundo à parede. Neste caso, o conceito abordado é a incidência do som aleatório (*random sound incidence*) e o campo sonoro associado é referido como um campo sonoro difuso [6].

Um campo sonoro perfeitamente difuso é quase inatingível, no entanto as características de um campo sonoro difuso podem ser definidas. Alguns autores consideram as seguintes [7]:

- As irregularidades da frequência obtidas em medições do campo sonoro no estado estacionário devem ser insignificantes;

- O decaimento sonoro deve ser perfeitamente exponencial (sendo representado por uma linha reta numa escala logarítmica);
- O tempo de reverberação deverá ser o mesmo em todas as posições da sala;
- A natureza do decaimento sonoro será essencialmente a mesma para todas as frequências;
- A natureza do decaimento sonoro será independente das características direcionais de medição do microfone.

Estes fatores são relativos a uma orientação de observação experimental. Mais teoricamente, um campo sonoro difuso pode ser definido em termos de densidade e fluxo de energia e sobreposição de um número infinito de planos de ondas sonoras progressivas. No entanto as características acima apresentadas apontam para formas mais práticas de avaliar a natureza do campo sonoro difuso de um determinado espaço.

# 3

## DIFUSÃO E DISPERSÃO

### 3.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo abordam-se os fenómenos da difusão e dispersão, a sua interferência na acústica de salas e como pode ser controlada. Para tal é importante responder a algumas questões:

- O que é a difusão?
- Como pode ser o som dispersado?
- O que é um difusor acústico?
- Como os difusores afetam a perceção sonora?
- Quais as aplicações dos difusores?

### 3.2. CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA

O som que se ouve na maior parte dos espaços, é uma combinação do som direto proveniente diretamente de uma ou mais fontes sonoras e das reflexões indiretas de superfícies ou outros objetos. Assim, um dos aspetos centrais na acústica é o controlo destas reflexões que afetam a propagação do som, e consequentemente a sua perceção.

A difusão só começou a ter um conhecimento científico apreciável há uns 30-40 anos, resultado de uma pesquisa significativa de métodos para dimensionamento, previsão, medição e quantificação de superfícies difusoras. As primeiras formas de difusão consistiam nas colunas da arquitetura clássica e na decoração ornamental usada antigamente. No entanto, com o desuso destas formas clássicas, as formas geométricas foram usadas para garantir a dispersão sonora, embora sem conhecimento específico do desempenho destas superfícies ao nível da difusão e atuando numa largura de banda limitada. No início da década de 1980, surgiram os primeiros difusores baseados em sequências matemáticas, fruto do trabalho desenvolvido por Schroeder ao nível dos *phase grating diffusors*. Estas foram as primeiras superfícies difusoras, dimensionadas com base na previsão de desempenho, dispersando a energia sonora uniformemente numa determinada gama de frequências. Estas superfícies periódicas consistiam numa série de reentrâncias ou saliências cujas profundidades eram definidas por sequências matemáticas, tais como a sequência da raiz quadrada. Ao longo dos últimos 30 anos estas superfícies foram otimizadas, surgindo assim novas superfícies difusoras de forma a garantir um desempenho de dispersão adequado ao uso necessário.

### 3.3. PRINCÍPIOS BÁSICOS DOS DIFUSORES

#### 3.3.1. O QUE É UM DIFUSOR?

Quando um som incide sobre uma superfície, uma parte da energia é removida, através de absorção ou transmissão e outra parte é dispersada. Quando o som é dispersado apenas numa direção, onde o ângulo de incidência iguala o ângulo de reflexão, a energia dispersada é geralmente denominada de reflexão especular. Quando a energia é dispersada uniformemente em muitas direções e dispersa no tempo, a energia dispersada é denominada uma reflexão difusa. Na reflexão especular, a maior parte da energia é concentrada num curto período de tempo, enquanto a energia numa reflexão difusa é distribuída durante um maior período de tempo. Uma reflexão difusa ocorre assim quando a energia sonora é dispersada nas direções não especulares.

De acordo com Rathsam *et al.* [8] as reflexões difusas podem ser classificadas segundo três mecanismos diferentes. A rugosidade da superfície é o primeiro mecanismo da reflexão difusa. Para melhor percepção deste mecanismo é dado o exemplo de uma lâmpada. No caso de uma lâmpada normal a luz é transmitida diretamente do filamento através do vidro para os objetos. Numa lâmpada fosca, pequenas irregularidades no vidro provocam o espalhamento da luz em todas as direções. Da mesma forma a rugosidade de uma superfície acústica refletora provoca o espalhamento das ondas sonoras em todas as direções (Figura 3.1).

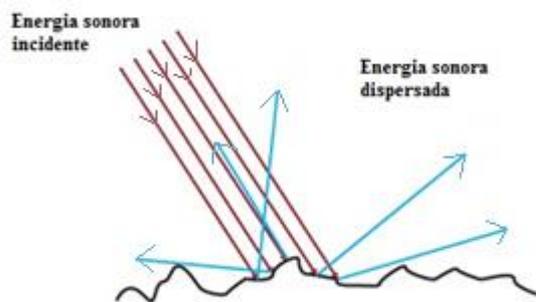


Figura 3.1 – Primeiro mecanismo de reflexão difusa – rugosidade da superfície.

O segundo mecanismo da reflexão difusa é a difração pelos bordos. A difração pelos bordos explica a capacidade de um pessoa ouvir um vizinho a falar do outro lado de uma barreira mesmo sem conseguir ver o vizinho (Figura 3.2). Na fronteira entre a barreira e o ar no topo da parede são formadas novas fontes que irradiam o som esfericamente pelo espaço à volta delas. Desta forma é criado um caminho direto entre o ouvido do ouvinte e a fonte sonora no topo da barreira. Na acústica arquitetónica, a difração pelos bordos ocorre sempre que uma onda sonora encontra uma mudança na superfície refletora. Esta pode ser uma mudança no material ou na orientação das superfícies.

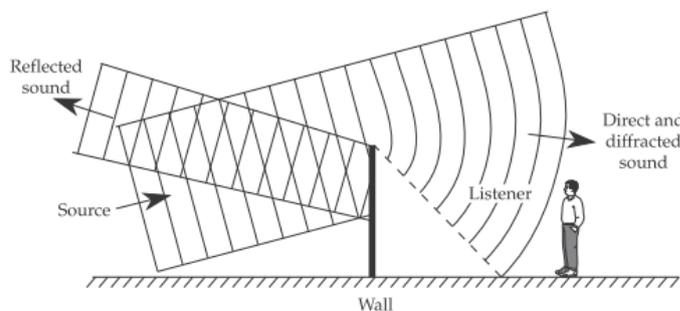


Figura 3.2 – Segundo mecanismo de reflexão difusa - difração pelos bordos [7].

O terceiro mecanismo da reflexão difusa é o tratamento denominado de difusor numérico. Este é constituído por reentrâncias de igual largura com variação de profundidade. As ondas sonoras incidentes deslocam-se pelas reentrâncias abaixo e reemergem de cada reentrância com uma fase diferente. As aberturas das reentrâncias tornam-se assim fontes sonoras individuais, que em interação umas com as outras produzem reflexões nas direções não especulares (Figura 3.3) [8].

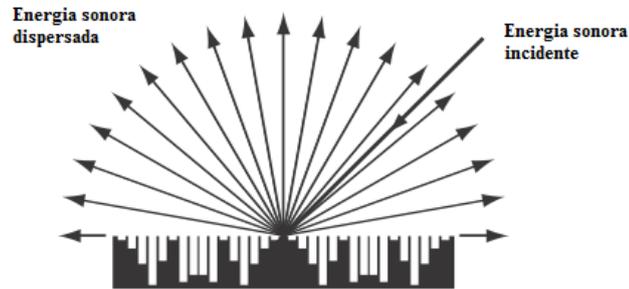


Figura 3.3 – Terceiro mecanismo da reflexão difusa – difusor numérico [1].

Uma maneira de explicar como uma superfície difusora dispersa a energia é através da construção de Huygens usada na ótica, embora seja apenas aproximada em muitos casos de acústica [1]. Considerando uma superfície plana, (a situação representada na parte superior da Figura 3.4) quando a superfície é iluminada por uma fonte sonora, um conjunto de fontes secundárias são geradas na superfície, sendo que depois cada uma destas fontes secundárias irradia ondas semicirculares. Ligando os pontos destas ondas que se encontram em fase, é possível visualizar a direção e propagação ondas refletidas pela superfície, ou seja, estas linhas são as frentes de onda. Nesta situação é refletida uma onda plana na direção da reflexão especular, onde o ângulo de incidência iguala o ângulo de reflexão. Assim, a frente de onda refletida é espacialmente inalterada. Na parte inferior da Figura 3.4 é demonstrado o caso de uma superfície semicircular. Nesta situação a frente de onda foi alterada pela superfície, adquirindo uma forma semicircular. Daqui é depreendido que acrescentando rugosidade à superfície é provocada uma dispersão espacial da reflexão. As ondas geradas permanecem no entanto bem ordenadas. Por isso, embora os semicilindros apresentem uma boa dispersão espacial, não são os melhores difusores, pois a dispersão temporal não é atingida.

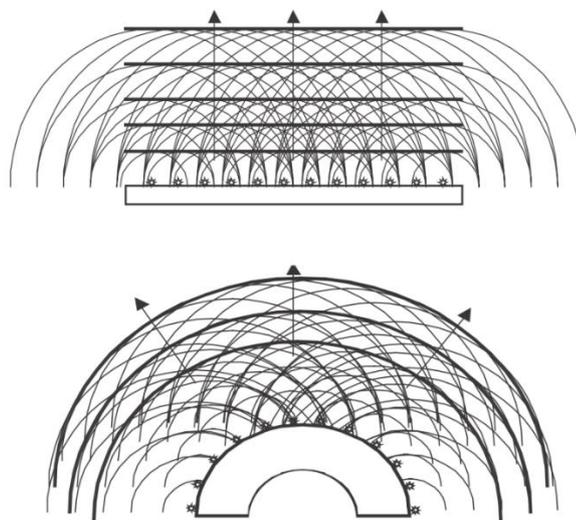


Figura 3.4 – Construção de Huygens para uma onda plana refletida por uma superfície plana (acima) e por uma superfície curva (abaixo) [1].

A construção de Huygens permite demonstrar o processo para a obtenção de uma dispersão temporal alterando a fase das frentes de onda refletida. Esta é conseguida atuando na rugosidade da superfície, ou seja, criando uma conjunto de saliências e reentrâncias de diferentes profundidades.

A Figura 3.5 mostra o efeito do uso de um difusor de Schroeder simplificado, que será abordado no Capítulo 4. As ondas radiadas pelas fontes secundárias são mais complicadas, surgindo a dificuldade em unir os pontos de igual fase e de se definirem claramente as frentes de onda. Isto, porque as fontes secundárias têm diferentes atrasos (fases) devido às diferentes profundidades das reentrâncias e isso altera a onda refletida. Entende-se daqui que é possível obter uma difusão mais clara com o uso de configurações mais complexas de reentrâncias.

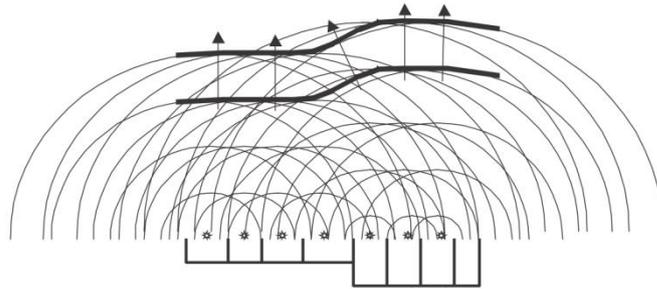


Figura 3.5 – Construção de Huygens para uma onda plana refletida num difusor de Schroeder simplificado [1]

Um difusor é assim definido como uma superfície que dispersa uniformemente o som incidente independentemente do ângulo de incidência, do ângulo de observação e da frequência, dentro da sua largura de banda. Eles devem também apresentar uma resposta temporal diferente do som incidente, que é geralmente conseguida criando uma dispersão temporal.

### 3.3.2. COMO É DISPERSADO O SOM PELO DIFUSOR?

Os difusores podem ser avaliados pela natureza da distribuição espacial. Quando a variação da fase ou amplitude é provocada apenas numa direção, denominam-se difusores unidimensionais ou difusores 1D (Figura 3.6 esquerda). Num difusor 1D o som é dispersado numa forma semicilíndrica na direção de variação da fase ou amplitude e é refletido com o mesmo ângulo de incidência. Um difusor 2D dispersa uniformemente o som numa forma semiesférica independentemente do ângulo de incidência. Uma vez que o difusor 2D dispersa o som omnidirecionalmente, a energia comparável numa dada direção para um difusor 2D é metade da que é para um difusor 1D (Figura 3.6 direita).

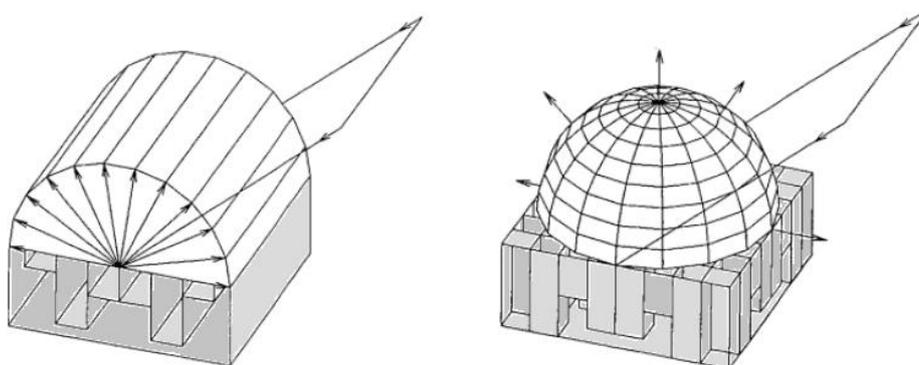


Figura 3.6 – Esquerda – resposta polar de um difusor 1D; Direita – resposta polar para um difusor 2D [9]

Na Figura 3.7 é apresentada a reflexão em duas superfícies diferentes, uma superfície lisa e uma superfície difusa. As diferenças ao nível da difusão provocada são visíveis ao nível dos lóbulos de

energia refletida. A superfície difusa (Figura 3.7 em baixo) provoca uma dispersão da onda sonora incidente, criando assim um campo difuso.

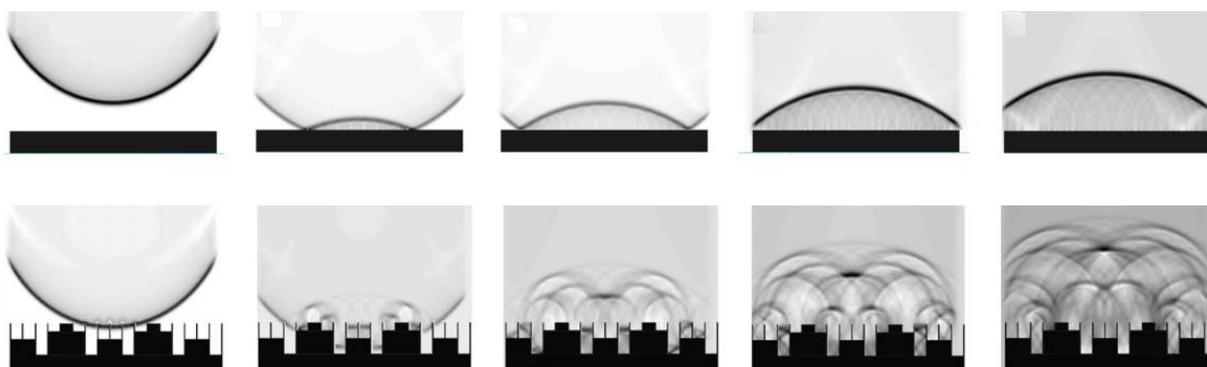


Figura 3.7 – Representação de uma reflexão especular (acima) e uma reflexão difusa (abaixo) [10]

### 3.3.3. DIFUSÃO EM SALAS PEQUENAS

Um bom desempenho acústico de uma sala requer o volume certo, a forma correta e tratamento da superfície utilizando uma combinação apropriada na disposição de absorvedores, difusores e superfícies planas. Em termos de acústica arquitetônica, os espaços podem ser grosseiramente divididos em produção de som, reprodução de som e ambientes de controlo do ruído. Como exemplo de salas produção do som são as instalações de artes de palco, tais como salas de concertos para música clássica ou teatros. Neste caso, a acústica da sala contribui bastante para a percepção da música ou palavra. O tempo de chegada, direção, densidade no tempo e o nível das reflexões diretas associado ao balanço da energia direta e indireta, decaimento do som e densidade temporal e espacial das reflexões indiretas, definem o som que é ouvido. Em salas grandes de produção de som, a reflexão e a difusão são as ferramentas acústicas primárias.

Em contraste, a acústica de salas de reprodução, como estúdios de gravação e *home theatres*, deve ser neutra. Todo o espectro, timbre e informação temporal é pré-gravado, assim, o som recebido deve consistir no que é emitido pelas fontes sonoras (altifalantes). Numa sala de reprodução de som, a absorção e a reflexão difusa desempenham um papel fundamental e a reflexão especular tem uma contribuição menor, como mostra a Figura 3.8. A absorção e a difusão são usadas para controlar principalmente a coloração devido às reflexões diretas e aos modos das baixas frequências.

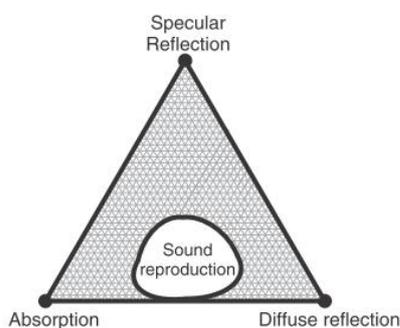


Figura 3.8 – Importância relativa de três tratamentos acústicos em salas de reprodução de som (estúdios de gravação e *home theatres*) [1]

Nas situações de controlo do ruído, tais como ginásios, piscinas e fábricas, o objetivo é simplesmente reduzir a reverberância e o nível sonoro. Aqui a reflexão especular e as reflexões difusas têm um papel menos importante, focalizando-se mais na distribuição uniforme de absorção.

#### 3.3.4. ONDE DEVEM SER POSICIONADOS OS DIFUSORES?

Em espaços acusticamente exigentes a proximidade dos ouvintes às superfícies limitantes do espaço é um fator de extrema importância para a colocação dos elementos difusores. A localização mais eficiente para uma superfície difusora ou absorvente será nos locais onde refletem as primeiras reflexões especulares e também num campo próximo da fonte sonora. A consequência da colocação de difusores para estas posições reflete-se no efeito que provocam na coloração do som (*coloration* - distorção do conteúdo espectral ou timbre do som direto) e no deslocamento da imagem sonora (*image shift* – alteração da perceção da direccionalidade do som, ou seja, o som é percecionado de uma direção que não coincide com a direção de emissão do som).

Atendendo a que as reflexões de primeira ordem afetam as características do som na posição do ouvinte, a absorção é usada para controlar as reflexões entre a fonte e o recetor de forma a garantir uma zona temporal e espacial livre de reflexões (RFZ – *Reflection Free Zone*) (Figura 3.9). Esta é temporal uma vez que as reflexões são controladas apenas durante uma janela temporal específica, antes da chegada das reflexões provenientes do resto da sala. E é espacial porque a zona livre de reflexões apenas ocorre dentro de uma certa área na sala. Após a RFZ, as reflexões provenientes do resto da sala chegam ao ouvinte e de forma audível [11].

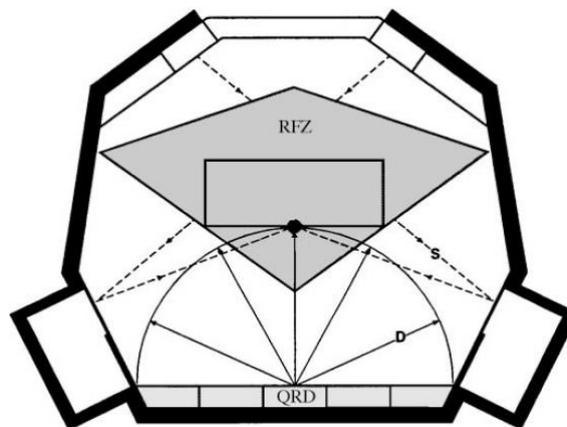


Figura 3.9 – Esquema da *Reflection Free Zone* (área sombreada) de uma sala de controlo (régie) [5].

A reflexão das ondas sonoras nas paredes de fundo dos espaços é um dos aspetos de grande relevância no uso dos difusores. As reflexões especulares nestas paredes são indesejáveis em espaços acusticamente exigentes pois interferem significativamente na perceção do som que chega aos recetores. Uma prática corrente para a correção destas reflexões especulares é a colocação de material absorvente, no entanto esta solução leva a que estes espaços se tornem “salas mortas”, ou seja a vivacidade do som é bastante reduzida pelo forte amortecimento da capacidade sonora do espaço. No sentido desta correção acústica, a difusão apresenta-se como um caminho alternativo garantindo a manutenção da energia sonora e evitando a ocorrência de reflexões especulares. Desta forma a colocação de difusores acústicos nas paredes de fundo de espaços com requisitos acústicos garantem um som envolvente (*surround*) passivo sem praticamente interferir com o som direto [12].

A quantidade de difusão a aplicar em cada espaço não é óbvia, esta dependerá da preferência pessoal do ouvinte. Se as reflexões das paredes de fundo, ou qualquer outra reflexão de primeira ordem num espaço

forem absorvidas, o som direto será ouvido de forma muito instantânea e pura, pelo menos num campo sonoro próximo, sendo a imagem sonora caracterizada essencialmente por pontos no espaço. Se a difusão for utilizada para controlar qualquer uma destas reflexões o tamanho aparente da imagem sonora será alargado. Quando aplicada devidamente, o som ouvido aproxima-se do som ideal, ou seja, aquele que é ouvido próximo da fonte sonora. Importa assim que se atinja um equilíbrio entre o uso de absorção e difusão de modo a obter-se o ambiente desejado em cada espaço. Enquanto umas pessoas preferem “espaços mortos” em salas de edição do som, outras não. Por isso, este equilíbrio terá de ser atingido com base no gosto pessoal. No entanto salienta-se que se é pretendida alguma vivacidade numa sala, será ideal usar uma combinação de absorção e difusão em vez de absorção e reflexão [5].

Na Figura 3.10 é apresentada a medição do tempo de resposta de uma sala antes e depois do tratamento acústico com absorção e difusão. Antes do tratamento todas as superfícies eram completamente refletoras. Analisando o tempo de resposta da sala antes do tratamento é possível ver-se a interferência das reflexões das paredes laterais e do piso, a reflexão do teto e uma série de reflexões espaçadas da parede traseira. As paredes, teto e piso foram tratados com absorção de forma a criar uma RFZ e a parede posterior foi tratada com difusão de forma a criar um padrão de reflexão temporal e espacial denso, característico de um campo sonoro difuso, contribuindo desta forma para um ambiente sonoro mais envolvente [5].

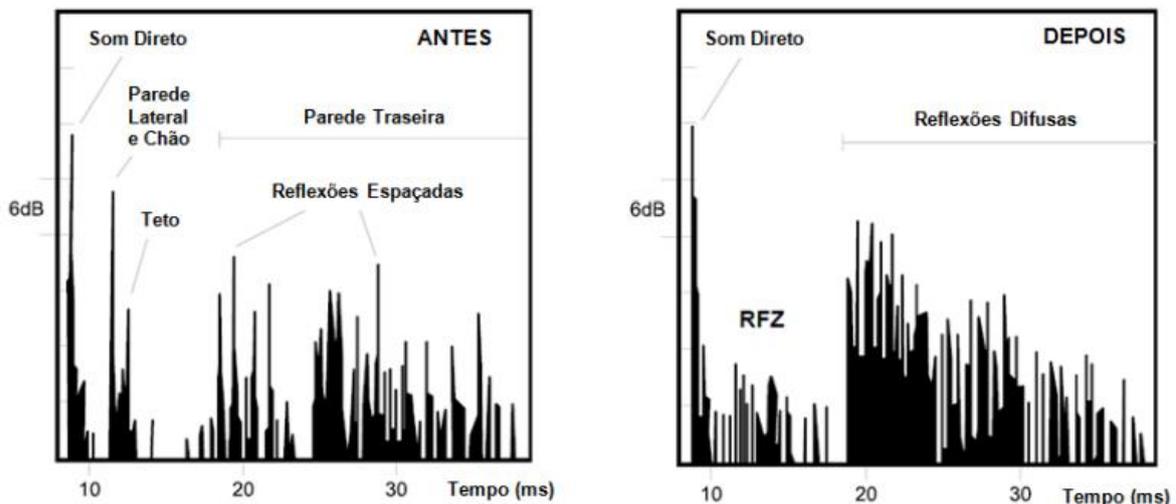


Figura 3.10 – Tempo de resposta de uma sala antes e depois do tratamento acústico [12].

### 3.3.5. A QUE DISTÂNCIA DEVERÁ ESTAR COLOCADO O OUVINTE?

A distância ótima a que o ouvinte deverá estar posicionado da superfície difusora pode ser determinada considerando o campo sonoro dispersado (*scattered field*) ou o campo sonoro total (*total field*). A questão aqui é quão distante precisa de estar o difusor para originar uma frente de onda coerente. Essencialmente, se o ouvinte está num campo próximo ou afastado.

#### 3.3.5.1. CAMPO SONORO DISPERSADO

O campo sonoro dispersado pode ser descrito pela resposta de frequência temporal e espacial. A resposta temporal descreve o nível sonoro da energia dispersada em relação ao tempo de chegada do impulso sonoro para um dado ângulo de incidência e um dado ângulo de observação em relação à normal da superfície. Para uma superfície lisa de dimensões infinitas, a resposta temporal é semelhante ao som direto, orientada na direção especular. Para um painel de dimensões finitas esta resposta consiste na

reflexão especular e nos efeitos dos bordos. A resposta por frequência apresenta o nível de som dispersado em função da frequência do impulso sonora para um dado ângulo de incidência e um dado ângulo de observação. Na Figura 3.11 (A e B) é apresentado um exemplo de um painel de dimensões finitas, no qual a resposta por frequência é caracterizada por um corte nas baixas frequências e uma ondulação determinada pelo tamanho do painel. A resposta temporal e por frequência para um difusor é apresentada na Figura 3.11 (C e D). Neste caso a energia espalhada pelo difusor é dispersada no tempo e a resposta por frequência do impulso sonoro é caracterizada por uma série de altos e baixos espaçados irregularmente, o que normalmente é medido numa sala que tenha um campo difuso.

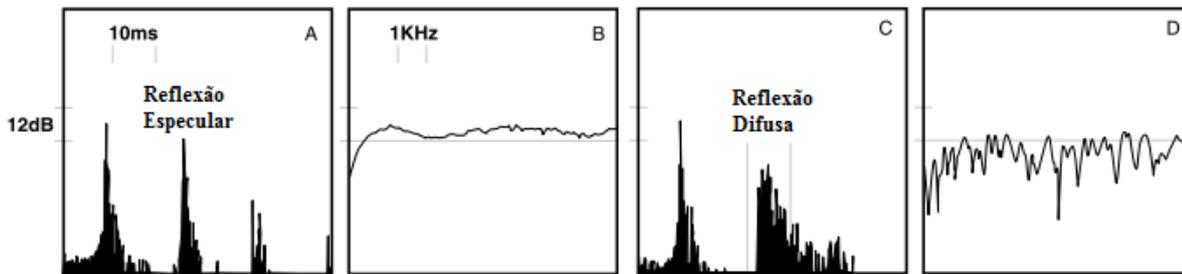


Figura 3.11 – Resposta em função do tempo e da frequência para uma reflexão especular isolada (A e B) e para uma reflexão difusa isolada (C e D). A janela de tempo usada na transformada de Fourier para gerar a resposta por frequência é indicada por duas linhas verticais em (C) [5].

O campo sonoro dispersado também pode ser caracterizado pela sua resposta espacial e neste sentido é importante compreender a diferença de desempenho para um campo próximo (*near field*) ou para um campo afastado (*far field*).

Num campo afastado a resposta polar de um difusor ideal é invariante relativamente ao ângulo de incidência, de observação e em relação à sua banda de frequência operacional. Deve ser garantido o cumprimento de dois critérios para se estar num campo afastado: a distância da fonte ao recetor deve ser maior quando comparada com o comprimento de onda e a diferença entre a distância de pontos da superfície e o recetor deve ser pequena comparada ao comprimento de onda. Infelizmente, em várias salas de requisitos acústicos é recorrente as fontes e o recetores estarem mais próximo do que o delimitado pelo campo afastado de modo a que os ouvintes tenham de estar posicionados o mais afastados possível das superfícies difusoras. É sugerido que essa distância seja no mínimo três comprimentos de onda. Por exemplo, numa sala em que estejam aplicados difusores com uma banda de frequência operacional de 300-500 Hz, a distância mínima recomendada será aproximadamente 3 m [5].

Quando os recetores estão localizados num campo próximo, ou seja, uma distância curta entre a fonte e o recetor, é comum que surjam problemas como *comb-filtering* e efeitos perturbadores devido aos lóbulos de energia dispersados (quanto maior a distância ao difusor, mais a frente de onda é coerente e homogénea). Desta forma a dispersão temporal provocada pela superfície não será ouvida e o som direto e o refletido tornam-se similares, aumentando a interferência. Daqui surge a necessidade de considerar o campo sonoro total.

### 3.3.5.2. CAMPO SONORO TOTAL

Até aqui foi considerado apenas o som dispersado por um difusor, no entanto o som direto também tem de ser considerado. Quando se ouve música numa sala, ouve-se o campo total, o som direto e o dispersado. Tal como as reflexões de uma sala afetam a amplitude e a direccionalidade das ondas sonoras, elas podem também introduzir coloração, normalmente definida como uma distorção do espectro sonoro ou do timbre

do som direto. Esta introdução de coloração pode ser melhor percebida quando analisado o campo sonoro total.

Na Figura 3.12, é considerada a resposta do campo sonoro total em função do tempo e da frequência, considerando os efeitos quando o ouvinte está a aproximadamente a 1 m da superfície difusora. Quando o som dispersado provem de uma superfície lisa, o som refletido e o som direto são relativamente comparáveis no nível sonoro (Figura 3.12 A) e o resultado é uma resposta por frequência consistindo numa série de altos e baixos numa sequência homogênea (*comb filter*) (Figura 3.12 B) traduzindo a interferência que ocorre entre o som direto e as reflexões especulares primárias.

Quando se trata de um difusor a resposta temporal é mais prolongada no tempo (Figura 3.12 C). A resposta espacial é mais homogênea e a resposta por frequência caracteriza-se por uma sequência irregular de picos e quedas tal como se verificava para o campo difuso (Figura 3.12 D). A frequência de resposta do campo total aproxima-se mais da resposta para o som direto, uma vez que as interferências são minimizadas pela difusão. Desta forma o ouvinte não está tão exposto à regularidade de pontos nulos e máximos de pressão que seriam notáveis para uma superfície lisa e as mudanças no espectro sonoro podem ser menos perceptíveis [5].

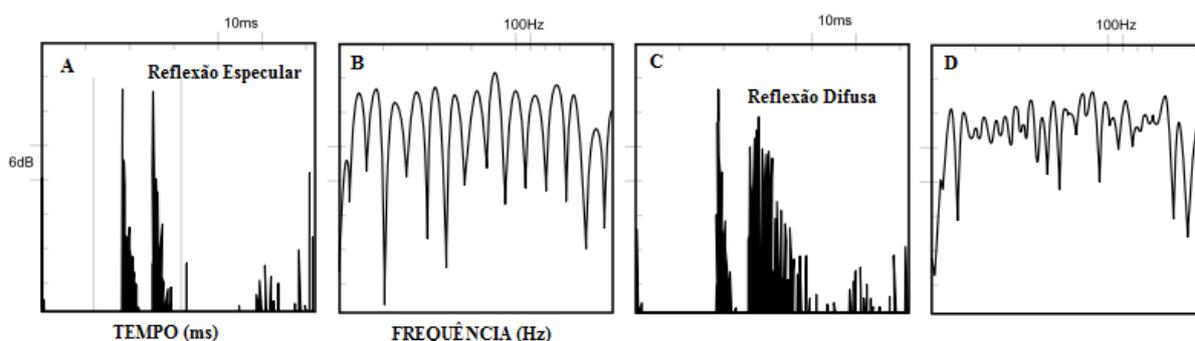


Figura 3.12 – Resposta em função do tempo e da frequência para o campo sonoro total consistindo no som direto e na reflexão especular (A e B) e no som direto e na reflexão difusa (C e D) [5].

### 3.4. APLICAÇÕES DOS DIFUSORES

A área na qual se verifica uma maior aplicação de difusores é em salas de produção musical, como salas de espetáculos, e em salas de reprodução, como estúdios de gravação e *home theaters*. No primeiro caso os difusores ajudam a criar uma acústica que melhora o som ouvido quer pelos músicos, quer pelo público, enquanto no segundo caso os difusores são usados para garantir um ambiente de audição crítico mais neutro. Os difusores, tal como já foi referido, são destinados principalmente ao controlo das reflexões de primeira ordem, em contraste com a aplicação da absorção para controlar a reverberação. Dispersando as reflexões iniciais, os efeitos da reflexão especular tais como coloração, rugosidade e brilho acústico podem ser mitigados.

As principais aplicações dos difusores acústicos podem ser as seguintes:

- Controlo do eco em salas de espetáculos – frente de onda e reflexões difusas;
- Redução da coloração em salas pequenas – reprodução de som (Figura 3.13);
- Controlo dos modos próprios em câmaras de reverberação;
- Melhorar a inteligibilidade da palavra (em locais reverberantes, como por exemplo, estações de metro);

- Promover o envolvimento sonoro em salas de espetáculos – *spaciousness* (Figura 3.14);
- Redução dos efeitos das reflexões diretas em espaços grandes;
- Garantir a uniformidade de cobertura em palcos com canópias;
- Promover a uniformidade do campo sonoro em *home theaters* (Figura 3.15);
- Redução do efeito de foco em superfícies côncavas;
- Difusão e barreiras laterais de estradas;
- Difusão e *street canyons*.



Figura 3.13 – Estúdio de gravação *Blackbird* em Nashville, EUA [13].

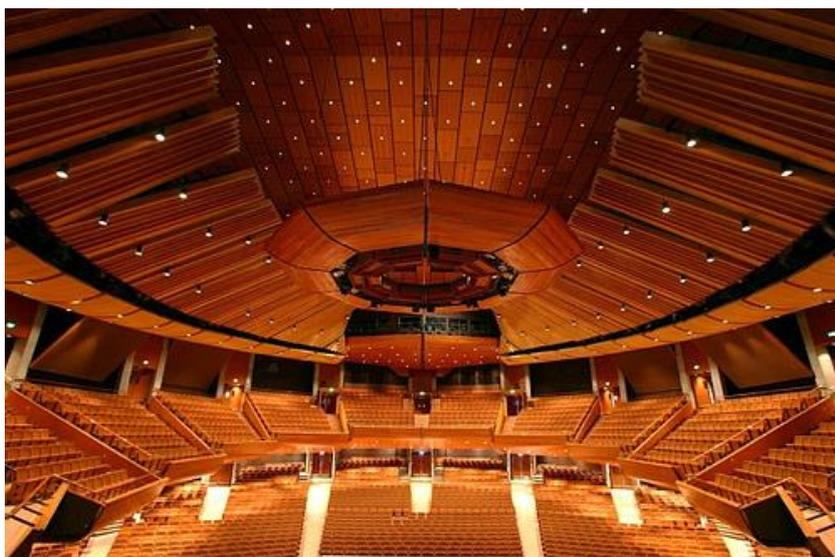


Figura 3.14 – Difusores de Schroeder no *Michael Fowler Centre*, Nova Zelândia [14].



Figura 3.15 – Difusores de Schroeder num *home theater* [10].

### 3.5. MEDIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS REFLEXÕES DIFUSAS E DISPERSÃO

#### 3.5.1. INTRODUÇÃO

Sem medições da difusão produzida pelas superfícies difusoras, é impossível ter confiança no desempenho dos difusores acústicos e optar pelo seu uso. Foi esta a máxima que levou a que nas últimas décadas se tenha assistido a um esforço para desenvolver métodos para a medição e caracterização da dispersão provocada por estas superfícies. Assim, ao longo das últimas duas décadas foi desenvolvida uma standardização para a medição e caracterização das superfícies difusoras resultando em normas que definem métodos para a determinação de determinados coeficientes que permitem caracterizar e quantificar o seu desempenho.

Os métodos para a medição da dispersão produzida por uma superfície centram-se principalmente na medição em termos de resposta polar, tendo sido a primeira forma que possibilitou a medição da dispersão provocada pelas superfícies para o projeto e avaliação dos difusores. Embora as respostas polares forneçam bastante informação de como uma superfície reflete o som, este método requer uma quantidade considerável de dados e é necessária uma resposta polar diferente para cada banda de frequências e ângulo de incidência. Esta é uma das razões pela qual se definiram parâmetros simples, que condensam os dados polares e permitem a caracterização em termos de coeficientes de difusão.

A reflexão de uma superfície também pode ser caracterizada por um coeficiente de dispersão (*scattering*), que é diferente do coeficiente de difusão (*diffusion*). Enquanto o coeficiente de dispersão pode ser entendido como uma medida que descreve o grau de som disperso, o coeficiente de difusão descreve a uniformidade direcional da dispersão.

#### 3.5.2. COEFICIENTE DE DIFUSÃO

O coeficiente de difusão (*diffusion coefficient (d)*) permite avaliar a uniformidade do som refletido, medindo a semelhança entre a resposta polar de uma superfície com uma distribuição uniforme. Este coeficiente é fundamental no desenvolvimento e otimização de superfícies difusoras e para comparar méritos de diferentes superfícies. O método de medição e caracterização do coeficiente de dispersão foi

proposto por D'Antonio e posteriormente aceite pelo comité da AES (Audio Engineering Society), estando publicado no documento AES-4id-2001, *AES information document for room acoustics and sound reinforcement systems – Characterization and measurement of surface scattering uniformity* [2].

O método de avaliação do coeficiente de dispersão consiste na medição da dispersão de uma superfície em termos de distribuição polar que é realizada recorrendo a um goniómetro (Figura 3.16) que possibilita várias medições sequenciais da resposta dos impulsos. Essas medições são realizadas para ângulos de observação e incidência particulares que permitem obter a resposta dos impulsos da amostra a ser testada. Depois o coeficiente de difusão é dependente da frequência e derivado da distribuição polar. Existem várias operações estatísticas sugeridas para calcular o coeficiente de difusão a partir da distribuição polar, destacando-se o cálculo por auto correlação.

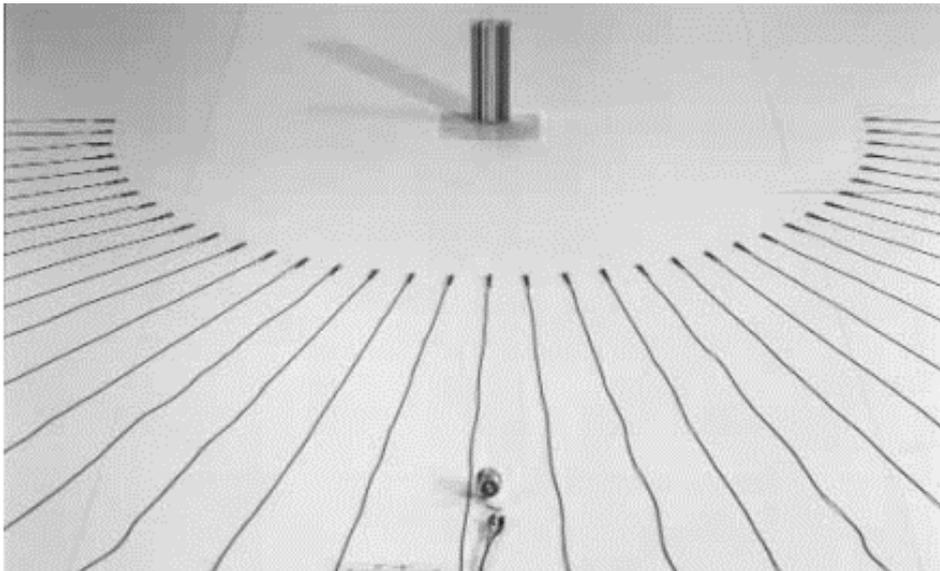


Figura 3.16 – Goniómetro para um difusor 1D [15].

### 3.5.3. COEFICIENTE DE DISPERSÃO

O coeficiente de dispersão (*scattering coefficient* ( $s$ )) permite avaliar a quantidade de energia dispersada, medindo a relação entre a energia refletida não especular com a energia total refletida. Este coeficiente é de grande importância para os modelos geométricos de salas, sendo a par do coeficiente de absorção ( $\alpha$ ), um dos parâmetros de entrada fundamentais. O ensaio para a determinação deste coeficiente está normalizado na ISO 17497-1, *Acoustics – Sound-scattering properties of surfaces. Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room* [3] que foi baseada no trabalho de Mommertz e Vorländer [16].

O princípio do coeficiente de dispersão consiste na separação do som refletido especular e a componente dispersada. A componente especular é a porção de energia que é refletida à semelhança de uma superfície plana, largamente comparada ao comprimento de onda. A componente dispersada é relativa à energia refletida de um modo não especular. No entanto este conceito pode ser melhor entendido quando analisado o efeito da reflexão e difusão no domínio do tempo. Quando analisado o impulso filtrado refletido por uma superfície ondulada para diferentes orientações da amostra de teste em campo livre sonoro a parte inicial da reflexão está altamente correlacionada. Sendo esta parte idêntica à componente especular da reflexão. Em contraste, as partes finais não se encontram em fase e dependem bastante da orientação específica. A energia na parte final do impulso refletido contém a parte dispersada. Assim é mais fácil de compreender o princípio aplicado da extração da energia especular dos impulsos refletidos. Este princípio pode ser diretamente aplicado às medições realizadas numa câmara reverberante (Figura 3.17), em que a

amostra é colocada numa mesa giratória e as respostas dos impulsos são obtidas para diferentes orientações da amostra [3]. Este processo permite assim definir o coeficiente de dispersão ( $s$ ) como uma proporção da energia não refletida na direção especular.

Os procedimentos descritos nas normas serão abordados com mais rigor no Capítulo 6.

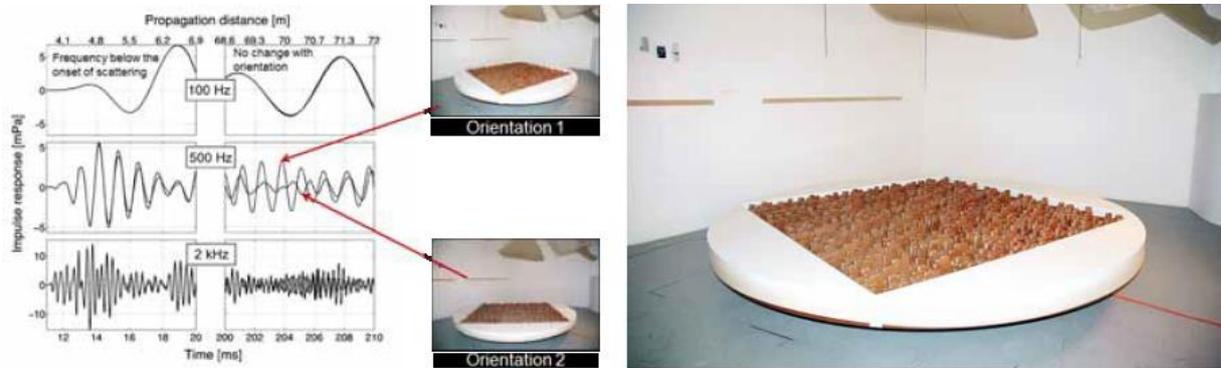


Figura 3.17 – Resposta do impulso para duas posições diferentes da mesa rotativa a 100, 500 e 2000 Hz [11].



# 4

## DIFUSORES ACÚSTICOS

### 4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são desenvolvidos os princípios básicos dos difusores e a abordagem é feita pela aplicação destes. Embora esta temática ainda seja alvo de estudo e de desenvolvimento, Peter D'Antonio e Trevor Cox estabeleceram um trabalho sólido e fundamentado a nível teórico e experimental no dimensionamento de difusores acústicos [1]. Devido a esse trabalho o desempenho dos difusores pode ser quantificado e padronizado. Assim, os difusores acústicos integram, atualmente, um lugar junto aos absorvedores e refletores, na paleta de soluções acústicas.

É difícil subestimar a importância que o dimensionamento moderno dos difusores desempenhou no desenvolvimento do estado de arte das instalações de reprodução de som, sejam estas salas de audição, controlo, transmissão ou teleconferência. O maior catalisador para este trabalho foi o *design* pioneiro do difusor de Schroeder.

A chave para um bom difusor é encontrar formas que complementem os requisitos arquitetónicos aliado a um desempenho adequado a cada tipo de local a melhorar. Neste capítulo são apresentados os vários tipos de difusores conhecidos atualmente, desde o difusor pioneiro de Schroeder até às modelações mais complexas que incorporam tecnologia ativa.

### 4.2. DIFUSORES DE SCHROEDER

#### 4.2.1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento dos difusores acústicos deve-se em muito ao trabalho pioneiro de Manfred Schroeder que em 1970 desenvolveu um difusor com alteração de fase das ondas sonoras (*phase grating diffuser*) também conhecido como Difusor de Schroeder (Figura 4.1). Estes difusores ofereceram aquilo que os acústicos precisavam, um desempenho acústico definido baseado em formulações matemáticas simples [17].

Os difusores de Schroeder são dimensionados com base em princípios matemáticos simples que resultam numa estrutura periódica constituída por uma série de reentrâncias separadas por saliências rígidas muito estreitas (comparadas com a largura das reentrâncias). As reentrâncias têm igual largura mas diferentes profundidades, ditadas por sequências matemáticas que têm a propriedade da transformada de Fourier dos seus valores ser constante. A frequência de projeto e a largura de banda destes difusores é ditada pelas dimensões geométricas das reentrâncias, profundidade e largura – no entanto, a qualidade da difusão pode estender-se para além do limite previsto [18].

O princípio físico subjacente a estes difusores é a alteração de fase das ondas sonoras. Quando uma onda sonora incide na superfície do difusor, há a propagação de ondas planas em cada uma das reentrâncias em direção à superfície do fundo, refletindo-se aí. As ondas refletidas, por percorrerem comprimentos diferentes (devido às diferentes profundidades) possuem fases diferentes à saída das reentrâncias. Esta diferença de fase, propositada, provoca uma interferência nas ondas refletidas de modo a que a estrutura disperse o som uniformemente em todas as direções. É possível comparar a dispersão de energia sonora entre um difusor de Schroeder e uma superfície plana na Figura 4.1, onde é visível a uniformidade de dispersão causada pela alteração de fase no difusor de Schroeder. O desempenho destes difusores é também suscetível à qualidade do acabamento, devendo ser utilizados materiais de levada impedância acústica, rígidos e sem frechas ou orifícios significativos.

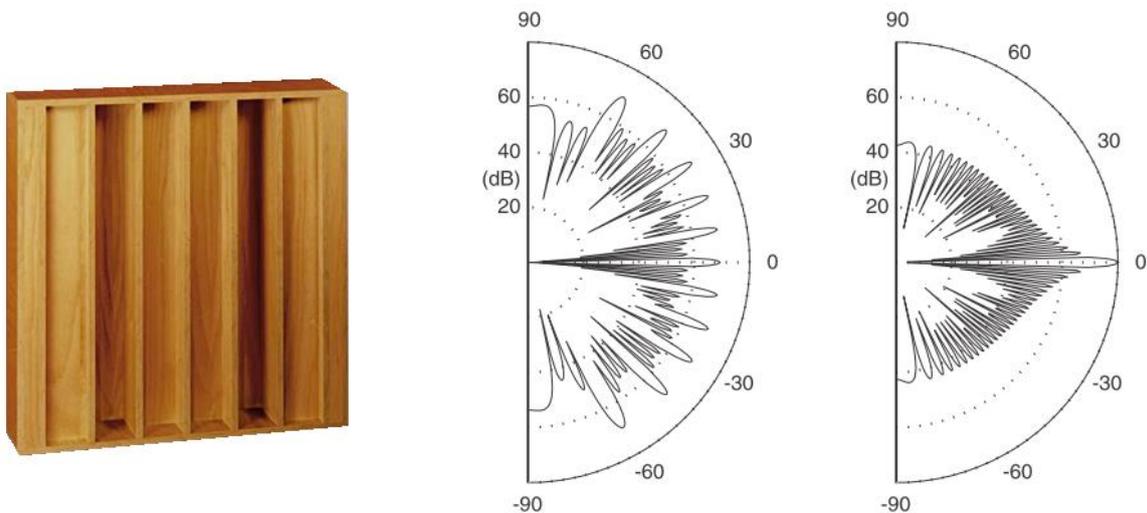


Figura 4.1 – Esquerda - *design* original do difusor de Schroeder [10]. Meio – níveis de dispersão de um difusor de Schroeder. Direita - níveis de dispersão de uma superfície plana [1].

Embora este *design* seja bem-sucedido comercialmente até aos dias de hoje, muitos acústicos são relutantes em relação ao seu uso, uma vez que não se enquadra muito bem na arquitetura moderna atual. Além disso, este modelo matemático teórico apresenta algumas limitações de desempenho, tais como:

- Apenas alcançam uma dispersão “ótima” em frequências específicas;
- São dimensionados com base na simplificação teórica da “difusão ótima” que significa igual energia nos lóbulos dispersados. No entanto isto não é o mesmo que energia uniformemente dispersa em todas as direções.

No dimensionamento de um difusor de alteração de fase das ondas sonoras é necessário um método que permita obter as sequências de reentrâncias e as suas profundidades que permitam o controlo das fases das ondas sonoras, gerando uma distribuição da fase na superfície do difusor para alcançar o grau de difusão desejado. Assim, Schroeder recorreu à teoria numérica, formulada por Gauss, que foi a grande base para formulação da sequência residual quadrática usada no dimensionamento do difusor residual quadrático (*QRD - Quadratic Residue Diffuser*). Schroeder demonstrou que ao escolher a sequência residual quadrática, a energia dispersa em cada lóbulo de difração é a mesma.

O dimensionamento dos painéis difusores de Schroeder é baseado em equações simples e a sequência residual quadrática é baseada nos números primos.

Para esta teoria ser válida a propagação de ondas planas (simplificação da propagação de ondas esféricas – propagação segundo uma direção em que as ondas poderão ser representadas como segmentos de reta verticais paralelos entre si) nas reentrâncias deve ser evidente.

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

$$w = \lambda_{min}/2 \quad (4.1)$$

Em que  $w$  é a largura da reentrância e  $\lambda_{min}$  é o mínimo comprimento de onda (dado pelo quociente entre a velocidade do som  $c$  e a frequência máxima  $f_{max}$ ), conforme a Figura 4.2.

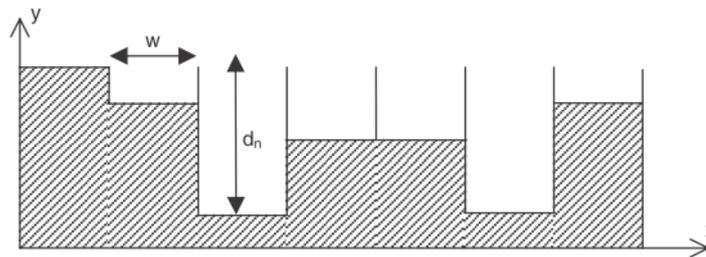


Figura 4.2 – Secção transversal de um difusor residual quadrático (QRD) com  $N=7$  [1].

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

A sequência residual quadrática é a sequência matemática conhecida mais adequada para o dimensionamento das dimensões das reentrâncias. A formulação desta sequência é baseada num número primo. O número da sequência  $s_n$  (para a reentrância  $n$ ) pode ser obtido aplicando a seguinte expressão:

$$s_n = n^2 \bmod N \quad (4.2)$$

Onde **mod** representa o resto não negativo. O valor  $N$  é o número primo gerado que neste caso representa também o número de reentrâncias por período. Por exemplo, um período de um QRD com  $N=7$  tem  $s_n = [0; 1; 4; 2; 2; 4; 1]$ .

Os difusores de Schroeder trabalham num múltiplo inteiro da frequência de projeto,  $f_0$  (normalmente definida como frequência mínima limite). É mais conveniente apresentar a formulação matemática em termos do comprimento de onda correspondente,  $\lambda_0$ :

$$\lambda_0 = c/f_{min} \quad (4.3)$$

Na qual  $c$  é a velocidade de propagação do som e  $f_{min}$  a frequência mínima. A profundidade da reentrância ( $d_n$ ) é determinada pela sequência através da equação:

$$d_n = \frac{s_n \lambda_0}{2N} \quad (4.4)$$

A profundidade  $d_n$ , varia entre 0 e aproximadamente  $\lambda_0/2$ . A frequência de projeto não é a menor frequência para a qual a superfície produz mais dispersão do que uma superfície plana, esta é apenas a frequência para a qual a dispersão pode ter lóbulos de energia de difração uniformes.

A periodicidade é um dos fatores de maior relevância do dimensionamento e comportamento do difusor, e a ela estão associadas algumas limitações e considerações essenciais. Para um difusor apresentar um bom comportamento, o dispositivo deve ser periódico, uma vez que os lóbulos de difração da energia são gerados pela periodicidade da superfície. A ponderação do número de períodos definidos deve ser feita de modo a garantir a maior eficácia a nível da difusão sonora. Analisando a Figura 4.3 é possível verificar que, para um número reduzido de períodos a resposta polar apresenta uma distribuição homogênea em todas as direções. No entanto, as direções dos níveis similares não são fixas, ou seja, os pontos não estão alinhados com os lóbulos de energia refletida. Esta hipótese levanta assim um problema na formulação matemática e na definição de uma boa difusão num difusor de Schroeder. Por outro lado, quando são incluídos muitos períodos, os lóbulos dispersados tornam-se bastante mais estreitos e próximos, levando a uma dispersão heterogênea, caracterizada por picos e zonas de anulação entre eles. Nesse sentido, a melhor solução é aquela com um número pequeno de períodos, por exemplo cinco, para assegurar a periodicidade, mas com lóbulos de difração não tão estreitos. A largura do período deve ser larga de forma a garantir um maior número de lóbulos de dispersão.

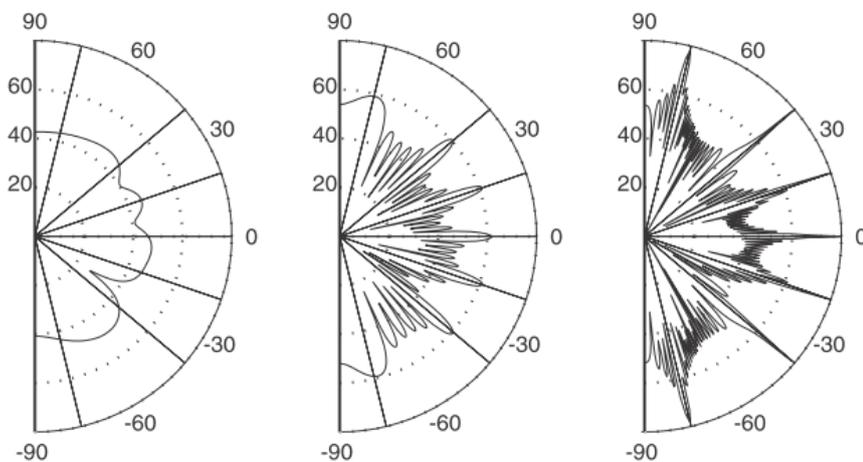


Figura 4.3 – Resposta polar de um difusor residual quadrático ( $N=7$ ), numa frequência de 3000 Hz, para três números de períodos diferentes. À esquerda um período, no meio seis períodos e na direita 50 períodos [1].

Relativamente à largura das reentrâncias ( $w$ ), existem duas restrições a ponderar: os custos de produção e a absorção. A necessidade de se garantir uma maior abrangência de gamas de frequências, induz a questão de o quão estreitas podem ser as reentrâncias. À medida que um difusor se torna mais estreito, a camada viscosa de fronteira (*viscous boundary layer*) torna-se significativa comparada com a largura das reentrâncias e a absorção aumenta. As reentrâncias estreitas também induzem um trabalho de fabrico mais complexo e dispendioso. Por essas duas razões, a largura das reentrâncias é no mínimo 2,5 cm e usualmente por volta de 5 cm.

A escolha no número primo é limitada pelo custo de fabrico, o desempenho nas baixas frequências e as frequências críticas. Para uma dada profundidade máxima ( $d_{máx}$ ) a frequência de projeto atingida é:

$$f_0 = \frac{s_{máx}}{N} \frac{c}{2d_{máx}} \quad (4.5)$$

Onde  $s_{máx}$  é o maior número da sequência residual quadrática. A razão entre  $s_{máx}$  e o número primo  $N$  determina a eficiência do difusor para as baixas frequências. Por exemplo: para um difusor  $N=7$  e com  $s_{máx} = 4$ , tem-se uma razão  $s_{máx}/N = 4/7$ , enquanto para um difusor  $N=13$  e com  $s_{máx} = 12$ , tem-se uma razão  $s_{máx}/N = 12/13$ , concluindo-se daqui que um difusor  $N=7$  terá uma frequência de projeto aproximadamente uma oitava abaixo do difusor  $N=13$ . É possível, no entanto, manipular algumas sequências aumentando a sua resposta nas baixas frequências, introduzindo uma constante de mudança de fase ( $m$ ) apresentada na equação abaixo ( $s_n$ ), embora esta não deva ser realizada se a largura repetida for muito estreita.

$$s_n = (n^2 + m) \bmod N \quad (4.6)$$

Outro aspeto de relevância na análise das frequências consiste nas frequências críticas. Estas frequências caracterizam-se por estarem relacionadas com a localização onde o difusor apresenta um comportamento semelhante a uma superfície plana por causa da re-irradiação em fase de todas as reentrâncias. Este fenómeno ocorre quando o valor de todas as profundidades é múltiplo inteiro de metade do comprimento de onda. Para evitar este comportamento é necessário colocar a primeira frequência crítica acima da frequência máxima do difusor, usando a seguinte expressão [1]:

$$N \gg \frac{c}{2wf_0} \quad (4.7)$$

#### 4.2.2. DIFUSORES DE SEQUÊNCIA DE COMPRIMENTO MÁXIMO (MLS)

Em 1975, Schroeder propôs a construção de difusores baseados nas sequências de comprimento máximo (MLS). Esta foi justificada usando um princípio da teoria ótica: a dispersão de um campo sonoro distante pode ser aproximadamente prevista aplicando a transformada de Fourier de uma superfície, assim o espectro da energia e a dispersão da superfície estão intimamente relacionados. O difusor MLS foi assumido como tendo um espectro de energia plano em todas as frequências.

Um difusor MLS consiste em faixas de material com duas profundidades diferentes, estando estas dispostas em concordância com uma sequência predefinida. Por exemplo, um difusor MLS com um período  $N=7$  (Figura 4.4) apresentará uma superfície baseada na sequência  $[0,0,1,0,1,1,1]$ . A forma do difusor é apresentada por uma caixa com uma entrada variável na superfície frontal.

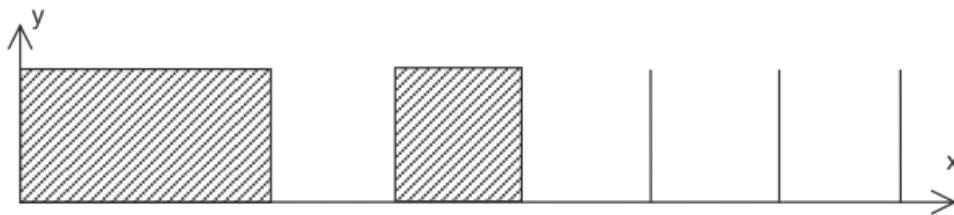


Figura 4.4 – Seção de um difusor MLS, de período  $N=7$  [1].

A admissão da superfície é determinada pela propagação das ondas sonoras planas nas ranhuras, levando assim a equações de concepção que relacionam as dimensões físicas com o desempenho de dispersão. Isto faz com que seja mais fácil criar uma superfície que atinge um máximo de dispersão numa frequência específica. Na Figura 4.5 é apresentada a resposta polar para uma superfície com base numa sequência MLS para a sua frequência de projeto em comparação com uma superfície plana.

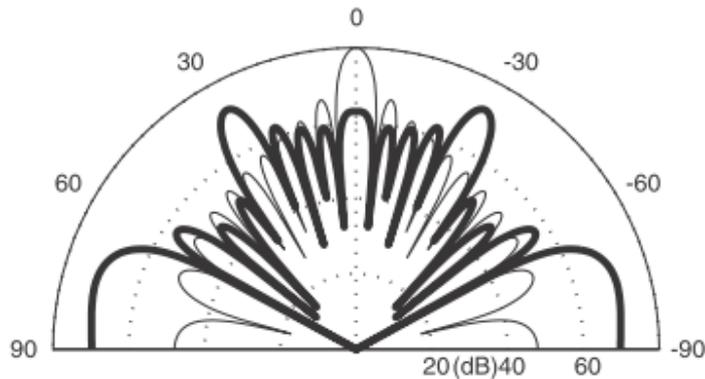


Figura 4.5 – Resposta polar de um difusor MLS N=7 na sua frequência de projeto. — difusor MLS N=7; — superfície plana [1].

Uma oitava acima da frequência de projeto, o difusor MLS apresenta uma reflexão especular. Nesta frequência crítica o comportamento de alteração de fase falha, pois a profundidade da ranhura é metade do comprimento de onda, causando assim uma re-irradiação das ondas com a mesma fase. De forma a contornar este problema de largura de banda estreita, Schroeder sugeriu diferentes sequências numéricas, tais como a sequência residual quadrática [18].

#### 4.2.3. DIFUSORES QUADRÁTICOS (QRD)

Os difusores quadráticos (QRD) (Figura 4.6) são dimensionados de forma a estender as características de dispersão dos difusores MLS sobre uma maior largura de banda. Estes atingem uma dispersão ótima em múltiplos inteiros da frequência de projeto e, geralmente, atingem uma dispersão razoável entre essas frequências. Uma boa dispersão abrangendo mais frequências pode ser atingida usando modulações ortogonais, resultando em difusores com duas frequências de projeto diferentes, ou seja, resultando em difusores 2D.



Figura 4.6 – Aplicação de um conjunto de difusores QRD no *Nicholas Music Center*, EUA [19].

#### 4.2.4. DIFUSORES DE SEQUÊNCIA DE RAIZ PRIMITIVA (PRD)

Em relação aos difusores QRD, os difusores baseados na sequência de raiz primitiva (PRD) são dimensionados de forma a diminuir a energia refletida na direção da reflexão especular e assim produzir um difusor com uma quebra (*notch*) na resposta à dispersão na direção especular (Figura 4.7). Adicionalmente devem apresentar a mesma energia nos outros lóbulos de difração. Tal como nos QRD, a dispersão ótima apenas é atingida em múltiplos inteiros da frequência de projeto. Desfavoravelmente, as pressões nulas atingidas pelo PRD estão localizadas noutras partes do espectro.

O difusor de raiz primitiva modificado por Cox-D'Antonio (CDMPRD) [1] é um difusor revisto projetado para responder ao problema acima referido (Figura 4.7). Com efeito, esta modificação introduziu uma mudança efetiva na frequência de forma a alinhar os fatores de reflexão adequadamente em torno de um círculo unitário em múltiplos da frequência de projeto, com vista a atingir os valores nulos de pressão desejados.

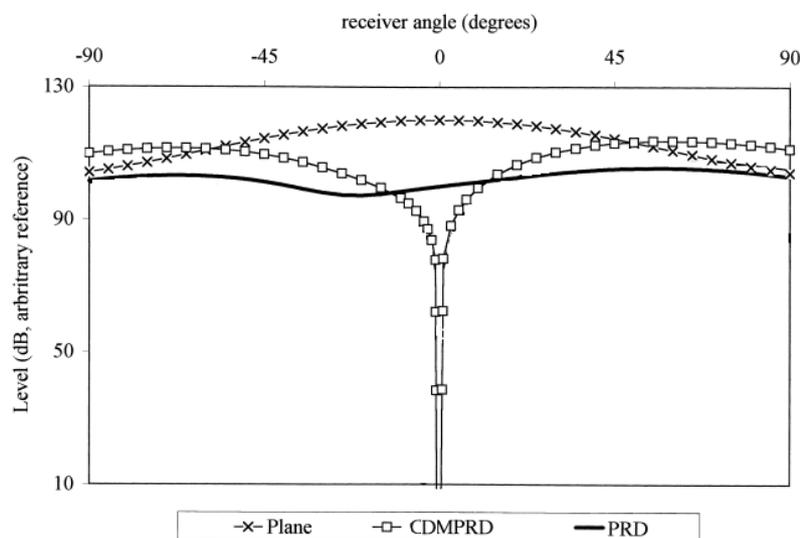


Figura 4.7 – Dispersão provocada por um difusor de raiz primitiva (PRD), um difusor de raiz primitiva modificado (CDMPRD) e uma superfície plana, para uma incidência normal e uma frequência de projeto de 500 Hz [20].

Pode parecer que o difusor PRD é útil em espaços pequenos como forma de minimizar a energia refletida na direção da reflexão especular, no entanto os PRD's apenas apresentam estes nulos de pressão em frequências muito discretas. Quando se analisa um difusor PRD para uma frequência que não é múltiplo inteiro da frequência de projeto, este não apresenta qualquer nulo de pressão na reflexão especular, apresentado um comportamento desapontante quando não se atinge a frequência ótima de dispersão.

Triângulos e pirâmides podem ser usados para atingir uma maior largura de banda de quebra (*broadband notch*), no entanto estas formas integram restrições relativamente ao ângulo de incidência.

#### 4.2.5. OUTRAS SEQUÊNCIAS

As sequências acima descritas não são as únicas adequadas para o dimensionamento de difusores. Existem outras sequências promissoras tais como [1]:

- *Index sequences;*
- *Short power residue sequences;*
- *The Chu sequence;*
- *Optimized sequences.*

As sequências mais promissoras são aquelas com propriedades de auto-correlação. Se a função de auto-correlação dos coeficientes de reflexão é uma função delta, então a sua transformada de Fourier irá revelar um espectro plano de energia. Isto corresponde assim a uma distribuição da dispersão uniforme, ou seja, um bom difusor [18].

#### 4.2.6. ESQUEMAS DE MODULAÇÃO E CONSTRUÇÃO FRACTAL

Enquanto a periodicidade é a base dos difusores QRD, esta é também uma das suas limitações, porque a periodicidade provoca uma dispersão em lóbulos em direções específicas de difração (Figura 4.8 B). De forma a minimizar este problema que compromete a uniformidade da resposta polar existe a adoção de superfícies assimétricas otimizadas, que garantam a aperiodicidade do conjunto de difusores e com isso uma resposta polar mais uniforme (Figura 4.8 C).

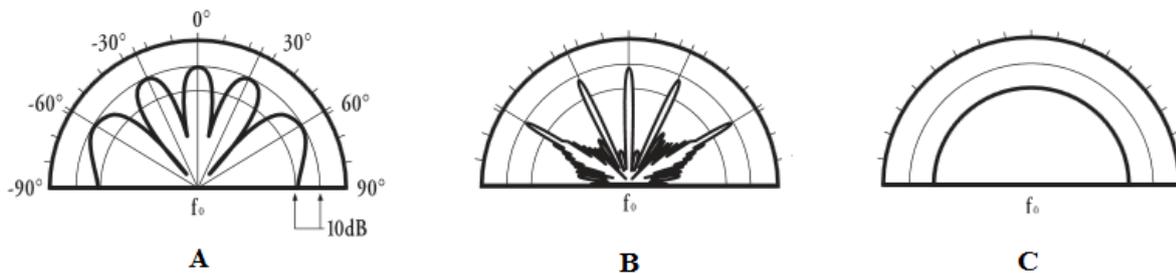


Figura 4.8 – Resposta polar de um difusor QRD (B) e a resposta polar ideal para um difusor de modulação aperiódica (C) [19].

A aperiodicidade resultará do uso de uma longa sequência numérica com boas propriedades de auto-correlação. No entanto, isso raramente é uma prática de dimensionamento razoável, pois há um escasso conhecimento de grandes sequências polifásicas aperiódicas. Além disso, a criação de difusores aperiódicos acarreta um maior custo de fabrico. Uma solução prática para este problema é o uso de esquemas de modelação. Normalmente, a melhor opção é usar um difusor e o seu inverso, dispostos de forma a alcançar a aperiodicidade (Figura 4.9).

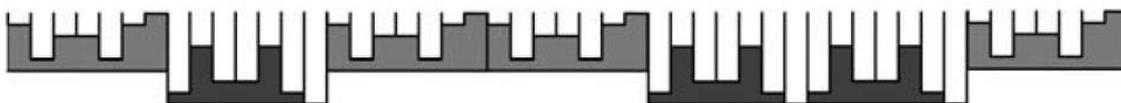


Figura 4.9 – Secção transversal de uma modulação de um esquema usando um difusor QRD  $N=7$  e o seu inverso [17]

As formações fractais são uma solução “elegante” para a resolução de problemas de periodicidade, absorção e largura de banda. Difusores para altas frequências podem ser incorporados em difusores para baixas frequências, explorando assim a simetria própria das construções fractais de modo a fornecer uma difusão num espectro mais completo com um único dispositivo Este tipo de difusores será abordado posteriormente.

#### 4.2.7. DIFUSORES BIDIMENSIONAIS (HEMISFÉRICOS)

Até agora apenas foram abordados os difusores planos (uma dimensão ou 1D), no entanto, os difusores podem ser divididos em dois tipos principais. Os difusores planos (1D) apresentam variação da profundidade apenas numa direção, com profundidade constante na direção ortogonal. Estes dispersam uniformemente o som incidente numa forma semicilíndrica. Em contraste, os difusores bidimensionais, 2D (Figura 4.10) dispersam o som uniformemente num padrão hemisférico, sendo dimensionados com base em dois planos, cada um projetado para uma difusão ótima. Um plano dispersa numa direção-x,

enquanto o outro plano dispersa numa direção-z, resultando assim numa forma hemisférica. O dispositivo toma assim uma forma de grelha. Os difusores 2D são úteis quando se pretende que a dispersão da energia seja distribuída hemisféricamente, como por exemplo em tetos, ou para dispersar uma forte reflexão especular [5].

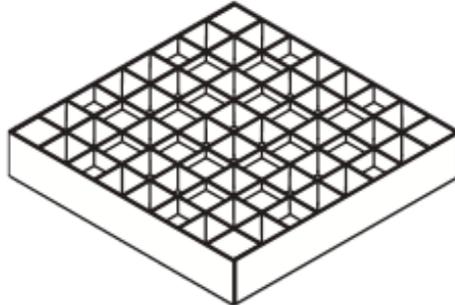


Figura 4.10 - Difusor *Omnifusor 2D QRD* [19]

#### 4.2.8. DIFUSORES DE SCHROEDER OTIMIZADOS E DIFUSORES ESCALONADOS (*STEPPED*)

Em vez de depender de uma sequência numérica ideal, com um espectro de energia plano, o dimensionamento dos difusores de Schroeder pode ser melhorado otimizando a dispersão uniforme diretamente (Figura 4.11).



Figura 4.11 – Difusor escalonado otimizado (*Optimized stepped diffuser*) [18]

Esta abordagem combina técnicas de otimização multidimensionais com definições de elementos de fronteira para dimensionar os difusores de fase otimizados. O primeiro passo para otimizar os difusores de Schroeder é remover as paredes finas entre as ranhuras (Figura 4.12), obtendo-se assim um *design* bastante mais simples: um difusor escalonado. Esta simples modificação melhora o desempenho da dispersão e facultar alguns benefícios adicionais:

- A simplificação da geometria reduz os custos da produção;
- Remoção das ranhuras ressonantes, que resulta numa menor absorção.

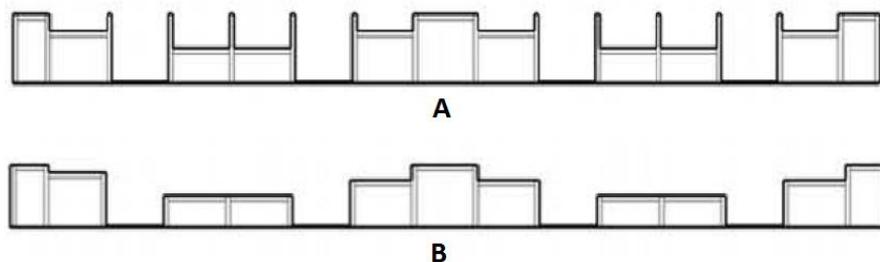


Figura 4.12 – Secção de uma superfície difusora com as paredes finas entre os elementos sequências (A) e uma superfície difusora sem as paredes finas (B) [21]

O processo de otimização começa pela escolha aleatória da sequência das profundidades das ranhuras, prevendo-se posteriormente a sua dispersão e avaliando-se a sua qualidade. O objetivo é minimizar o erro entre a dispersão prevista e a dispersão desejada. Isto é realizado incrementando alguns ajustes na sequência das profundidades das ranhuras até se obter o modelo ideal.

Neste processo de otimização é necessária a hierarquização de alguns passos fundamentais:

- Um modelo para a previsão da dispersão de um dado projeto de difusor;
- Um parâmetro de erro ou modelo ideal para definir a qualidade da dispersão;
- Um algoritmo de otimização para alterar a sequência da profundidade das ranhuras e encontrar a solução mais apropriada.

Um modelo de elementos finitos (*boundary element model – BEM*) é geralmente a primeira escolha para a previsão da dispersão no dimensionamento acústico, mas existem outras opções incluindo os modelos de Fraunhofer, os modelos de Fourier, métodos das diferenças finitas do domínio do tempo (FDTD) e análise dos elementos finitos (FEA). Enquanto o modelo BEM pode apresentar um cálculo bastante moroso, os resultados são precisos. Estudos passados usaram as soluções de Fraunhofer que apresentaram uma otimização mais rápida à custa de precisão do resultado. Outra aproximação consiste no uso de modelos simples para reduzir o leque de soluções, oferecendo um modelo mais preciso para ser calculado. O modelo ideal para uma dispersão uniforme na largura de banda pode ser formado a partir da média e do desvio padrão dos coeficientes de difusão em todas as frequências [18].

### **4.3. DIFUSORES GEOMÉTRICOS**

#### **4.3.1. INTRODUÇÃO**

Apesar da maioria do dimensionamento de difusores se basear na alteração da fase das frentes de onda sonora alterando a rugosidade da superfície ou alterando a impedância, até uma superfície plana pode causar difração pelos bordos da superfície. Com um bom dimensionamento da superfície, existem muitas formas que podem resultar em bons difusores, no entanto, apenas alguns serão visualmente aceitáveis. Nesta ótica surgiram vários tipos de difusores baseados em diferentes formas da superfície – arcos, triângulos, pirâmides, fractais e superfícies curvas. Dependendo da geometria usada, os prismas triangulares e pirâmides podem produzir dispersão, reflexão ou reflexão especular. Aplicados corretamente, estes poderão reduzir significativamente a energia em determinadas direções. Quanto às superfícies curvas, estas são mais claramente difusoras e universalmente usadas. Um “bom” difusor não se faz apenas pela forma da superfície, mas também depende da quantidade de elementos próximos uns dos outros. Assim, a dispersão depende da disposição dos elementos, periodicamente ou aleatoriamente, e não apenas das características de um único elemento.

#### **4.3.2. SUPERFÍCIES PLANAS**

A consideração do papel das superfícies planas, na dispersão em superfícies planas de dimensões finitas é fundamental para a compreensão da difração e da reflexão difusa. Numa superfície sem rugosidade, qualquer dispersão gerada será devido à dispersão pelos bordos. Quando analisado um painel plano, para frequências muito baixas, ou seja, quando o comprimento de onda é bastante maior comparado com o tamanho do painel, a quantidade de energia sonora dispersada pela superfície é ínfima ou nula. Por outro lado, para altas frequências, em que o comprimento de onda é pequeno comparado com o tamanho do painel, constata-se uma forte reflexão especular. De facto, pode assumir-se que à medida que a frequência aumenta e que o comprimento de onda se torna mais comparável e depois mais pequeno que

o tamanho do painel, o espalhamento da energia será dominado pelo tipo de reflexão especular, onde o ângulo de incidência iguala o ângulo de reflexão (Figura 4.13).

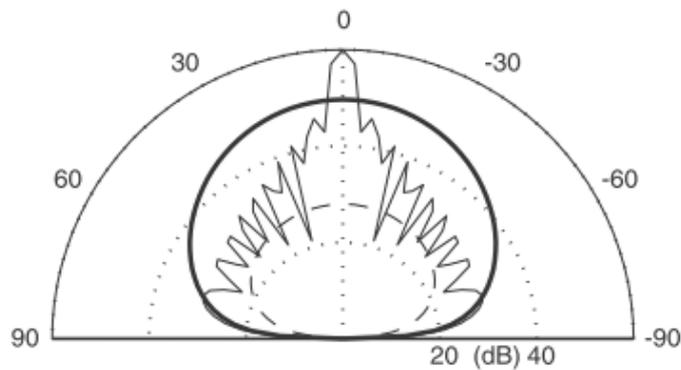


Figura 4.13 - Resposta polar para a pressão dispersada por um painel plano para três frequências diferentes. - - -  $\lambda=20a$ ; —  $\lambda=2a$ ; —  $\lambda=0,2a$ , onde  $a$  é a dimensão do painel [1].

Um dos usos mais comuns deste tipo de painéis planos é em cima de palcos ou da plateia em auditórios (Figura 4.14). Neste caso, quando usado um padrão de painéis, estes denotam um comportamento irregular. Para altas frequências, a energia é concentrada nas direções especulares e a energia dispersada para os recetores é reduzida. Neste caso o tamanho dos painéis ou a sua densidade determinam o desempenho para baixas frequências. O desempenho para as médias-altas frequências é dominado por fortes variações localizadas, devido ao tamanho dos difusores e à distância entre os painéis. Por estes motivos será normal o uso de outras formas geométricas, tais como arcos ou prismas triangulares, de modo a dispersar a energia sonora de forma mais uniforme a todos os recetores [1].



Figura 4.14 – Aplicação de painéis planos no *Byron Steele High School Auditorium*, EUA [22].

#### 4.3.3. SUPERFÍCIES TRIANGULARES E PIRAMIDAIS

As superfícies triangulares e piramidais podem gerar diversas formas de difusão e reflexões especulares dependendo da sua geometria e disposição. A geometria destas superfícies é composta pela repetição de unidades que são derivadas de formas piramidais e apresentam vários parâmetros de variação: declive das inclinações laterais dos elementos, comprimento e largura das pirâmides, profundidade e a disposição dos elementos de forma padronizada ou aleatória (Figura 4.15). O espalhamento provocado por um conjunto de pirâmides ou prismas triangulares é muito influenciado por todos estes parâmetros

de variação, podendo assim haver uma grande variação do seu desempenho para diferentes gamas de frequência.

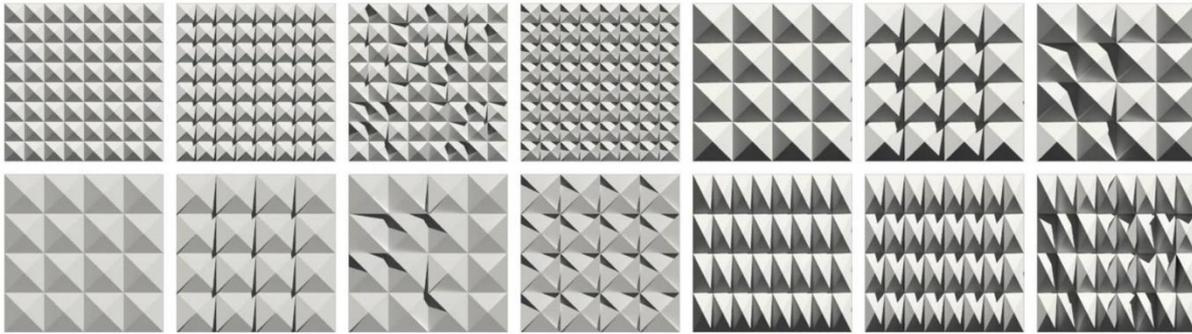


Figura 4.15 – Diferentes superfícies difusoras piramidais [23].

O desempenho destas superfícies é caracterizada pela capacidade de reduzir a reflexão na direção especular e por dispersar a energia sonora com lóbulos de energia distintos. Atendendo a que o pretendido é uma dispersão da energia sonora de forma uniforme em todas as direções, ou seja, com uma distribuição uniforme dos lóbulos de energia, é preciso atender à disposição dos elementos nestas superfícies. A periodicidade dos lóbulos de energia pode ser reduzida atendendo à modulação das superfícies, por exemplo, dois tamanhos diferentes de pirâmides podem ser escolhidos e poderão ser dispostos de acordo com uma sequência numérica pseudoaleatória. Na Figura 4.16 é apresentada uma aplicação de difusores piramidais com inclinação variável das superfícies laterais dispostos aleatoriamente no teto de um estúdio de gravação.



Figura 4.16 – Disposição de difusores piramidais no teto de um estúdio de gravação [24].

#### 4.3.4. SUPERFÍCIES CURVAS

Comparadas com os outros tipos de difusores, as superfícies curvas têm a potencial vantagem de menores custos de produção e menor absorção. Teoricamente uma superfície cilíndrica parece ser a forma ideal para um difusor mas na prática, uma superfície semicilíndrica teria demasiada profundidade para a maioria das aplicações arquitetónicas. As formas mais comuns para as superfícies curvas são cilindros e esferas, sendo os cilindros eficazes na dispersão do som num único plano enquanto as esferas geram uma dispersão hemisférica. Geralmente este tipo de superfícies apresenta um melhor desempenho

acústico para as baixas frequências, uma vez que o comprimento de onda é maior e por isso as estruturas de tamanho aproximado a esses comprimentos de onda permitem gerar maior difusão [12].

Os difusores convexos baseados em semicilindros, apenas apresentam um bom comportamento à dispersão do som para uma incidência normal. Uma melhor resposta pode ser alcançada quando estes são dispostos numa sequência de semicilindros (Figura 4.17), ou criando uma estrutura mais complexa usando a otimização de forma.



Figura 4.17 – Aplicação de difusores cilíndricos numa sala [25].

Quando estes são dispostos em sequência, a resposta de um único semicilindro torna-se secundária em relação à resposta do conjunto. Para a disposição sequencial ser efetiva, os semicilindros devem ser espaçados, aleatoriamente quanto possível; caso contrário, serão necessários esquemas de modulação para reduzir a periodicidade. A resposta polar depende assim da disposição dos cilindros. Na Figura 4.18 é analisada essa influência. Se o conjunto de semicilindros for disposto de forma não periódica geram-se mais lóbulos de energia e por isso uma maior dispersão sonora, comparativamente à disposição periódica.

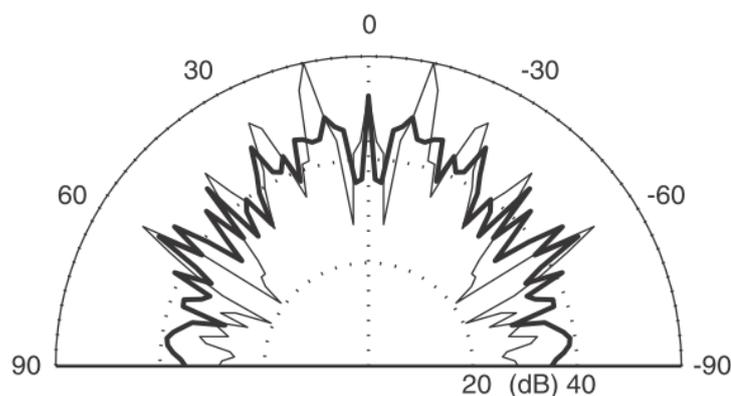


Figura 4.18 - Resposta polar para a pressão dispersada para um conjunto de semicilindros periódico e aperiódico. — aperiódico; — periódico [1].

#### 4.3.5. SUPERFÍCIES CURVAS OTIMIZADAS

No processo de desenvolvimento de um difusor existe muitas vezes um conflito entre as exigências visuais de estética e as exigências acústicas que deve ser considerado. Os difusores de Schroeder, apesar

de terem um desempenho acústico bem definido, possuem uma aparência visual bem específica que por muitas vezes é suscetível de refutação por parte dos arquitetos. Estimulados pela disponibilidade de novos materiais e pelo avanço tecnológico dos programas de dimensionamento e *design*, os arquitetos usam cada vez mais superfícies curvas na concepção de edifícios, tornando-se estas bastante comuns na arquitetura moderna.

Os difusores acústicos curvos são por isso uma solução atraente em complemento das tendências arquitetônicas. Estes enquadram-se bastante melhor na construção resultando numa boa combinação com as restantes estruturas. Um exemplo desta aplicação é o *Hummingbird Centre*, em Toronto (Figura 4.19) no qual foi necessário a instalação de difusores nas paredes laterais devido à implementação de um sistema de melhoria de som que provocaria ecos na sala caso não fosse aplicado nenhum tratamento nas superfícies.



Figura 4.19 - Aplicação de difusores curvos otimizados (*OptiCurve™*) no *Humminbirg Centre*, em Toronto [26]

O processo para a otimização dos difusores acústicos curvos incide, em semelhança com a otimização para os difusores de Schroeder, na tentativa de computacionalmente se encontrar a melhor forma curva para gerar dispersão. Neste processo de otimização a forma da superfície deve ser representada por uma série numérica, salientando-se que qualquer forma e deslocamento da superfície pode ser representado pela série de Fourier. Estes parâmetros de forma podem depois ser alterados permitindo obter possíveis formas da superfície. Após ser obtida a forma da superfície, é necessário ajustar a dimensão da forma ajustando o deslocamento máximo requerido na direção-y, ou seja, a máxima profundidade do difusor. Existem outras representações matemáticas que podem ser usadas para definir as superfícies curvas [1], no entanto mantém-se o princípio de que são necessários parâmetros que definam a forma.

Há no processo de modulação um esforço requerido para a compatibilização da solução encontrada com as limitações impostas pela arquitetura do espaço, ou requisitos impostos pelo arquiteto. Neste caso, devem ser usadas restrições não acústicas no processo de otimização para garantir que a forma da superfície satisfaz as restrições visuais e físicas. Tal pode ser feito definindo um conjunto de coordenadas pelas quais a superfície deve passar ou então recorrendo à distorção que tem a vantagem de ser um processo não tão complexo. Na Figura 4.20 é possível verificar o desempenho de uma superfície otimizada curva em comparação com uma superfície côncava. Demonstra-se que a otimização da superfície alcança uma resposta polar mais uniforme em todas as direções e a reflexão na direção especular é reduzida.

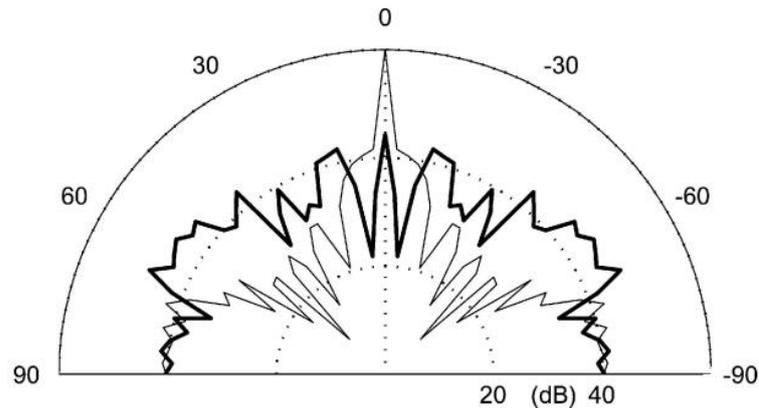


Figura 4.20 – Resposta polar da dispersão provocada por um difusor de superfície curva otimizada — e um difusor de superfície côncava — [17].

Quando estas superfícies são dispostas de forma periódica, a qualidade da dispersão para as baixas-médias frequências é dominada tanto pelos efeitos da periodicidade (*primarily grating lobes*) como pela forma da superfície. É, assim, importante remover a periodicidade do conjunto de superfícies, o que pode ser conseguido usando grandes superfícies, no entanto é uma solução bastante cara e não compatível com limitações de espaço, ou então, ser removida pela modelação do conjunto de superfícies. A chave para este tipo de modulação é criar uma forma que seja suficientemente assimétrica de forma a produzir uma dispersão completamente diferente. Na Figura 4.21 é apresentado um exemplo destas superfícies, aplicadas no teto de uma sala.



Figura 4.21 – Conjunto de difusores otimizados assimétricos [1].

#### 4.3.6. SUPERFÍCIES FRACTAIS

Os elementos fractais são elementos que mantêm a mesma escala de dimensões para diferentes níveis de ampliação. A técnica de manutenção da forma e proporção, em escalas diferentes pode assim ser usada na construção de painéis difusores, possibilitando a abrangência de uma largura de banda muito superior. Um difusor fractal é caracterizado pela existência de reentrâncias de diferentes escalas, em que reentrâncias mais pequenas se apresentam dentro das reentrâncias mais largas, a profundidades diferentes. Enquanto as reentrâncias de menores dimensões atuam nas altas frequências, as mais largas apresentam melhor desempenho nas baixas frequências. Tal comportamento pode ser visualizado na Figura 4.22. Os difusores fractais são melhores que os difusores em arco para uma incidência de som aleatória. Estes possibilitam também a produção de difusores com uma estética diferente dos difusores de superfície curva otimizados, no entanto com um desempenho não tão bom.

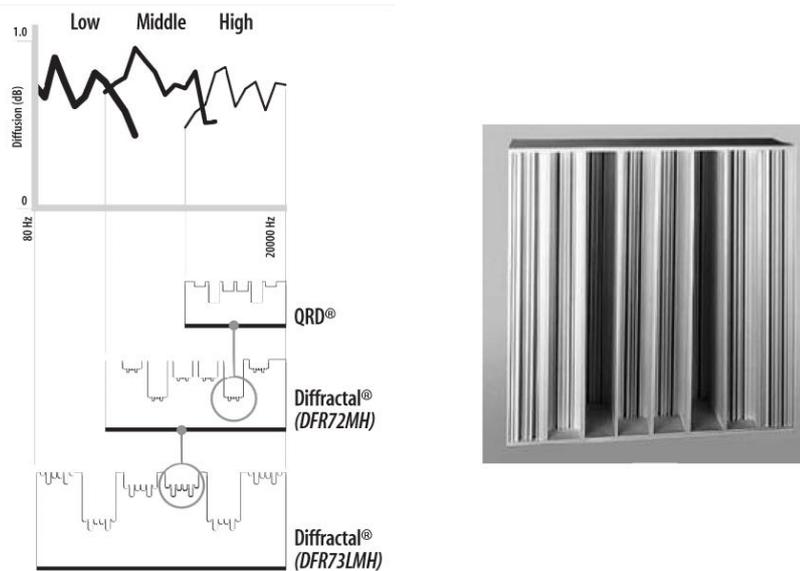


Figura 4.22 – Espectro de difusão de difusores fractais comercializados pela RPG [19]

#### 4.4. SUPERFÍCIES HÍBRIDAS

##### 4.4.1. INTRODUÇÃO

Um difusor tem a função de atuar nas ondas sonoras incidentes de modo a provocar uma dispersão da onda refletida, ou seja, quebrar a frente de onda sonora refletida visando a diminuição da reflexão espectral. Enquanto tal pode ser alcançado através da modelação da superfície, pode também ser conseguido alterando a impedância da superfície. Na verdade, o difusor de Schroeder é muitas vezes interpretado como uma superfície de impedância variável [1]. Resultado desta propriedade, nos últimos anos houve o interesse em voltar à teoria numérica para se criar um novo tipo de difusor acústico, o difusor de superfície híbrida. Ao contrário do difusor de Schroeder, este não pode ser dimensionado para a absorção mínima. Estas superfícies são híbridas, algures entre os absorvedores puros e os difusores não absorventes, atingindo estas uma impedância variável pela conjugação das propriedades absorventes e refletoras dos materiais.

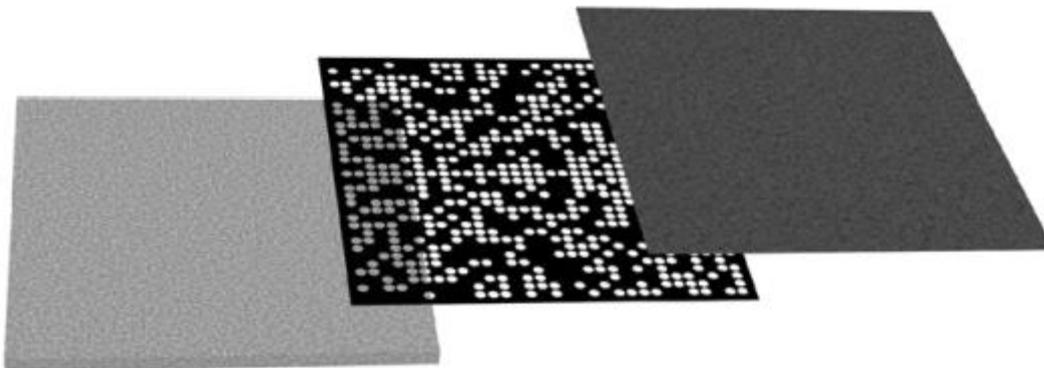


Figura 4.23 – Construção de uma superfície híbrida: material absorvente poroso (esquerda), máscara perfurada (meio) e cobertura (direita) [1].

A construção de uma superfície híbrida, representada esquematicamente na Figura 4.23, consiste na acoplação de três camadas de impedância diferente: uma camada de material absorvente (poroso), uma

segunda camada rígida com um determinado padrão de perfuração, denominada de máscara perfurada, e uma fina camada de revestimento com um comportamento acústico transparente. A máscara perfurada é a camada que confere à superfície a capacidade de absorção e difusão. A absorção ocorre nos furos da máscara perfurada, uma vez que o som que passa por estes é dirigido para a camada de material absorvente. O som que atinge a parte rígida da máscara é refletido, e devido à disposição aleatória das perfurações a energia refletida é dispersada. A matriz de perfuração é pois o elemento fundamental na dispersão da energia refletida, sendo o seu ótimo desempenho obtido através de uma sequência binária pseudoaleatória com propriedades de auto correlação ideais (menor número possível de repetições) [17]. Na Figura 4.24 demonstra-se a dispersão superior de uma superfície híbrida em relação a uma superfície plana.

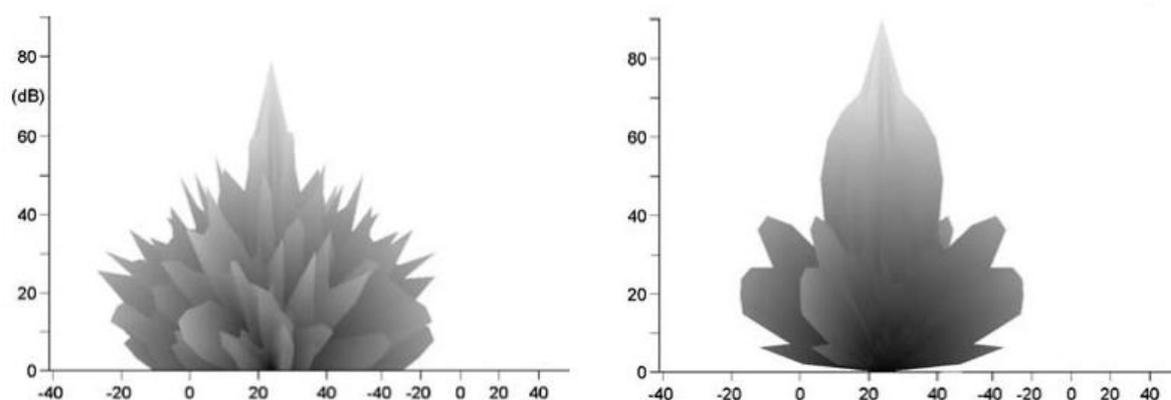


Figura 4.24 – Respostas polares de dispersão a 3 kHz. Esquerda: difusor híbrido (*BAD™*). Direita: superfície plana [17].

Esta dispersão pode ainda ser melhorada caso a superfície híbrida, em vez de plana, seja moldada numa forma ondulatória, diminuindo assim a reflexão especular. Assim surge a diferenciação entre difusores híbridos planos e difusores híbridos curvos.

#### 4.4.2. DIFUSORES HÍBRIDOS PLANOS

Como dito anteriormente, estas superfícies híbridas são caracterizadas por terem capacidade de absorção e difusão. Estas garantem simultaneamente a difusão do som em médias-altas frequências, e a absorção num intervalo de frequências específico. O material poroso que constitui o painel (por exemplo lã mineral) é conhecido pelo seu desempenho adequado na absorção de altas frequências, no entanto, a massa adicional de ar conferida pelo padrão de perfuração da máscara faz com que haja uma absorção adicional na gama das baixas-médias frequências. Nas altas frequências, a componente rígida da máscara provoca a reflexão de parte da energia sonora, evitando que haja a absorção desta em algumas partes da lã mineral, provocando assim uma redução no coeficiente de absorção. É nestas frequências, onde a absorção é reduzida, que a superfície deve começar a gerar quantidades significativas de reflexões difusas.

Os difusores híbridos planos alargaram o desempenho acústico dos tradicionais painéis acústicos absorvedores, permitindo abranger uma maior área de tratamento sem o excessivo efeito de “sala morta” (*deadening*) nas médias a altas frequências. Estes difusores são utilizados em instalações que necessitam de um controlo das reflexões, assegurando-o com uma construção simples e económica.

#### 4.4.3. DIFUSORES HÍBRIDOS CURVOS

As superfícies híbridas planas apresentam ainda assim uma quantidade significativa de reflexão especular, embora atenuada, devido a ser parcialmente absorvida. As partes rígidas da máscara

provocam a reflexão das ondas que chegam em fase na direção especular. A solução para este problema é moldar a superfície de forma a reduzir a difusão na direção especular, criando uma dispersão mais uniforme no espaço.

O desempenho de absorção das superfícies híbridas curvas é semelhante às superfícies planas, mas como mostra a Figura 4.25, a dispersão é aumentada e uniformizada.

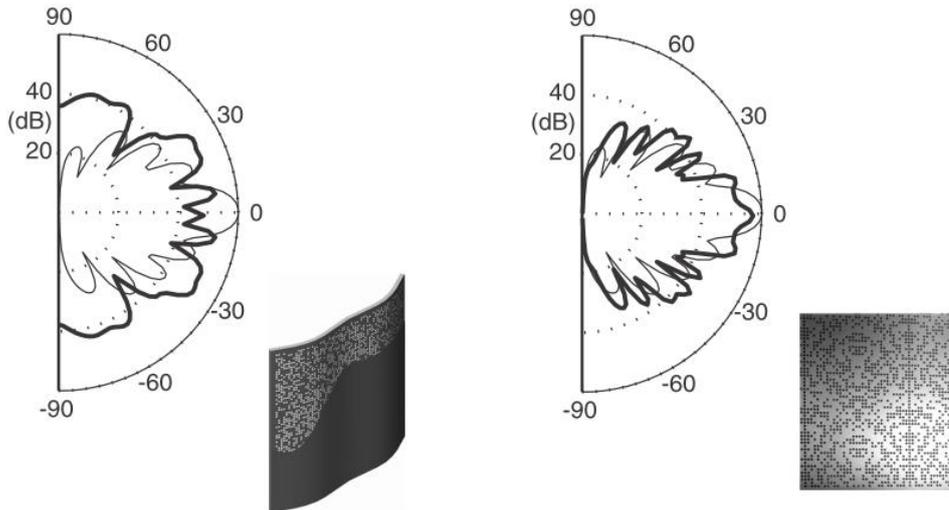


Figura 4.25 – Espectros de dispersão para duas superfícies (a linha fina representa uma superfície plana não absorvente). Esquerda: superfície híbrida curva. Direita: superfície híbrida plana [1].

Os espectros de dispersão demonstram essa melhoria da passagem de uma superfície híbrida plana para curva, no entanto curvar a superfície híbrida produz uma melhoria mais acentuada no coeficiente de difusão, como é apresentado na Figura 4.26. Curiosamente, a qualidade da difusão para a superfície híbrida curva é apenas um pouco pior do que uma superfície curva otimizada. Revelando-se assim uma razoável solução para gerar reflexões difusas a partir de uma profundidade limitada. No entanto, apenas será claramente útil quando a absorção seja também necessária, como por exemplo, estúdios de gravação.

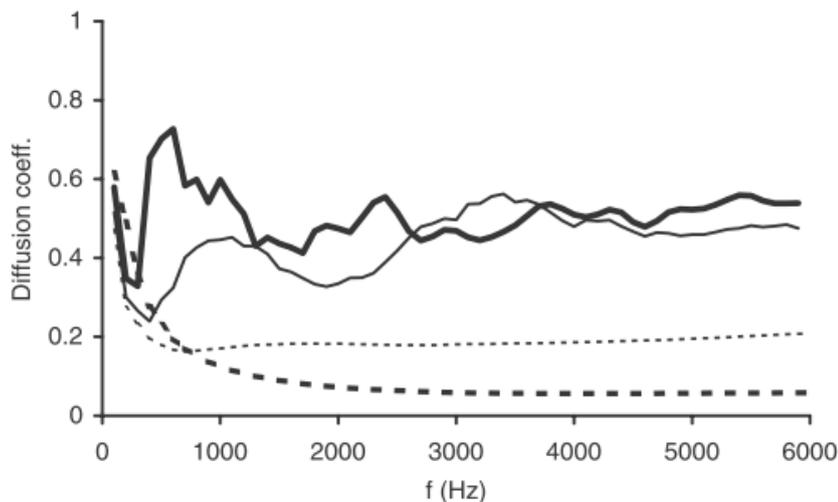


Figura 4.26 – Coeficiente de difusão para quatro superfícies. - - - - Refletor plano sem absorção; ..... Superfície híbrida plana; ——— Superfície híbrida curva; ——— Difusor curvo otimizado [1]

Os difusores híbridos oferecem assim uma solução mais moderna para quem deseja controlar a reverberação e as reflexões difusas. Além de ser uma solução mais barata e econômica, têm a vantagem de diminuir o conflito entre a estética e os requisitos acústicos, uma vez que a sua função acústica pode ser oculta pelo revestimento superficial.

#### 4.5. DIFUSORES ATIVOS

Os difusores acústicos apresentados até agora são usados para melhorar a acústica de salas numa ampla variedade de aplicações. A dispersão proporcionada pelos difusores correntes é muitas vezes limitada a médias-altas frequências, devido a requisitos não acústicos. Para serem atingidas reflexões difusas um difusor passivo deverá apresentar uma profundidade significativa comparada com o comprimento de onda do som, e para serem eficazes nas baixas frequências os difusores teriam de ser muito amplos para serem facilmente instalados. De forma a estender a largura de banda às baixas frequências Cox *et al.* [27, 28] propuseram o uso de tecnologia de controlo ativa. Um dispositivo ativo oferece a possibilidade de se produzir um difusor que trabalhe nas baixas frequências à custa de uma profundidade mais favorável quando comparada com um dispositivo passivo. Outra vantagem é a possibilidade de uma superfície ativa variar as condições acústicas.

Na Figura 4.27 são apresentadas estruturas possíveis para uma superfície difusora ativa, usando o perfil de um difusor de Schroeder como base. Nesta são implantados elementos ativos (pequenos altifalantes), substituindo as reentrâncias mais profundas. Mudando a forma de resposta dos altifalantes ao som incidente é possível alterar as características das reentrâncias artificialmente. É assim possível simular uma maior profundidade da reentrância. Estes dispositivos funcionam da seguinte forma: anulam uma determinada reflexão, mas seguidamente a fonte secundária adiciona uma reflexão artificial que emita as características do difusor. Assim, o modelo simples para um difusor ativo usa os elementos ativos para produzir uma dispersão nas baixas frequências controlando a impedância da reentrância e simulando a sua profundidade.



Figura 4.27 – Difusores ativos baseados no modelo de Schroeder [28]

A Figura 4.28 mostra a resposta polar para os difusores de Schroeder ativo e passivo em duas frequências diferentes. A resposta polar mostra como os difusores diminuem a energia refletida na direção da reflexão especular (normal à superfície). Aqui é possível comprovar que as superfícies passiva e ativa produzem uma dispersão semelhante. Ou seja, o difusor ativo, onde as reentrâncias com maior profundidade foram substituídas por reentrâncias ativas de reduzida profundidade, consegue provocar dispersão como um difusor passivo [27].

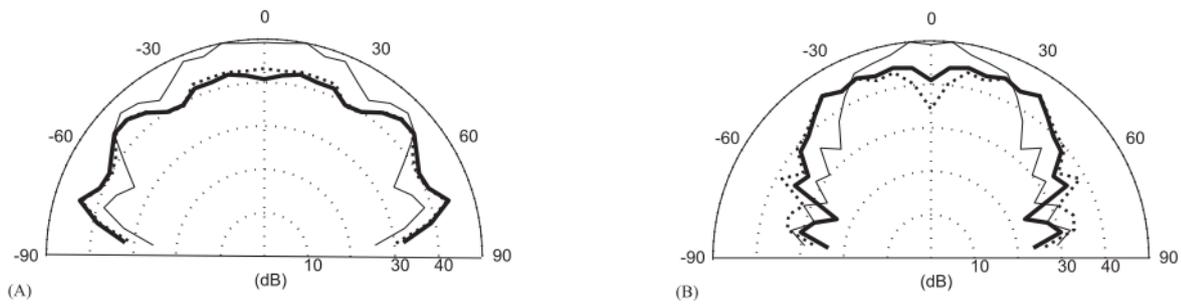


Figura 4.28 – Medição da resposta polar de dispersão para dois difusores e uma superfície plana. (A) 500 Hz, (B) 1000 Hz: —, difusor de Schroeder passivo; ·····, difusor de Schroeder ativo; —, superfície plana [27].

Os elementos ativos podem assim ser usados para alcançar uma absorção melhorada ou maior dispersão. A principal vantagem será, como já foi referido, superar a necessidade de grandes superfícies passivas que são necessárias nas baixas frequências, onde os comprimentos de onda são maiores. O pequeno entrave no uso destes elementos é o seu custo e as dificuldades práticas associadas a esta tecnologia. No entanto os elementos ativos são vistos pelos especialistas como o futuro na absorção das baixas frequências e na tecnologia dos difusores.

# 5

## DESENVOLVIMENTO DAS SOLUÇÕES – DIMENSIONAMENTO E CARACTERIZAÇÃO

### 5.1. PRIMEIRO MODELO PROPOSTO

#### 5.1.1. INTRODUÇÃO

Após o primeiro contacto com a empresa *Castelhano & Ferreira*, que se predispôs a colaborar ativamente na elaboração deste projeto, resultaram algumas linhas de seguimento para delinear o dimensionamento do difusor que viria a ser fabricado. A base de ideias que originou a primeira proposta para o modelo do difusor foi:

- Criação de um modelo simples, preferencialmente diferente dos difusores já abordados pela empresa;
- Um elemento modular, preferencialmente destinado a pequenas salas de áudio, tais como salas de *home theater*, estúdios de gravação ou salas de ensaio;
- O material a usar para o modelo deveria incidir nos materiais habitualmente utilizados pela empresa: madeira ou seus derivados (MDF, etc.);

A parte inicial para o dimensionamento do difusor incidiu na pesquisa dos vários tipos de difusores, entendendo quais as possibilidades mais adequadas à necessidade do desempenho desejado.

#### 5.1.2. DIMENSIONAMENTO DO MODELO

A primeira ideia delineada para o protótipo do difusor baseou-se na criação de uma estrutura aleatória de saliências e reentrâncias que permitisse o desfasamento das ondas sonoras aquando da reflexão nos difusores, provocando assim a difusão das mesmas devido às diferentes dimensões das saliências e reentrâncias que atuavam em diferentes comprimentos de onda. Assim, a primeira ideia consistiu em criar dois modelos de difusores com uma estrutura semelhante. Um difusor *A* baseado em perfurações cilíndricas de diferentes diâmetros, no qual também variassem as profundidades dos mesmos, de modo a alargar a gama de frequências a atuar. E um difusor *B* que consistiria no reaproveitamento do material perfurado para o primeiro difusor, criando uma estrutura de saliências cilíndricas com variação nos diâmetros das saliências e na altura destas.

O material idealizado seria a madeira, não só por ser um material de absorção sonora reduzida, ideal para um difusor, mas também por ser um material com o qual a empresa estava mais familiarizada no processo de fabrico.

Na Figura 5.1 é apresentado o procedimento para o fabrico do protótipo do difusor A. Inicialmente delineou-se uma disposição de forma aleatória das perfurações, tentando criar uma superfície heterogênea de forma a se obter uma melhor resposta do difusor. As reentrâncias, neste caso perfurações, teriam como dito anteriormente, variação no diâmetro e profundidade. Os diâmetros aproximadamente entre 1,5 e 4,4 cm e as profundidades 1, 2, 3, 4, 5 e 6 cm.

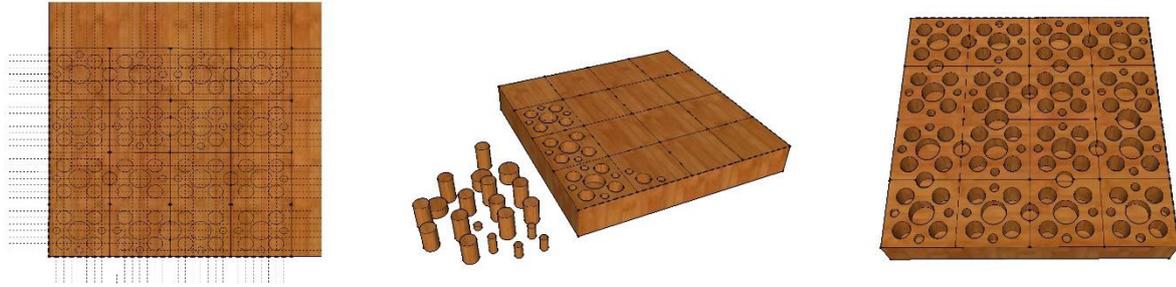


Figura 5.1- Esquema de fabrico do protótipo do difusor A (perfurações cilíndricas).

O protótipo do difusor B, representado na Figura 5.2, resulta do reaproveitamento do material extraído no fabrico do difusor A, constituindo assim um difusor de saliências cilíndricas de diâmetros entre 1,5 e 4,4 cm e alturas variáveis entre 1 e 6 cm, dispostos numa malha aleatória. Este difusor resulta da tentativa de criar uma superfície bastante irregular, de modo a criar o desfasamento necessário na reflexão das ondas sonoras promovendo a difusão das mesmas.

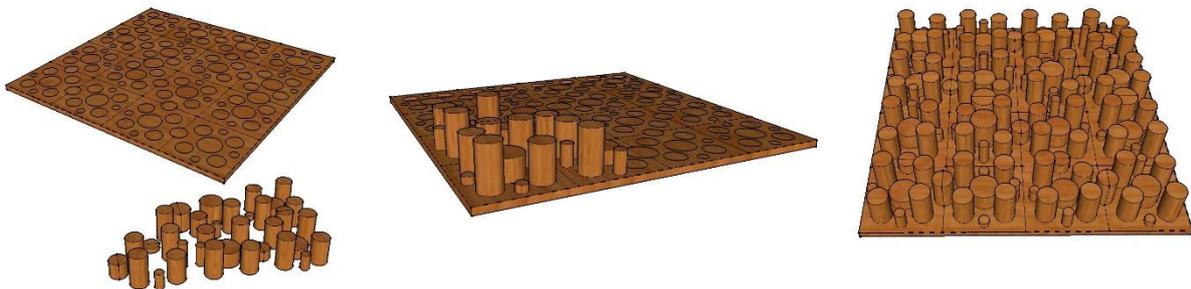


Figura 5.2 - Esquema de fabrico do protótipo do difusor B (saliências cilíndricas).

Além da estrutura delineada para o difusor, o reaproveitamento do material no fabrico no segundo difusor permitiria otimizar o material a utilizar, reduzindo assim o desperdício e obtendo dois modelos de difusores (Figura 5.4) de aproximadamente 50x50 cm de características diferentes com um custo mais reduzido.

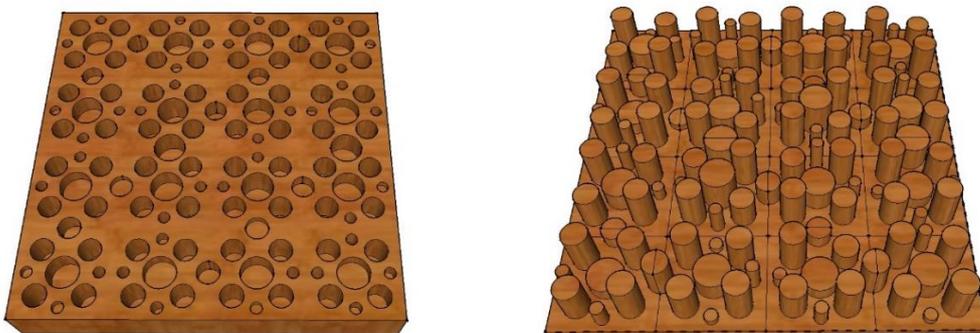


Figura 5.3 (esq) - Protótipo do difusor A e Figura 5.4 (dir) - Protótipo do difusor B.

O fabrico destes dois difusores de 50x50 cm com diferentes características permitiria assim o seu uso separadamente ou em conjunto, como uma estrutura modular, facilitando assim o uso de diferentes áreas da superfície difusa, tendo como objetivo a aplicação em paredes posteriores de salas pequenas (Figura 5.5).

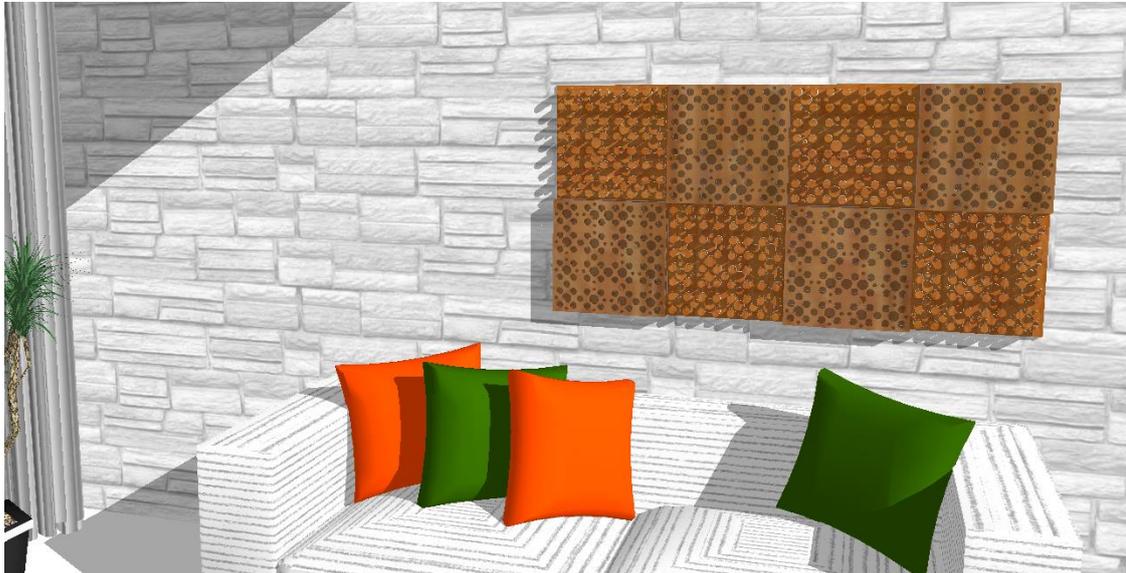


Figura 5.5 - Aplicação num esquema modular (2x2) dos difusores A e B, na parede posterior de uma sala.

Estes protótipos propostos basearam-se apenas na criação de uma superfície de elevada rugosidade, com bastantes desfasamentos, de forma a interferir na reflexão das sonoras. Aqui não foram usados programas de seriação, modelagem ou de previsão de desempenho, sendo que o seu comportamento apenas poderia ser avaliado recorrendo a ensaios que avaliassem e caracterizassem a difusão provocada pela superfície dos protótipos e a sua influência no campo sonoro de uma sala.

### 5.1.3. ANÁLISE DA PROPOSTA

Como a elaboração dos protótipos ficou a cargo da empresa *Castelhana & Ferreira* e esta pretendia um produto para uma possível comercialização, para além de um produto que apresentasse um bom desempenho, surgiram algumas condicionantes ao nível do fabrico:

- Limitações a nível do material escolhido, principalmente o custo do material, mas também as dimensões do material comercializado;
- Condicionantes a nível da execução, devido às limitações no corte do material (máxima espessura que a fresa pode cortar e a geometria do corte);
- Condicionantes relacionadas com a mão-de-obra e o custo associado.

Após a definição dos protótipos, apresentou-se a proposta à *Castelhana & Ferreira* para analisar a sua viabilidade ao nível de desempenho e condicionantes de fabrico. Dessa análise resultaram alguns entraves para o fabrico dos protótipos. A dificuldade e custo de fabrico foram os principais. A ideia de fazer as perfurações cilíndricas num dos difusores e reaproveitar o material resultante da perfuração para o outro difusor apenas resultaria se a empresa tivesse equipamentos que possibilitassem o corte cilíndrico dos elementos de diâmetros variáveis, o que não era o caso. Assim, o fabrico destes protótipos teria um custo, em termos de mão-de-obra (homem-tempo) muito elevado, pois requeria o corte e colagem peça a peça

(à mão) e do ponto de vista fabril e industrial, este tipo de tarefas necessitariam de ser mais mecanizadas para serem mais viáveis.

Posto isto, acordou-se cancelar a primeira proposta para os protótipos e avançar para uma nova proposta na qual as condicionantes de fabrico também seriam tidas em consideração.

## 5.2. SEGUNDO MODELO PROPOSTO

### 5.2.1. INTRODUÇÃO

Para este segundo modelo a *Castelhana & Ferreira* contribuiu com uma sugestão para a ideia inicial para obviar as impossibilidades técnicas do primeiro modelo. Esta consistia num difusor similar a um difusor 2D de Schroeder, no entanto, com os topos dos elementos inclinados. O maior desafio aqui consistia no facto da empresa pretender uma inovação a nível do fabrico destes difusores, além do seu desempenho. Pretendia-se que de cada corte dos elementos resultassem dois elementos constituintes do difusor, reduzindo assim o tempo de fresagem e otimizando os processos de fabrico.

No entanto, apesar da ideia delineada, foi necessário realizar o dimensionamento numérico dos perfis constituintes do difusor de modo a obter uma superfície que proporcionasse o ressalto dos lóbulos de energia sonora uniformemente em todas as direções, ou seja, uma superfície difusa. Contrariamente ao processo pressuposto para o dimensionamento da superfície difusora, tiveram de ser consideradas algumas limitações a nível estrutural devido ao material escolhido e às condicionantes de moldagem em fábrica, sendo estas referidas a seguir:

- O material escolhido para o fabrico dos difusores foi o MDF, uma vez que a sua moldagem é mais fácil e é também mais económico do que a madeira;
- A largura de cada linha do difusor ficou limitada a 40 mm, uma vez que era a espessura das placas de MDF que a empresa tinha disponíveis para o fabrico do protótipo;
- A dimensão total do difusor foi limitada a 600 mm, uma vez que é a medida *standard* de revestimentos interiores, o que facilita assim a instalação dos difusores;
- E a nível de fábrica, a limitação em relação à penetração das fresas condicionando assim a profundidade de corte e a limitação de corte das arestas em ângulo reto condicionando a forma dos elementos.

### 5.2.2. DIMENSIONAMENTO DO MODELO

No seguimento do modelo sugerido pela empresa para a elaboração do difusor e com base na teoria de um difusor quadrático de Schroeder procedeu-se ao dimensionamento do difusor, analisando o desempenho de várias superfícies, de modo a obter-se a solução para a proposta do difusor, representada na Figura 5.6.

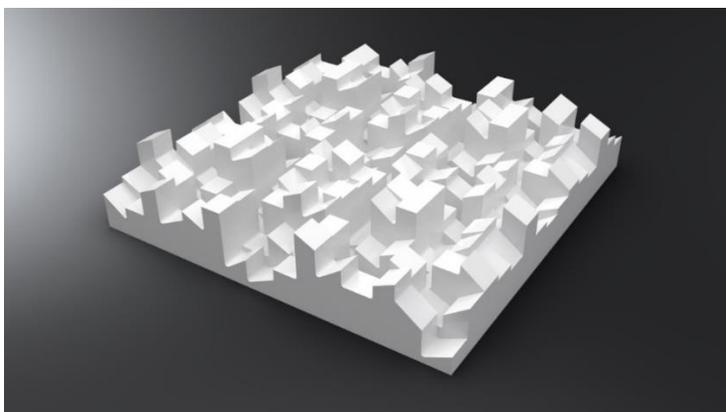


Figura 5.6 – Segundo modelo de difusor proposto para realização do protótipo.

O dimensionamento da superfície do difusor consistiu num processo com diversas fases distintas, que se apresentam na Figura 5.7:

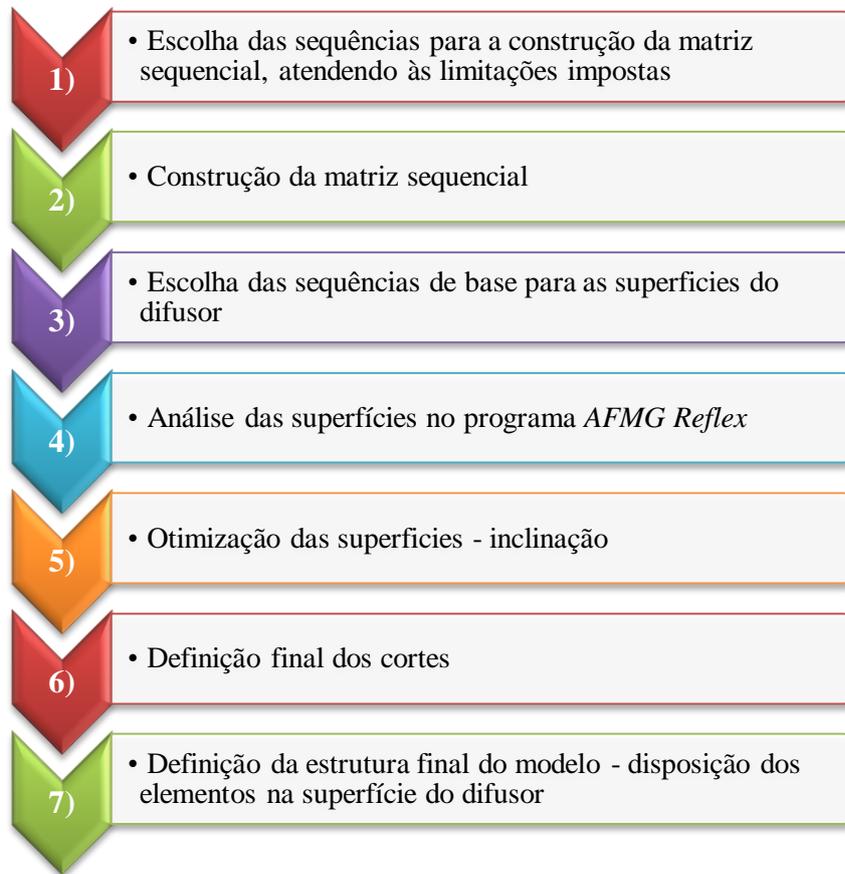


Figura 5.7 – Processo de dimensionamento do segundo modelo proposto.



O primeiro procedimento para o dimensionamento da superfície consistiu na elaboração de uma matriz sequencial para a definição das alturas dos elementos de cada linha do difusor. Este processo foi condicionado pela limitação da dimensão total do difusor e da largura de cada linha do difusor. Uma vez que se definiu a dimensão máxima do difusor em 600 mm e a largura de cada linha do difusor teria de ser de 40 mm por condicionalismo do material usado, o número de linhas do difusor ficou restringido a quinze.

Este número de elementos é importante para a definição da matriz uma vez que para a elaboração desta, atendendo a que este dimensionamento tem como base uma sequência quadrática residual, o número de elementos está diretamente relacionado com o período escolhido para a estrutura. A seguir é explicado com maior pormenor este aspeto.

A principal particularidade de um difusor 2D em relação a um difusor plano é a forma como a superfície dispersa a energia sonora. Se, por um lado, um difusor plano dispersa a energia sonora de uma forma semicilíndrica, o difusor 2D dispersa a energia hemisféricamente. Esta dispersão é conseguida através de um modelo que apresente um bom funcionamento em dois planos, ou seja, que proporciona uma boa dispersão numa direção-x e numa direção-z, portanto dispersa a energia sonora em lóbulos de energia constantes numa semiesfera, como se pode ver na Figura 5.8.

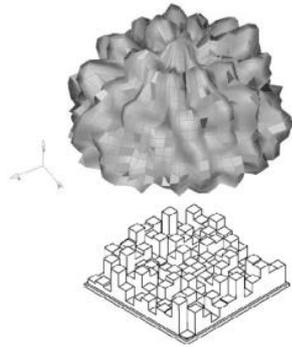


Figura 5.8 - Resposta polar de um difusor 2D [29].

**E como é conseguida essa dispersão em lóbulos de energia?** Para que sejam gerados estes lóbulos de energia, a superfície terá de ser periódica, ou seja, a superfície tem de ser dimensionada com base numa sequência matemática na qual o número e profundidade das reentrâncias dependam da periodicidade admitida para a estrutura. Assim, para o modelo em questão foi necessário escolher a sequência de base para a superfície e encontrar o período que melhor se adaptasse às dimensões já definidas. De acordo com Cox e D'Antonio [1], um dos processos para o dimensionamento de difusores 2D consiste na formação de duas sequências, uma para a direção-x e outra para a direção-z fazendo a modulação da sequência x com a sequência z. Admitindo a **sequência residual quadrática**, esta modulação pode ser expressa por:

$$s_{n,m} = (n^2 + m^2) \bmod N \tag{4.8}$$

onde  $n$  e  $m$  são números inteiros e dão a sequência para os elementos  $n$  e  $m$  na direção-x e direção-z respetivamente e  $N$  representa o período da sequência.

Na Figura 5.9 são representadas as sequências quadráticas residuais relativamente aos períodos para os números primos de 5 a 19. É aqui que tem de ser estabelecida a relação entre a escolha da periodicidade da superfície e o número de elementos de cada linha do difusor.

n	período					
	5	7	11	13	17	19
0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1
2	4	4	4	4	4	4
3	4	2	9	9	9	9
4	1	2	5	3	16	16
5	0	4	3	12	8	6
6		1	3	10	2	17
7		0	5	10	15	11
8			9	12	13	7
9			4	3	13	5
10			1	9	15	5
11			0	4	2	7
12				1	8	11
13				0	16	17
14					9	6
15					4	16
16					1	9
17					0	4
18						1
19						0

Figura 5.9 - Sequência quadrática residual para os números primos de 5 a 19.

Uma vez que o número de elementos definidos para o difusor (15) não é um número primo, a escolha da sequência teve de ser adaptada. Ou seja, o mais aproximado do número 15 seriam o período  $N=13$  ou  $N=17$ . No entanto nenhum destes períodos se adaptava muito bem ao número de elementos definido, pois para  $N=13$ , era possível definir uma matriz completa para um período mas para perfazer os 15 elementos teria uma linha a mais desnecessária. Por outro lado, para um período  $N=17$ , não seria possível definir a matriz completa para um período, além de que o fabrico do modelo seria bastante mais difícil e morosa devido ao elevado número de diferentes alturas dos elementos.

**Assim, qual foi a solução escolhida?** Adotou-se uma sequência quadrática residual de dois períodos  $N=7$  para a direção-x e -z, conseguindo assim aproveitar a totalidade dos elementos do difusor, como apresentado na Figura 5.10.

	N=7							+	N=7							
	0	1	2	3	4	5	6	0	1	2	3	4	5	6	0	
0	0	1	4	2	2	4	1	0	1	4	2	2	4	1	0	
1	1															
2	4															
3	2															
4	2															
5	4															
6	1															
0	0															
1	1															
2	4															
3	2															
4	2															
5	4															
6	1															
0	0															

↑  
m

Figura 5.10 - Matriz sequencial para o difusor quadrático residual 15x15 (sequências escolhidas na direção-x e -z).



Após a escolha das sequências na direção-x e na direção-z, procedeu-se à modulação da sequência em x com a sequência em z para a obtenção da matriz sequencial 15x15. Essa modelação é feita recorrendo à fórmula (4.8).

No Quadro 5.1 são apresentados os cálculos para a determinação dessa matriz.

Quadro 5.1 - Cálculo da modulação da sequência em x com a sequência em z.

Cálculo	$S_{n,m}$
$s_{0,0} = (0^2 + 0^2) \bmod 7 = 0$	0
$s_{1,0} = (1^2 + 0^2) \bmod 7 = 1$	1
$s_{2,0} = (2^2 + 0^2) \bmod 7 = 4$	4
$s_{3,0} = (3^2 + 0^2) \bmod 7 = 9 - 7 = 2$	2
$s_{4,0} = (4^2 + 0^2) \bmod 7 = 16 - 7 = 9 - 7 = 2$	2
$s_{5,0} = (5^2 + 0^2) \bmod 7 = 25 - 7 = 18 - 7 = 11 - 7 = 4$	4
$s_{6,0} = (6^2 + 0^2) \bmod 7 = 36 - 7 = 29 - 7 = 22 - 7 = 15 - 7 = 8 - 7 = 1$	1
$s_{1,1} = (1^2 + 1^2) \bmod 7 = 2$	2
$s_{2,1} = (2^2 + 1^2) \bmod 7 = 5$	5
$s_{3,1} = (3^2 + 1^2) \bmod 7 = 10 - 7 = 3$	3
$s_{4,1} = (4^2 + 1^2) \bmod 7 = 17 - 7 = 10 - 7 = 3$	3
$s_{5,1} = (5^2 + 1^2) \bmod 7 = 26 - 7 = 19 - 7 = 12 - 7 = 5$	5
$s_{6,1} = (6^2 + 1^2) \bmod 7 = 37 - 7 = 30 - 7 = 23 - 7 = 16 - 7 = 9 - 7 = 2$	2
$s_{2,2} = (2^2 + 2^2) \bmod 7 = 8 - 7 = 1$	1
$s_{3,2} = (3^2 + 2^2) \bmod 7 = 13 - 7 = 6$	6
$s_{4,2} = (4^2 + 2^2) \bmod 7 = 20 - 7 = 13 - 7 = 6$	6
$s_{5,2} = (5^2 + 2^2) \bmod 7 = 29 - 7 = 22 - 7 = 15 - 7 = 8 - 7 = 1$	1
$s_{6,2} = (6^2 + 2^2) \bmod 7 = 40 - 7 = 33 - 7 = 26 - 7 = 19 - 7 = 12 - 7 = 5$	5
$s_{3,3} = (3^2 + 3^2) \bmod 7 = 18 - 7 = 11 - 7 = 4$	4
$s_{4,3} = (4^2 + 3^2) \bmod 7 = 25 - 7 = 18 - 7 = 11 - 7 = 4$	4
$s_{5,3} = (5^2 + 3^2) \bmod 7 = 34 - 7 = 27 - 7 = 20 - 7 = 13 - 7 = 6$	6
$s_{6,3} = (6^2 + 3^2) \bmod 7 = 45 - 7 = 38 - 7 = 31 - 7 = 24 - 7 = 17 - 7 = 10 - 7 = 3$	3
$s_{4,4} = (4^2 + 4^2) \bmod 7 = 32 - 7 = 25 - 7 = 18 - 7 = 11 - 7 = 4$	4
$s_{5,4} = (5^2 + 4^2) \bmod 7 = 41 - 7 = 34 - 7 = 27 - 7 = 20 - 7 = 13 - 7 = 6$	6
$s_{6,4} = (6^2 + 4^2) \bmod 7 = 52 - 7 = 45 - 7 = 38 - 7 = 31 - 7 = 24 - 7 = 17 - 7 = 10 - 7 = 3$	3
$s_{5,5} = (5^2 + 5^2) \bmod 7 = 50 - 7 = 43 - 7 = 36 - 7 = 29 - 7 = 22 - 7 = 15 - 7 = 8 - 7 = 1$	1
$s_{6,5} = (6^2 + 5^2) \bmod 7 = 61 - 7 = 54 - 7 = 47 - 7 = 40 - 7 = 33 - 7 = 26 - 7 = 19 - 7 = 12 - 7 = 5$	5
$s_{6,6} = (6^2 + 6^2) \bmod 7 = 72 - 7 = 65 - 7 = 58 - 7 = 51 - 7 = 44 - 7 = 37 - 7 = 30 - 7 = 23 - 7 = 16 - 7 = 9 - 7 = 2$	2

Após a modulação das sequências em ambas as direções construiu-se a **matriz sequencial**, representada na Figura 5.11, sendo esta a base para a escolha das linhas constituintes do modelo do difusor.

	0	1	2	3	4	5	6	0	1	2	3	4	5	6	0	← n
0	0	1	4	2	2	4	1	0	1	4	2	2	4	1	0	
1	1	2	5	3	3	5	2	1	2	5	3	3	5	2	1	
2	4	5	1	6	6	1	5	4	5	1	6	6	1	5	4	
3	2	3	6	4	4	6	3	2	3	6	4	4	6	3	2	
4	2	3	6	4	4	6	3	2	3	6	4	4	6	3	2	
5	4	5	1	6	6	1	5	4	5	1	6	6	1	5	4	
6	1	2	5	3	3	5	2	1	2	5	3	3	5	2	1	
0	0	1	4	2	2	4	1	0	1	4	2	2	4	1	0	
1	1	2	5	3	3	5	2	1	2	5	3	3	5	2	1	
2	4	5	1	6	6	1	5	4	5	1	6	6	1	5	4	
3	2	3	6	4	4	6	3	2	3	6	4	4	6	3	2	
4	2	3	6	4	4	6	3	2	3	6	4	4	6	3	2	
5	4	5	1	6	6	1	5	4	5	1	6	6	1	5	4	
6	1	2	5	3	3	5	2	1	2	5	3	3	5	2	1	
0	0	1	4	2	2	4	1	0	1	4	2	2	4	1	0	

↑  
m

Figura 5.11 - Matriz sequencial para o difusor quadrático residual 15x15, com um período realçado.



O pretendido para a elaboração do difusor, atendendo à otimização do processo de fabrico, era a definição de um difusor em que cada duas linhas resultassem do corte de uma peça de material, obtendo-se assim duas linhas, uma definida pela matriz sequencial e outra pela sua inversa. Assim o terceiro passo consistiu na escolha das sequências da matriz, com base no seu desempenho a nível da difusão e dispersão, atendendo ao modelo de corte definido.

Na Figura 5.12, estão indicadas as sequências escolhidas. Entendeu-se que seria mais apropriado a escolha de duas sequências da matriz sequencial de forma a obter quatro linhas diferentes para a constituição do modelo. Assim é possível definir uma superfície mais heterogénea apenas com dois modelos de corte diferentes.

Foi escolhida a sequência [1 2 5 3 3 5 2 1 2 5 3 3 5 2 1] denominada *Line A2* e a sequência [4 5 1 6 6 1 5 4 5 1 6 6 1 5 4] denominada *Line B2*. Obtendo-se também as respetivas sequências inversas denominadas *Line A1* e *Line B1*.

Nas Figura 5.13 e Figura 5.14 foram representadas esquematicamente as sequências escolhidas e as respetivas inversas onde também foram indicadas as dimensões associadas aos elementos das sequências. A dimensão máxima do elemento para corte era 150 mm e considerando 15 mm em cada extremidade para a estabilidade da peça sobravam 120 mm para os elementos da sequência. Assim o quociente destes 120 mm pelos diferentes elementos de cada série resultou em 20 mm por cada diferença de unidade da sequência.

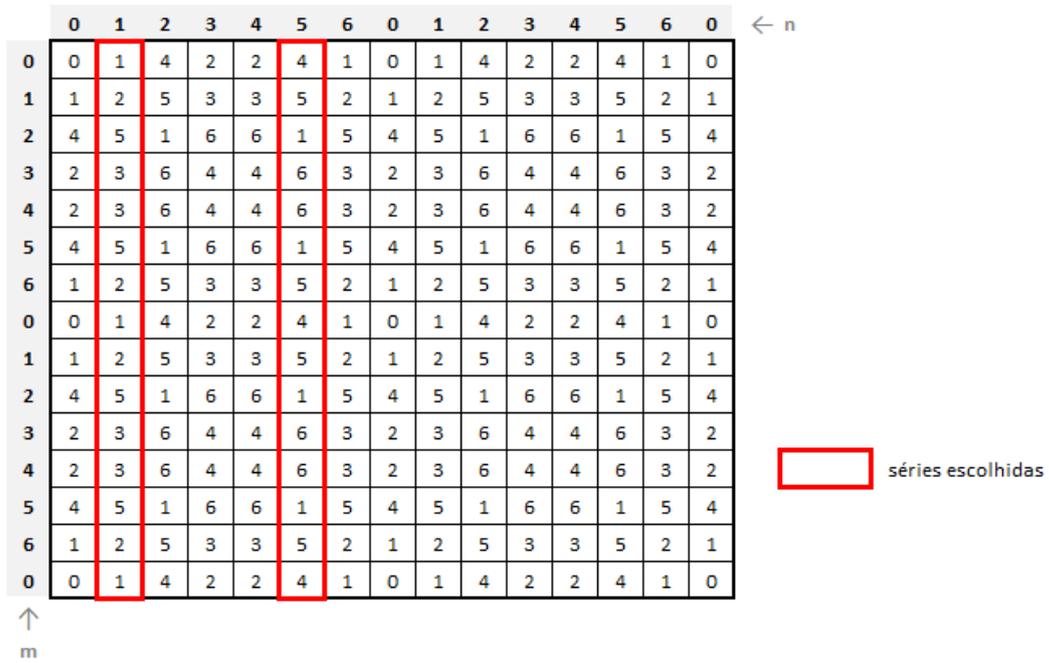


Figura 5.12 - Matriz sequencial para o difusor quadrático residual 15x15, com as séries escolhidas em realce.

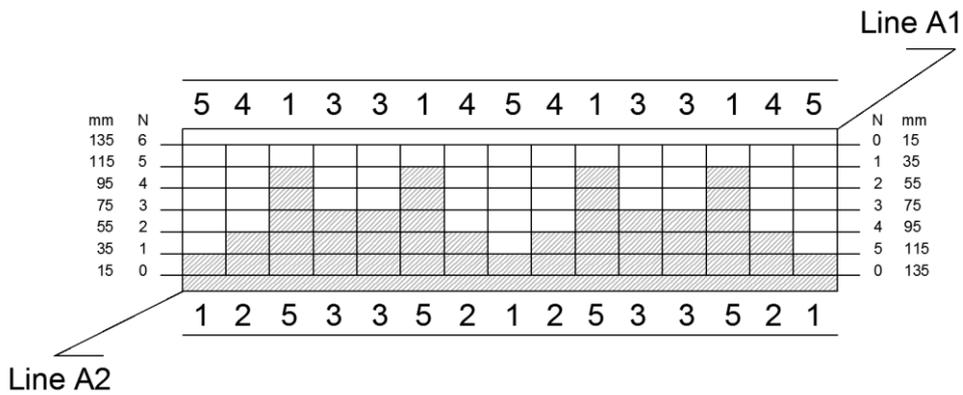


Figura 5.13 - Sequência [1 2 5 3 3 5 2 1 2 5 3 3 5 2 1] denominada Line A2 e a sequência inversa denominada Line A1.

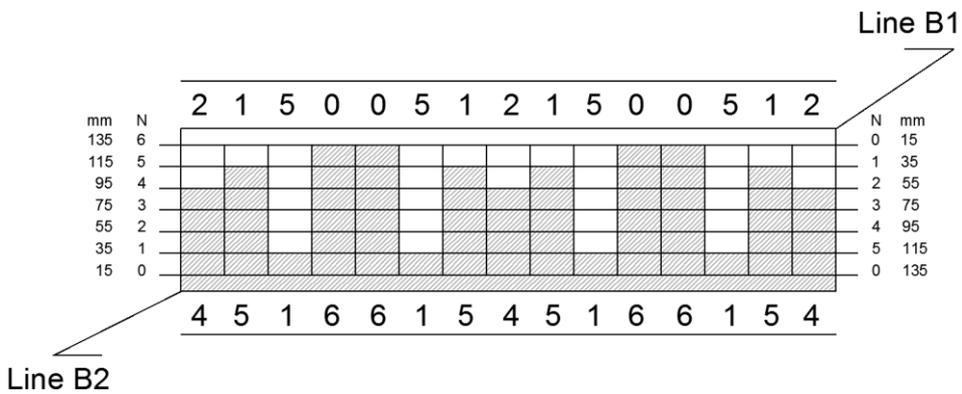


Figura 5.14 - Sequência [4 5 1 6 6 1 5 4 5 1 6 6 1 5 4] denominada Line B2 e a sequência inversa denominada Line B1.



O passo seguinte consistiu na análise do desempenho das superfícies obtidas no passo anterior com recurso a uma versão *trial* do programa *AFMG Reflex* [30]. O programa *AFMG Reflex* é um *software* de simulação acústica bidimensional para simular a reflexão, difusão e dispersão de uma onda sonora incidente numa estrutura geometricamente definida. A forma da superfície refletora é introduzida como uma secção bidimensional sendo que o programa admite que a terceira dimensão se estende infinitamente. Além disso, o *AFMG Reflex* também admite que a superfície é 100% refletora, não havendo qualquer absorção sonora. Assim, a análise realizada neste programa é apenas uma simulação aproximada do desempenho da superfície. No entanto, é bastante importante no processo de dimensionamento destas superfícies, pois permite a melhor adequação das soluções adotadas em função do seu comportamento. O *output* das propriedades difusoras é dado através de gráficos de resposta polar para qualquer ângulo de incidência e qualquer frequência da onda sonora. Os coeficientes de difusão e dispersão são dados por gráficos em função da frequência [30].

Um difusor ideal produz uma resposta polar que é invariante ao ângulo de incidência, ângulo de observação e frequência (dentro da sua largura de banda operacional).

Para a análise das diferentes configurações das linhas dos difusores foram introduzidas no *AFMG Reflex* as características geométricas de cada uma das linhas e foram efetuadas as simulações acústicas para a obtenção do desempenho a nível da resposta polar para diferentes ângulos de incidência e para obtenção da estimativa dos coeficientes de difusão e dispersão em função da frequência, quer para o campo difuso como para diferentes ângulos de incidência. Da Figura 5.15 à Figura 5.17 são apresentados alguns desses gráficos obtidos, remetendo para o Anexo A os relatórios completos da simulação efetuada para todas as superfícies.

A resposta polar da superfície *Line A2*, na Figura 5.15, permite descrever a uniformidade direcional da dispersão provocada pela superfície para uma incidência com um ângulo de  $0^\circ$ . Verifica-se que para as frequências de 1.000 e 2.000 Hz a superfície apresenta uma resposta polar diferente. Para os 1.000Hz são visíveis três lóbulos de energia constantes. Aqui verifica-se uma maior uniformidade na difração da energia sonora, que pode ser explicada pela proximidade da frequência de projeto. Através da fórmula (4.5) pode-se de forma rápida estimar essa frequência de projeto. Assim, para o maior número da sequência quadrática residual,  $s_{\text{máx}}=5$ , um período,  $N=7$ , uma velocidade,  $c=343,2$  m/s para uma temperatura de  $20^\circ\text{C}$  e uma máxima profundidade da reentrância,  $d_{\text{máx}}=100$  mm, temos que a frequência de projeto é aproximadamente,  $f_0=1225,7$  Hz.

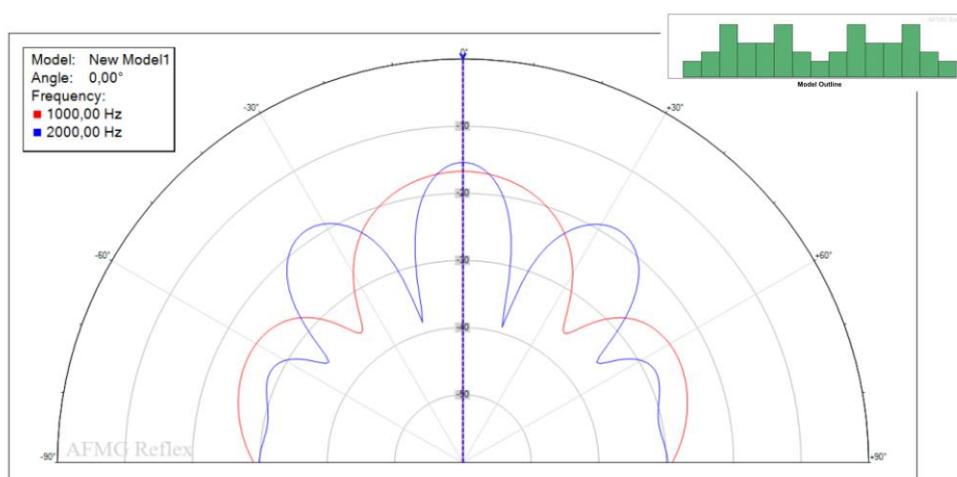


Figura 5.15 - Resposta polar da superfície *Line A2* para as frequências 1000 e 2000 Hz com um ângulo de incidência de  $0^\circ$  (previsto pelo *AFMG Reflex*).

Como referido anteriormente, um difusor de Schroeder funciona em múltiplos inteiros da frequência de projeto,  $f_0$ . A frequência de projeto é normalmente definida como a frequência limite inferior, no entanto esta não é a mais baixa frequência em que a superfície produz maior difusão do que uma superfície plana, esta é apenas a primeira frequência na qual a dispersão pode apresentar lóbulos de energia constantes.

Quando analisada a resposta polar para a frequência de 2000 Hz, ainda para a superfície *Line A2*, verifica-se uma menor uniformidade da energia dispersada, pois os lóbulos de energia são menores para as reflexões superiores a  $60^\circ$ . Tal facto deve-se ao maior afastamento de um múltiplo da frequência de projeto. Verifica-se também que os lóbulos de energia são mais estreitos, originando a tal não uniformidade da dispersão por causa das partes nulas de dispersão.

Quando analisadas as superfícies resultantes do inverso da sequência residual quadrática, verifica-se que a sua resposta polar é mais irregular, na Figura 5.16 é possível analisar essa resposta para a superfície *Line A1* para um ângulo de incidência de  $45^\circ$ . Aqui os lóbulos de energia não são uniformes, apresentam larguras diferentes, no entanto é importante lembrar que esta superfície atuará em conjunto com as outras superfícies do difusor e assim diversificará a resposta do conjunto.

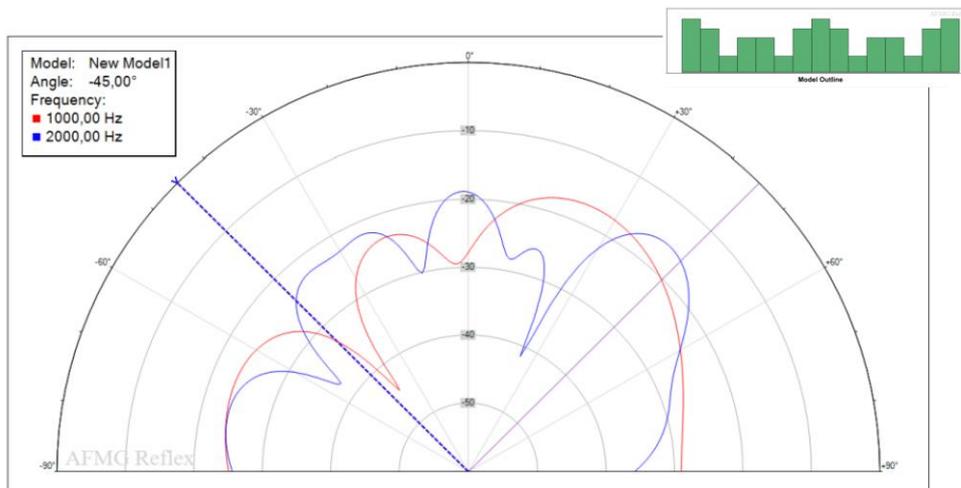


Figura 5.16 - Resposta polar da superfície *Line A1* para as frequências 1.000 e 2.000 Hz com um ângulo de incidência de  $-45^\circ$  (previsto pelo *AFMG Reflex*).

Relativamente aos coeficientes que caracterizam a dispersão, foram simulados três coeficientes diferentes para cada superfície. Na Figura 5.17 é apresentado o resultado da simulação para a superfície *Line A2*, em campo difuso, ou seja, para uma incidência aleatória das ondas sonoras na superfície.

O *coeficiente de dispersão* (representado a azul na Figura 5.17) é calculado, tal como definido por Mommertz [31], e representa a quantidade de energia que é refletida na direção não especular em relação à energia total refletida. Sendo assim o coeficiente de dispersão é 0 quando toda a energia incidente é refletida na direção especular (ângulo de incidência igual ao ângulo de reflexão), assim como o coeficiente de dispersão é 1 quando a totalidade da energia incidente é refletida na direção não especular. O coeficiente de dispersão não contém qualquer informação de quão uniforme a energia refletida pode ser.

Pode ver-se na Figura 5.17 que a superfície *Line A2*, começa a apresentar uma reflexão significativa na direção não especular a partir dos 600 Hz de frequência e a partir dos 1.250 Hz, aproximadamente, a quantidade de energia refletida na direção não especular, em relação à energia total refletida é elevada, apresentando assim a superfície um bom comportamento relativamente à dispersão.

O *coeficiente de difusão* (representado a verde na Figura 5.17) é calculado tal como definido por Cox e D'António [1]. Este é dependente da frequência e caracteriza-se como sendo a medição da qualidade para

a homogeneidade do campo sonoro refletido pelo difusor. Pode variar de 0 a 1 o seu valor. O coeficiente de difusão é 1 quando o som é igualmente refletido em todas as direções e 0 quando há uma direção singular preferida na qual toda a energia sonora é refletida. O coeficiente de difusão diz-nos o quão uniformemente a onda sonora incidente é refletida em todas as direções. Assim, analisando a superfície *Line A2*, na Figura 5.17, pode constatar-se que há uma variância moderada em relação à direção da reflexão da energia sonora pela superfície. O coeficiente de difusão é aproximadamente 0,6 para toda a banda de frequências, sendo o campo sonoro refletido menos homogêneo para as altas frequências.

Relativamente ao *coeficiente de difusão normalizado* [1] (representado a vermelho na Figura 5.17) pode por vezes oferecer melhor informação do que o coeficiente de difusão. Este é o valor do coeficiente de difusão para uma dada superfície, dividido pelo coeficiente de difusão de uma base de referência plana das mesmas dimensões dada superfície. Se por um lado o coeficiente de difusão inclui todos os efeitos de difusão provocados pela estrutura do difusor, o coeficiente de difusão normalizado pode ser entendido como incluindo apenas os efeitos da superfície, mas não os efeitos de difusão provocados pelos bordos da estrutura. Assim, na análise da superfície *Line A2*, pode ver-se na Figura 5.17, que o coeficiente de difusão normalizado mostra uma enorme redução do valor na gama das baixas frequências, comparando com o coeficiente de difusão. Daqui conclui-se que a homogeneidade do campo sonoro refletido na gama das baixas frequências se deve principalmente à difusão provocada pelos bordos da estrutura.

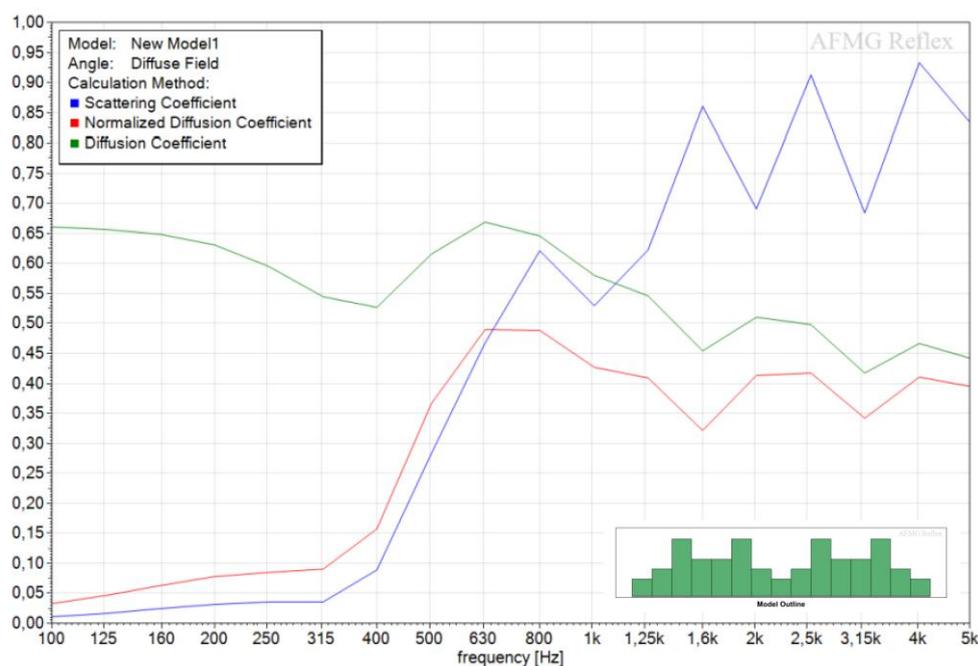


Figura 5.17 - Coeficientes de dispersão, difusão e difusão normalizado para a superfície *Line A2*, para uma incidência aleatória (previsto pelo AFMG Reflex).



Após a escolha e análise completa das superfícies provenientes da matriz sequencial, procedeu-se à otimização destas mesmas. Esta otimização consistiu na atribuição de inclinações dos topos de diversos elementos das superfícies escolhidas, de modo a criar uma estrutura mais heterogênea, com vista a uma maior difusão do som incidente. Segundo um estudo realizado na *National Pingtung University of Science and Technology*, em Taiwan [21], a inclinação dos topos dos elementos da superfície têm apenas um efeito marginal no desempenho do difusor e que este se deve ao aumento da rugosidade da superfície.

Através do programa *AFMG Reflex*, foram simuladas várias soluções para diferentes inclinações dos topos dos elementos. Esta análise consistiu na introdução da geometria de cada superfície escolhida, alterando

o ângulo de inclinação dos topos e comparando as alterações ao nível da resposta polar e dos coeficientes de dispersão e difusão.

Pretendia-se pois uma melhoria a nível do desempenho das superfícies e após a análise das simulações escolheram-se as inclinações de 27° e 37°. Na (esq.) e Figura 5.19, é demonstrada a diferença dos coeficientes de dispersão e difusão da superfície *Line A1*, numa simulação em que ao ângulo de inclinação dos topos dos elementos foi alterado. Nesta simulação é possível verificar a melhoria do coeficiente de dispersão nas altas frequências, aproximadamente a partir dos 600 Hz, com a variação dos ângulos de inclinação dos topos de 27° e 37°. Relativamente ao coeficiente de difusão também apresentou melhorias. Para a frequência de 1500 Hz, verifica-se uma maior homogeneidade do campo sonoro refletido, deduzido pelo aumento visível do coeficiente de difusão normalizado para esta frequência.

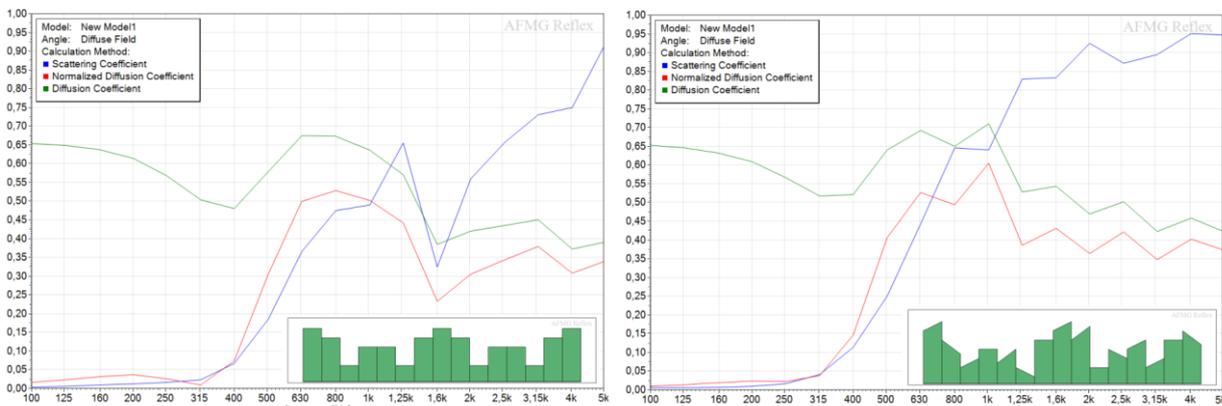


Figura 5. 18 (esq.) e Figura 5.19 (dir.) - Coeficientes de dispersão, difusão e difusão normalizado para a superfície *Line A1*, para uma incidência aleatória. À esquerda o ângulo de inclinação dos topos 0°. À direita o ângulo de inclinação dos topos 27° e 37° (previsão com o *AFMG Reflex*).

6)

Nas Figura 5.20 e Figura 5.21, é apresentada a configuração final das superfícies. Nesta fase são definidos os dois cortes, A e B, necessários para o fabrico do protótipo do difusor.

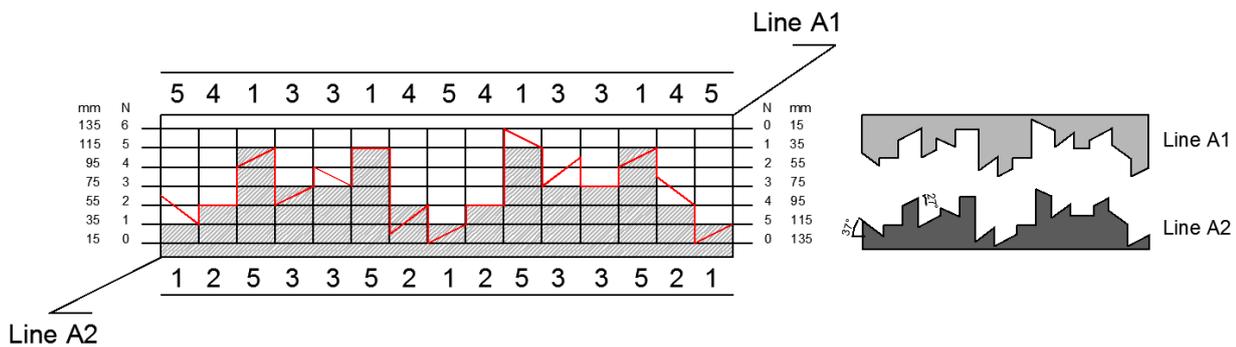


Figura 5.20 – Otimização das superfícies *Line A1* e *Line A2* – Corte A. A vermelho, o novo limite das superfícies com a disposição aleatória das inclinações de 27° e 37° nos topos dos elementos.

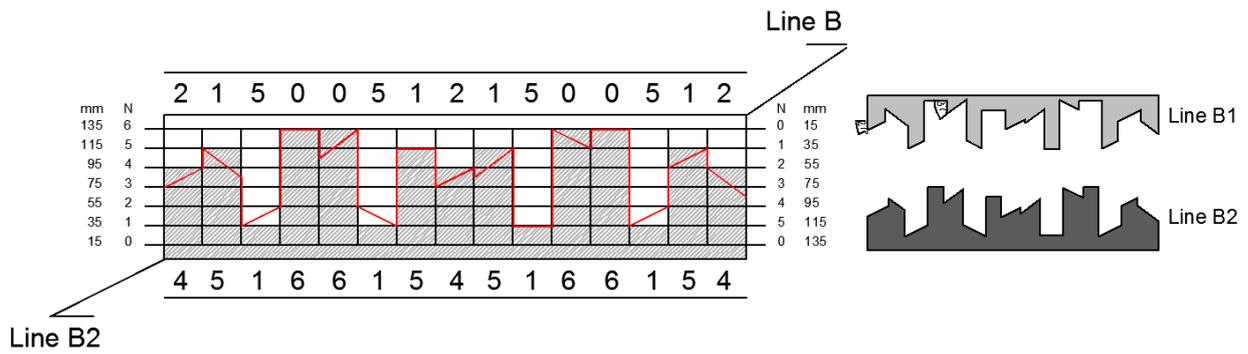


Figura 5.21 - Otimização das superfícies *Line B1* e *Line B2* - Corte B. A vermelho, o novo limite das superfícies com a disposição aleatória das inclinações de 27° e 37° nos topos dos elementos.



A fase final consistiu na definição da estrutura final do modelo do difusor. Para tal, foi adotada uma disposição para as superfícies resultantes dos cortes (Figura 5.22), baseada também numa sequência quadrática residual.

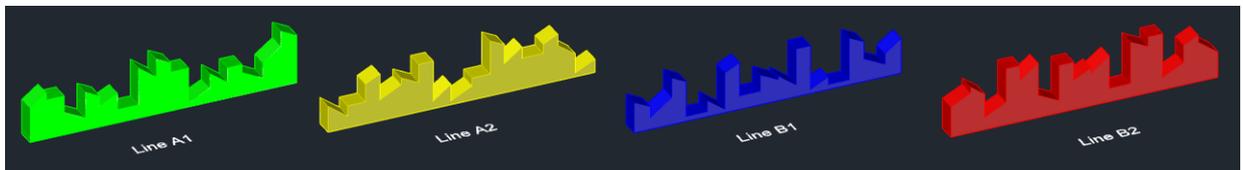


Figura 5.22 – Superfícies resultantes do corte A e B.

Para a distribuição das superfícies no difusor, o principal objetivo era tentar arranjar uma distribuição na qual os elementos na direção-x ficassem ordenados segundo uma sequência residual quadrática, de forma a garantir o melhor desempenho da superfície. Recorda-se que na direção-z, a ordem dos elementos não podia ser alterada, pois tal já estava definido nos modelos de superfície *Line*. Assim, o procedimento para a disposição das superfícies *Line*, consistiu na análise dos primeiros elementos de cada *Line* e na disposição destes em concordância com a sequência residual quadrática [1 2 5 4 4 5 2 1 2 5 4 4 5 2 1]. Assim obteve-se a matriz de distribuição final das superfícies, representada na Figura 5.23, para a montagem do difusor.

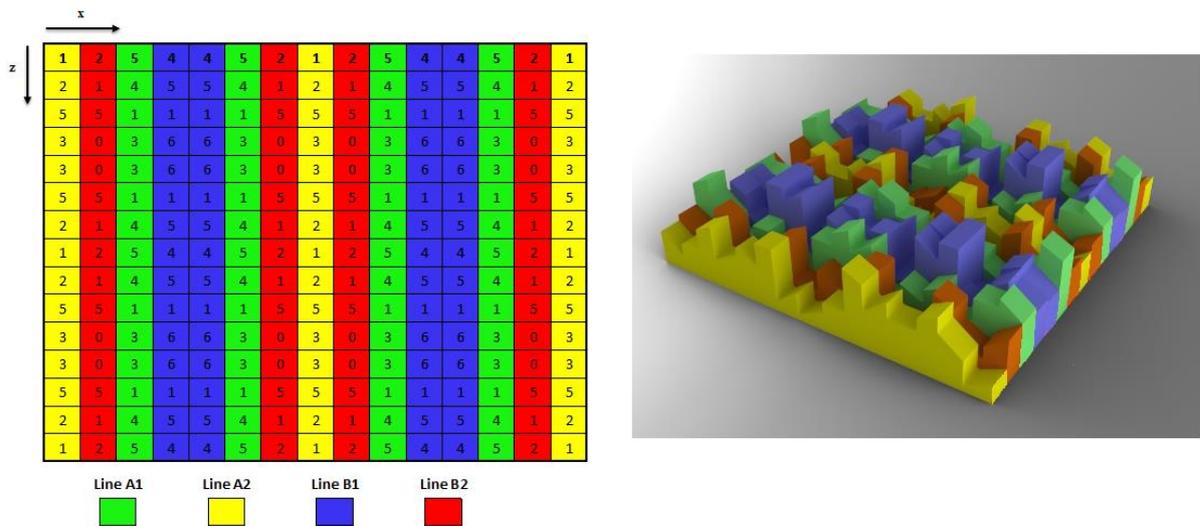


Figura 5.23 – Matriz de distribuição final das superfícies do difusor e representação do modelo (projetado em *Autocad 3D*).

### 5.2.3. ANÁLISE DA PROPOSTA

Após definida totalmente a estrutura do difusor, foram enviados os esquemas de dimensionamento e as peças desenhadas para a empresa *Castelhano & Ferreira*, para avaliarem a exequibilidade do modelo proposto.

Desta análise resultaram algumas propostas de alteração de pormenores relacionados com a execução do corte e com a estética final do modelo devido ao agrupamento adotado para os elementos do difusor:

- A nível da exequibilidade de corte, o problema incidiu no Corte B (Figura 5.24), no qual dois elementos seguidos tinham uma inclinação semelhante, e o desfasamento entre eles não seria perceptível após a fresagem, devido ao rasgo da fresa de 8 mm aproximadamente;

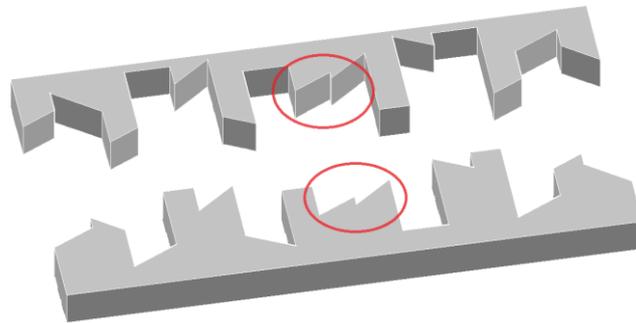


Figura 5.24 – Corte B.

- Ao nível do aspeto visual, o problema incidiu na junção de vários elementos com o mesmo tamanho e a mesma inclinação, visível na Figura 5.25. Tal facto deve-se à simetria existente nalgumas superfícies, que ao dispô-las rodadas coincidiam com a superfície adjacente. Ao nível do aspeto visual a *Castelhano & Ferreira* pretendia uma superfície mais heterógena, na qual houvesse uma maior distribuição dos elementos de igual altura e das inclinações dos topos dos elementos, criando não só uma superfície com bom desempenho, mas também visualmente apelativa.

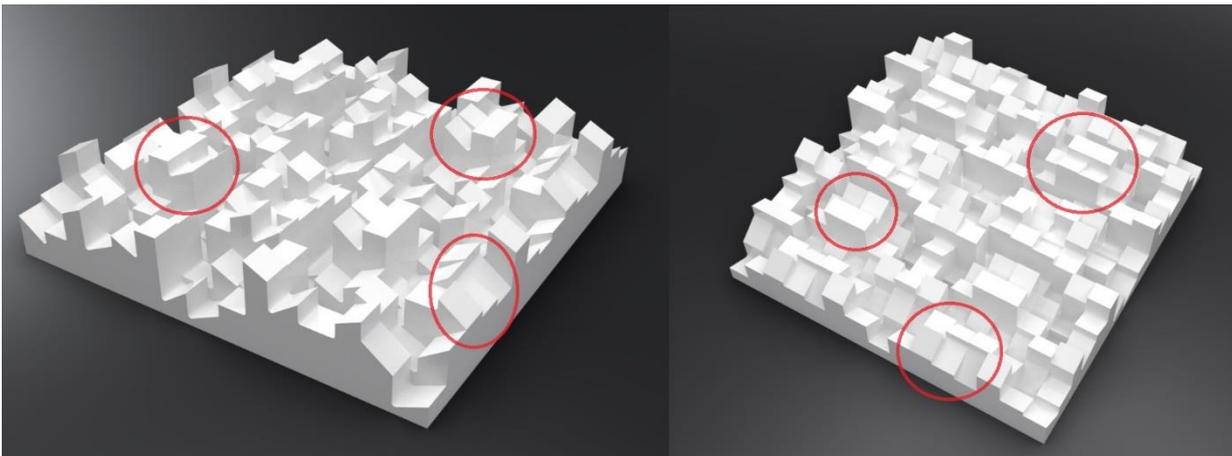


Figura 5.25 – Diferentes vistas do segundo modelo proposto para o difusor (projetado em *Autocad 3D*).

### 5.3. SEGUNDO MODELO COM AS ALTERAÇÕES PROPOSTAS – MODELO FINAL

De forma a compatibilizar o modelo do difusor com as imposições a nível de fabrico e estético foram realizadas algumas alterações a nível dos cortes e disposições dos elementos no difusor.

Relativamente à limitação a nível do fabrico foram alteradas as inclinações de alguns elementos do corte B de forma a corrigir o problema de corte devido à zona de pequeno desfasamento entre os elementos adjacentes, indicada na Figura 5.24, e de modo a corrigir o problema de simetria das linhas do difusor, para que quando rodássemos o elemento a 180° não houvesse coincidência nas alturas dos elementos e nas inclinações dos topos dos elementos. Na Figura 5.26 é possível verificar que a sequência quadrática residual de base para o dimensionamento da superfície permanece a mesma e apenas são ajustadas as inclinações dos elementos.

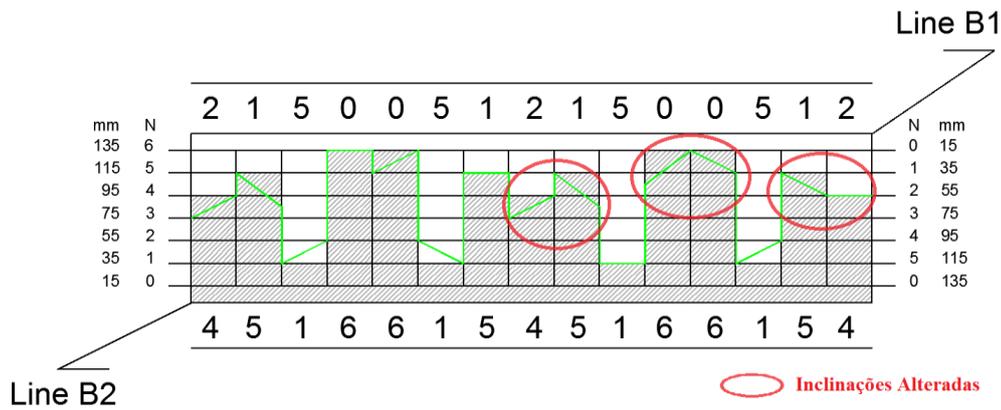


Figura 5.26 - Esquema da alteração das inclinações no Corte B. A linha verde representa o corte da superfície e as circunferências vermelhas assinalam as alterações realizadas em relação à proposta anterior.

Do ajuste das inclinações dos topos dos elementos, resultaram as configurações finais das superfícies do difusor, apresentadas na Figura 5.27. Nesta fase ficaram definidos os cortes de base para a fresagem dos materiais em fábrica.

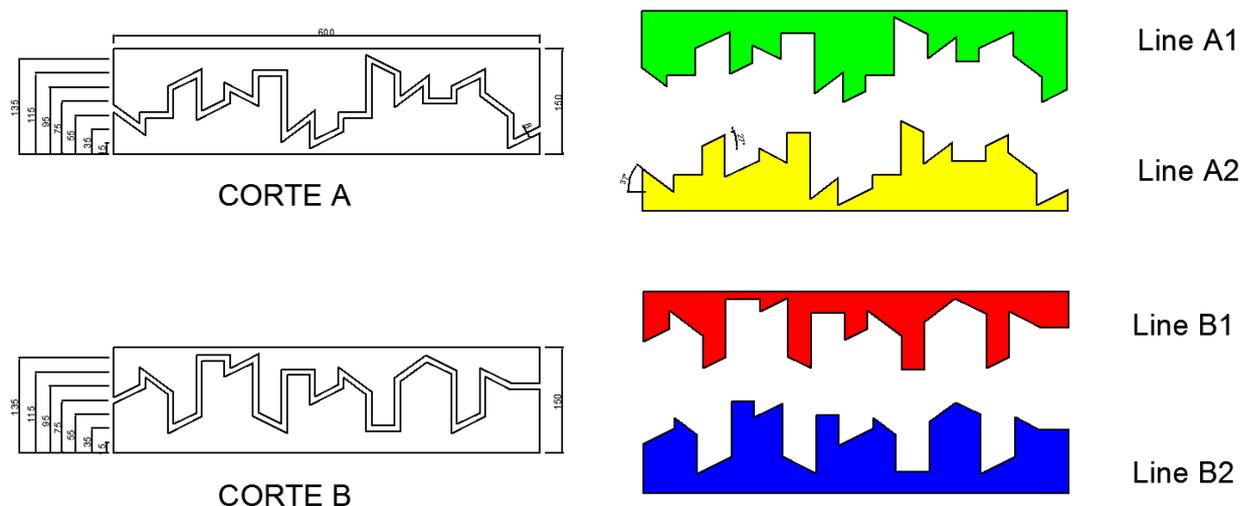


Figura 5.27 – Esquemas dos cortes finais A e B.

Ao nível do aspeto visual foi proposta uma nova disposição das linhas constituintes do difusor, de forma a criar um modelo de maior heterogeneidade. Para a nova organização da peça o pretendido era, tal como na proposta anterior, ordenar os primeiros elementos de cada linha do difusor segundo uma sequência

residual quadrática. Com os elementos disponíveis, 5 da *Line A1*; 1 da *Line A2*; 2 da *Line B1* e 4 da *Line B2*, a sequência quadrática residual escolhida para a base da organização dos elementos foi a [1 2 5 4 4 5 2 1 2 5 4 4 5 2 1]. No entanto, ao realizar a montagem do modelo 3D em *Autocad*, verificou-se que a peça não apresentava a heterogeneidade pretendida a nível visual. Portanto, de modo a corrigir esse problema foi necessário alterar a sequência de base trocando alguns elementos de posicionamento, de modo a ficarmos com a sequência [1 5 4 2 4 5 2 1 2 5 4 2 4 5 1], aliada à rotação de 180° de algumas linhas aquando da montagem da disposição final, resultando na configuração indicada na Figura 5.28.

Com estas propostas, as modificações sugeridas e as condicionantes de fabrico foram resolvidas, obtendo-se assim o modelo final para o difusor com aprovação da *Castelhano & Ferreira* (Figura 5.29).

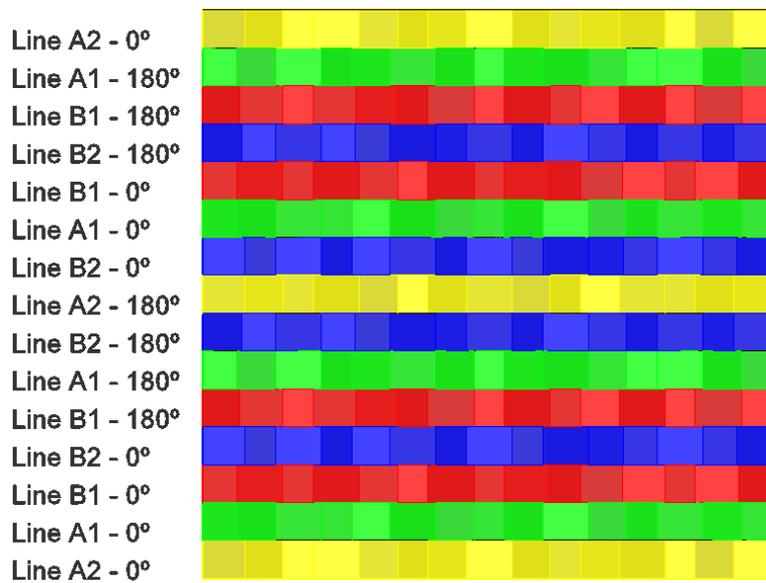


Figura 5.28 - Configuração final da superfície do difusor.

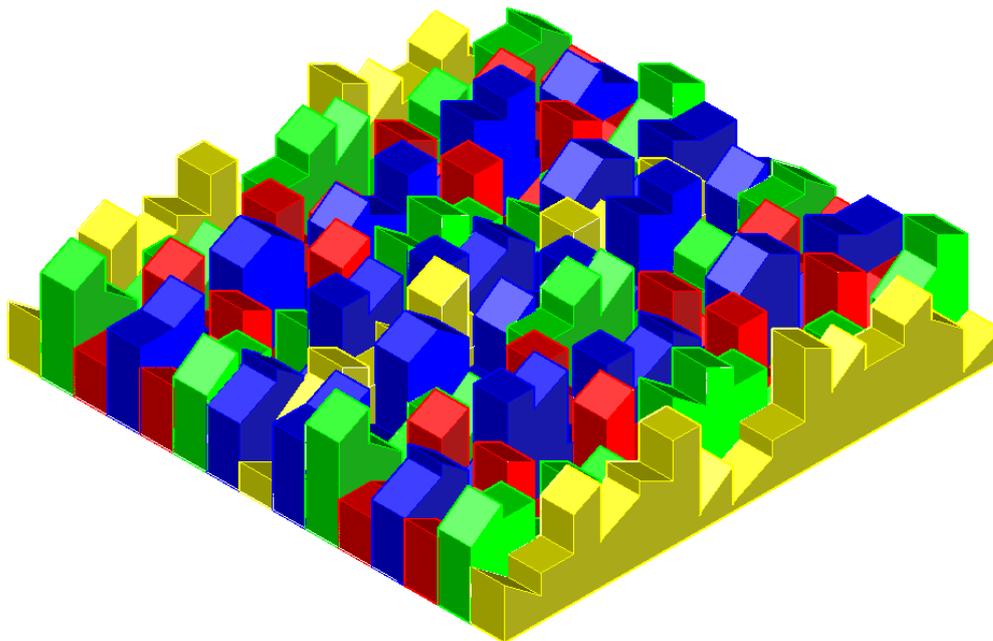


Figura 5.29 - Modelo final do difusor.

#### 5.4. FABRICO DOS PROTÓTIPOS

Como referido anteriormente, o material escolhido para os difusores foi o MDF (*Medium-Density Fiberboard*) que consiste numa placa de fibra de madeira de média densidade, sendo esta composta pela aglutinação de fibras de madeira com resinas sintéticas e outros aditivos (Figura 5.30). A empresa disponibilizou-se a encomendar duas placas de MDF de 40 mm de espessura e a iniciar o fabrico dos protótipos assim que chegassem as placas. Uma placa de MDF dá para fazer quatro difusores com dimensão em planta de 600 x 600 mm, como foram encomendadas duas placas, fabricaram-se oito difusores. Este valor revelou-se insuficiente para os ensaios a efetuar de acordo com a normalização. Apesar de tal ser indicado à *Castelhana & Ferreira* esta não conseguiu disponibilizar um número maior de painéis.



Figura 5.30 – Placas de fibra de madeira de média densidade – MDF [32].

Inicialmente as placas de MDF foram cortadas em tiras de 150 x 600 mm, resultando assim nos elementos de base para os cortes A e B, representados na Figura 5.27. Após a fresagem dos elementos segundo os esquemas de corte A e B, foram obtidas as superfícies *Line A1*, *Line A2*, *Line B1* e *Line B2* (Figura 5.31). Depois estas superfícies foram lixadas e tratadas de modo a remover-se os bordos da fresagem e a deixar as superfícies totalmente lisas.

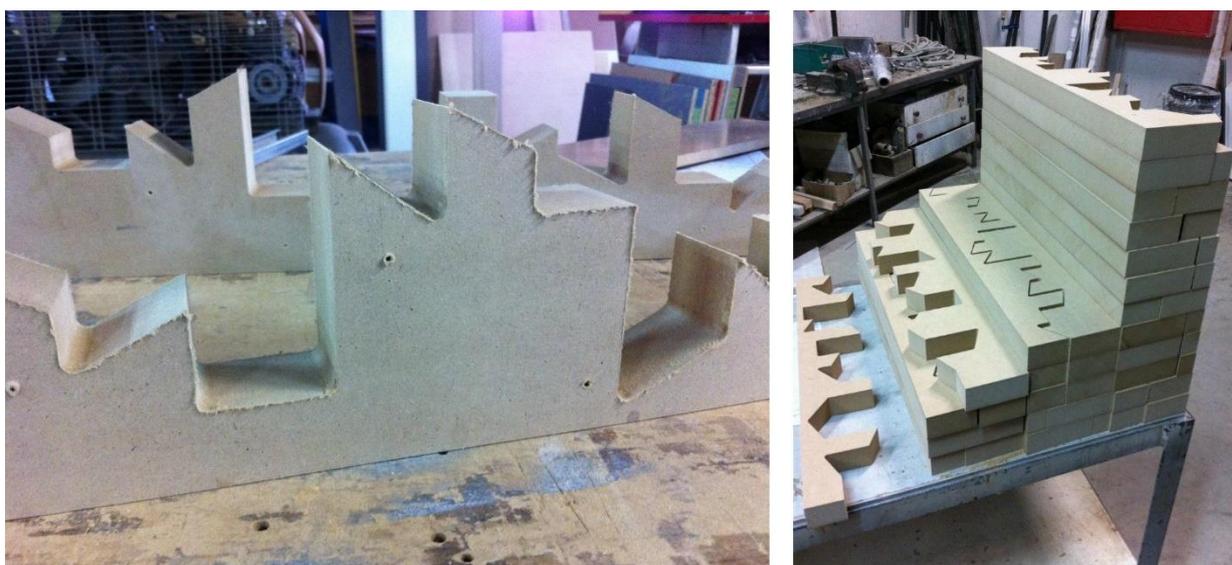


Figura 5.31 - Elementos dos cortes A e B após fresagem (fotos fornecidas pela *Castelhana & Ferreira*).

Após a preparação das superfícies resultantes dos cortes, estas foram agrupadas e dispostas segundo a configuração definida, Figura 5.32. Finalmente, efetuou-se a montagem dos elementos fixando-os de modo a obter-se uma única estrutura sólida.



Figura 5.32 – Montagem do difusor – disposição ordenada das *Lines* (foto fornecida pela *Castelhana & Ferreira*).

Finalizada a montagem dos elementos, obteve-se assim o protótipo final, Figura 5.33. Um difusor 2D de 600 x 600 mm, constituído por 15 linhas de 40 mm de espessura, resultantes de dois cortes diferentes, as quais contemplam diferentes elementos de diferentes alturas e diferentes inclinações dos tops dos elementos.

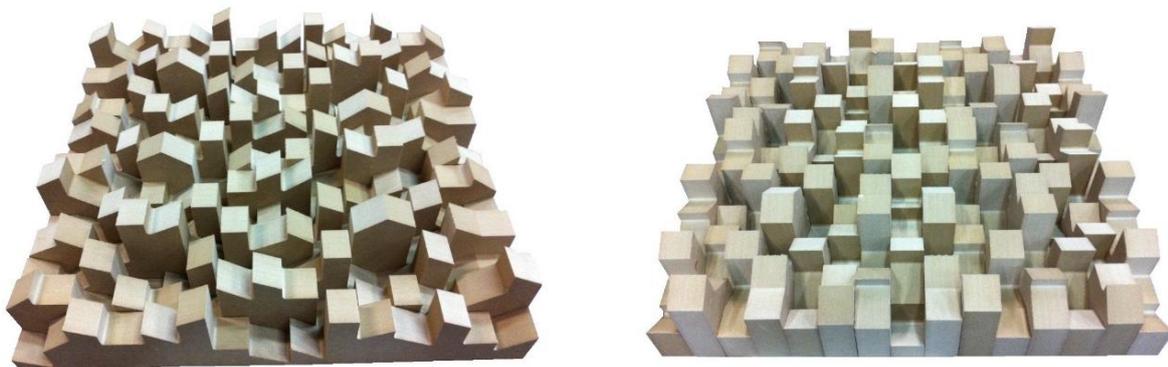


Figura 5.33 – Vistas do protótipo final. À esquerda, vista perpendicular às linhas do difusor. À direita, vista paralela às linhas do difusor.

# 6

## ENSAIOS E MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS

### 6.1. INTRODUÇÃO

Sem adequadas medições da “dispersão” produzida pelas superfícies é impossível confiar nos diferentes tipos de *design* dos difusores e, conseqüentemente, aplicá-los de modo correto. Para estas superfícies serem atrativas e úteis convém conhecer-se o seu desempenho acústico através da medição e caracterização da “dispersão” provocada.

Atualmente, esta caracterização e avaliação do desempenho são efetuadas através da determinação de coeficientes (de difusão e de dispersão) que permitem estabelecer comparações ao nível da eficácia das superfícies “difusoras” e, de certa forma, hierarquizá-las ao nível da “dispersão” sonora provocada. As respostas polares são uma ferramenta essencial para caracterizar a eficácia dos difusores uma vez que dizem muito acerca de como uma superfície reflete o som. No entanto, as respostas polares fornecem dados de forma muito densa, sendo que para cada banda de frequência e para cada ângulo de incidência é necessária uma resposta polar diferente [1]. Estes dois coeficientes surgem com o objetivo de condensar os dados das respostas polares e simplificar a caracterização dos difusores.

De forma a perceber melhor em que consiste cada um desses coeficientes de difusão e dispersão é importante conhecer as suas definições:

*Coefficiente de difusão (d)* é a medida da uniformidade do som refletido. O propósito deste coeficiente é capacitar o dimensionamento dos difusores e também permitir a comparação do desempenho de superfícies e especificações desse desempenho [2].

*Coefficiente de dispersão (s)* é o rácio da energia sonora dispersada de forma não especular em relação à energia sonora total refletida. O propósito deste coeficiente é caracterizar a dispersão provocada pela superfície para uso, por exemplo, em programas de modelação da geometria de salas [3].

Apesar destes dois coeficientes constituírem representações simplificadas da realidade na caracterização do som refletido e não existir uma definição física simples para eles, a comunidade científica internacional seguiu esta ideia e estabeleceu normas para a determinação destes dois coeficientes:

- *Coefficiente de dispersão (s)* - **ISO 17497-1** "Acoustics - sound-scattering properties of surfaces. Part 1: Measurement of the random-incident scattering coefficient in a reverberation room" [3];

- Coeficiente de difusão (d) - **AES-4id-2001** "AES information document for room acoustics and sound reinforcement systems - Characterization and measurement of surface scattering uniformity" [2].

## 6.2. COEFICIENTES DE DIFUSÃO E DISPERSÃO

### 6.2.1. COEFICIENTE DE DIFUSÃO

#### 6.2.1.1. DEFINIÇÃO

A norma AES-4id-2001 [2] fornece orientações para a caracterização da uniformidade de espalhamento produzido por superfícies, a partir de medições ou previsões de diversas respostas polares. O principal objetivo é a quantificação do espalhamento das ondas sonoras através de um coeficiente de difusão. Este coeficiente não é mais do que uma medida quantitativa da qualidade das superfícies difusoras, permitindo classificar e comparar diferentes superfícies relativamente à sua capacidade de difusão. Poderá também ser indicado para o desenvolvimento de modelos geométricos para diversos espaços acústicos. O coeficiente de difusão caracteriza o som refletido a partir de uma superfície, tendo em conta a uniformidade da resposta polar por ela criada [12].

#### 6.2.1.2. PRINCÍPIO

As superfícies de teste são avaliadas em termos da sua capacidade para dispersar a energia sonora incidente uniformemente ao longo da resposta polar, sendo esta medida num único plano ao longo de todo o hemisfério. É assumido que a difusão completa ocorre quando todas as medições de cada posição na resposta polar recebem a mesma energia dispersada. Exemplos da medição da resposta polar são apresentados na Figura 6.1, que mostra que o difusor *Skyline* é melhor a dispersar o som refletido.

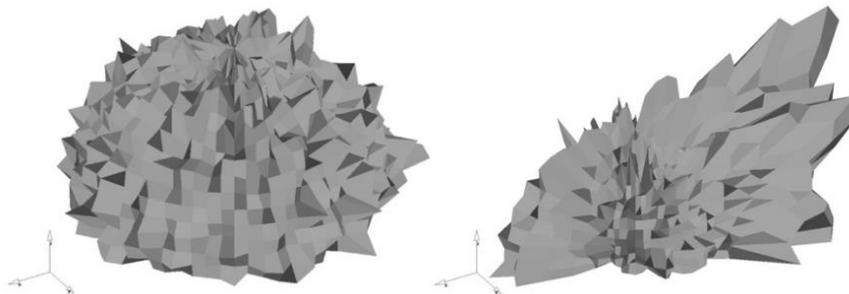


Figura 6.1 – Medição da resposta polar em 3D. À esquerda 2,5 kHz, difusor *Skyline*, incidência normal. À direita 1,25 kHz, estrutura ripada aleatória, incidência a 60° [33].

A norma AES-4id-2001 [2] detalha requisitos dos métodos de medição para se obterem estas distribuições polares. O método mais íntegro consiste em usar um sistema de sequência de máximo comprimento com seleção de tempo para extrair a energia dispersada. A medição num único plano é relativamente fácil, no entanto as medições 3D completas são logisticamente mais difíceis. Alternativamente, podem ser usados modelos de previsão, como por exemplo o Método dos Elementos Fronteira (*Boundary Element Method – BEM*) que fornecem resultados de previsão com bastante precisão [33].

#### 6.2.1.3. METODOLOGIA

O método da avaliação da dispersão da energia pela superfície difusora depende fundamentalmente da estrutura do difusor, ou seja, no caso de se estar a avaliar a dispersão de um difusor com apenas um plano de reflexão, também denominado “difusor 1D”, utiliza-se um sistema de medição com um goniómetro 2D (Figura 6.2, à esquerda), no qual existem vários microfones dispostos segundo um semicírculo em torno do difusor. Por outro lado, no caso de se estar a avaliar um difusor com múltiplos

planos de reflexão, utiliza-se um goniómetro 3D (Figura 6.2, à direita). Este consiste num sistema hemisférico constituído por um único microfone que é colocado por cima do difusor e que realiza medições em toda a sua extensão [2].



Figura 6.2 – Esquemas de montagem laboratorial para medição do coeficiente de difusão conforme AES-4id-2001. À esquerda sistema de medição de uma superfície difusora 1D, com goniómetro 2D. À direita sistema de medição de um difusor 2D, com um goniómetro 3D [19].

É aconselhável que as medições dos difusores com apenas um plano de reflexão sejam realizadas em câmara anecóica. No entanto, também poderão ser realizadas em salas de grandes dimensões em que as superfícies da sala estejam suficientemente afastadas do difusor ensaiado, utilizando o Método dos Elementos Fronteira. O documento de normalização deste procedimento [2] indica medidas a respeitar na utilização deste tipo de espaços. Os microfones deverão ser colocados no piso e a uma distância tal do difusor que permita obter a medição numa zona livre de reflexão. Neste sentido são colocados 37 microfones, espaçados de 5°, perfazendo um semicírculo e são medidas as respostas de cada microfone.

Se por um lado as medições para difusores 1D são simples e de rápida realização, para os difusores de planos múltiplos o processo de medição é bastante mais moroso e complexo, já que requer a medição com recurso a goniómetros hemisféricos, a ser implantados em câmara anecoica, que exigem um maior trabalho de montagem e consumo de tempo. Estes ensaios poderão ser realizados em amostras à escala real ou numa escala reduzida, atendendo à adaptação das frequências de estudo conforme o fator de escala. No que diz respeito ao campo de medição poderá ser utilizado o campo próximo (*near field*) ou o campo afastado (*far field*), permitindo assim perceber aspetos particulares mais próximo da amostra, tais como a focalização, ou então medir a quantidade de difusão provocada num campo afastado.

O processo de determinação do coeficiente de difusão está esquematizado na Figura 6.3. No entanto, salientam-se de seguida os principais passos para a sua determinação. Inicialmente, são medidos os impulsos de resposta altifalante-microfone para cada ângulo de difusão (como normalmente são efetuadas duas medições para cada uma das 37 posições dos microfones, resultam 74 registos) e para diferentes posições da fonte sonora incidente. Posteriormente, é medida a resposta de fundo sem o difusor, o que permite definir a denominada janela temporal, correspondente ao intervalo de 10 ms, onde se isolam as reflexões relevantes. A seguir é medida a resposta de fundo sem o difusor, de modo a permitir isolar a resposta do difusor, subtraindo ao registo de fundo com o difusor o registo de fundo sem ele. Desta forma é reduzido o som direto e as interferências da sala.

A última fase passa por aplicar a *Transformada de Fourier* a cada impulso de forma a obter-se as frequências de resposta por banda de terço de oitava e as respostas polares, que são depois processadas de forma a fornecerem os coeficientes de difusão [15].

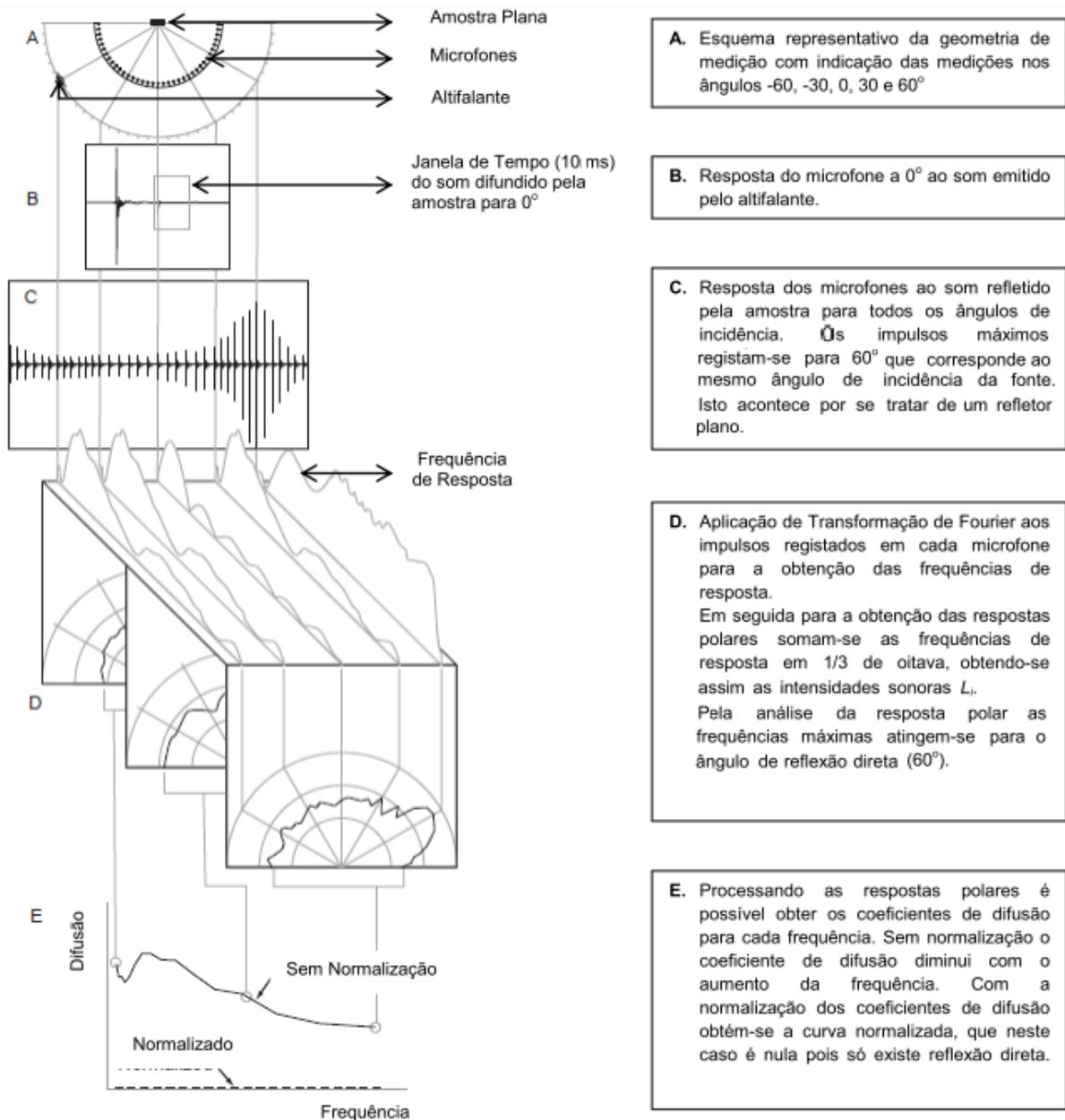


Figura 6.3 - Resumo do processo de obtenção do coeficiente de difusão ( $d$ ) para uma amostra plana cf. norma AES-4id-2001 [12].

## 6.2.2. COEFICIENTE DE DISPERSÃO

### 6.2.2.1. DEFINIÇÃO

A norma ISO 17497-1 [3] especifica uma metodologia laboratorial de medição do coeficiente de dispersão ( $s$  – *scattering*), com incidência aleatória, em função da rugosidade da superfície em estudo. As medições são realizadas em câmara reverberante, podendo ser adotado um elemento à escala real ou um modelo à escala reduzida. Este ensaio tem como principal objetivo fornecer os dados que permitam descrever a quantidade de energia que é refletida de forma não especular. Os resultados obtidos podem ser utilizados para comparar diversos produtos e proceder a cálculos de conceção e dimensionamento acústico de espaços. O método referido na ISO 17497-1 [3] produz resultados qualitativos e não quantitativos, na medida em que não quantifica a quantidade de energia espalhada em cada direção, ou

seja a uniformidade espacial do espalhamento de uma superfície, mas sim o rácio entre a energia espalhada de forma não especular e a energia total [12].

#### 6.2.2.2. PRINCÍPIO

O coeficiente de dispersão ( $s$ ) representa a capacidade de uma superfície redirecionar aleatoriamente a energia sonora incidente e pode ser determinado pelo método descrito na norma ISO 17497 [3], baseada nos estudos realizados por Vorländer e Mommertz [16]. O princípio básico do coeficiente de dispersão é obter a quantidade de energia refletida fora da zona especular. A zona especular é aquela que representa uma reflexão com o mesmo ângulo, em relação à normal ao plano de reflexão, do ângulo da energia incidente (Figura 6.4). Comparando os impulsos resultantes de reflexões para uma amostra com diferentes orientações, segundo Vorländer e Mommertz [16], a parte inicial dos impulsos possui uma grande correlação, o que não ocorre com a parte tardia destes impulsos.

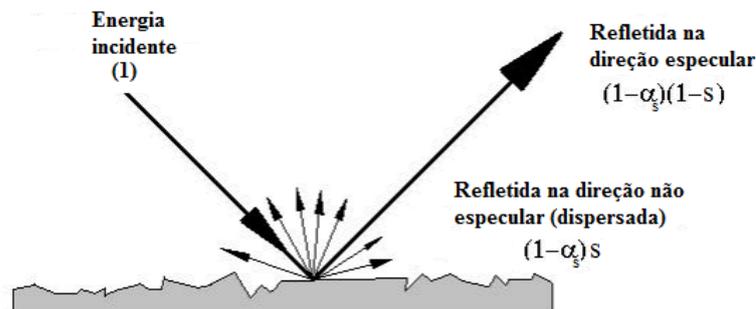


Figura 6.4 - Dispersão provocada por uma superfície rugosa (energia normalizada em relação à energia incidente) em que  $\alpha$  - coeficiente de absorção e  $s$  - coeficiente de dispersão (adaptado de [34]).

A resposta impulsiva resultante pode ser considerada como a resposta impulsiva da energia especular. Este princípio geral pode ser melhor percebido quando analisado o efeito da reflexão e da dispersão no domínio do tempo. A Figura 6.5 mostra três impulsos que foram refletidos por uma superfície ondulada para diferentes orientações da amostra em campo livre. As partes iniciais das reflexões estão altamente correlacionadas. Esta parte coerente é identificada com a componente especular da reflexão. Em contraste, as partes finais não estão em fase e dependem bastante da orientação específica. A energia na “cauda” do impulso refletido contém a parte dispersada.

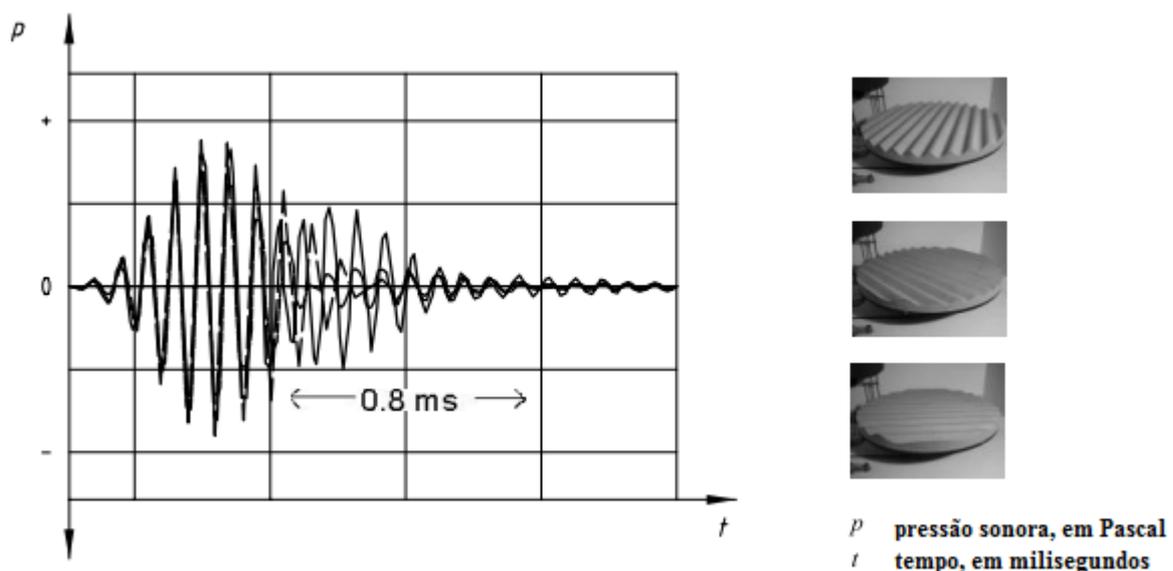


Figura 6.5 - Resposta impulsiva de três diferentes posições da amostra de teste (adaptado de [3, 34]).

O princípio do coeficiente de dispersão consiste assim em separar o som refletido nas componentes especular e dispersada. A componente especular corresponde à quantidade de energia que é refletida da mesma maneira que seria refletida para uma superfície plana, ou seja, é aquela que é refletida com igual ângulo da energia incidente. Por outro lado, a componente dispersada representa toda a energia refletida de forma não especular.

As energias das reflexões (normalizadas atendendo à reflexão de uma superfície não absorvente) são expressas por (6.1).

$$E_{spec} = (1 - \alpha_s)(1 - s) \equiv (1 - \alpha_{spec}); E_{total} = 1 - \alpha_s \quad (6.1)$$

Onde  $E_{spec}$  é a energia refletida especular,  $E_{total}$  a energia total refletida,  $s$  o coeficiente de dispersão,  $\alpha_s$  o coeficiente de absorção e  $\alpha_{spec}$  o coeficiente de absorção especular aparente. Destas equações resulta o coeficiente de dispersão ( $s$ ) que pode ser determinado por (6.2) [1].

$$s = \frac{\alpha_{spec} - \alpha_s}{1 - \alpha_s} = 1 - \frac{E_{spec}}{E_{total}} \quad (6.2)$$

### 6.2.2.3. METODOLOGIA

O método referido na ISO 17497-1 [3] pode realizar-se em amostras em escala real ou em modelos de escala reduzida. O método referido consiste na medição dos impulsos sonoros em campo difuso, atendendo às disposições da NP EN 354 [35], de uma amostra numa mesa circular rotativa (Figura 6.6).

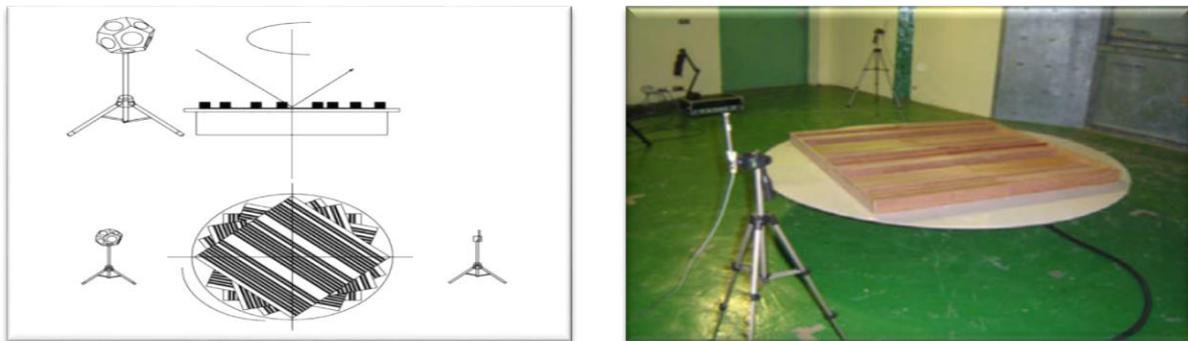


Figura 6.6 – Disposição da amostra sobre mesa rotativa para medição dos impulsos sonoros cf. ISO 17497-1 para obtenção do coeficiente de dispersão ( $s$ ) [21].

A separação das duas energias (especular e difusa cf. Figura 6.4), que está na base desta metodologia, é obtida através da média com sintonia de fase dos impulsos medidos para as diversas rotações da amostra (ponto a partir do qual surgem as reflexões difusas, Figura 6.5). Enquanto o impulso relativo às reflexões especulares (parte inicial do gráfico da Figura 6.5) apresenta um comportamento semelhante para as várias posições, sendo a sua média muito próxima do valor para cada uma das orientações, o impulso relativo às reflexões difusas (parte final do gráfico) toma um comportamento de interferência destrutiva do sinal, ou seja, a média do impulso para várias orientações resulta num sinal que contém apenas a energia refletida de forma especular, já que a média da energia refletida de forma difusa dá aproximadamente zero. Desta forma é importante garantir a medição de um elevado número de resposta impulsivas para que o valor médio contenha essencialmente a componente especular das reflexões. Esta resposta impulsiva é objeto de integração inversa para se obter o respetivo tempo de reverberação [12].

Na realidade, são necessários quatro tipos de tempo de reverberação, medidos em diferentes condições diferentes para a obtenção do coeficiente de dispersão. Os impulsos são medidos *sem* e *com* a amostra, seguindo a NP EN 354 [35] dando os tempos de reverberação  $T_1$  e  $T_2$ , respetivamente. Nesta fase são necessárias pelo menos seis medições, através de duas posições para a fonte e três posições para o microfone (Figura 6.7). Nestas medições, a temperatura e a humidade poderão ter influência nos resultados medidos, principalmente nas altas frequências. Assim, é preferível realizar as medições rapidamente evitando as flutuações que possam vir a ocorrer entre medições, aguardar algum tempo de modo a evitar erros de medição devido à movimentação do ar e se possível reduzir a atenuação do ar conduzindo assim a medições mais precisas. A forma de colocação das fontes sonoras e microfones foi a referida na NP EN 354 [35].

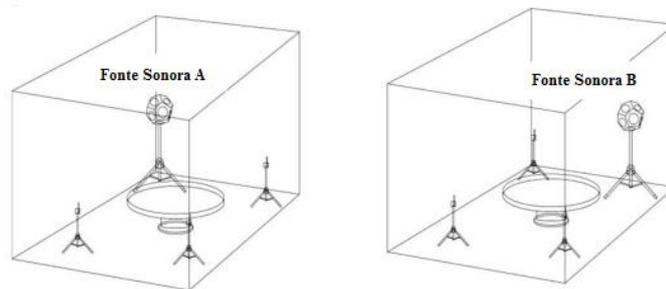


Figura 6.7 – Disposição das fontes e dos microfones na câmara reverberante para medição dos tempos de reverberação (6 medições por posição) [21].

Os microfones devem ser omnidirecionais e devem ser efetuados registos para diferentes posições afastadas entre si de, pelo menos, 1,5 a 2 m da fonte sonora e, pelo menos, a 1 m de distância da amostra e das paredes da câmara. A fonte sonora deverá igualmente ser omnidirecional e deverão ser registadas várias posições para a mesma, espaçadas de pelo menos 3 m. As dimensões referidas deverão, no caso de estar a ser utilizada uma amostra à escala reduzida (1:N), ser divididas pelo fator de escala  $N$ . O tempo de reverberação final corresponde à média aritmética dos diversos valores dos tempos de reverberação determinados para cada posição. Para cada posição fonte-recetor é gerado e recebido um sinal periódico pseudoaleatório de forma contínua, enquanto a mesa rotativa está em funcionamento. A duração total da medição deverá ser igual ao tempo correspondente a uma volta completa da mesa rotativa. Poderão também, em alternativa, para cada posição fonte-recetor, ser realizadas  $n$  medições com a amostra rodada entre cada medição de  $360^\circ/n$ . O valor de  $n$  deverá estar entre 60 e 120, sendo 72 um valor comum, correspondendo a variações angulares de  $5^\circ$ . O sinal utilizado deverá ser sempre o mesmo em todas as medições para assegurar a homogeneidade e igualdade nos resultados obtidos. Para obter uma resposta que não dependa do tempo, é necessário efetuar uma média com sintonia de fase (*phase-locked*) das  $n$  medições. Este processo poderá ser feito através da média das respostas dos impulsos de pressão ou através da média dos sinais recebidos antes de calcular as respostas dos impulsos de pressão. Estas medições feitas com a mesa rotativa em funcionamento e sem a amostra permitem determinar o tempo de reverberação  $T_3$ . Com a mesa rotativa em funcionamento e a amostra presente obtém-se o tempo de reverberação  $T_4$ . A Figura 6.8 resume as medições dos diversos tipos de tempo de reverberação.

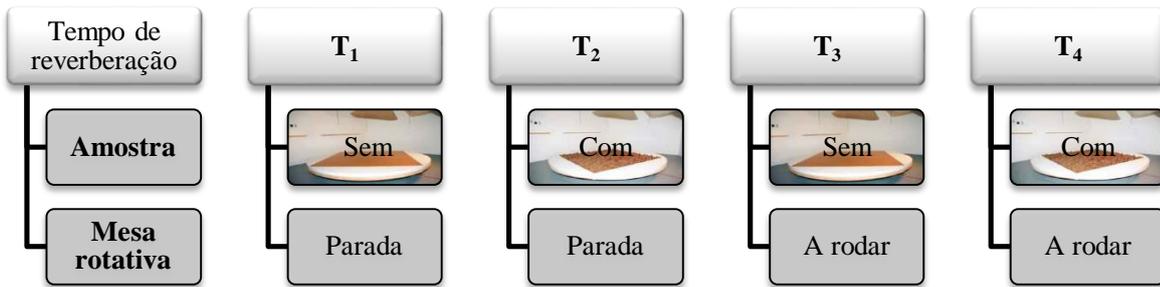


Figura 6.8 – Condições de medição para os tempos de reverberação diferentes cf. ISO 17497-1 [3].

O coeficiente de absorção da energia total incidente ( $\alpha_s$ ) é calculado usando:

$$\alpha_s = 55,3 \frac{V}{S} \left( \frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - \frac{4V}{S} (m_2 - m_1) \quad (6.3)$$

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

O coeficiente de absorção da energia refletida de forma especular ( $\alpha_{spec}$ ) é calculado usando a seguinte formulação:

$$\alpha_{spec} = 55,3 \frac{V}{S} \left( \frac{1}{c_4 T_4} - \frac{1}{c_3 T_3} \right) - \frac{4V}{S} (m_4 - m_3) \quad (6.4)$$

Em que  $c_3$  e  $c_4$  são a velocidade do som no ar ( $m/s$ ) durante a medição de  $T_3$  e  $T_4$ ,  $m_3$  e  $m_4$  são os coeficientes de atenuação no ar ( $m^{-1}$ ) durante a medição de  $T_3$  e  $T_4$ . Finalmente, o coeficiente de dispersão ( $s$ ) é calculado usando a expressão (6.2) A precisão dos resultados obtidos dependerá principalmente do tamanho da amostra, estando limitadas na ISO 17497-1 [3] as dimensões mínimas para a mesma, o coeficiente de absorção máximo da amostra e a área equivalente de absorção máxima da sala vazia.

### 6.3. MOTIVOS PARA NÃO SE AVALIAR O COEFICIENTE DE DIFUSÃO

Após a abordagem dos principais métodos de caracterização e medição do desempenho das superfícies acusticamente difusoras é possível verificar que ambos os ensaios são de elevado nível de dificuldade, tanto a nível dos requisitos de *hardware* e *software*, como a nível da complexidade dos procedimentos e requisitos na montagem dos esquemas de teste.

Sendo um dos objetivos deste trabalho avaliar a capacidade difusora do protótipo dimensionado no Capítulo 5, foram analisados os procedimentos normalizados de determinação dos coeficientes de difusão ( $d$ ) e dispersão ( $s$ ) de modo a avaliar a capacidade técnica de realização dos mesmos nas instalações e prazos disponíveis. Após a análise das metodologias dos ensaios acima descritos foram detetadas várias limitações nos diversos processos dos ensaios.

Relativamente ao ensaio de difusão ( $d$ ) a grande dificuldade centra-se na recolha e tratamento do estímulo sonoro. No documento AES-4id-2001 [2] é exigido um estímulo sonoro impulsivo, ou seja, um sinal de curta duração. É referido como ideal um impulso *Dirac* que, além de instantâneo, é um sinal que dispõe de todas as frequências num espectro bastante alargado e abrange o balizamento das frequências necessárias neste estudo. Neste sentido verificou-se a impossibilidade prática do uso de um impulso *Dirac*, sendo que tal sinal teria de ser substituído por um sinal pseudoaleatório com um tempo

de emissão bastante curto. Contornado este problema, a questão centrou-se na capacidade de receção do sinal sonoro. Neste ensaio seria necessário obter as leituras dos valores de pressão sonora associados ao isolamento do sinal sonoro referente às reflexões provenientes do painel difusor. Desta forma seria necessário captar o estímulo sonoro para tempos bastante reduzidos (aproximadamente 5 ms) de forma a captar apenas a reflexão proveniente do painel.

De forma a isolar as reflexões vindas do painel, seria ideal realizar este ensaio em câmara anecoica, devido ao facto de esta possuir superfícies de elevada capacidade de absorção que reduziriam as reflexões permitindo assim a obtenção das respostas polares provenientes apenas do difusor. Como não havia disponibilidade de uma câmara anecoica, este ensaio teria de ser realizado na câmara reverberante, sendo este procedimento possibilitado pelo elevado volume da câmara reverberante disponível, ficando assim a amostra distante o suficiente das paredes, situação esta admissível no documento AES-4id-2001 [2].

No que diz respeito a esta questão, a receção e tratamento do sinal seria efetuada recorrendo ao programa *Pulse* da *Briuel & Kjaer*. No entanto, apesar da capacidade para efetuar essa medição, o programa apenas estava programado para captação de estímulos a partir de 20 ms. Ainda relativo à receção do sinal sonoro, como visto acima, para um difusor de múltiplos planos de dispersão, como é o caso, seria necessário recorrer a uma estrutura semiesférica (goniómetro 3D) de modo a registar a resposta polar do difusor em toda a sua extensão. Contudo o Laboratório de Acústica da FEUP não dispunha de tal equipamento, sendo assim impossível realizar tal medição.

Assim, devido aos constrangimentos técnicos acima referidos e à limitação de tempo para a realização destes ensaios, não foi realizada a medição do coeficiente de difusão ( $d$ ) do protótipo dimensionado.

## 6.4. ENSAIOS REALIZADOS

### 6.4.1. OBJETIVOS

Tendo em consideração as limitações acima referidas e atendendo à impossibilidade de realizar a medição do coeficiente de difusão ( $d$ ), foram planeados dois ensaios para se caracterizar o desempenho acústico do protótipo dimensionado.

- Ensaio CDS (Coeficiente de Dispersão Simplificado) - Determinação do coeficiente de dispersão (*scattering*) por simplificação do método da ISO 17497-1;
- Ensaio HCS (Homogeneidade do Campo Sonoro) - Determinação da homogeneidade do campo sonoro e da influência dos difusores no mesmo.

Um ensaio para a determinação do coeficiente de dispersão ( $s$ ) com incidência aleatória foi realizado com base na metodologia especificada na ISO 17497-1 [3], mas de forma simplificada, que se denominou de ensaio CDS (Coeficiente de Dispersão Simplificado). A disponibilização de material não foi a adequada, uma vez que o fornecimento de painéis foi insuficiente, impossibilitando assim o cumprimento de todos os requisitos delineados na metodologia normativa.

No entanto, este ensaio não era suficiente para se caracterizar o desempenho acústico do difusor, uma vez que não quantifica a uniformidade espacial da dispersão da energia da superfície.

De forma a avaliar o comportamento do difusor relativamente à uniformidade espacial da dispersão da energia provocada (dada a impossibilidade de determinação do coeficiente de difusão) foi realizado um outro ensaio, não normalizado, com o objetivo de se determinar a homogeneidade do campo sonoro perante a colocação de uma amostra de difusores numa sala “acusticamente pequena”, pretendendo-se avaliar o aumento da difusão (grau de difusão) do campo sonoro dentro da sala, provocado pelo difusor.

## 6.4.2. ENSAIO CDS – DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DISPERSÃO SIMPLIFICADO

### 6.4.2.1. OBJETIVO

O objetivo deste ensaio era determinar o coeficiente de dispersão ( $s$ ) do difusor dimensionado, tendo como base a metodologia especificada na ISO 17497-1 [3]. Este ensaio foi realizado na câmara reverberante *R1* da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e consistiu na medição dos diferentes tempos de reverberação, para cada posição da amostra, de modo a determinar os valores dos coeficientes de absorção da energia total incidente e de absorção da energia refletida de forma especular (Figura 6.9).

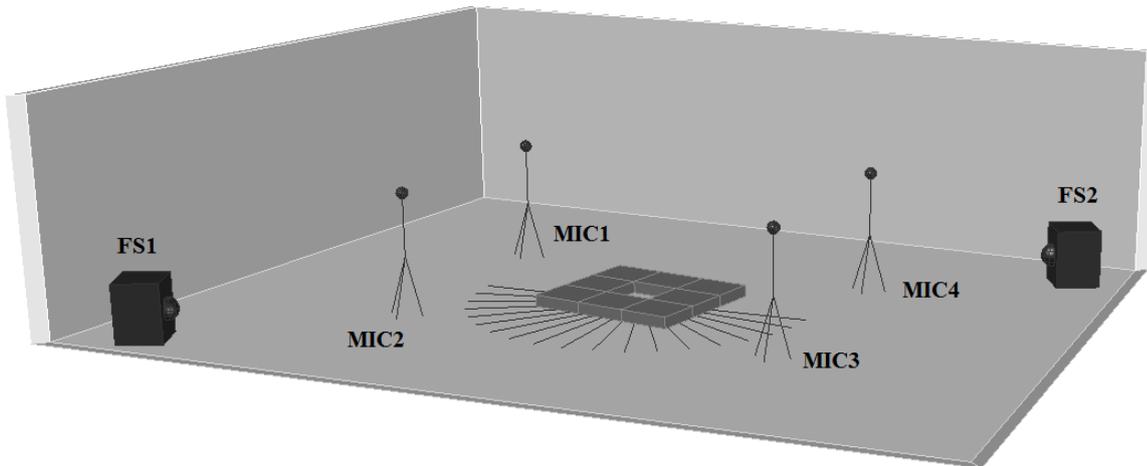


Figura 6.9 - Disposição do Ensaio CDS (Coeficiente de Dispersão Simplificado) na câmara reverberante R1 (FS – Fonte sonora, MIC – Microfone).

Vários autores defendem a realização deste ensaio em amostras à escala reduzida, regra geral à escala 1:5 [15, 34, 36, 37]. Neste ensaio essa opção não foi possibilitada, uma vez que havia dependência da empresa *Castelhano & Ferreira* para fabricar os protótipos e esta apenas se disponibilizou a realizar os protótipos à escala 1:1. Além disso as medições à escala 1:5 obrigariam ao ajuste das frequências de ensaio. As frequências teriam de ser multiplicadas pelo fator de escala ( $\times 5$ ), sendo necessário usar altas frequências onde o efeito do ar é muito significativo e perturbador.

Assim, as medições foram realizadas em protótipo à escala real, em bandas de um terço de oitava, numa gama de frequências entre os 100 e os 5000 Hz. A realização deste ensaio à escala real comporta algumas condicionantes adicionais, tais como o aumento do tempo de espera entre as medições para estabilização da temperatura e dos fluxos de ar e o grande tamanho da amostra, que dificulta o processo de rotação da amostra.

### 6.4.2.2. REQUISITOS DO ENSAIO

Na metodologia seguida para a realização deste ensaio [3] existem diversas especificações exigidas para que os resultados obtidos possam ser validados e tomados como valores reais da amostra em estudo.

Este ensaio foi realizado na câmara reverberante R1 do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Segundo a configuração da câmara, no período de ensaios, esta apresenta um volume de 207 m<sup>3</sup> e uma área de absorção equivalente da sala vazia de 0,9 m<sup>2</sup>. Relativamente à câmara reverberante são especificados os seguintes requisitos da norma, que foram verificados e cumpridos:

- Volume da câmara reverberante:  $V \geq 200 \times N^{-3}$  *para*  $N = 1$ ;  $V \geq 200 \text{ m}^3$

- Área de absorção equivalente da sala vazia:  $A_1 \leq 0,3 \times V^{2/3}$  para  $V = 207 \text{ m}^3$ ;  $A_1 \leq 10,5 \text{ m}^2$

Em relação à amostra, esta deverá ser suficientemente grande para poder proporcionar medições precisas. Na norma é feita referência a que seja usada uma amostra circular de diâmetro mínimo ( $\phi_d$ ) recomendado ou, em alternativa esta poderá ser quadrangular, no entanto com aresta de dimensão mínima a respeitar em relação à escala de amostra usada:

- Diâmetro mínimo da amostra circular:  $\phi_d \geq N^{-1} \times 3,0 \text{ m}$  para  $N = 1$ ;  $\phi_d \geq 3,0 \text{ m}$
- Dimensão mínima da aresta da amostra quadrada e diâmetro mínimo da mesa rotativa ( $\phi_d$ ):

$$l \geq N^{-1} \times 2,65 \text{ m} \quad \text{para } N = 1; l \geq 2,65 \text{ m}$$

$$\phi_d \geq N^{-1} \times 3,75 \text{ m} \quad \text{para } N = 1; \phi_d \geq 3,75 \text{ m}$$

Esta especificação da norma foi o principal problema no cumprimento dos requisitos indicados. De acordo com o requisito da norma, para uma amostra quadrangular à escala real seria necessário no mínimo uma amostra de 2,65 m de aresta. O facto de ser uma amostra a uma escala 1:1 requeria então, no mínimo, 25 painéis de 60x60 cm, de modo a respeitar a área mínima da amostra correspondente a uma amostra quadrada de 2,65 m de aresta, recomendada na ISO 17497-1 [3], como indicado na Figura 6.10, no entanto a empresa *Castelhano & Ferreira* apenas se disponibilizou a fabricar oito difusores à escala real. De modo a usar-se uma amostra mais pequena, cumprindo a dimensão mínima normativa, abordou-se então a possibilidade de realizar o ensaio a uma amostra à escala 1:2, em que a aresta mínima da amostra teria de ser 1,325 m, isto é nove painéis. No entanto essa possibilidade foi também posta de lado, devido à impossibilidade da empresa *Castelhano & Ferreira* em fabricar as amostras necessárias.

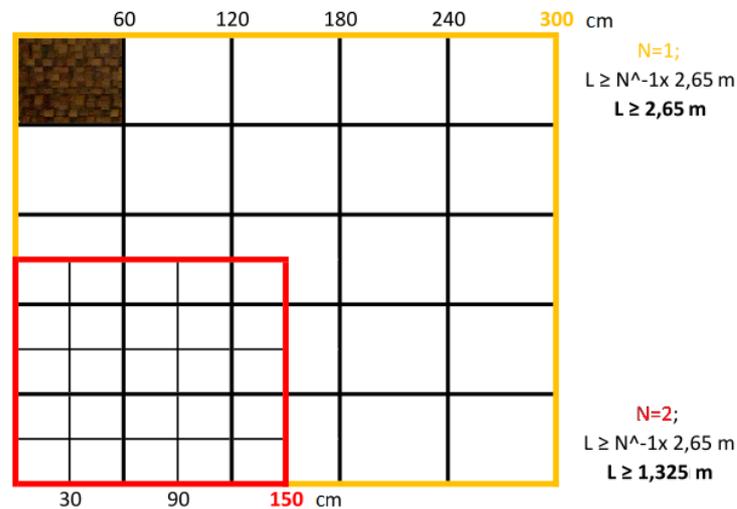


Figura 6.10 – Esquema da aresta mínima necessária para cumprimento do requisito de dimensão mínima da amostra à escala real (amarelo) e à escala 1:2 (vermelho).

Assim foi realizado o ensaio à amostra constituída pelos oito difusores disponibilizados, ciente de que os resultados seriam condicionados devido à área reduzida da amostra e ao não cumprimento da dimensão mínima normativa da amostra. Posto isto, pensou-se também usar os painéis fabricados como se fossem à escala 1:2, ou seja, desta forma o modelo real teria as reentrâncias mais acentuadas, tendo assim uma segunda amostra para analisar. No entanto, também esta amostra era insuficiente, uma vez que seriam necessários nove painéis para cumprimento da amostra mínima normativa.

Este fator foi também decisivo para a impossibilidade de cumprir o requisito de se realizar o ensaio numa mesa rotativa de dimensão mínima, pois ao estudar uma amostra à escala real seria necessária uma mesa rotativa de aproximadamente 4 m de diâmetro. Além da dificuldade do fabrico de uma mesa com estas dimensões, o seu transporte instalação e custo conduziram à formulação de uma simplificação criteriosa do método apresentado na norma. Assim, decidiu-se testar a amostra sem a mesa rotativa, colocada diretamente no piso (Figura 6.11), sendo que a rotação da amostra foi realizada manualmente. No entanto, apesar de simplificado face à norma, este processo de rodar manualmente a amostra parece ser tecnicamente correto pois dá todos os ângulos de rotação enquanto se rodasse com a mesa giratória as medições efetuadas iriam sempre coincidir com um certo arco de rotação com o rasto sonoro do tempo de reverberação a decair. Com esta opção, foi possível realizar na mesma o ensaio, embora de forma simplificada, anulando a absorção e dispersão pelo ar que iria existir entre a mesa rotativa e o piso da câmara que influenciaria os resultados, mas por outro lado aumentando a dispersão pelos bordos da amostra, que seria reduzida caso a amostra fosse implementada numa mesa rotativa [34].



Figura 6.11 – Amostra quadrada (oito painéis) colocada diretamente no piso da câmara reverberante (o espaço no centro deve-se à falta do nono painel não fornecido pela *Castelhano & Ferreira*).

A norma indica ainda requisitos relativamente à rugosidade da amostra, ao coeficiente de absorção da amostra e à distância desta às paredes da câmara:

- Rugosidade da amostra:  $h \leq \phi_a / 16$  sendo  $\phi_a = 1,80 \text{ m}$ ;  $h \leq 0,11 \text{ m}$
- Coeficiente de absorção da amostra:  $\alpha_s \leq 0,5$
- Distância da amostra às paredes da câmara:  $e \geq N^{-1} \times 1,0 \text{ m}$  caso  $N = 1$ ;  $e \geq 1,0 \text{ m}$

A profundidade estrutural da amostra é requisito importante para a obtenção de resultados fiáveis, pois baseia-se na relação entre as dimensões da rugosidade e da amostra e os resultados só serão fiáveis se a profundidade das reentrâncias for suficientemente pequena comparada com o tamanho total da amostra. Uma vez que a amostra apresentava uma dimensão máxima da rugosidade de 100 mm este requisito foi satisfeito, assim como o requisito do coeficiente de absorção da amostra, visto que ao tratar-se de uma

amostra de MDF, a sua absorção sonora é bastante inferior a 0,5. Relativamente à distância superior a 1 m entre a amostra e as paredes da câmara também foi garantida.

#### 6.4.2.3. PROCEDIMENTO DE TESTE

Na elaboração deste ensaio foram usados os seguintes equipamentos:

- *Hardware e software* de receção e tratamento de dados, *PULSE* da *Briuel & Kjaer*;
- Amostra de teste (Figura 6.12-1), composta por oito difusores à escala real. Cada painel com as dimensões 60 cm x 60 cm;
- Duas fontes sonoras da marca *JBL*, modelo EON15 G2 (Figura 6.12-2);
- Quatro microfones da marca *Briuel & Kjaer* de ½ de polegada, Modelo 4190 (Figura 6.12-3);
- Equipamento de medição da temperatura e humidade relativa.



Figura 6.12 – Material usado na medição do coeficiente de dispersão [fotos do autor].

Para a especificação e posicionamento das fontes sonoras e dos microfones foram seguidas as indicações da NP EN 354 [35] que refere que devem ser efetuadas medições, pelo menos, em duas posições da fonte e em, pelo menos, três posições dos microfones para cada fonte, dando assim um total de seis medições. Os microfones devem ser omnidirecionais e estar afastados entre si de pelo menos 1,5 m, colocados a 2,0 m ou mais da fonte sonora e pelo menos a 1,0 m de distância da amostra e das paredes da câmara. Na Figura 6.13, está representada a disposição adotada com indicação das distâncias entre os equipamentos. O sinal de teste emitido foi um sinal pseudoaleatório, com intensidade sonora de aproximadamente 100 dB, durante um curto espaço de tempo, de modo a assemelhar-se a um ruído impulsivo, possibilitando desta forma obter a medição da resposta do impulso. Visto a amostra a estudar estar à escala real, a gama de frequências de interesse estava localizada dos 100 aos 5.000 Hz. No entanto, como também se pretendia avaliar o desempenho acústico dos painéis, admitindo que estes estavam a uma escala 1:2, foi necessário ajustar a gama de frequências analisadas. No caso da amostra a uma escala 1:2 a gama de frequências de interesse é dos 200 aos 10.000 Hz. Assim foram realizadas as medições numa gama de frequências dos 100 aos 10.000 Hz.

Recordando o referido na NP EN 354 [35], seria necessário realizar pelo menos seis medições para cada posição da amostra, de modo a que a média aritmética das medições obtidas fosse mais precisa despistando possíveis anomalias esporádicas das condições de medição. Neste ensaio foram realizadas 24 medições para cada posição da amostra. Estas resultaram do uso de quatro microfones para medição do estímulo emitido por cada fonte sonora. Desta forma só resultariam doze medições, no entanto como o tratamento dos dados foi realizado de forma automática pelo programa *Pulse*, definiu-se três medições para cada microfone, por fonte sonora.

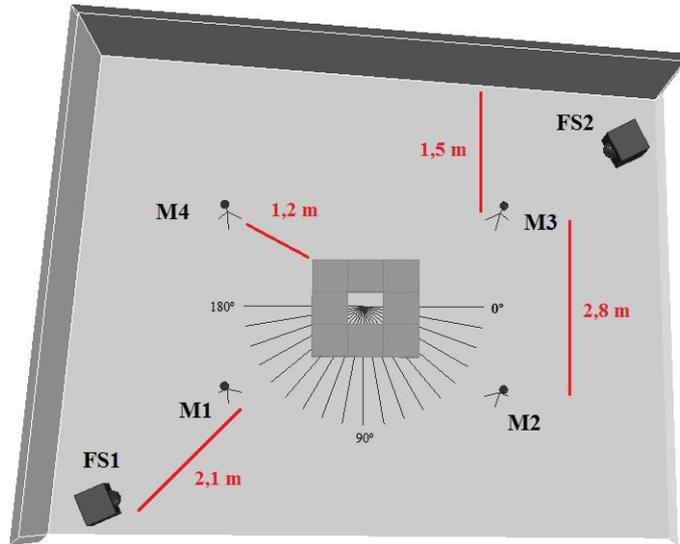


Figura 6.13 – Ensaio CDS - Montagem dos equipamentos na câmara reverberante R1 e distâncias entre os equipamentos para medição dos tempos de reverberação.

Após a calibração dos diversos equipamentos procedeu-se à medição dos diversos tipos de tempo de reverberação. As primeiras medições realizadas consistiram na medição dos impulsos de resposta *sem* e *com* a amostra presente na câmara reverberante, dando assim os tempos de reverberação  $T_1$  e  $T_2$  respetivamente.

O tempo de reverberação  $T_1$  corresponde à medição realizada *sem* a amostra e *sem* rotação, tal como representado na Figura 6.14. É de notar que caso houvesse possibilidade de efetuar o ensaio com a mesa rotativa, esta medição corresponderia à medição com a mesa *sem* a amostra e *sem* rotação da mesma.

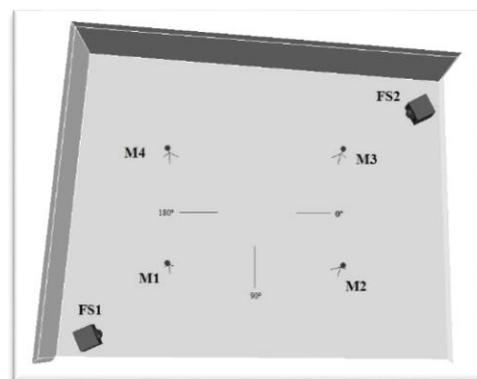


Figura 6.14 – Ensaio CDS - Montagem experimental para a determinação do tempo de reverberação  $T_1$  (*sem* amostra e *sem* rotação).

O tempo de reverberação  $T_2$  corresponde à medição realizada *com* a amostra e *sem* rotação, tal como representado na Figura 6.15. Nesta medição houve o cuidado de colocar a amostra centrada relativamente aos eixos de rotação, de forma a evitar divergências que poderiam provocar erros na quantificação dos vários tempos de reverberação. Para tal, antes da colocação da amostra na superfície da câmara, procedeu-se a marcação dos eixos de rotação de  $10^\circ$  em  $10^\circ$ , definindo assim o centro de posicionamento da amostra.

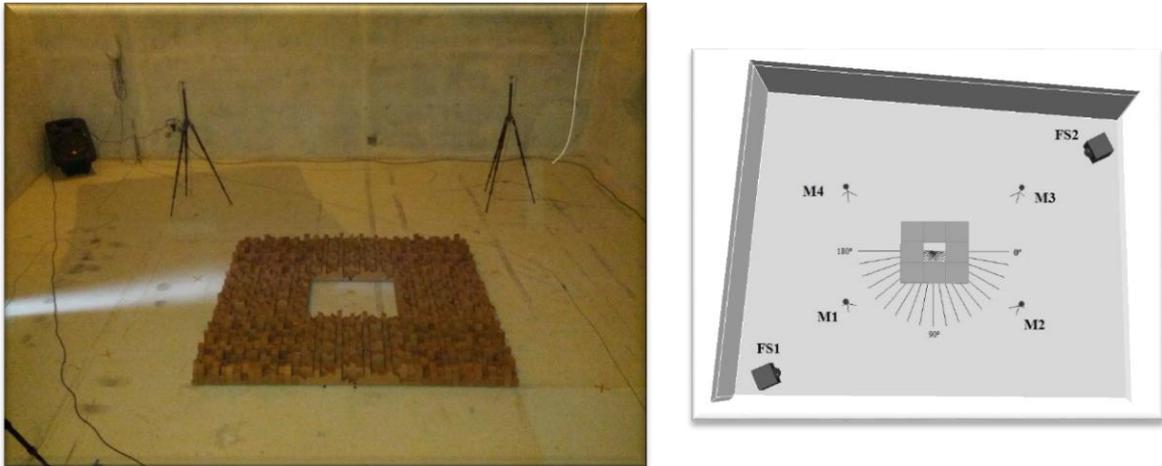


Figura 6.15 – Ensaio CDS -Montagem experimental para a determinação do tempo de reverberação  $T_2$  (*com* amostra e *sem* rotação).

Importa salientar que a disposição da amostra com a ausência de um painel difusor no centro (Figura 6.15), não é a prática corrente deste ensaio. Tal disposição deve-se ao número insuficiente de painéis fornecido pela empresa *Castelhano & Ferreira*. Uma vez que, segundo a metodologia especificada na ISO 17497-1 [3], é referido que em défice de uma amostra circular deve ser usada uma amostra quadrada, foi esta a disposição adotada de modo a não reduzir ainda mais a área da amostra.

O segundo grupo de medições realizadas consistiu na medição dos impulsos de resposta para as várias rotações da amostra, obtendo-se assim os tempos de reverberação *sem* e *com* a amostra, respetivamente  $T_3$  e  $T_4$ . Caso se usasse uma mesa rotativa, o sinal pseudoaleatório periódico seria emitido e recebido continuamente enquanto a mesa rodasse. Em que a duração total da medição seria igual ao tempo de uma volta completa da mesa rotativa [3]. Por exemplo, usando um sinal pseudoaleatório periódico com um período de 5 s e com uma rotação da mesa de  $1 \text{ min}^{-1}$ , seria necessário emitir doze períodos do sinal continuamente. No entanto, a norma possibilita a realização destas medições faseadamente. Sendo assim foram realizadas  $n$  medições de acordo com as rotações angulares subdivididas.

O tempo de reverberação  $T_3$  corresponde à medição realizada *sem* a amostra e *com* rotação da mesa. Uma vez que no ensaio não foi usada a mesa rotativa, os tempos de reverberação  $T_1$  e  $T_3$  são iguais. Esta analogia também é referida na norma, sendo que esta acontece quando um ensaio é realizado em condições ideais.

O tempo de reverberação  $T_4$  corresponde à medição realizada *com* amostra e *com* rotação da mesma (Figura 6.16). Assim foram realizadas rotações de  $10^\circ$  em  $10^\circ$ , o que equivale a 36 medições. No entanto, visto que a disposição das fontes e dos microfones foi simétrica e devido ao condicionamento relativamente ao prazo de realização do ensaio, decidiu-se realizar 18 medições, correspondendo assim à rotação da amostra num total de  $180^\circ$ . A amostra foi rodada manualmente para cada orientação e devido a motivos de movimentação de ar e das suas características de temperatura e humidade relativa, que podem ter influência na determinação do coeficiente de dispersão, realizaram-se períodos de espera

após a rotação da amostra e fecho da porta da câmara reverberante. Na norma é aconselhada uma espera de  $15/N$  minutos antes de se efetuar o ensaio, em que  $N$  corresponde à escala usada na amostra, tornando assim a medição do tempo de reverberação  $T_4$  um processo bastante demorado.

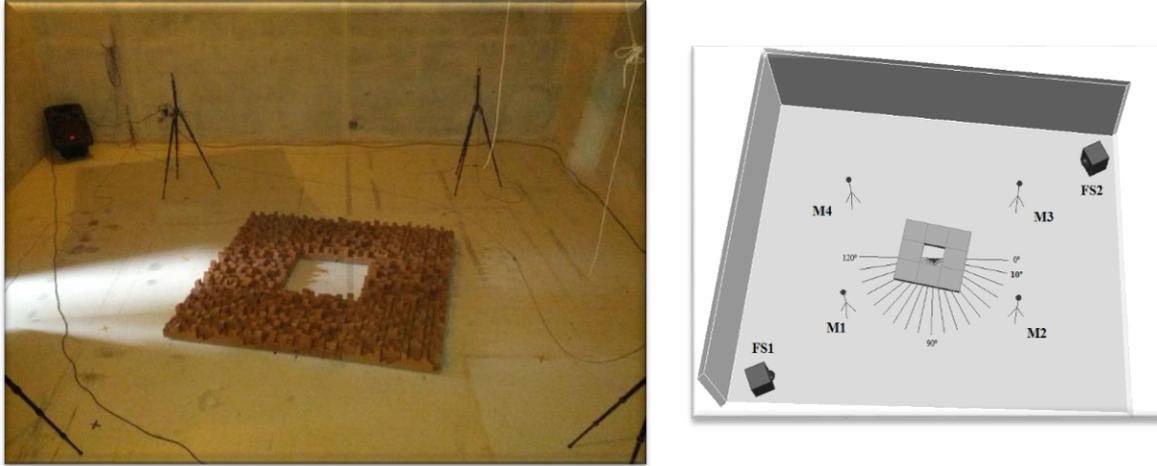


Figura 6.16 – Ensaio CDS - Montagem experimental para a determinação do tempo de reverberação  $T_4$  (com amostra e com rotação).

Ao longo das medições efetuadas foram também registados os valores da temperatura e humidade relativa, fatores que devido à atenuação do ar podem influenciar os valores finais do coeficiente de difusão, nas altas frequências, principalmente no ensaio à escala 1:2 (frequências até 10.000 Hz).

Os valores dos tempos de reverberação finais foram determinados, após a integração da resposta impulsiva, pela média aritmética dos valores individuais determinados em cada posição.

Após a finalização das medições, os dados foram exportados do programa *Pulse* para folhas de cálculo e tratados para a obtenção dos coeficientes de dispersão por terço de oitava.

#### 6.4.2.4. RESULTADOS

Com os dados exportados do programa *Pulse* o primeiro passo consistiu na determinação dos valores dos tempos de reverberação ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  e  $T_4$ ) necessários para o cálculo dos coeficientes de absorção da energia total incidente,  $\alpha_s$  (expressão 6.3) e de absorção da energia refletida de forma especular,  $\alpha_{spec}$  (expressão 6.4).

O cálculo destes valores de tempos de reverberação consistiu na determinação da média aritmética das várias leituras realizadas de acordo com as orientações e condições pretendidas para cada um. Estes resultados encontram-se no Anexo B.1, onde  $T_1$  e  $T_3$  correspondem à média aritmética dos tempos de reverberação de referência, ou seja, sem a amostra na câmara. O tempo de reverberação  $T_2$  correspondente à média aritmética das medições realizadas para a orientação de  $0^\circ$  da amostra e o tempo de reverberação  $T_4$  corresponde à média aritmética das medições para as várias orientações da amostra.

Para a determinação dos coeficientes também foi necessário determinar a atenuação do ar ( $m^{-1}$ ) para cada medição, calculada de acordo com a ISO 9613-1 [38], em função da temperatura e da humidade relativa (Quadro 6.1). Assim, com base nas medições da humidade relativa e da temperatura, efetuadas durante os ensaios (Quadro 6.2), determinou-se a atenuação do ar para cada orientação. A determinação de  $m_4$  consistiu na média aritmética das atenuações do ar para cada orientação da amostra. No Anexo B.2 são apresentados os valores da atenuação do ar para todas as medições efetuadas.

Quadro 6.1 - Absorção sonora do ar, em  $m^{-1}$ , em função da humidade relativa (adaptado de [39]).

HR (%)	< 1 kHz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	16 kHz
0	0	0	0	0	0	0
20	0	0,002	0,004	0,014	0,047	0,085
40	0	0,001	0,002	0,011	0,024	0,053
60	0	0,001	0,001	0,007	0,002	0,035
80	0	0,001	0,001	0,002	0,013	0,028

Quadro 6.2 - Registos da humidade relativa e da temperatura durante a realização dos ensaios .

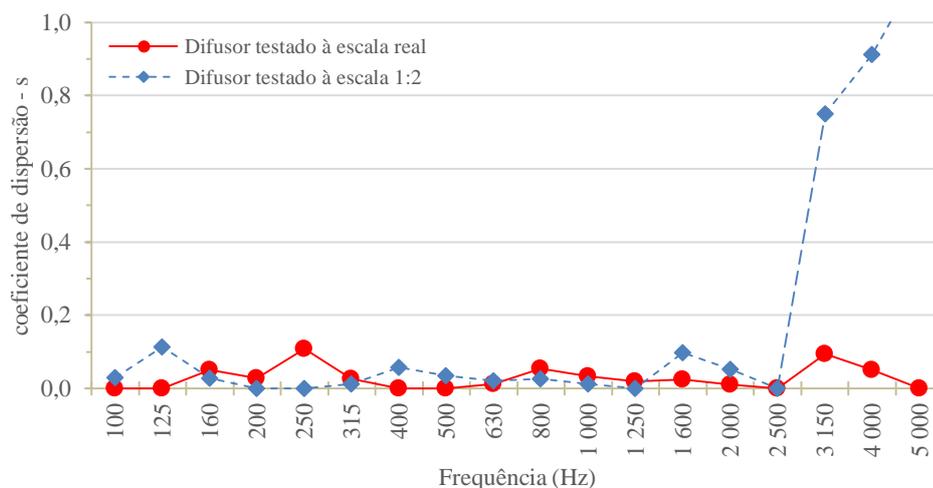
	0 - 50°	60-120°	130-180°	Vazia
HR (%)	65,7	66,8	66,5	68,0
T (°C)	23,4	24,3	24,6	24,1

Após determinação do coeficiente de absorção da energia total incidente ( $\alpha_s$ ) e do coeficiente de absorção da energia refletida de forma especular ( $\alpha_{spec}$ ) foi possível determinar o coeficiente de dispersão ( $s$ ) por terço de oitava, para a amostra em escala real, para as bandas dos 100 Hz aos 5.000 Hz e para a amostra à escala reduzida 1:2, para as bandas dos 200 Hz aos 10.000 Hz. Neste caso, apesar de os painéis ensaiados nas situações à escala 1:1 e à escala 1:2 serem os mesmos, estes referem-se a dois modelos de difusores teoricamente distintos.

Para a determinação do coeficiente de dispersão utilizou-se a expressão 6.2 e no Anexo B.3 é apresentada a folha de cálculo para essa determinação. No Quadro 6.3 e na Figura 6.17 são apresentados os resultados finais obtidos.

Quadro 6.3 – Valores dos coeficientes de dispersão ( $s$ ) por terço de oitava para as amostras à escala 1:1 e à escala 1:2.

Freq (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 000	1 250	1 600	2 000	2 500	3 150	4 000	5 000
s [1:1]	0,00	0,00	0,05	0,03	0,11	0,03	0,00	0,00	0,01	0,06	0,03	0,02	0,02	0,01	0,00	0,09	0,05	0,00
s [1:2]	0,03	0,11	0,03	0,00	0,00	0,01	0,06	0,03	0,02	0,02	0,01	0,00	0,09	0,05	0,00	0,75	0,91	1,14

Figura 6.17 – Coeficiente de dispersão ( $s$ ) para o difusor ensaiado à escala real e à escala 1:2.

## 6.4.2.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Analisando os valores obtidos para o coeficiente de dispersão na Figura 6.17 é constatável a obtenção de valores bastante baixos, ao contrário do pretendido. Para o ensaio à escala real os valores obtidos para toda a gama de frequências em estudo nunca ultrapassam os 0,2. Sendo os maiores valores obtidos para as frequências de 250, 800 e 3150 Hz. No ensaio à escala 1:2 também se obtiveram valores para o coeficiente de dispersão bastante baixos, à exceção dos valores obtidos para as altas frequências. O valor do coeficiente de dispersão para as baixas e médias frequências nunca ultrapassa os 0,2. Apresenta no entanto valores superiores a 0,6 na gama de frequências dos 3.150 aos 5.000 Hz.

Relativamente ao ensaio à escala real, a obtenção de valores bastante baixos para o coeficiente de dispersão dever-se-á, em grande parte, ao tamanho insuficiente da amostra, relativamente ao tamanho normativo. O tamanho da amostra testada apenas correspondia a 32% da amostra mínima requerida, uma vez que seriam necessários 25 painéis e apenas foram disponibilizados 8 painéis. Na Figura 6.18 são apresentados os resultados obtidos para o coeficiente de dispersão de dois difusores de características semelhantes, onde é possível comparar os resultados obtidos para o difusor testado à escala real pelo método simplificado e com o número insuficiente de amostras (oito painéis em vez de vinte e cinco) com os resultados obtidos para um difusor *Skyline* 2D da empresa RPG testado segundo a metodologia da ISO 17497-1 [3]. Seria expectável que o difusor testado apresentasse valores próximos do exemplo apresentado, uma vez se tratarem de difusores de difusão hemisférica (difundem a energia sonora em duas direções). Da comparação efetuada pode concluir-se que numa gama de baixas frequências dos 100 aos 250 Hz os valores obtidos são semelhantes nos dois difusores comparados, no entanto a partir dos 250 Hz os valores obtidos são bastante discrepantes, apresentando o difusor testado valores muito abaixo do esperado.

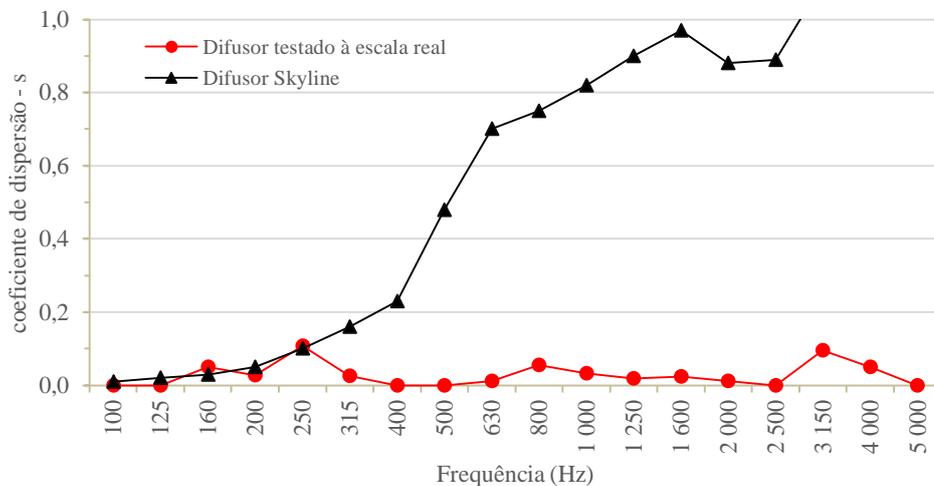


Figura 6.18 - Coeficientes de dispersão (s) para dois difusores. O difusor ensaiado à escala real (pelo método simplificado e com o número insuficiente de amostras, oito painéis em vez de 25) e um difusor 2D *Skyline* (ensaiado por Peter D'Antonio cf. [1]).

Relativamente aos valores obtidos não existe grande discrepância nos resultados em função do posicionamento do painel, já que o difusor é capaz de dispersar a energia nas duas direções. Seria assim expectável que o painel difusor apresentasse um coeficiente de dispersão a rondar os 0,5. Caso se tratasse de um painel difusor 1D o posicionamento do painel já seria preponderante para os valores obtidos. Neste caso, se o coeficiente de dispersão na direção difusora fosse 1, então seria de esperar um valor nulo na outra direção. No entanto, o painel difusor 2D *Skyline*, apresentado como exemplo, atinge valores próximo da unidade. Esse fator pode ser explicado pela alteração significativa da geometria do difusor de cada vez que se roda o mesmo.

Quanto à interpretação dos resultados obtidos para o ensaio realizado a uma escala 1:2, os baixos valores obtidos (Figura 6.19) também poderão dever-se à amostra insuficiente. Segundo a amostra normativa recomendável seriam necessários nove painéis, no entanto, apenas foram disponibilizados oito. Neste caso foi necessário analisar um espectro que continha frequências desde os 200 aos 10.000 Hz de forma a adaptar as frequências à escala analisada, sendo necessário duplicar as frequências, enquanto na escala real a gama se estenderia dos 100 aos 5.000 Hz. Este pode também ser um dos fatores responsáveis pelos valores obtidos uma vez que para altas frequências as variações de temperatura e humidade podem ter grande influência nos resultados finais dos coeficientes de dispersão devido à atenuação do ar.

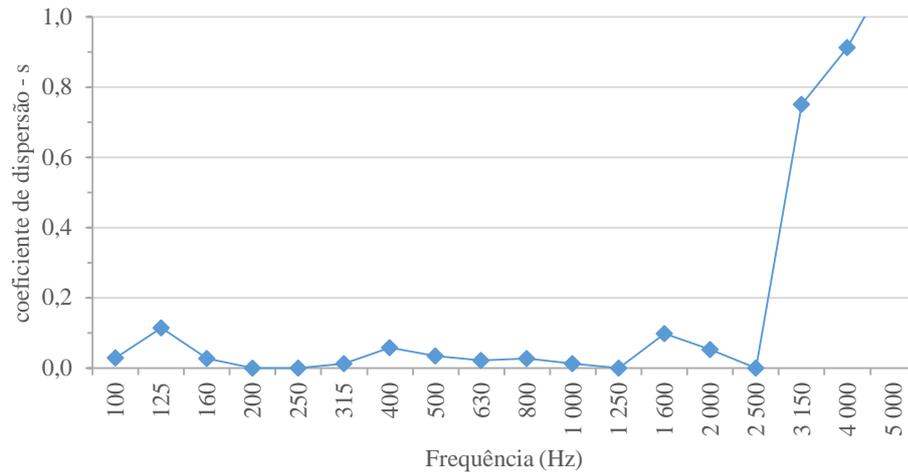


Figura 6.19 - Coeficientes de dispersão (s) para o difusor ensaiado à escala 1:2 pelo método simplificado e com número insuficiente de amostras, oito painéis em vez dos nove normativos.

Comparando os resultados obtidos para o painel difusor ensaiado à escala 1:2 pelo método simplificado e com um número insuficiente de amostras (oito painéis em vez dos nove normativos) com um difusor 2D *Skyline* da RPG mantém-se a discrepância de valores para a gama de frequências intermédia. No entanto a partir dos 2.500 Hz os valores obtidos evoluem no sentido de aproximação dos valores do difusor apresentado como exemplo. O aumento do coeficiente de dispersão poderá dever-se à dispersão ocorrida pelos bordos da amostra que tem maior expressão para altas frequências.

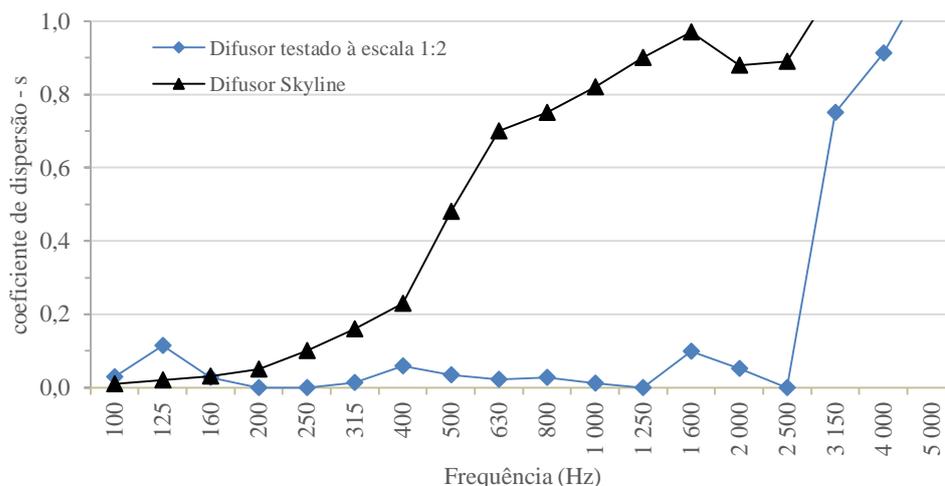


Figura 6.20 - Coeficientes de dispersão (s) para dois difusores. O difusor ensaiado à escala 1:2 pelo método simplificado e com número insuficiente de amostras, oito painéis em vez dos nove normativos e um difusor 2D *Skyline* (ensaado por Peter D'Antonio cf. [1])

### 6.4.3. ENSAIO HCS – DETERMINAÇÃO DA HOMOGENEIDADE DO CAMPO SONORO

#### 6.4.3.1. OBJETIVO

Um ensaio para determinar a homogeneidade do campo sonoro (HCS) foi realizado com o objetivo de se estudar o aumento do grau de difusão do campo sonoro dentro de uma sala “acusticamente pequena” com a aplicação dos difusores em estudo (Figura 6.21). Para este ensaio não foi seguida nenhuma metodologia normalizada, no entanto foi baseado no trabalho realizado por Redondo *et al.* [40] na determinação da influência de diferentes difusores no grau de difusão de uma sala. Este ensaio foi realizado devido à impossibilidade de medição do coeficiente de difusão ( $d$ ), possibilitando desta forma compreender a difusão provocada em pontos diferentes de uma sala real “pequena”, no entanto sem a possibilidade de quantificar a qualidade da superfície difusora, não permitindo assim a comparação com outras superfícies difusoras relativamente à sua capacidade de difusão.

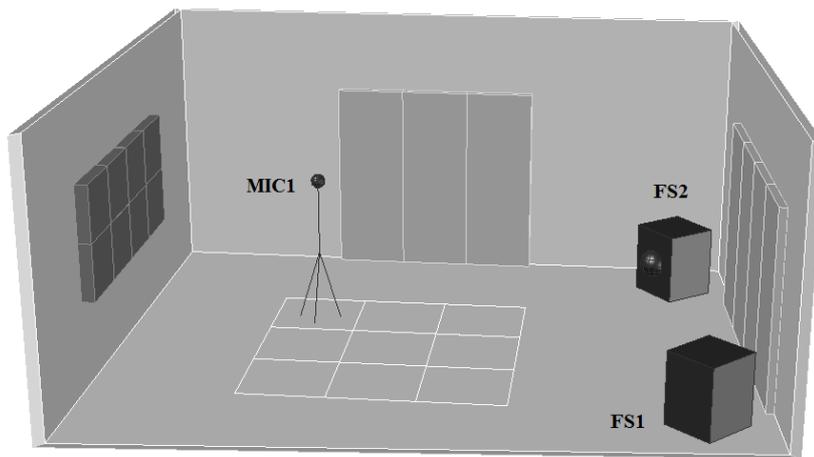


Figura 6.21 - Disposição do *Ensaio HCS* na câmara reverberante E1 transformada por aumento significativo da absorção para simular uma “sala acusticamente pequena”.

#### 6.4.3.2. REQUISITOS DO ENSAIO

Neste ensaio pretendia-se realizar as medições numa sala acusticamente pequena, de modo a obter medições que pudessem ser comparáveis a uma situação real. Assim, os ensaios realizaram-se na câmara reverberante E1 do Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, cujo volume para a disposição da câmara aquando das medições era de aproximadamente  $106 \text{ m}^3$  e que foi adaptada por aumento significativo da absorção interior (Figura 6.22). Foram colocadas placas de material absorvente nas paredes laterais e na parede posterior, de forma a reduzir as reflexões das paredes e captando assim o nível de pressão sonora em cada microfone com uma maior incidência das reflexões iniciais provenientes da amostra.

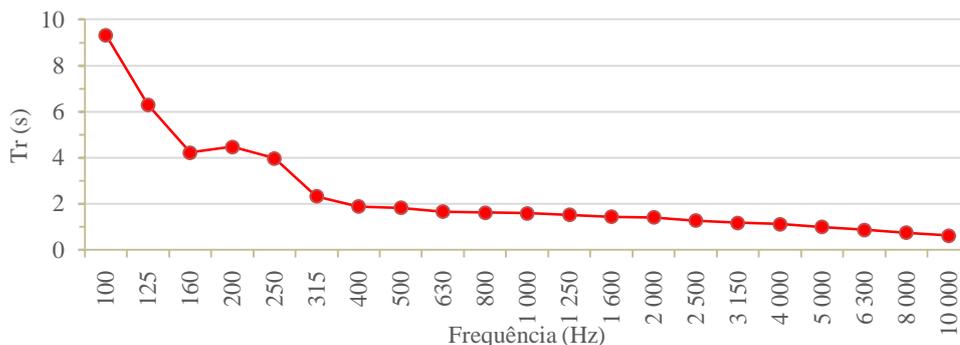


Figura 6.22 - Tempo de reverberação da sala na situação inicial (transformada com mais absorção).

Visto pretender-se avaliar o aumento do grau de difusão do campo sonoro na sala, foi necessário realizar medições segundo uma malha de pontos fixos, possibilitando realizar as medições com e sem amostra de modo a obter-se a sua influência no campo sonoro. Para tal definiu-se uma malha de nove pontos de medição, para que fossem garantidas pelo menos três medições à frente, ao meio e no fundo da sala (Figura 6.24).

A amostra estudada consistiu nos oito difusores disponibilizados pela empresa *Castelhano & Ferreira*, sendo esta colocada na parede oposta à colocação das fontes sonoras, ou seja, em sala real esta colocação corresponderia à parede posterior (Figura 6.23). Os painéis foram assim colocados segundo a normal à emissão da fonte sonora e foram dispostos rodados aleatoriamente de modo a criar uma superfície de difusão mais heterogénea. Este número de difusores não era, de novo, o ideal, devendo existir uma área um pouco superior de modo a provocar maior interferência no campo sonoro da sala.



Figura 6.23 – Disposição dos oito difusores na parede frontal da câmara reverberante E1 (foto do autor).

#### 6.4.3.3. PROCEDIMENTO DE TESTE E MEDIÇÃO

Na elaboração deste ensaio foram usados os seguintes equipamentos:

- *Hardware* e *software* de receção e tratamento de dados, *PULSE* da *Brüel & Kjaer* ;
- Amostra de teste composta por oito difusores à escala real, cada painel com as dimensões 60 cm x 60 cm (Figura 6.24-1);
- Duas fontes sonoras da marca *JBL* (Figura 6.24-2);
- Quatro microfones da marca *Brüel & Kjaer* de ½ de polegada (Figura 6.24-3);
- Material absorvente (Figura 6.24-2).



Figura 6.24 – Material e equipamento usado na medição do aumento do grau de difusão numa sala pequena (HCS) (fotos do autor).

As fontes sonoras e os microfones foram dispostos de acordo com o posicionamento representado na Figura 6.25. As fontes sonoras (FS1 e FS2) foram dispostas nos cantos da sala, afastadas de 0,5 m da parede posterior. A malha de microfones foi demarcada no centro do piso da sala, com a primeira linha de microfones distanciada 1,5 m da amostra colocada na parede frontal e os microfones distanciados entre si de 1,5 m. Relativamente ao material absorvente foi colocado nas paredes laterais e posterior da sala.

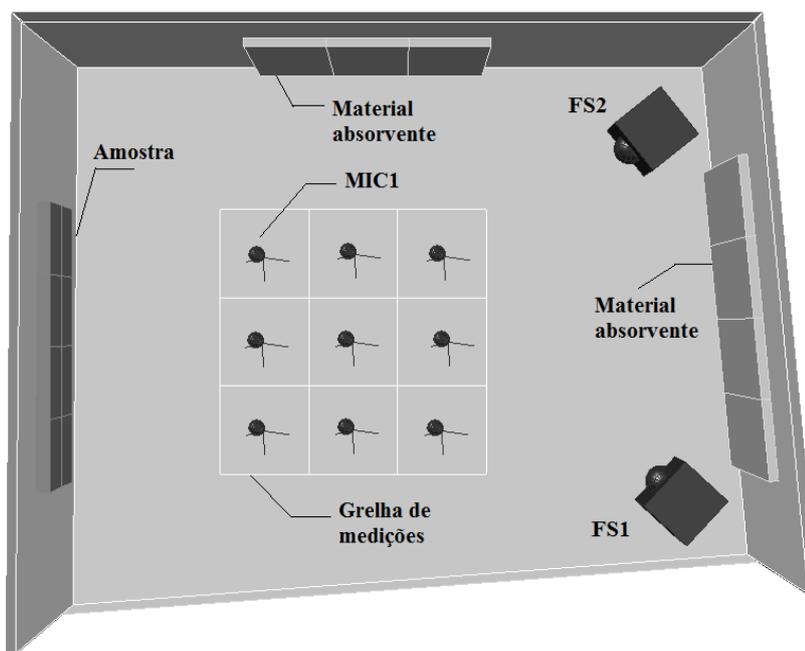


Figura 6.25 – Ensaio HCS - Montagem dos equipamentos na câmara reverberante E1 transformada em sala acusticamente pequena.

Para a avaliação do grau de difusão do campo sonoro provocado pelos difusores na sala, procedeu-se à medição dos níveis de pressão sonora equivalente para nove posições diferentes da sala, com e sem a amostra. Para tal, foi usado um sinal pseudoaleatório, de intensidade sonora de aproximadamente 80 dB, ruído rosa, durante dois tempos de emissão diferentes. A duração desses sinais foi escolhida após serem testados diferentes tempos de duração do sinal. Após esses testes para uma determinada posição dos microfones percebeu-se que, ao fim de aproximadamente 10 s de emissão do sinal, os valores do campo sonoro estabilizavam, como demonstrado na Figura 6.26, não possibilitando assim analisar as diferenças provocadas pela amostra. Essa estabilização do campo sonoro é de fácil compreensão, pois uma vez emitido o sinal, começam as reflexões iniciais da energia sonora nas paredes envolventes da sala. Nos breves milissegundos iniciais essas reflexões devem-se praticamente à reflexão na parede frontal e a intensidade sonora do sinal captado é mais baixa, mas com o avançar do tempo ocorrem mais reflexões em toda a envolvente provocando assim um aumento do nível de pressão sonora captado e uma estabilização nas leituras efetuadas.

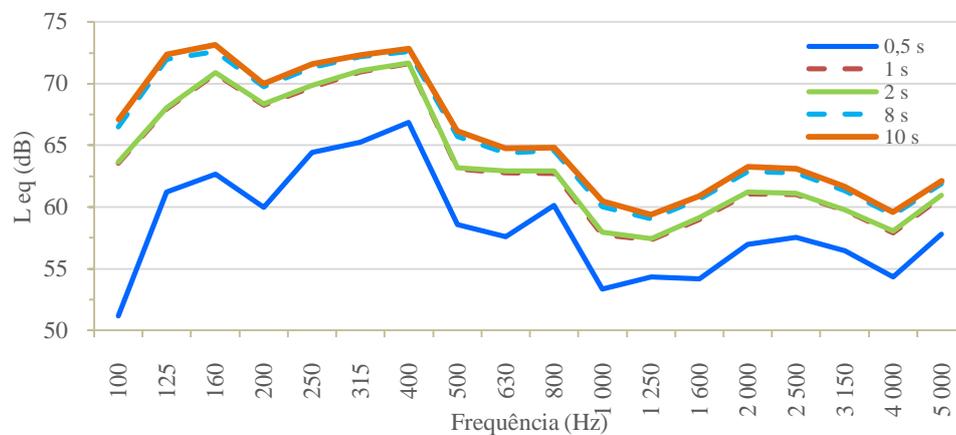


Figura 6.26 - Comparação do nível sonoro para cinco diferentes tempos de emissão do sinal sonoro na sala E1.

Assim, de modo a se obter uma amostra mais diversificada de leituras, foram recolhidos os dados da emissão do sinal com duração de 0,5 e 5 s para cada posição, numa gama de frequências dos 100 aos 5.000 Hz. Após a calibração dos diversos equipamentos mediram-se os tempos de reverberação *sem* e *com* a amostra, respetivamente  $T_1$  e  $T_2$ . Estas medições serviram apenas para avaliar a interferência dos difusores no tempo de reverberação da sala. Estas medições foram efetuadas segundo a NP EN 354. Na Figura 6.27 é demonstrada a disposição dos equipamentos para a realização dessas medições.

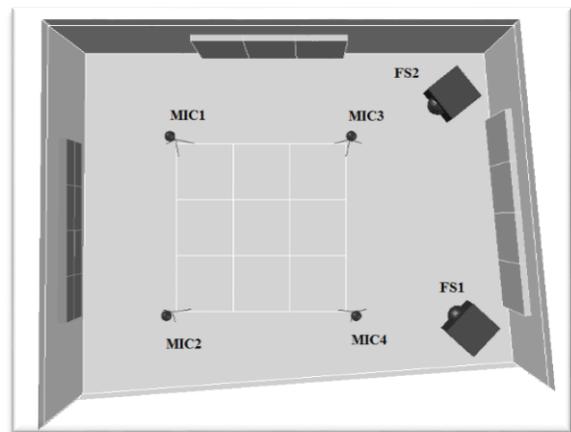


Figura 6.27 – Ensaio HCS - Montagem experimental para determinação do tempo de reverberação  $T_2$ , com a amostra presente na sala E1.

Em seguida efetuaram-se as medições dos níveis de pressão sonora de referência, neste caso sem a amostra (difusor) na sala (Figura 6.28). Devido à limitação no número de microfones disponíveis, estas medições foram realizadas de forma faseada. Foram usados três microfones por cada medição do  $L_{eq}$  para 0,5 e 5 s. Desta forma entre cada leitura de valores foi necessário reposicionar os microfones, fazendo assim as leituras para as nove posições definidas.

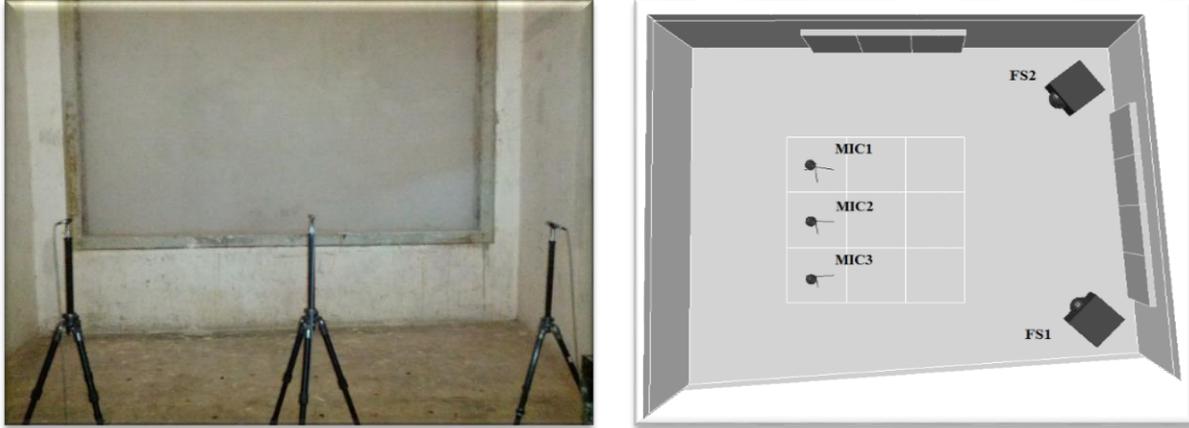


Figura 6.28 – Ensaio HCS - Montagem experimental para determinação do nível sonoro equivalente na malha definida, *sem* a amostra, para os tempos de 0,5 e 5 s, de emissão do estímulo sonoro.

As medições do nível de pressão sonora com a amostra presente na sala (Figura 6.29) foram realizadas de igual forma às medições anteriores, em que a única condição que mudou foi mesmo a colocação da amostra na parede frontal da sala. Nestas medições importa salientar que foi necessária especial atenção no reposicionamento dos microfones, garantindo que os valores se mediam exatamente nas mesmas nove posições *sem* a amostra.

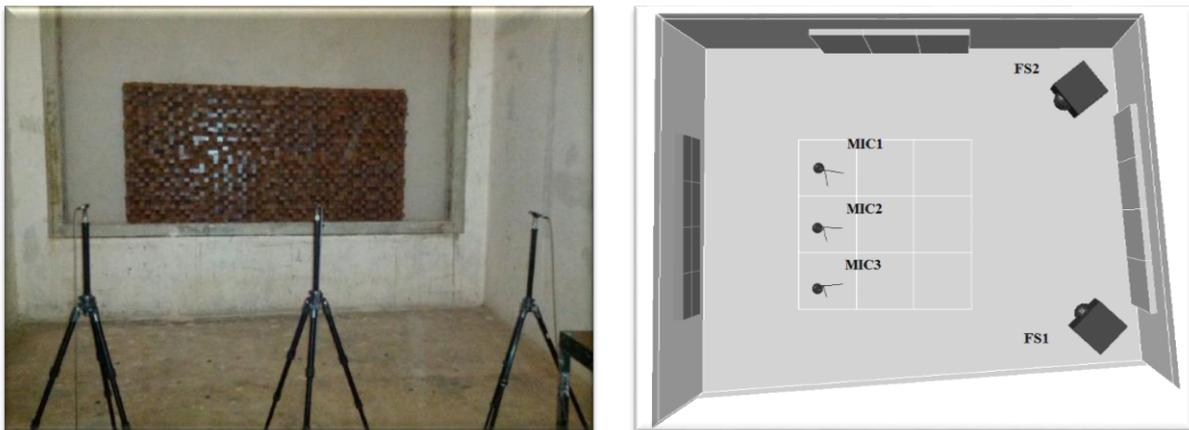


Figura 6.29 – Ensaio HCS - Montagem experimental para determinação do nível sonoro equivalente na malha definida, *com* a amostra (difusor), para os tempos de 0,5 e 5 s de emissão do estímulo sonoro.

Após a conclusão das medições, os dados foram recolhidos do programa *Pulse* e registados em folhas de cálculo para tratamento com vista à determinação da variação do campo sonoro na sala.

Após o tratamento dos dados verificou-se a necessidade de uma amostra maior de medições por cada microfone de forma a se obterem resultados mais conclusivos. Assim foi realizada uma última medição que consistiu na determinação do nível sonoro equivalente unicamente no meio da sala, para 1 e 5 s, *sem* e *com* o difusor na sala e para uma amostragem de 20 medições por posição (Figura 6.30). Este

processo foi algo demorado, devido à grande amostragem de valores, e uma vez que por cada medição era necessário iniciar uma medição através do programa *Pulse*, exportar as leituras da medição de cada microfone e reiniciar uma nova medição. A realização das leituras apenas para as três posições no meio da sala, deveu-se à limitação de tempo para efetuar estas medições, no entanto foram escolhidas estas pois normalmente o ouvinte está localizado no meio da sala sendo assim esta a posição de maior interesse de análise.

Finalizada esta medição, foi então possível realizar a análise final das leituras obtidas e caracterizar o aumento do nível de difusão sonora numa sala.

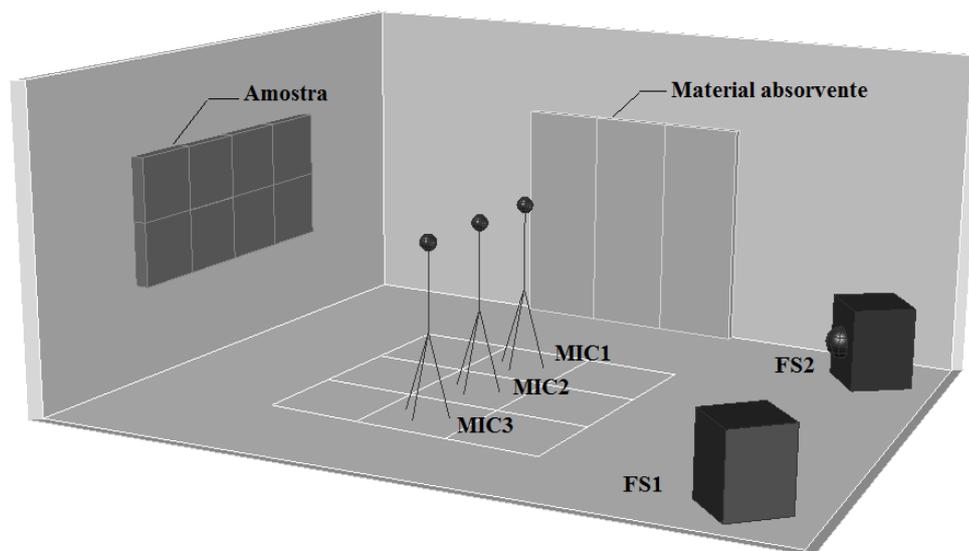


Figura 6.30 – Ensaio HCS - Montagem experimental para determinação do nível sonoro equivalente no meio da sala, para uma amostragem de 20 medições.

#### 6.4.3.4. RESULTADOS

Os dados fornecidos pelo programa *Pulse* foram exportados para folhas de cálculo de forma a organizar a informação necessária para a avaliação da homogeneidade do campo sonoro da sala e para perceber qual a influência dos difusores ao nível da dispersão provocada na sala.

Assim foram elaboradas folhas de cálculo com os resultados obtidos que podem ser consultadas no Anexo C. A seguir apresentam-se os nomes das folhas de cálculo e as respetivas localizações:

- Determinação do nível sonoro equivalente para 0,5 s, *com* e *sem* o difusor na sala (Anexo C.1);
- Determinação do nível sonoro equivalente para 5 s, *com* e *sem* o difusor na sala (Anexo C.2);
- Determinação do nível sonoro equivalente no meio da sala, para uma amostragem de 20 medições por posição para 1 s e *sem* difusores na sala (Anexo C.3);
- Determinação do nível sonoro equivalente no meio da sala, para uma amostragem de 20 medições por posição para 1 s e *com* difusores na sala (Anexo C.4);
- Determinação do nível sonoro equivalente no meio da sala, para uma amostragem de 20 medições por posição para 5 s e *sem* difusores na sala (Anexo C.5);
- Determinação do nível sonoro equivalente no meio da sala, para uma amostragem de 20 medições por posição para 5 s e *com* difusores na sala (Anexo C.6);

## 6.4.3.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na Figura 6.31 estão representados os resultados obtidos do nível sonoro equivalente para uma emissão de 0,5 s de duração, *com* e *sem* o difusor na sala, para 250, 500, 1.000 e 2.000 Hz.. Esta representação gráfica não pretende representar a dispersão provocada em cada direção. Nesta representação o pretendido é avaliar a homogeneidade entre as medições efetuadas para cada um dos nove microfones posicionados em diferentes posições da sala ao longo da malha previamente definida. Analisando os resultados obtidos verifica-se que os valores do nível sonoro equivalente para a frequência dos 250 Hz são mais homogêneos *com* os difusores na sala do que *sem* os difusores. Neste caso as medições efetuadas em cada posição, com os difusores presentes na sala, apresentam valores com menor variação de nível sonoro entre as posições, tal é verificado pela Figura 6.31 no gráfico relativo à frequência dos 250 Hz onde a figura relativa às medições com difusores na sala é mais homogênea e centrada.

Relativamente às medições efetuadas para as restantes frequências (500, 1.000 e 2.000 Hz) o comportamento verificado já não é o mesmo. Segundo as medições efetuadas e as representações gráficas (Figura 6.31) a instalação dos difusores na sala provoca uma dispersão sonora não uniforme. De acordo com a Figura 6.31 as representações relativas à medição do nível sonoro equivalente para uma emissão de 0,5 s, com os difusores na sala, apresentam uma maior variação de valores (figuras mais irregulares e descentradas sendo o maior exemplo as medições para os 2.000 Hz) quando comparadas com as representações do nível sonoro equivalente sem os difusores na sala.

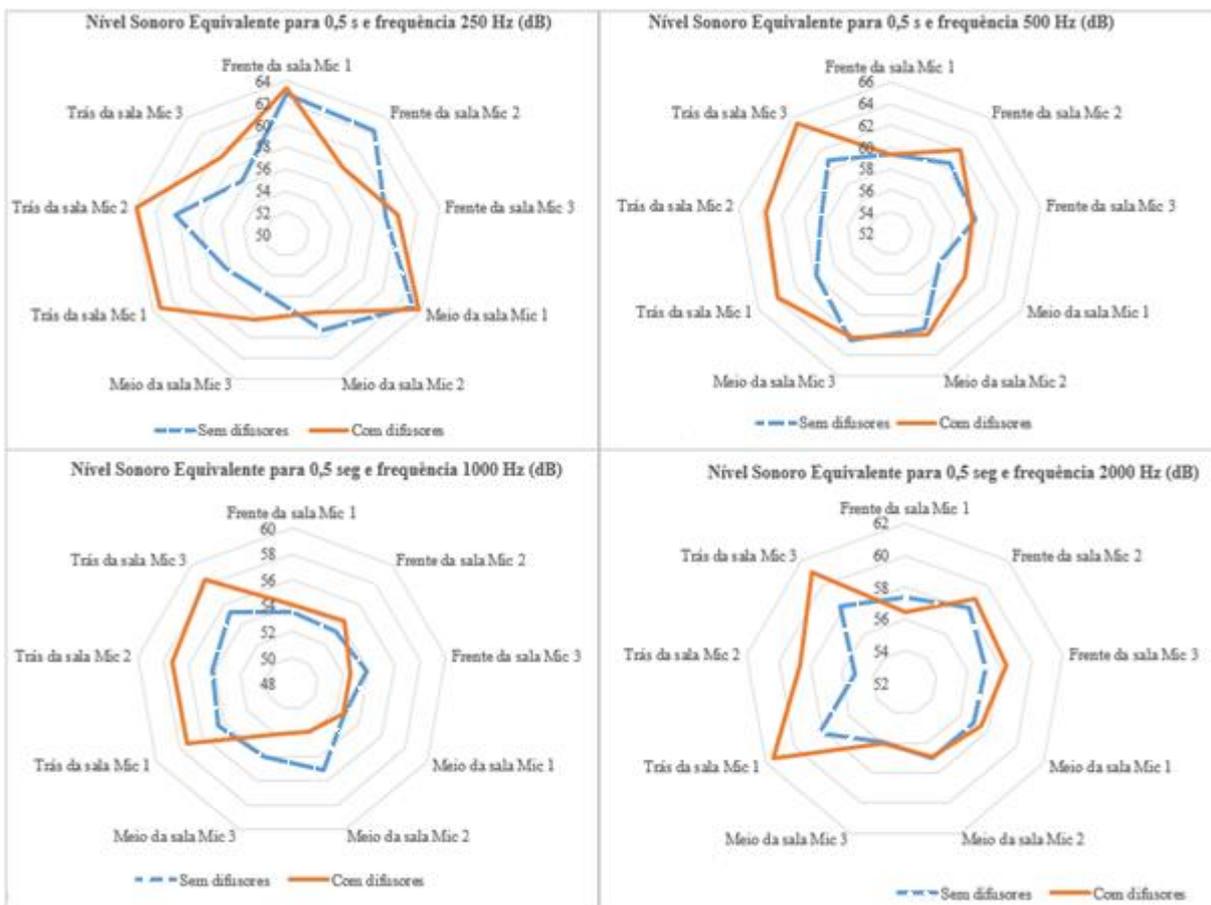


Figura 6.31 - Análise gráfica do nível sonoro equivalente para uma emissão de 0,5 s de duração e para as frequências de 250, 500, 1000 e 2000 Hz, sendo representada a leitura do nível sonoro equivalente para cada uma das nove posições de medição.

Analisando o desvio padrão das nove medições efetuadas (Quadro 6.4), as conclusões acima efetuadas são reforçadas. De um modo geral o desvio padrão das medições do nível sonoro equivalente para uma emissão de 0,5 s de duração, com os difusores é maior do que as medições sem os difusores. Ou seja, para este caso temos um aumento na variação dos valores, podendo concluir-se que para estas medições o campo sonoro equivalente para uma emissão de 0,5 de duração, com os difusores na sala, não apresenta um grau de homogeneidade maior, ao contrário do pretendido. No entanto, devido às limitações de tempo, a amostragem ao nível das leituras efetuadas em cada posição para este ensaio foi bastante pequena, não sendo assim possível afirmar-se com absoluta confiança que este é o comportamento real do difusor.

Quadro 6.4 - Desvio padrão do nível sonoro equivalente para uma emissão de 0,5 s de duração entre as medições efetuadas para as nove posições, com e sem os difusores ( $\Delta$ =COM-SEM)..

Desvio padrão (dB)			
Freq (Hz)	Sem	Com	$\Delta$
100	5,8	6,6	↑
125	1,8	1,9	↑
160	1,7	3,2	↑
200	3,1	2,4	↓
250	2,9	2,7	↓
315	2,6	1,3	↓
400	1,7	1,9	↑
500	1,5	2,1	↑
630	1,9	1,1	↓
800	1,9	2,1	↑
1 000	0,8	2,5	↑
1 250	1,5	1,7	↑
1 600	1,4	1,8	↑
2 000	1,1	1,9	↑
2 500	1,0	1,9	↑
3 150	1,0	1,8	↑
4 000	0,8	1,8	↑
5 000	0,6	2,1	↑
Média	1,8	2,3	↑

Os resultados das medições do nível sonoro equivalente para uma emissão de 5 s de duração, sem e com os difusores na sala, foram representados na Figura 6.32. Os valores obtidos para as medições efetuadas, com os difusores na sala, para as frequências de 250 e 500 Hz apresentam menor variação dos que as medições sem os difusores na sala, uma vez que as representações gráficas dos valores obtidos com os difusores são mais centradas e regulares. Pode daqui concluir-se que a instalação dos difusores aumenta o grau de difusão na sala para as frequências de 250 e 500 Hz. Tal verificação é reforçada analisando o desvio padrão das medições com e sem os difusores, no Quadro 6.5, onde se verifica que para estas frequências a variação dos valores obtidos com os difusores é menor do que sem os difusores na sala.

As representações gráficas dos valores obtidos para uma emissão de 5 s de duração, com os difusores na sala, são mais irregulares e descentradas, indicando que os valores obtidos apresentam uma maior variação com do que sem os difusores na sala. Analisando o desvio padrão para estas frequências (Quadro 6.5) de facto verifica-se uma maior variação dos valores com os difusores. Podendo daí concluir-se que não é atingida uma maior homogeneidade do campo sonoro nestas frequências.

Fazendo uma análise global dos valores obtidos para o nível sonoro equivalente para uma emissão de 5 s de duração *sem* e *com* os difusores na sala verifica-se que para as baixas frequências há uma melhoria significativa na homogeneidade do campo sonoro da sala com a aplicação dos difusores. No entanto para altas frequências verifica-se um comportamento contrário de tal forma que a média total dos desvios padrão para as medições efetuadas com e sem os difusores iguala-se. Como referido acima, devido a limitações de tempo, a amostragem de medições pretendida foi bastante inferior ao pretendido. Desta

forma as conclusões cingem-se a uma medição efetuada por posição para cada caso. E devendo tomar estes resultados como totalmente assertivos em relação ao comportamento real dos difusores.

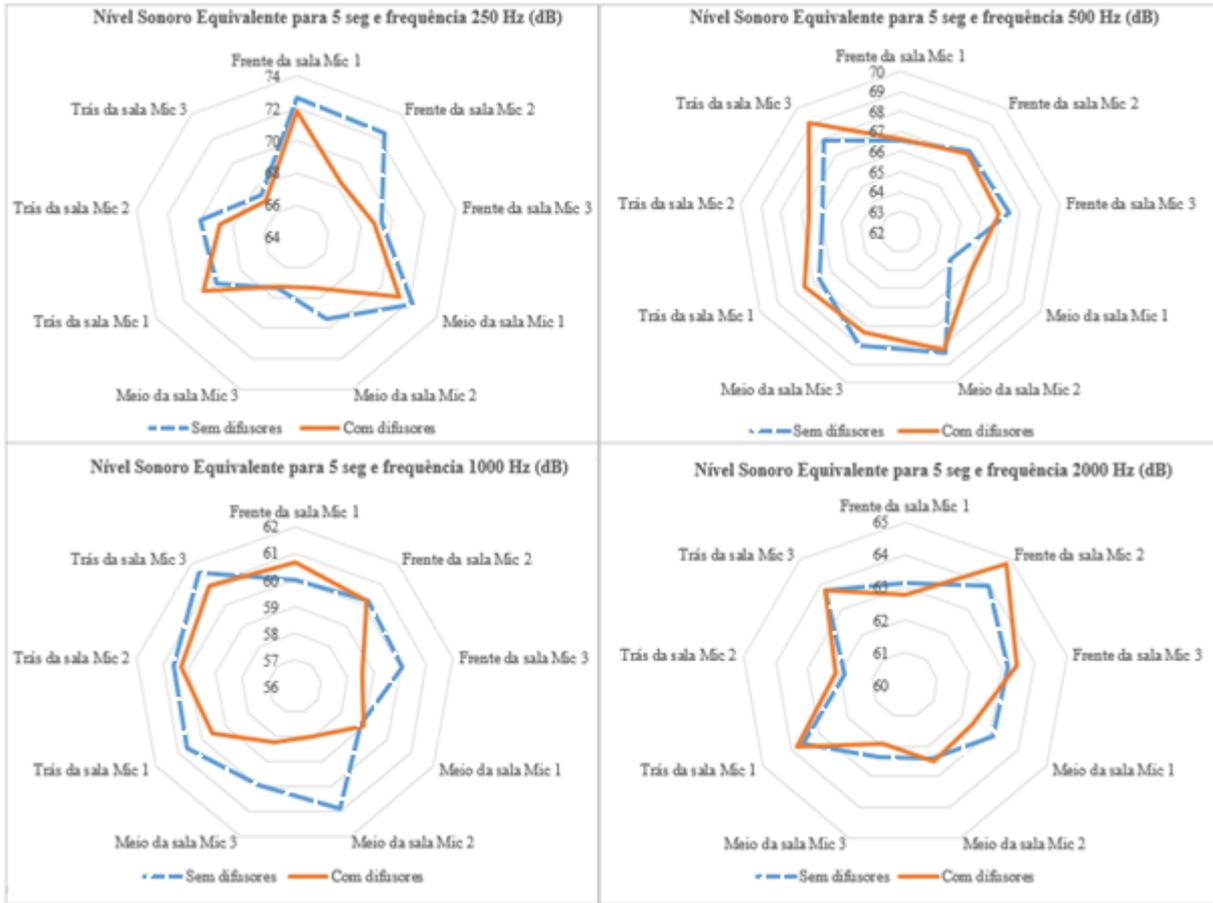


Figura 6.32 - Análise gráfica do nível sonoro equivalente para uma emissão de 5 s de duração e para as frequências de 250, 500, 1000 e 2000 Hz, sendo representada a leitura do nível sonoro equivalente para cada uma das nove posições de medição.

Quadro 6.5 - Desvio padrão do nível sonoro equivalente para uma emissão de 5 s de duração entre as medições efetuadas para as nove posições, com e sem os difusores ( $\Delta$ =COM-SEM).

Desvio padrão (dB)			
Freq (Hz)	Sem	Com	$\Delta$
100	3,1	3,2	↑
125	2,0	2,2	↑
160	1,5	1,5	↔
200	0,9	1,2	↑
250	2,0	1,8	↓
315	1,2	1,2	↔
400	1,3	1,2	↓
500	1,1	0,9	↓
630	1,1	1,4	↑
800	1,3	1,4	↑
1 000	0,7	1,1	↑
1 250	0,9	0,9	↔
1 600	0,9	0,9	↔
2 000	0,7	1,0	↑
2 500	0,7	0,7	↔
3 150	0,8	0,5	↓
4 000	0,5	0,4	↓
5 000	0,4	0,8	↑
Média	1,2	1,2	↔

Para uma amostragem de vinte medições por posição, agora apenas para os três microfones instalados no meio da sala, é notória a melhoria em relação à homogeneidade do campo sonoro com a instalação dos difusores na sala (Figura 6.29). Analisando o desvio padrão para as medições do nível sonoro equivalente para uma emissão de 1 s *com* e *sem* os difusores na sala (Quadro 6.6), verifica-se que há uma menor variação dos valores obtidos com os difusores na sala para a generalidade das frequências estudadas. Verificando-se a maior melhoria para a frequência dos 500 Hz, na qual é registada a maior diminuição do desvio padrão com os difusores. Desta forma é possível concluir que a instalação dos difusores aumenta o grau de difusão do campo sonoro na sala, obtendo-se um campo sonoro mais homogêneo no meio da sala para as reflexões iniciais.

Quadro 6.6 - Média e desvio padrão do nível sonoro equivalente para 1 s e uma amostragem de 20 medições por microfone para o meio da sala, *com* e *sem* os difusores.

média (dB)				Desvio padrão (dB)			
Freq (Hz)	MIC 1	MIC 2	MIC 3	Freq (Hz)	Sem	Com	Δ
100	64,7	67,0	64,1	100	1,52	1,43	↓
125	66,4	65,4	65,3	125	0,76	0,82	↑
160	68,7	67,0	67,0	160	1,23	0,88	↓
200	71,2	71,1	71,6	200	0,31	0,38	↓
250	69,1	66,0	66,3	250	1,59	1,47	↓
315	68,6	72,3	70,3	315	1,21	1,55	↑
400	68,7	69,0	67,5	400	0,83	0,66	↓
500	66,1	66,9	66,2	500	1,24	0,47	↓
630	64,4	65,9	65,5	630	0,45	0,72	↑
800	61,4	62,6	61,2	800	0,78	0,64	↓
1 000	57,8	57,6	57,0	1 000	0,84	0,42	↓
1 250	56,7	58,5	57,8	1 250	0,92	0,77	↓
1 600	58,8	61,7	59,6	1 600	1,35	1,27	↓
2 000	61,6	61,7	61,2	2 000	0,60	0,30	↓
2 500	62,4	62,4	62,0	2 500	0,48	0,29	↓
3 150	61,3	61,6	62,0	3 150	0,37	0,35	↓
4 000	58,6	59,2	59,5	4 000	0,49	0,47	↓
5 000	59,6	60,3	60,0	5 000	0,35	0,34	↓
				Média	0,85	0,73	↓

Analisando o desvio padrão para as medições do nível sonoro equivalente para uma emissão de 5 s *com* e *sem* os difusores na sala, para uma amostragem de 20 medições por posição (Quadro 6.7), verifica-se também uma variação menor dos valores obtidos com os difusores na sala para a generalidade das frequências estudadas. A maior expressividade desses resultados verifica-se nas médias frequências (500 e 1.000 Hz) onde é registada a maior diminuição do desvio padrão dos valores obtidos para cada posição com os difusores na sala, em comparação com o desvio padrão dos valores obtidos sem os difusores na sala. Dando assim indicações de um aumento do grau de difusão do campo sonoro e de uma maior homogeneidade do nível sonoro equivalente para as diferentes posições no meio da sala.

De facto, analisando de uma forma global a variação dos valores do nível sonoro equivalente para uma emissão de 5 s de duração, com os difusores na sala, para uma amostragem de 20 medições por posição verifica-se uma diminuição dessa variação em cerca de 11% em relação à variação verificada para as medições sem os difusores na sala.

Desta forma, pode concluir-se que resultados mais expressivos foram obtidos quando se realizou a análise para uma maior amostragem. Neste caso, para além da maior homogeneidade do campo sonoro para as reflexões iniciais (emissão de 1 s de duração), quando analisada a interferência dos difusores no campo sonoro para uma situação após as reflexões iniciais (emissão de 5 s de duração) verificou-se também uma maior homogeneidade do nível sonoro equivalente nas várias posições no meio da sala, logo verificou-se um aumento do grau de difusão do campo sonoro.

Quadro 6.7 - Média e desvio padrão do nível sonoro equivalente para 5 s e uma amostragem de 20 medições por microfone para o meio da sala, *com* e *sem* os difusores.

média (dB)				Desvio padrão (dB)			
Freq (Hz)	MIC 1	MIC 2	MIC 3	Freq (Hz)	Sem	Com	Δ
100	67,1	68,9	66,2	100	1,22	1,16	↓
125	70,1	69,1	67,5	125	1,05	1,05	↔
160	72,0	71,6	69,6	160	0,97	1,06	↑
200	73,8	73,2	73,4	200	0,26	0,25	↓
250	72,9	68,9	69,2	250	1,88	1,83	↓
315	70,6	72,9	72,0	315	0,65	0,96	↑
400	70,8	71,6	69,8	400	0,97	0,72	↓
500	67,4	69,1	68,6	500	1,39	0,73	↓
630	66,9	67,9	67,5	630	0,38	0,40	↑
800	64,1	64,7	63,9	800	0,80	0,37	↓
1 000	59,8	59,9	59,3	1 000	0,68	0,26	↓
1 250	58,3	60,2	59,3	1 250	0,80	0,78	↓
1 600	60,5	63,1	61,6	1 600	1,02	1,07	↓
2 000	63,7	63,7	62,9	2 000	0,53	0,39	↓
2 500	64,2	64,3	63,4	2 500	0,47	0,41	↓
3 150	62,5	63,2	63,5	3 150	0,50	0,42	↓
4 000	60,1	60,9	61,1	4 000	0,38	0,43	↑
5 000	61,0	61,8	61,4	5 000	0,34	0,36	↑
				Média	0,79	0,70	↓

## 6.5. ANÁLISE GLOBAL

Numa análise geral dos resultados obtidos, o protótipo apresenta resultados que ficam aquém do esperado para uma superfície difusora. No entanto, esta análise não pode ser considerada conclusiva em relação ao real desempenho acústico do protótipo proposto. Tal facto deve-se a vários fatores já apresentados anteriormente, tais como o número insuficiente de difusores disponibilizados para os ensaios, a adoção de metodologias de análise e medição simplificadas e a limitação ao nível do tempo disponível para o desenvolvimento de todo o trabalho experimental necessário. Se, por um lado, o coeficiente de dispersão ( $s$ ) obtido para o protótipo desenvolvido apresenta valores realmente baixos em relação ao pretendido, para a metodologia experimental simplificada, quando analisada a homogeneidade do campo sonoro instalado na sala após a aplicação dos difusores, os resultados revelam um melhor desempenho acústico com a superfície dimensionada. Esta melhoria é demonstrada quando analisada a homogeneidade do campo sonoro para uma grande amostragem de leituras.

## 7

## CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 7.1. CONCLUSÕES

O interesse da elaboração deste trabalho resulta da crescente valorização do bem-estar e da qualidade sonora como requisitos básicos exigidos pela sociedade. Atualmente a acústica apresenta um papel mais valorizado, sendo desta forma a difusão acústica (dispersão do som) essencial na arquitetura de espaços onde seja necessária uma ótima distribuição do som e um equilíbrio espectral. Neste sentido, este trabalho surge como uma boa oportunidade para clarificar e aprofundar os conhecimentos necessários à compreensão do fenómeno de difusão acústica, ao dimensionamento de superfícies difusoras mais adequadas às exigências de desempenho acústico, e ao desenvolvimento e compreensão das metodologias de análise e avaliação do desempenho acústico das superfícies difusoras.

O grande objetivo deste trabalho foi pois o dimensionamento de um difusor e a caracterização e avaliação do seu desempenho.

Ao nível do dimensionamento do difusor, foi necessária a compreensão dos fenómenos de difusão e dispersão da energia sonora, de forma a alcançar uma superfície de acordo com o objetivo pretendido. Foram estudados os vários tipos de superfícies possíveis e delineadas as premissas para o dimensionamento do difusor. Quando analisada a oferta relativamente a superfícies difusoras no mercado encontrou-se uma vasta diversidade de superfícies, desde difusores simples baseados no modelo básico de Schroeder e na sequência residual quadrática até modelos mais complexos com base em algoritmos de otimização como difusores curvos otimizados ou mesmo até difusores híbridos e ativos. Embora exista uma diversidade de superfícies difusoras no mercado, a informação relativamente ao dimensionamento destas superfícies é bastante escassa. São indicadas metodologias, bases matemáticas e programas de modelação matemática, no entanto sempre numa abordagem superficial. Esta foi uma das principais dificuldades encontradas no desenvolvimento deste trabalho, a definição de uma metodologia de dimensionamento da superfície difusora e a compatibilização com os requisitos impostos.

Neste trabalho também foram sentidas as dificuldades de trabalho em ambiente real, pois foi necessário realizar o trabalho em cooperação com a empresa *Castelhano & Ferreira* e com o Laboratório de Acústica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, que por muitas vezes foi de difícil conciliação com os prazos impostos. Das limitações da *Castelhano & Ferreira* ao nível de fabricação e da dificuldade em conciliar o tempo e trabalho produzido neste âmbito com aquele decorrente da sua atividade económica, verificaram-se algumas dificuldades condicionantes para a realização deste

trabalho. Foi necessária a modificação de soluções de modo a compatibilizar a solução proposta com os requisitos de fabricação impostos, muito em especial, e a quantidade da amostra disponibilizada inviabilizou em parte uma análise experimental mais detalhada da solução proposta.

A necessidade de avaliação do desempenho acústico do painel dimensionado originou a procura de coeficientes que pudessem comparar a qualidade e eficácia da solução. Nesse sentido surgiram dois coeficientes, com metodologias de determinação definidas normativamente: o coeficiente de difusão e o coeficiente de dispersão. No entanto as metodologias experimentais para a determinação desses coeficientes demonstraram-se bastante complexas. A obtenção destes coeficientes esbarrou com dificuldades técnicas ao nível dos equipamentos de medição necessários e ao nível do cumprimento dos requisitos impostos que eram necessários compatibilizar. Para além disso, a complexidade associadas à produção e análise das amostras à escala, bem como as questões da mesa rotativa, tempos de medição e execução dos ensaios e a dificuldade de interpretação dos documentos normativos conduziram à formulação e adoção de metodologias simplificadas para a caracterização e avaliação do desempenho acústico do difusor dimensionado.

As metodologias simplificadas adotadas para a medição e caracterização do desempenho acústico do difusor dimensionado conduziram a uma análise menos detalhada do que o esperado, não sendo desta forma possível a comparação com o desempenho de outras superfícies no entanto derivado às condicionantes acima indicadas.

Em suma, com este trabalho foram abordados e desenvolvidos processos de dimensionamento de superfícies difusoras 2D baseadas em sequências residuais quadráticas, nos quais foram incluídos processos de otimização da superfície de modo a adaptar as soluções propostas aos requisitos impostos por limitações de fábrica e foram adotadas metodologias de avaliação e medição do desempenho acústico das superfícies difusoras atendendo às condições de ensaio que foram possibilitadas e às limitações que surgiram ao longo do procedimento experimental. Este aspeto é sem dúvida um dos pontos de interesse neste trabalho, uma vez que com os recursos disponíveis foram realizadas práticas simplificadas que podem servir de base para abordagens futuras ao tema.

Relativamente aos resultados deste trabalho importa salientar os seguintes aspetos:

- O difusor fabricado foi um difusor 2D, cujo dimensionamento da superfície foi baseado numa matriz sequencial residual quadrática;
- Quanto ao seu desempenho acústico: o coeficiente de dispersão determinado não pode ser considerado conclusivo, uma vez que os valores obtidos foram anormalmente baixos para este tipo de superfície difusora, motivado pela quantidade insuficiente de painéis difusores disponibilizados para a avaliação; quanto ao aumento do grau de difusão do campo sonoro numa sala “acusticamente pequena”, os resultados revelam um melhor desempenho acústico da superfície dimensionada, baseado na maior homogeneidade do campo sonoro verificada quando aplicados os difusores.

## 7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Ao nível de desenvolvimentos futuros era importante que houvesse maior clarificação ao nível das metodologias de ensaio para determinação dos coeficientes de avaliação das superfícies difusoras, permitindo assim obter um padrão de avaliações que permitiriam a comparação das diversas superfícies difusoras obtidas de igual modo. Pois o que se verifica no mercado atual é que essas comparações são

realizadas com valores baseados em ensaios com diferentes abordagens e simplificações em relação às metodologias normativas.

Seria também interessante avaliar o difusor dimensionado sem limitações e com qualidade de execução necessária para a obtenção de resultados credíveis do coeficiente de difusão e de dispersão. Seria importante realizar os ensaios de determinação do coeficiente de dispersão simplificado (CDS) e determinação da homogeneidade do campo sonoro (HCS) para um maior número de painéis, garantindo assim o cumprimento das dimensões mínimas normativas. E também proceder a estas medições com um prazo mais alargado, uma vez que o tempo disponível para a realização destes ensaios no âmbito desta dissertação revelou-se escasso. Desta forma seria possível medir e avaliar o desempenho acústico do difusor com maior grau de confiança.

Ao nível das metodologias de avaliação do desempenho acústico referidas neste trabalho seria interessante realizar um estudo de comparação no ensaio de determinação do coeficiente de dispersão (ensaio CDS), analisado a diferença de resultados obtidos para um ensaio realizado com e sem a mesa giratória. Desta forma seria possível determinar qual a sua influência e necessidade de uso para a obtenção do coeficiente de dispersão.

Relativamente ao ensaio de determinação do grau de difusão provocado pelo difusor no campo sonoro de uma sala “acusticamente pequena” seria importante realizar uma análise para uma maior malha de pontos (diferentes posições dos microfones) e para uma maior amostragem de leituras para cada posição com vista à obtenção de resultados mais conclusivos. Recordar-se que os resultados obtidos para uma amostragem de 20 medições por posição foram os mais satisfatórios relativamente ao desempenho do difusor, no entanto, por motivos de limitação de tempo, apenas foi possível realizar essa medição para três posições centrais. Daí a motivação e o interesse em realizar as leituras para um maior número de posições e desta forma avaliar a interferência do difusor em todo o campo sonoro.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Cox, T.J. e P. D'Antonio, *Acoustic Absorbers And Diffusers: Theory, Design And Application*, Taylor & Francis e-Library: Spon Press, 2005.
2. AES-4id-2001, *AES information document for room acoustics and sound reinforcement systems - Characterisation and measurement of surface scattering uniformity*, J.A.E. Soc. Editor, 2001.
3. ISO 17497-1:2004, *Acoustics – Sound-scattering properties of surfaces. Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room*, 2004.
4. Tadeu, A., *et al.*, "*Acústica Aplicada*" *Sebenta de apoio à disciplina*: DEC-FCTUC, 2010.
5. D'Antonio, P. e T.J. Cox, *Diffusor application in rooms*. *Applied Acoustics*, 60(2): p. 113-142, 2000.
6. Kuttruff, H., *Room Acoustics*. 4th edition, Institut fur Technische Akustik, Technische Hochschule Aachen, Aachen, Germany: Taylor & Francis e-Library, 2001.
7. Everest, F.A. e K.C. Pohlmann, *Master Handbook of Acoustics* 5th edition: The McGraw-Hill Companies, Inc. Editor, 2009.
8. Rathsam, J. e L.M. Wang, *A Review of Diffuse Reflections in Architectural Acoustics*. *Architectural Engineering - Faculty Publications*. Paper 14, 2006.
9. D'Antonio, P. e T. Cox *Technical Bulletin on the Application od Diffusion in Critical Listening Rooms*. 2003.
10. D'Antonio, P., *iRoom: The Next Generation Media Room*: RPG Diffusor Systems, Inc., 2012.
11. D'Antonio, P. e T. Cox *Technical Bulletin on the Application of Diffusion in Critical Listening Rooms*, 2003.
12. Meireles, P.E.A., *Estudo do fenómeno da difusão sonora: soluções à base de painéis difusores*, Dissertação para Mestrado em Engenharia Civil - Especialidade em Construções Civis, FEUP, 2012.

13. The BlackBird Academy [Online], <http://www.blackbirdstudio.com>, acessado em Junho, 2013.
14. Wellington Convention Centre [Online], <http://www.lca2010.org.nz/about/venue>, acessado em Junho, 2013.
15. D'Antonio, P. e B. Rife, *The state of the art in measurement of acoustical coefficients*, 2002.
16. Vorländer, M. e E. Mommertz, *Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients*. Applied Acoustics: p. 60, 2000.
17. D'Antonio, P. and T.J. Cox, *Engineering art: the science of concert hall acoustics*. Interdisciplinary Science Reviews: p. 28, 2003.
18. Perry, T., *The Lean Optimization Of Acoustic Diffusers: Design By Artificial Evolution, Time Domain Simulation And Fractals*, Dissertação para Mestrado em Engenharia Eletrotécnica, University of Victoria Faculty of Engineering, 2011.
19. RPG Diffusor Systems [Online], <http://www.rpginc.com>, acessado em Maio, 2013.
20. D'Antonio, P. e T.J. Cox, *Acoustic phase gratings for reduced specular reflection*. Applied Acoustics. 60(2): p. 167-186, 2000.
21. Lin, F.M., *et al.*, *An experimental investigation into the sound-scattering performance of wooden diffusers with different structures*. Applied Acoustics. 71(1): p. 68-78, 2010.
22. BAi, Consultants in Acoustics and A/V [Online], <http://www.baiaustin.com>, acessado em Junho, 2013.
23. LMNts, Acoustic Scattering Research [Online], <http://lmnts.lmnarchitects.com/>, acessado em Junho, 2013.
24. Auralex Acoustics [Online], <http://www.auralex.com/sustain/peakpyramid.asp>, acessado em Maio, 2013.
25. Áudio Sonora, Engenharia Acústica [Online], <http://www.audiosonora.com.br/>, acessado em Junho, 2013.
26. SONY Centre [Online], <http://www.sonycentre.ca/Home/Media/Sony-Centre.aspx>, acessado em Junho, 2013.
27. Xiao, L., T.J. Cox, e M.R. Avis, *Active diffusers: some prototypes and 2D measurements*, Journal of Sound and Vibration. 285(1-2): p. 321-339, 2005.
28. Cox, T.J., M.R. Avis, e L. Xiao, *The potential for room acoustic active diffusers*. Acoustics and Electronic Engineering, University of Salford, 2002.
29. Ramires, F., *Coeficiente de Espalhamento Sonoro de Painéis Perfurados*, Dissertação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitectura e Urbanismo, 2011.
30. AMFG Reflex - *Software Manual*: AFMG Technologies GmbH, 2011.
31. Mommertz, E., *Determination of Scattering Coefficients from Reflection Directivity of Architectural Surfaces*: Applied Acoustics. p. 201-203, 2000.

32. Portal da Madeira - MDF [Online], <http://portaldamadeira.blogspot.pt/2010/04/mdf-medium-density-fibreboard.html>, acessado em Julho, 2013.
33. D'Antonio, P. e T.J. Cox, *A Standard Method for Assessing Diffusor Quality*, 17th International Congress for Acoustics, Rome, Italy, 2001.
34. Gomes, M.H.d.A., *Determination of the Acoustical Random-Incidence Scattering Coefficient*, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Setembro, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
35. NP EN 354, *Medição da absorção sonora em câmara reverberante*, 2007.
36. Prodi, N. and C. Visentin, *An experimental evaluation of the impact of scattering on sound field diffusivity*, The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 133, issue 2, p. 810, 2013.
37. Jeon, J.Y. and Y.S. Jang, *Diffuser design in concert halls using scale models*. Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics ISRA, Melbourne, Australia, 2010.
38. ISO 9613-1, *Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors, Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere*, 1993.
39. Oliveira de Carvalho, A.P., *Acústica Ambiental e de Edifícios*, Edição 8.3, FEUP, 2012.
40. Redondo, J., J. Ramis, e J. Alba, *Influence of Different Kind of Diffusers on the Degree of Diffusion of a Room*, 17th International Congress for Acoustics, Rome, Italy, 2001.



## **ANEXOS**

**ANEXO A – RELATÓRIOS DE SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO  
ACÚSTICO DAS SUPERFÍCIES DO DIFUSOR NO PROGRAMA AFMG**

**ANEXO B – REGISTOS E FOLHAS DE CÁLCULO DO ENSAIO CDS  
(COEFICIENTE DE DISPERSÃO SIMPLIFICADO)**

**ANEXO C – REGISTOS E FOLHAS DE CÁLCULO DO ENSAIO HCS  
(HOMOGENEIDADE DO CAMPO SONORO)**



## **ANEXO A**

**Relatórios da simulação no programa AFMG**

**A.1 – LINE A2 – sem inclinações**

**A.2 – LINE A2 – com inclinações**

**A.3 – LINE A2 – com inclinações (modificada)**

**A.4 – LINE B2 – sem inclinações**

**A.5 – LINE B2 – com inclinações**



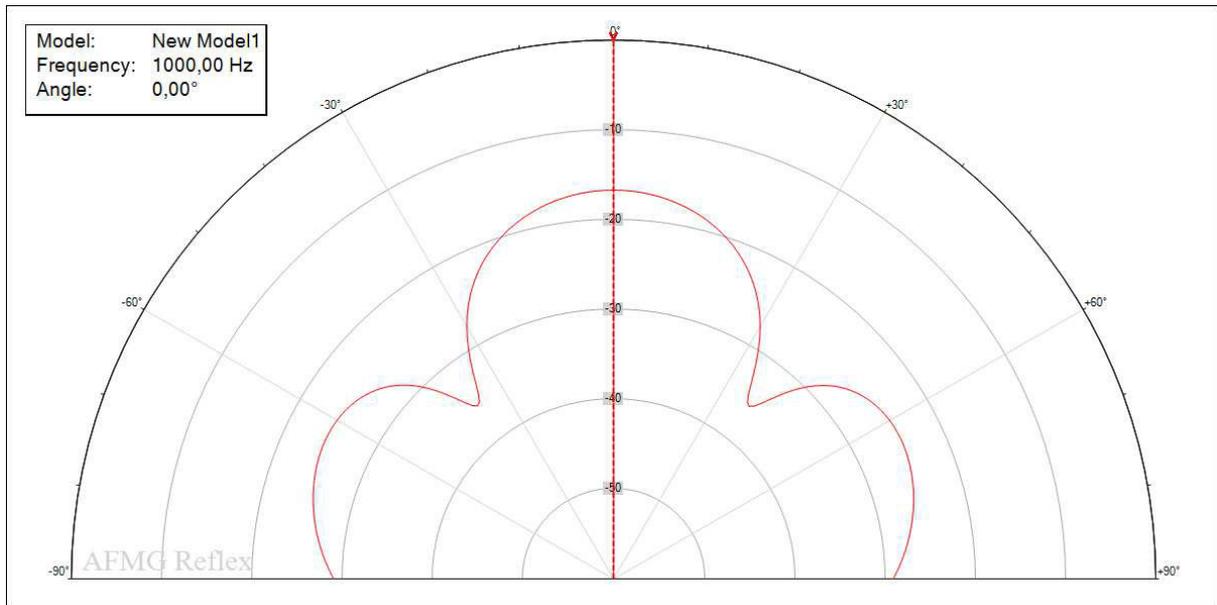
# AFMG Reflex Report

LINE A2 - sem inclinações



Creation date: 13/05/2013  
AFMG Reflex Version: 1.0.6

# 1. Spatial Response Plot

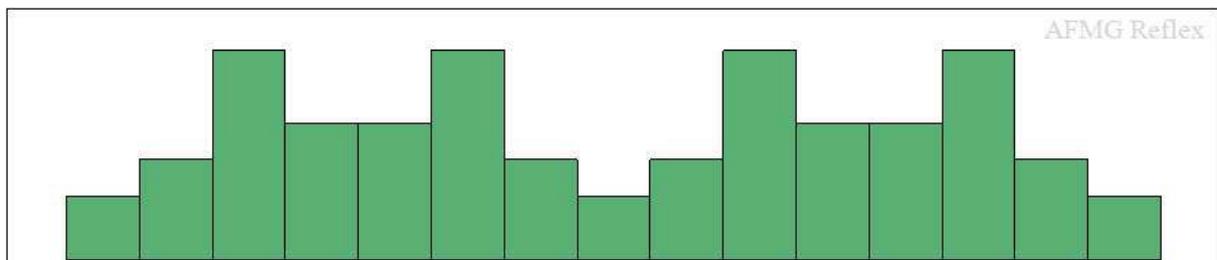


Spatial Response Plot

## 2. Models

### 2.1 New Model1

#### 2.1.1 Model Outline

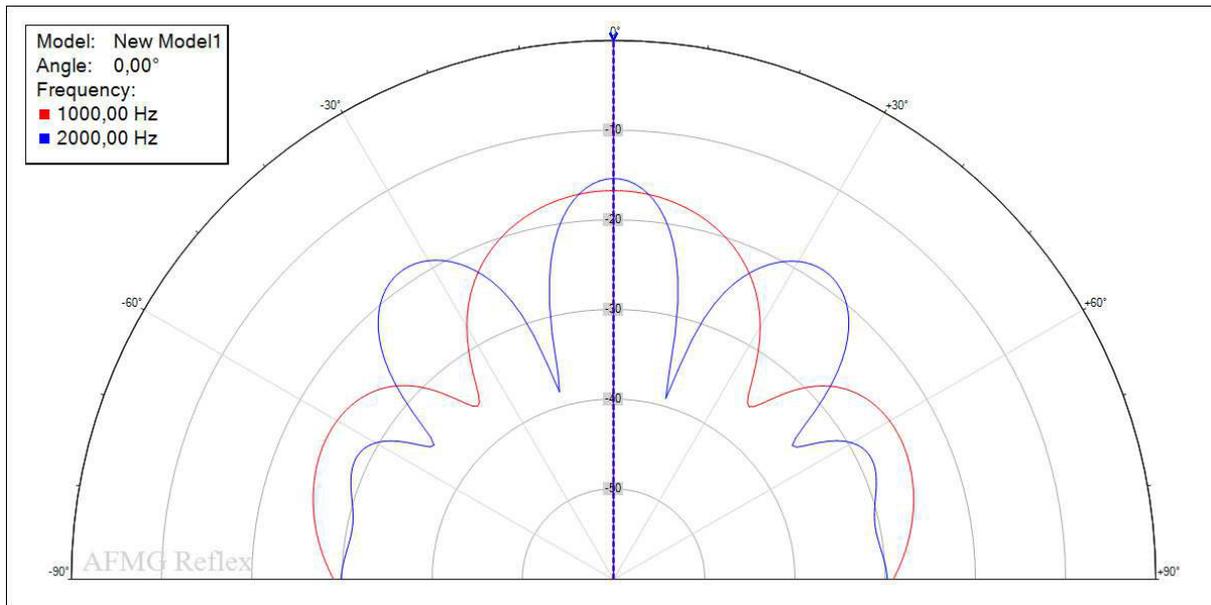


Model Outline

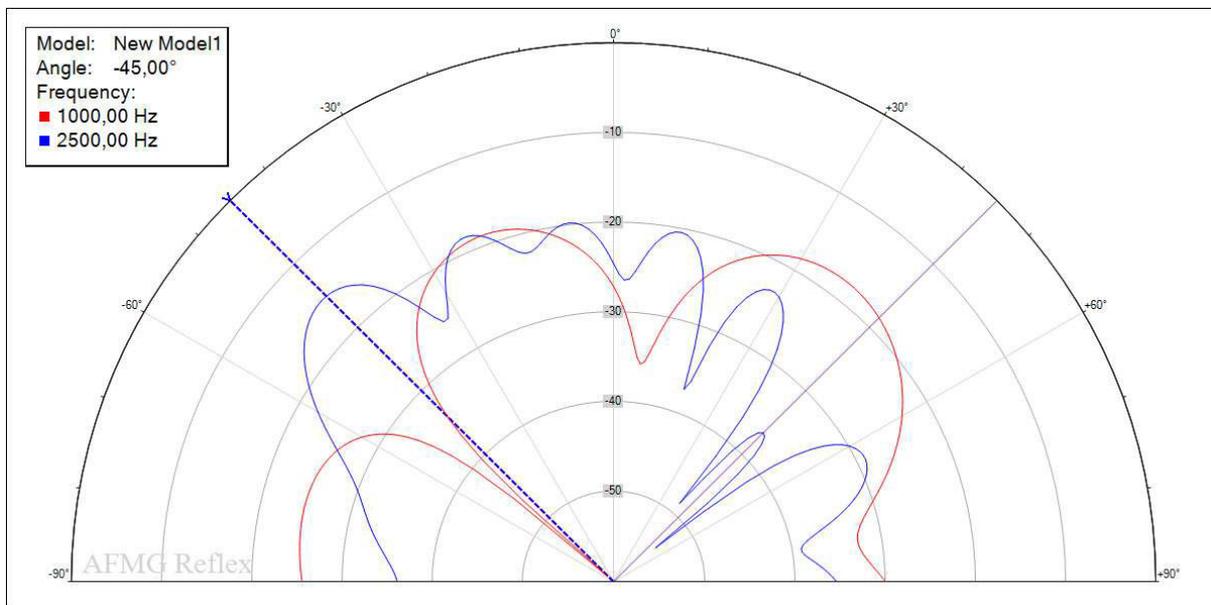
Element no.	Type	Width[cm]	Depth Base[cm]	Depth Top[cm]
1	Rectangle	4,0	3,5	0,0
2	Rectangle	4,0	5,5	0,0
3	Rectangle	4,0	11,5	0,0
4	Rectangle	4,0	7,5	0,0
5	Rectangle	4,0	7,5	0,0
6	Rectangle	4,0	11,5	0,0
7	Rectangle	4,0	5,5	0,0
8	Rectangle	4,0	3,5	0,0
9	Rectangle	4,0	5,5	0,0
10	Rectangle	4,0	11,5	0,0

11	Rectangle	4,0	7,5	0,0
12	Rectangle	4,0	7,5	0,0
13	Rectangle	4,0	11,5	0,0
14	Rectangle	4,0	5,5	0,0
15	Rectangle	4,0	3,5	0,0

### 2.1.2 Spatial Response Plots



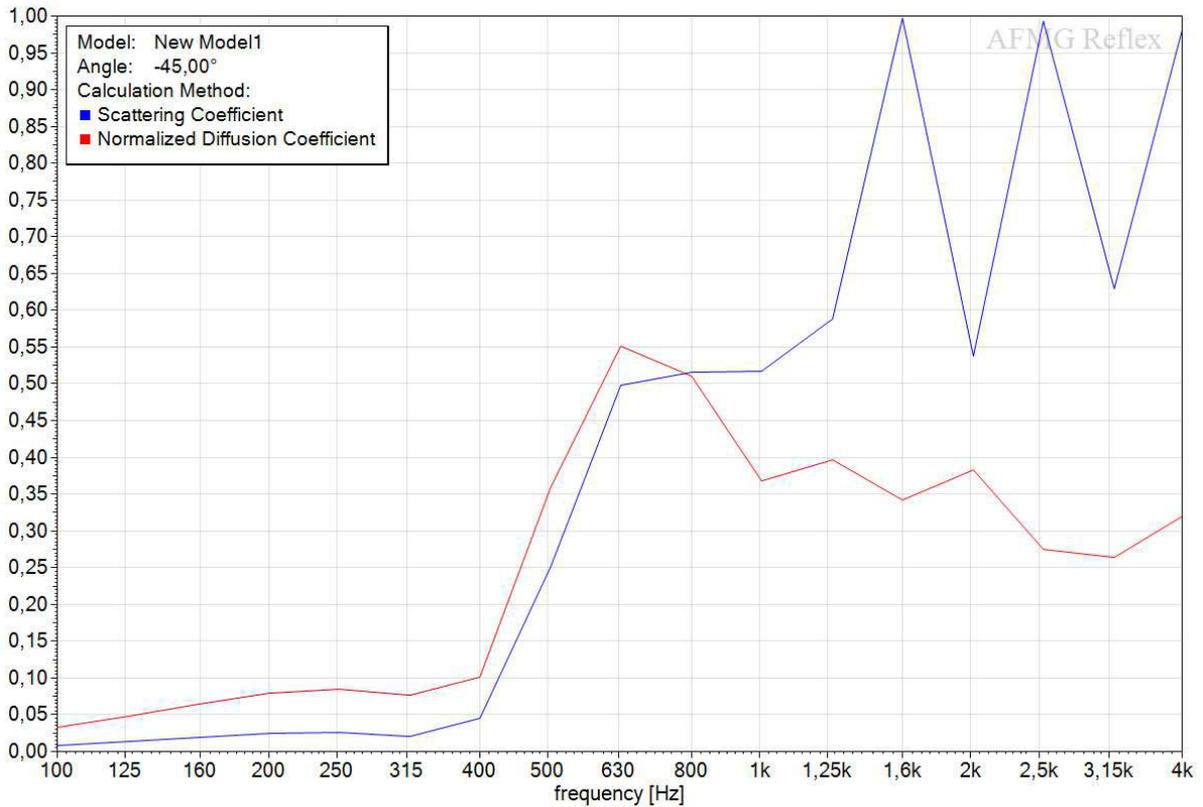
Spatial Response



Spatial Response

### 2.1.3 Coefficients Plots

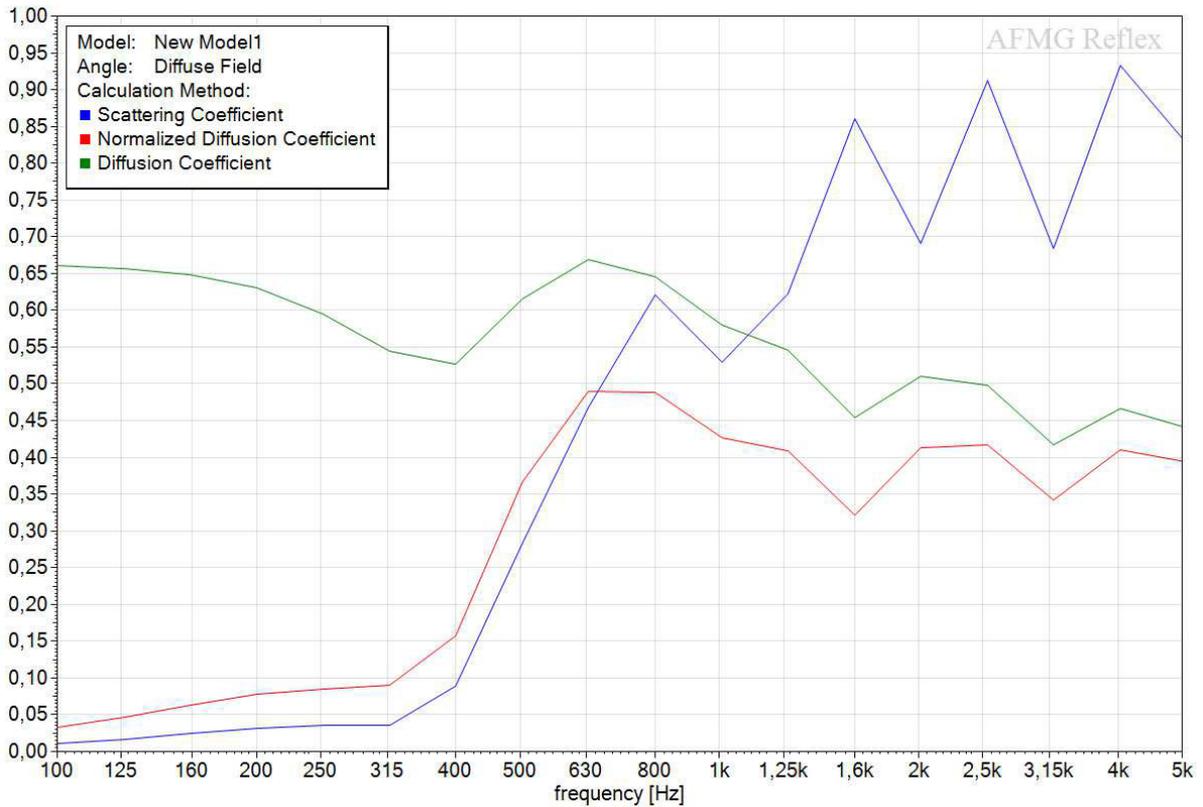
Angle: -45°, Frequency Range: [100 Hz, 4000 Hz] (From Current Selection)



**Coefficients (From Current Selection)**

Frequency [Hz]	Scattering Coefficient	Normalized Diffusion Coefficient	Diffusion Coefficient
100	0,009	0,033	0,660
125	0,013	0,048	0,657
160	0,019	0,064	0,649
200	0,024	0,079	0,631
250	0,026	0,085	0,594
315	0,021	0,076	0,535
400	0,046	0,101	0,492
500	0,252	0,360	0,609
630	0,498	0,551	0,710
800	0,516	0,511	0,664
1000	0,518	0,368	0,542
1250	0,588	0,397	0,541
1600	0,997	0,342	0,473
2000	0,538	0,383	0,484
2500	0,993	0,275	0,370
3150	0,629	0,264	0,342
4000	0,992	0,321	0,378

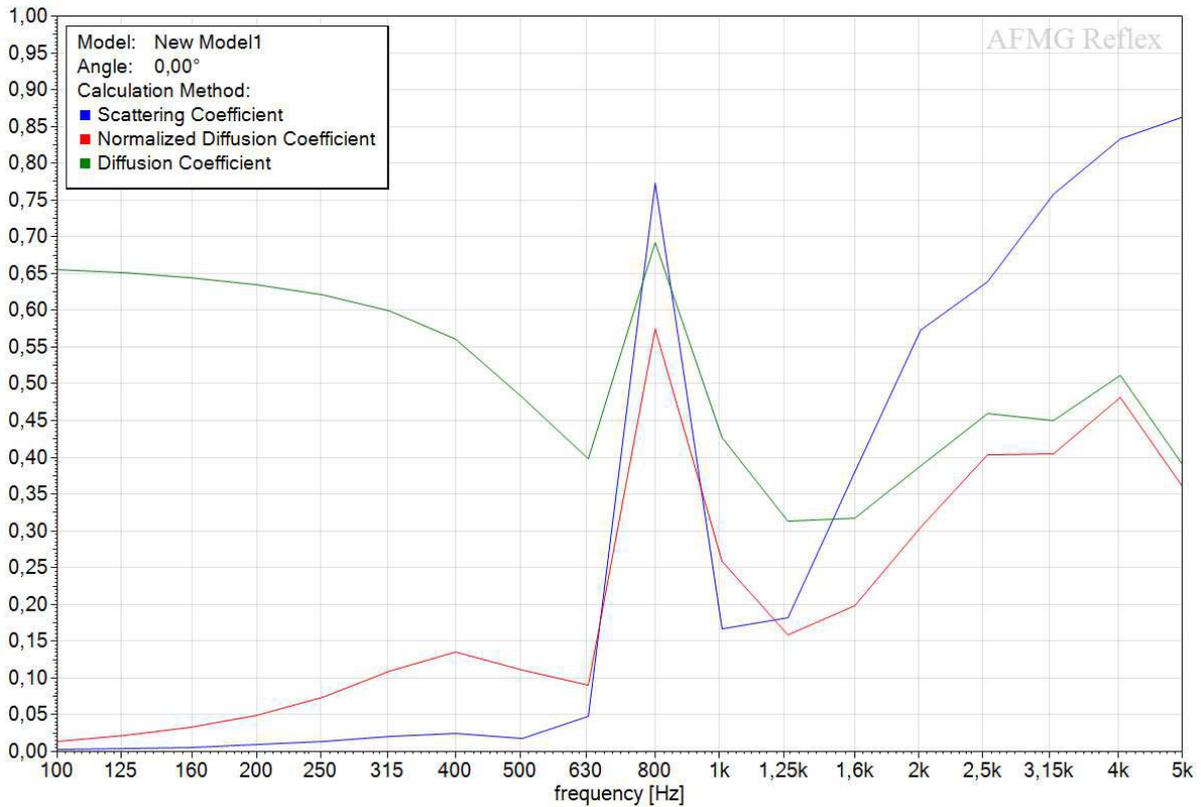
**Angle: Random Incidence, Frequency Range: [100 Hz, 5000 Hz]**



**Coefficients**

Frequency [Hz]	Scattering Coefficient	Normalized Diffusion Coefficient	Diffusion Coefficient
100	0,011	0,033	0,660
125	0,017	0,047	0,657
160	0,024	0,063	0,649
200	0,032	0,078	0,630
250	0,036	0,085	0,595
315	0,036	0,090	0,544
400	0,089	0,157	0,527
500	0,283	0,367	0,615
630	0,468	0,490	0,668
800	0,621	0,489	0,646
1000	0,530	0,426	0,580
1250	0,622	0,409	0,545
1600	0,860	0,321	0,455
2000	0,691	0,413	0,510
2500	0,912	0,417	0,498
3150	0,684	0,342	0,417
4000	0,933	0,410	0,466
5000	0,828	0,394	0,441

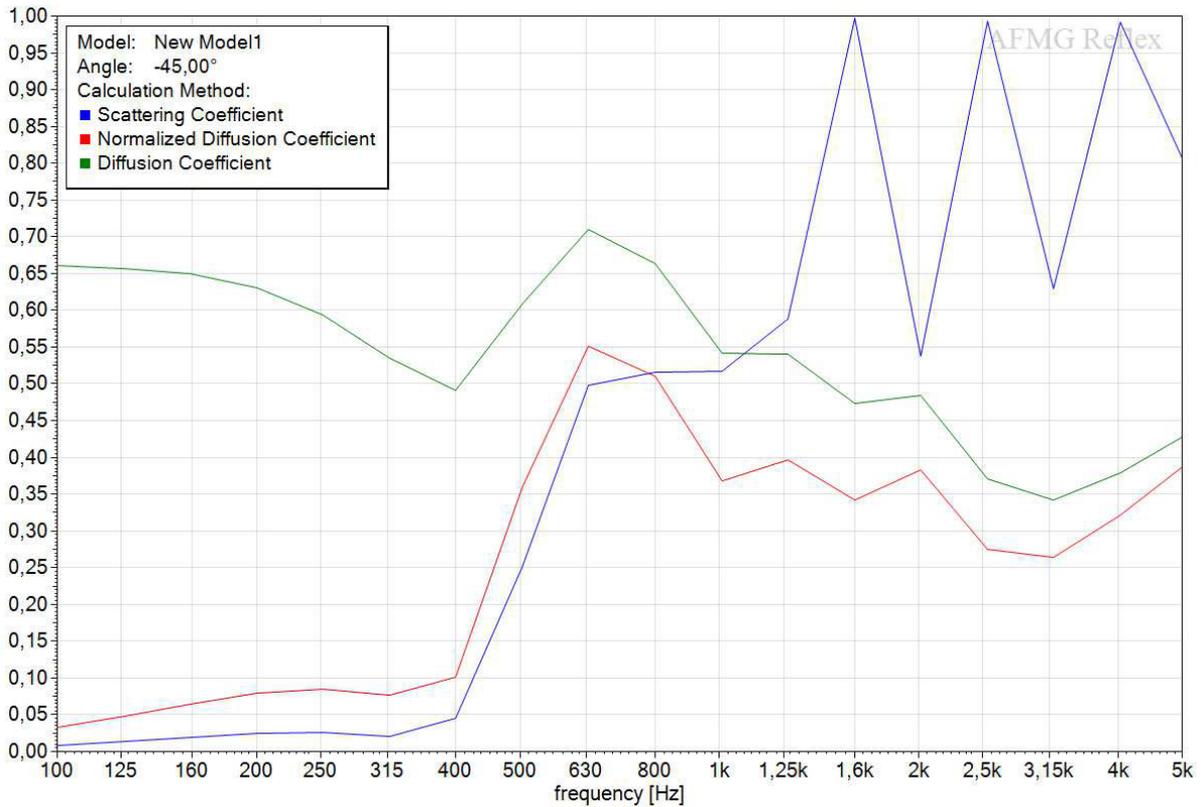
Angle: 0°, Frequency Range: [100 Hz, 5000 Hz]



**Coefficients**

Frequency [Hz]	Scattering Coefficient	Normalized Diffusion Coefficient	Diffusion Coefficient
100	0,002	0,014	0,655
125	0,004	0,022	0,651
160	0,006	0,033	0,645
200	0,009	0,050	0,635
250	0,014	0,075	0,621
315	0,021	0,109	0,599
400	0,024	0,136	0,561
500	0,018	0,111	0,482
630	0,047	0,090	0,398
800	0,773	0,575	0,692
1000	0,166	0,259	0,427
1250	0,182	0,158	0,313
1600	0,380	0,198	0,317
2000	0,574	0,306	0,388
2500	0,638	0,403	0,460
3150	0,758	0,405	0,450
4000	0,833	0,481	0,512
5000	0,864	0,353	0,383

**Angle: -45°, Frequency Range: [100 Hz, 5000 Hz]**



**Coefficients**

Frequency [Hz]	Scattering Coefficient	Normalized Diffusion Coefficient	Diffusion Coefficient
100	0,009	0,033	0,660
125	0,013	0,048	0,657
160	0,019	0,064	0,649
200	0,024	0,079	0,631
250	0,026	0,085	0,594
315	0,021	0,076	0,535
400	0,046	0,101	0,492
500	0,252	0,360	0,609
630	0,498	0,551	0,710
800	0,516	0,511	0,664
1000	0,518	0,368	0,542
1250	0,588	0,397	0,541
1600	0,997	0,342	0,473
2000	0,538	0,383	0,484
2500	0,993	0,275	0,370
3150	0,629	0,264	0,342
4000	0,992	0,321	0,378
5000	0,795	0,391	0,432



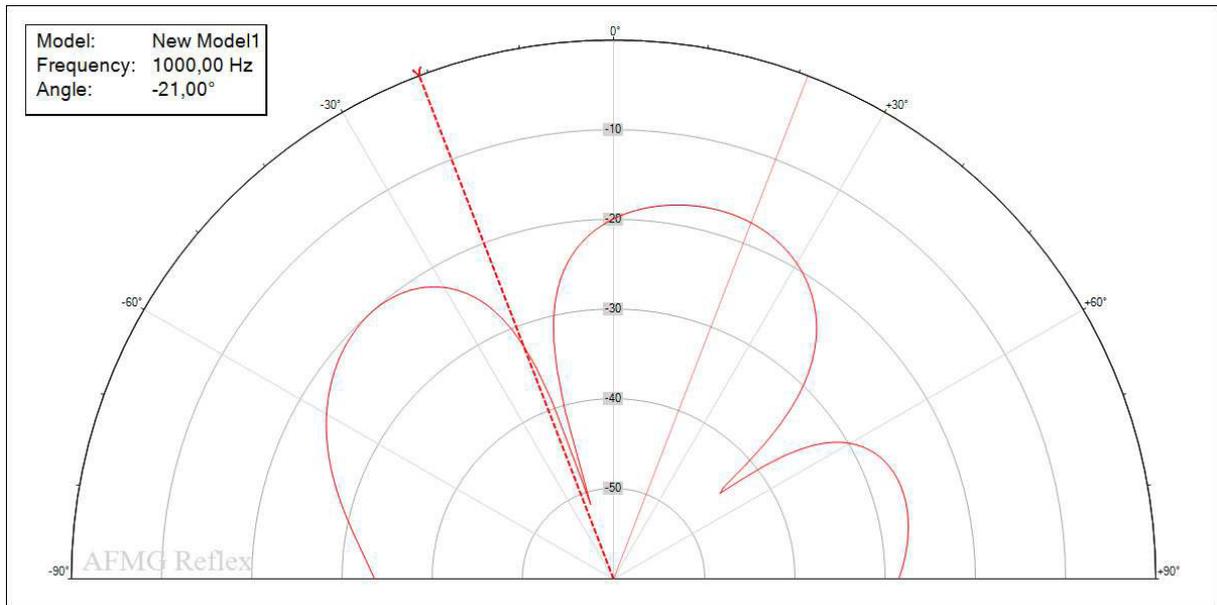
# AFMG Reflex Report

LINE A2 - inclinações



Creation date: 13/05/2013  
AFMG Reflex Version: 1.0.6

# 1. Spatial Response Plot

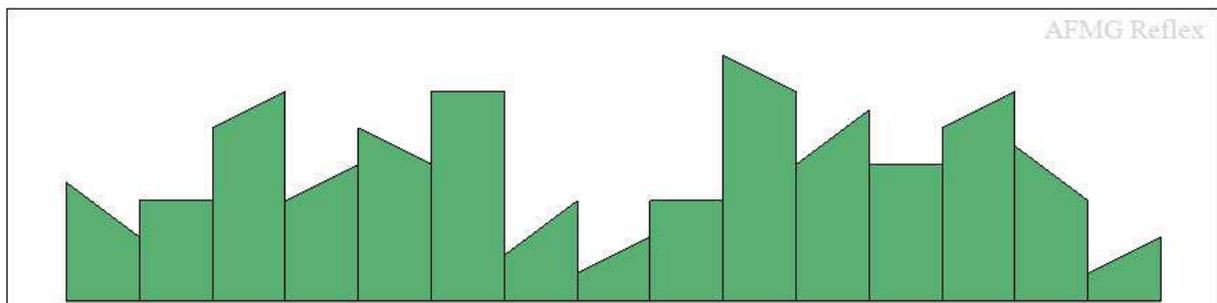


Spatial Response Plot

## 2. Models

### 2.1 New Model1

#### 2.1.1 Model Outline

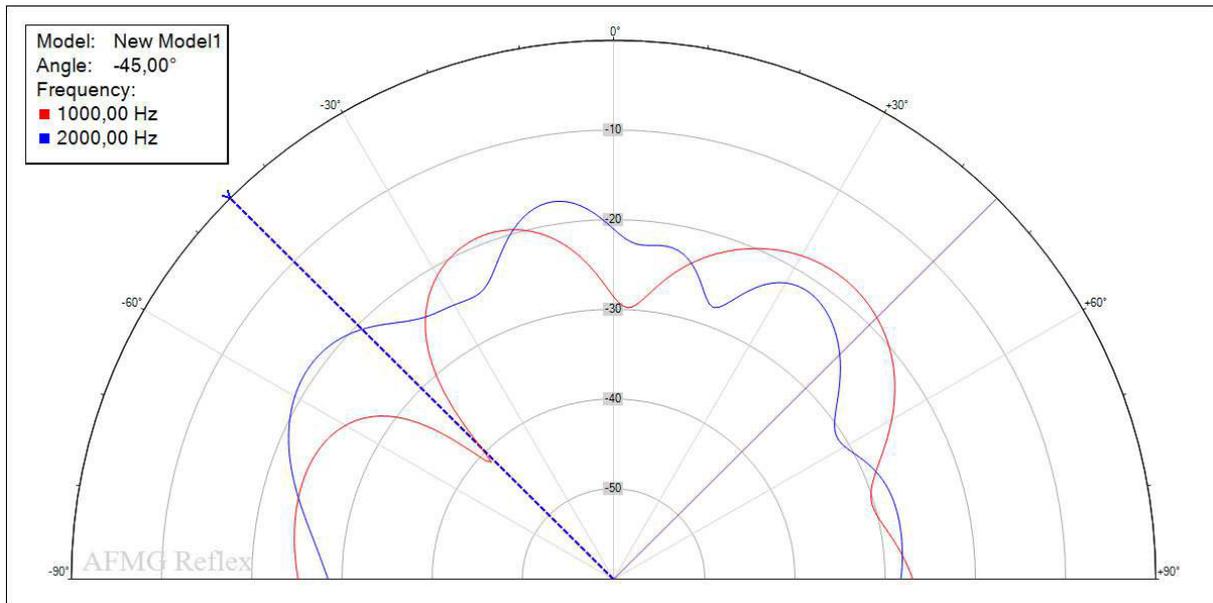


Model Outline

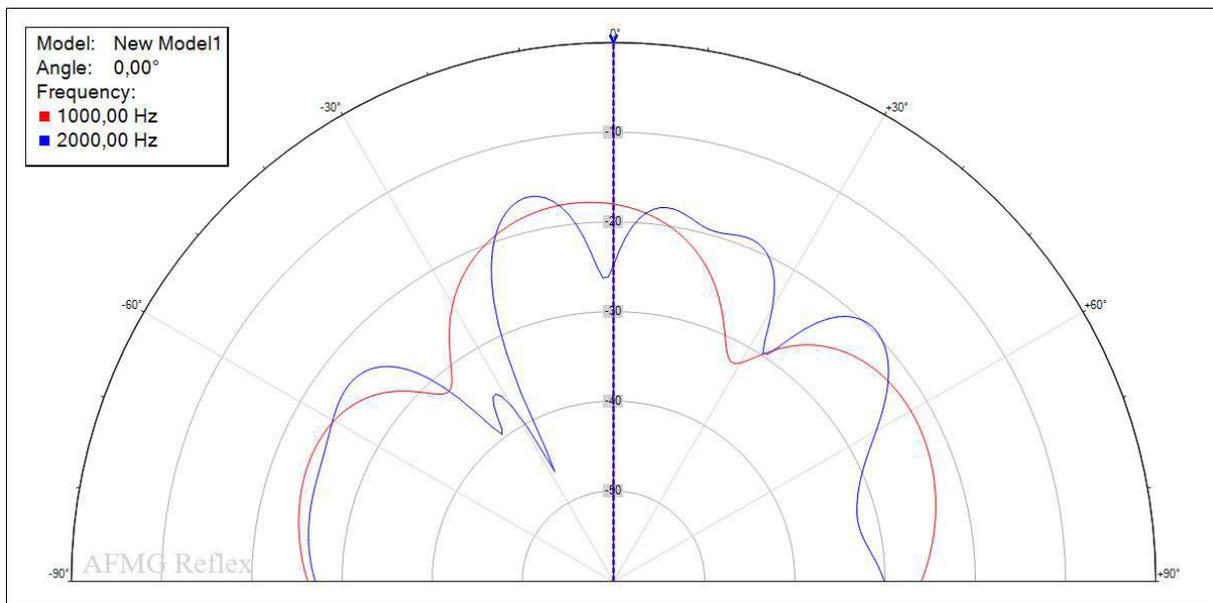
Element no.	Type	Width[cm]	Depth Base[cm]	Depth Top[cm]
1	Triangle	4,0	6,5	3,0
2	Triangle	4,0	5,5	0,0
3	Triangle	4,0	11,5	2,0
4	Triangle	4,0	7,5	2,0
5	Triangle	4,0	9,5	2,0
6	Triangle	4,0	11,5	0,0
7	Triangle	4,0	5,5	3,0
8	Triangle	4,0	3,5	2,0
9	Triangle	4,0	5,5	0,0

10	Triangle	4,0	13,5	2,0
11	Triangle	4,0	10,5	3,0
12	Triangle	4,0	7,5	0,0
13	Triangle	4,0	11,5	2,0
14	Triangle	4,0	8,5	3,0
15	Triangle	4,0	3,5	2,0

### 2.1.2 Spatial Response Plots



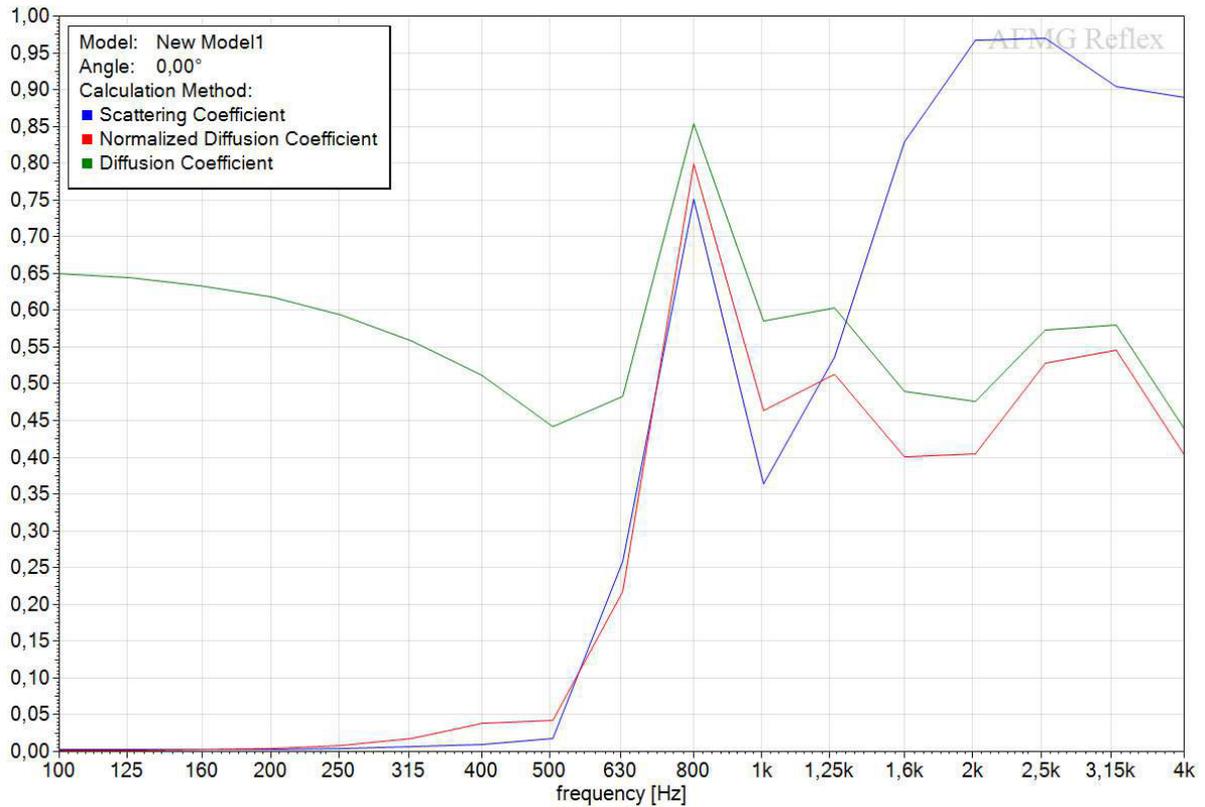
Spatial Response



Spatial Response

### 2.1.3 Coefficients Plots

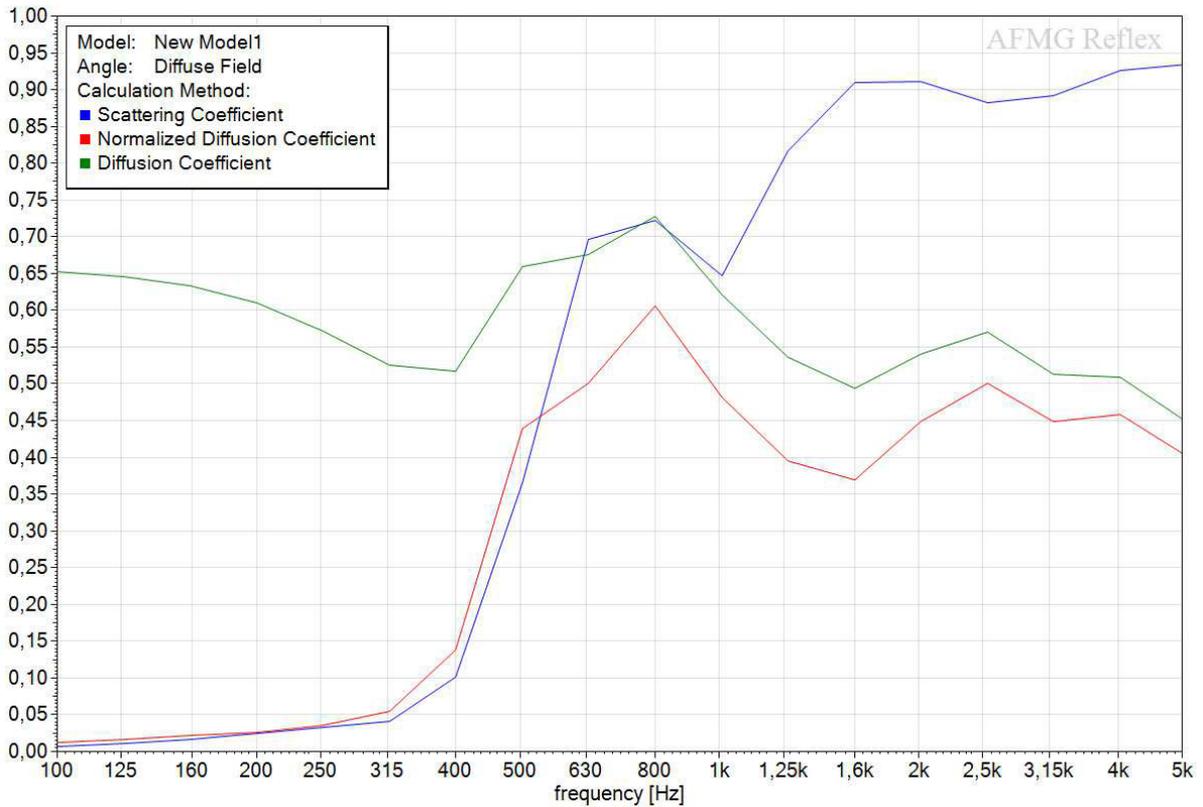
Angle: 0°, Frequency Range: [100 Hz, 4000 Hz] (From Current Selection)



**Coefficients (From Current Selection)**

Frequency [Hz]	Scattering Coefficient	Normalized Diffusion Coefficient	Diffusion Coefficient
100	0,002	0,001	0,650
125	0,003	0,002	0,644
160	0,003	0,003	0,634
200	0,003	0,004	0,618
250	0,005	0,008	0,593
315	0,007	0,018	0,558
400	0,010	0,038	0,511
500	0,018	0,043	0,442
630	0,258	0,218	0,483
800	0,752	0,799	0,854
1000	0,364	0,464	0,586
1250	0,536	0,514	0,603
1600	0,829	0,401	0,490
2000	0,967	0,405	0,476
2500	0,970	0,528	0,573
3150	0,905	0,545	0,580
4000	0,890	0,399	0,435

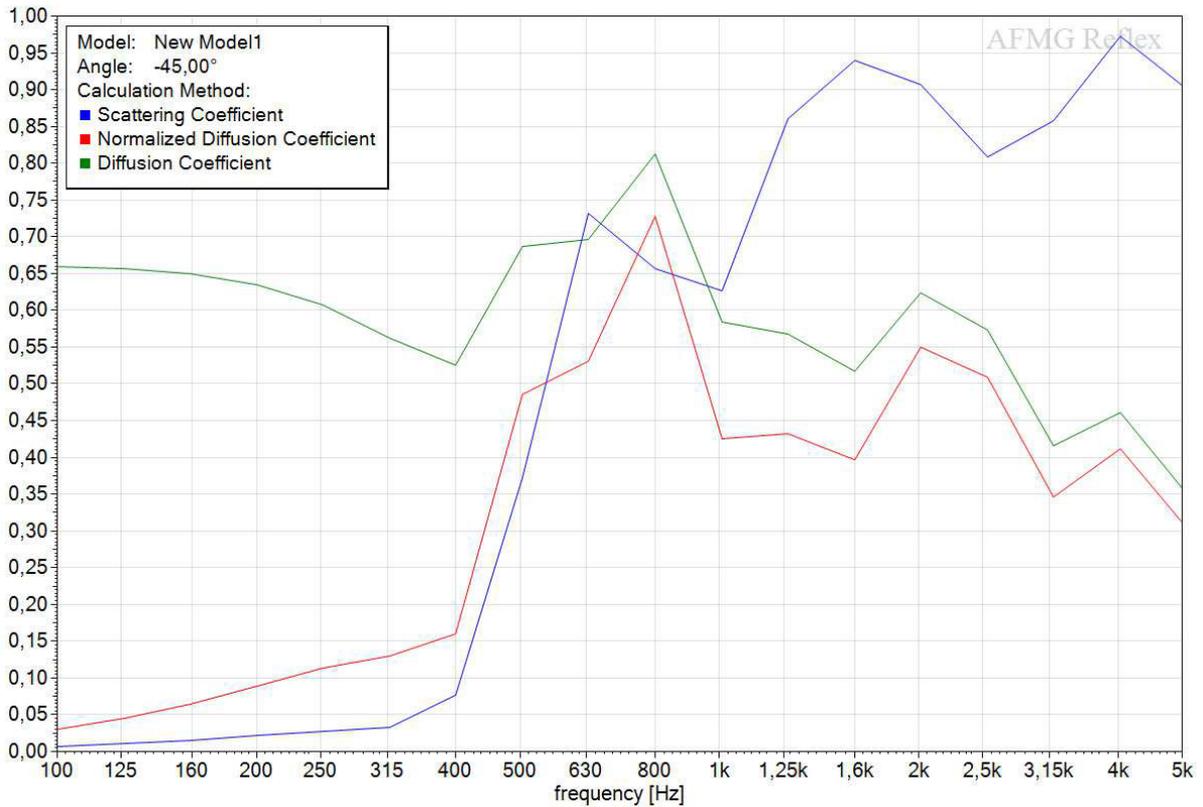
**Angle: Random Incidence, Frequency Range: [100 Hz, 5000 Hz]**



**Coefficients**

Frequency [Hz]	Scattering Coefficient	Normalized Diffusion Coefficient	Diffusion Coefficient
100	0,008	0,012	0,653
125	0,011	0,017	0,646
160	0,016	0,022	0,633
200	0,024	0,027	0,610
250	0,033	0,035	0,572
315	0,041	0,055	0,526
400	0,102	0,138	0,516
500	0,365	0,439	0,659
630	0,697	0,501	0,676
800	0,722	0,606	0,727
1000	0,647	0,481	0,620
1250	0,817	0,396	0,536
1600	0,910	0,370	0,494
2000	0,912	0,449	0,541
2500	0,882	0,501	0,570
3150	0,892	0,449	0,512
4000	0,926	0,458	0,509
5000	0,934	0,402	0,448

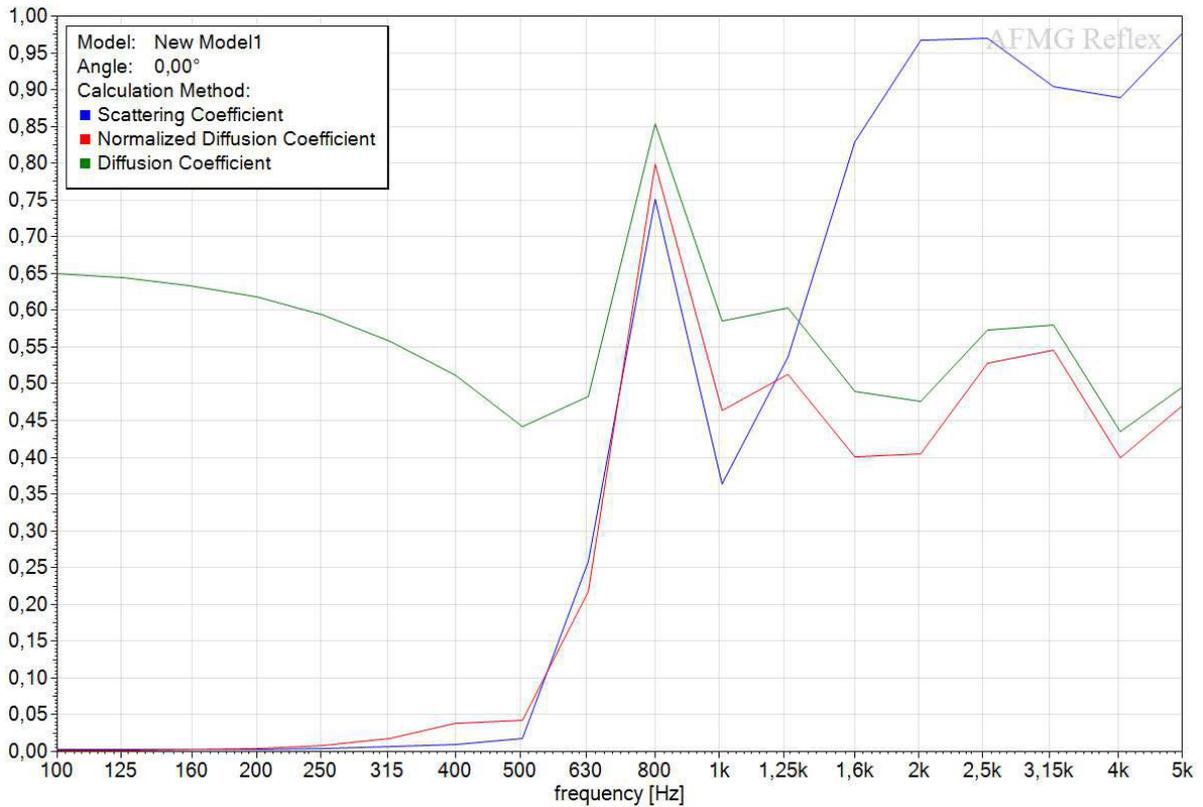
**Angle: -45°, Frequency Range: [100 Hz, 5000 Hz]**



**Coefficients**

Frequency [Hz]	Scattering Coefficient	Normalized Diffusion Coefficient	Diffusion Coefficient
100	0,007	0,030	0,659
125	0,010	0,045	0,656
160	0,015	0,065	0,649
200	0,021	0,089	0,635
250	0,028	0,113	0,607
315	0,033	0,129	0,562
400	0,077	0,160	0,525
500	0,372	0,486	0,686
630	0,733	0,530	0,696
800	0,657	0,727	0,813
1000	0,626	0,425	0,584
1250	0,861	0,432	0,567
1600	0,940	0,397	0,518
2000	0,907	0,550	0,623
2500	0,808	0,508	0,573
3150	0,858	0,346	0,415
4000	0,973	0,412	0,461
5000	0,901	0,305	0,351

**Angle: 0°, Frequency Range: [100 Hz, 5000 Hz]**



**Coefficients**

Frequency [Hz]	Scattering Coefficient	Normalized Diffusion Coefficient	Diffusion Coefficient
100	0,002	0,001	0,650
125	0,003	0,002	0,644
160	0,003	0,003	0,634
200	0,003	0,004	0,618
250	0,005	0,008	0,593
315	0,007	0,018	0,558
400	0,010	0,038	0,511
500	0,018	0,043	0,442
630	0,258	0,218	0,483
800	0,752	0,799	0,854
1000	0,364	0,464	0,586
1250	0,536	0,514	0,603
1600	0,829	0,401	0,490
2000	0,967	0,405	0,476
2500	0,970	0,528	0,573
3150	0,905	0,545	0,580
4000	0,890	0,399	0,435
5000	0,982	0,474	0,499



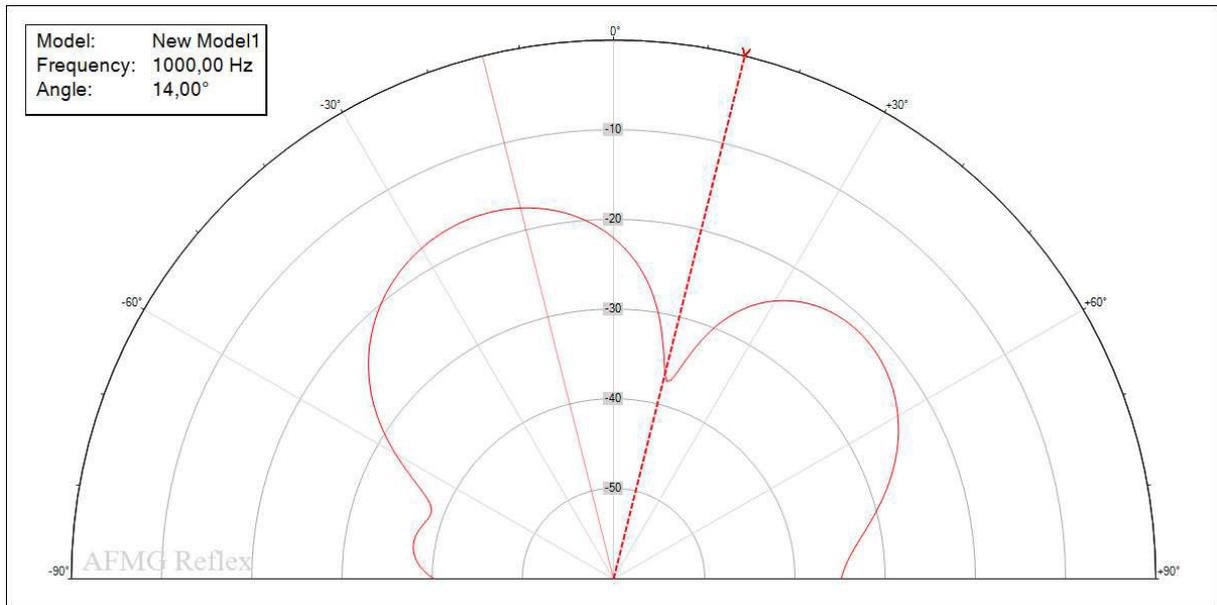
# AFMG Reflex Report

LINE A2 - inclinações (modificada)



Creation date: 13/05/2013  
AFMG Reflex Version: 1.0.6

# 1. Spatial Response Plot

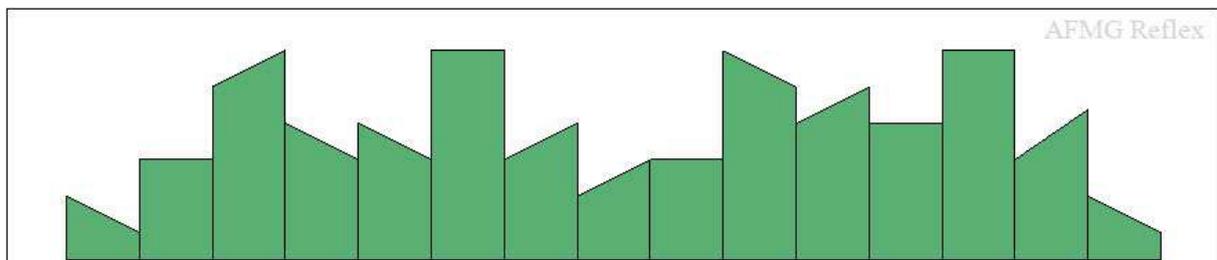


Spatial Response Plot

## 2. Models

### 2.1 New Model1

#### 2.1.1 Model Outline

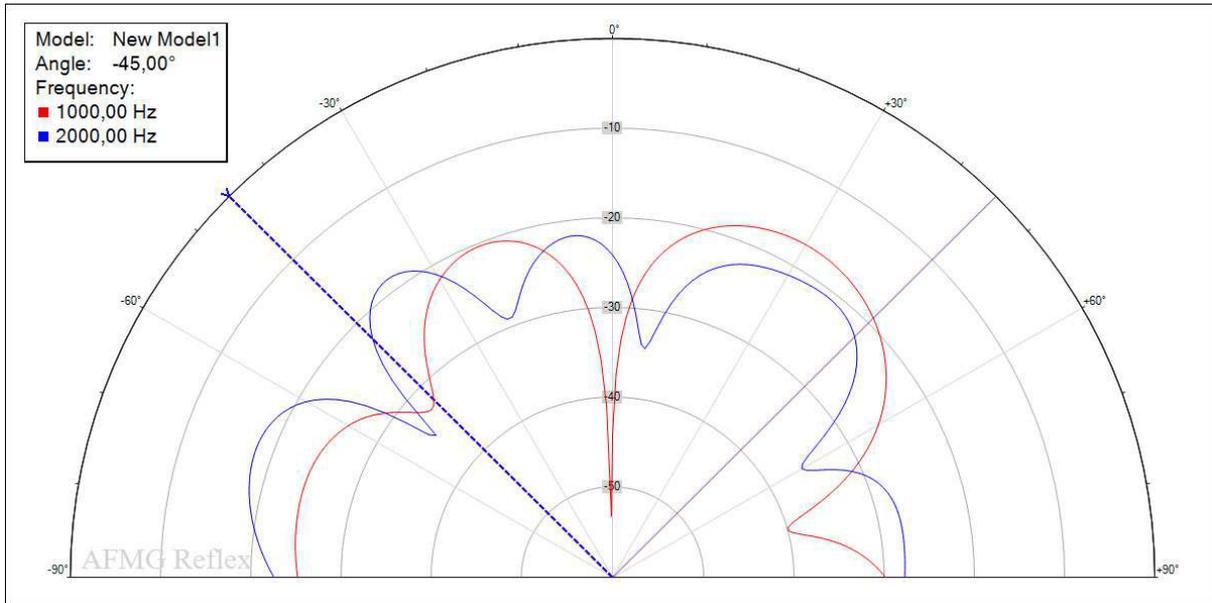


Model Outline

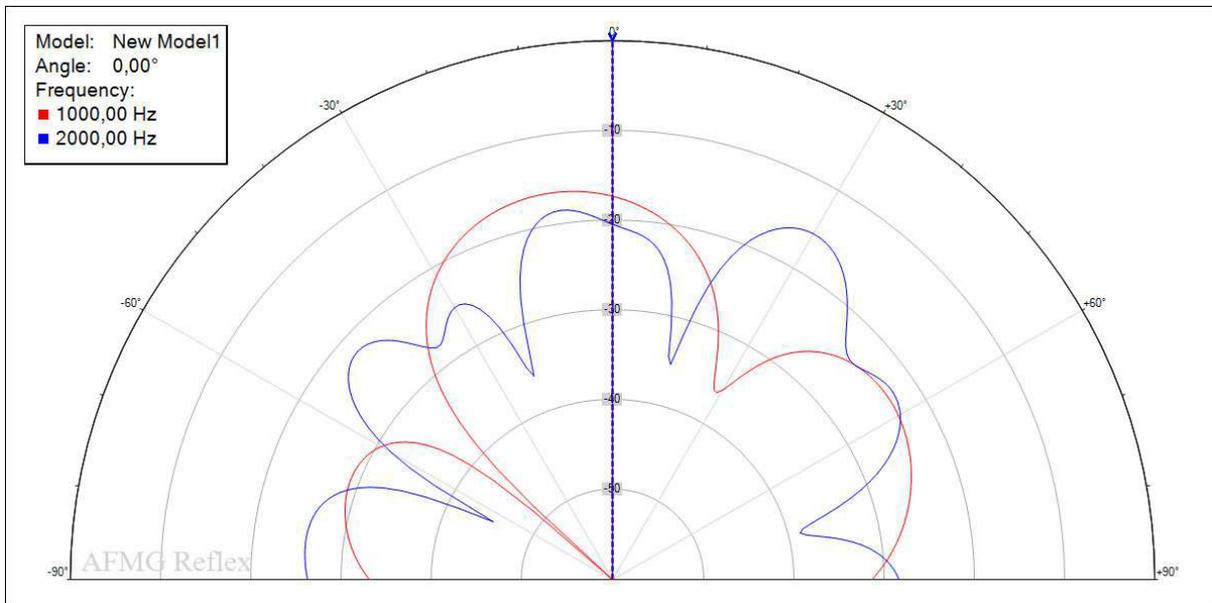
Element no.	Type	Width[cm]	Depth Base[cm]	Depth Top[cm]
1	Triangle	4,0	3,5	2,0
2	Rectangle	4,0	5,5	0,0
3	Triangle	4,0	11,5	2,0
4	Triangle	4,0	7,5	2,0
5	Triangle	4,0	7,5	2,0
6	Rectangle	4,0	11,5	0,0
7	Triangle	4,0	7,5	2,0
8	Triangle	4,0	5,5	2,0
9	Triangle	4,0	5,5	0,0
10	Triangle	4,0	11,5	2,0

11	Triangle	4,0	9,5	2,0
12	Rectangle	4,0	7,5	0,0
13	Rectangle	4,0	11,5	0,0
14	Triangle	4,0	8,2	2,7
15	Triangle	4,0	3,5	2,0

### 2.1.2 Spatial Response Plots



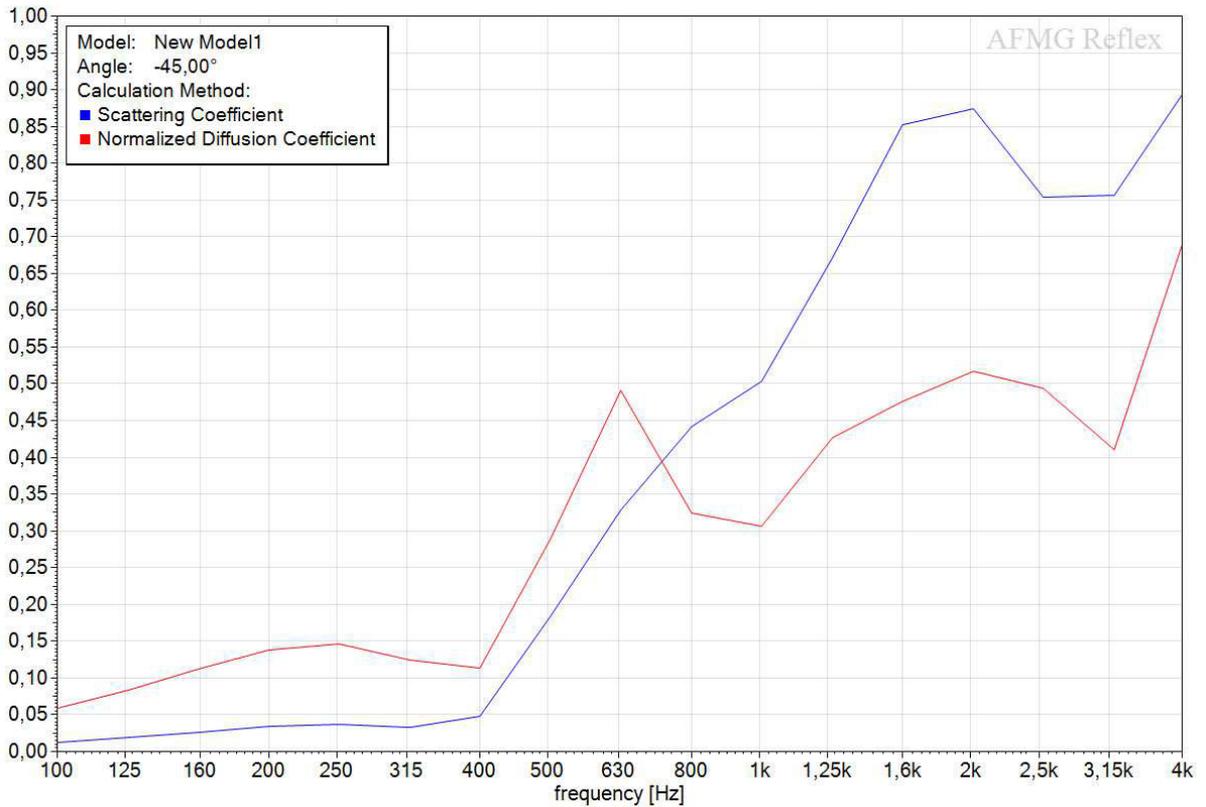
Spatial Response



Spatial Response

### 2.1.3 Coefficients Plots

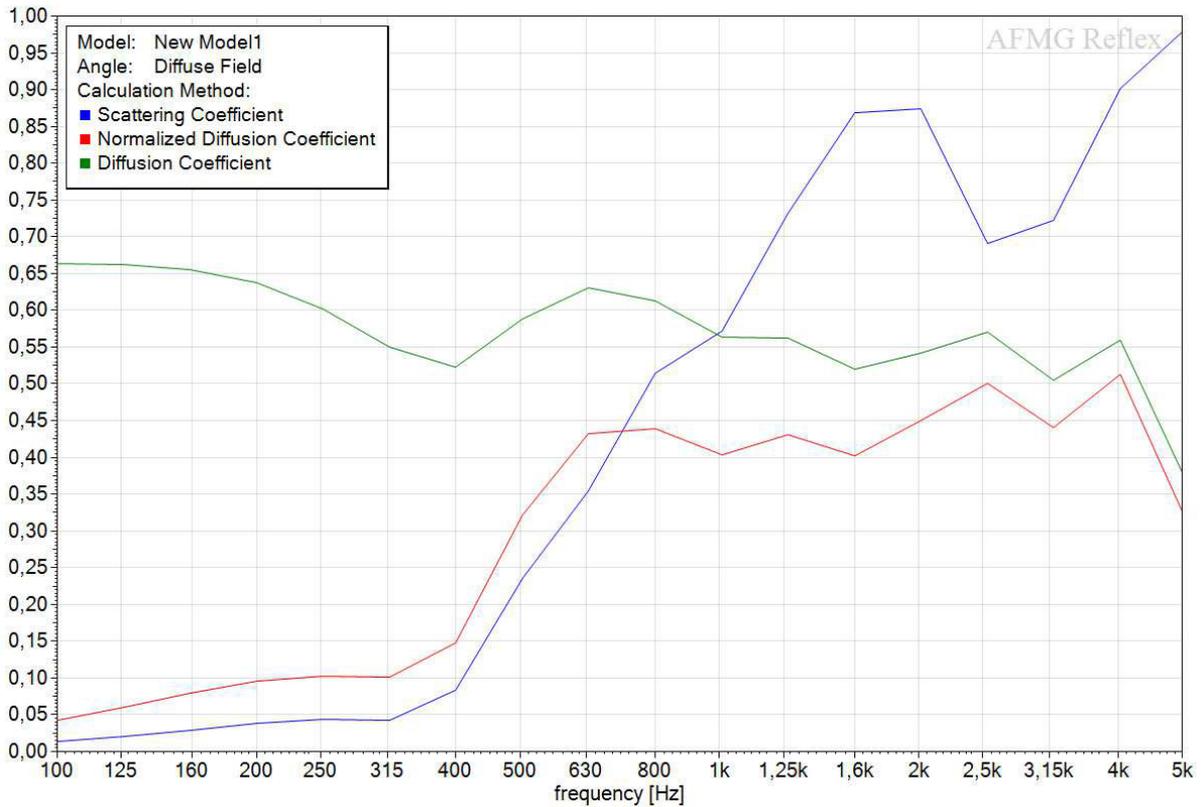
Angle: -45°, Frequency Range: [100 Hz, 4000 Hz] (From Current Selection)



**Coefficients (From Current Selection)**

Frequency [Hz]	Scattering Coefficient	Normalized Diffusion Coefficient	Diffusion Coefficient
100	0,013	0,058	0,669
125	0,019	0,084	0,670
160	0,026	0,113	0,667
200	0,034	0,138	0,655
250	0,038	0,146	0,622
315	0,033	0,125	0,560
400	0,048	0,114	0,499
500	0,185	0,289	0,566
630	0,328	0,491	0,671
800	0,442	0,325	0,536
1000	0,503	0,306	0,498
1250	0,672	0,426	0,563
1600	0,853	0,476	0,581
2000	0,874	0,518	0,596
2500	0,754	0,493	0,560
3150	0,757	0,411	0,473
4000	0,898	0,698	0,724

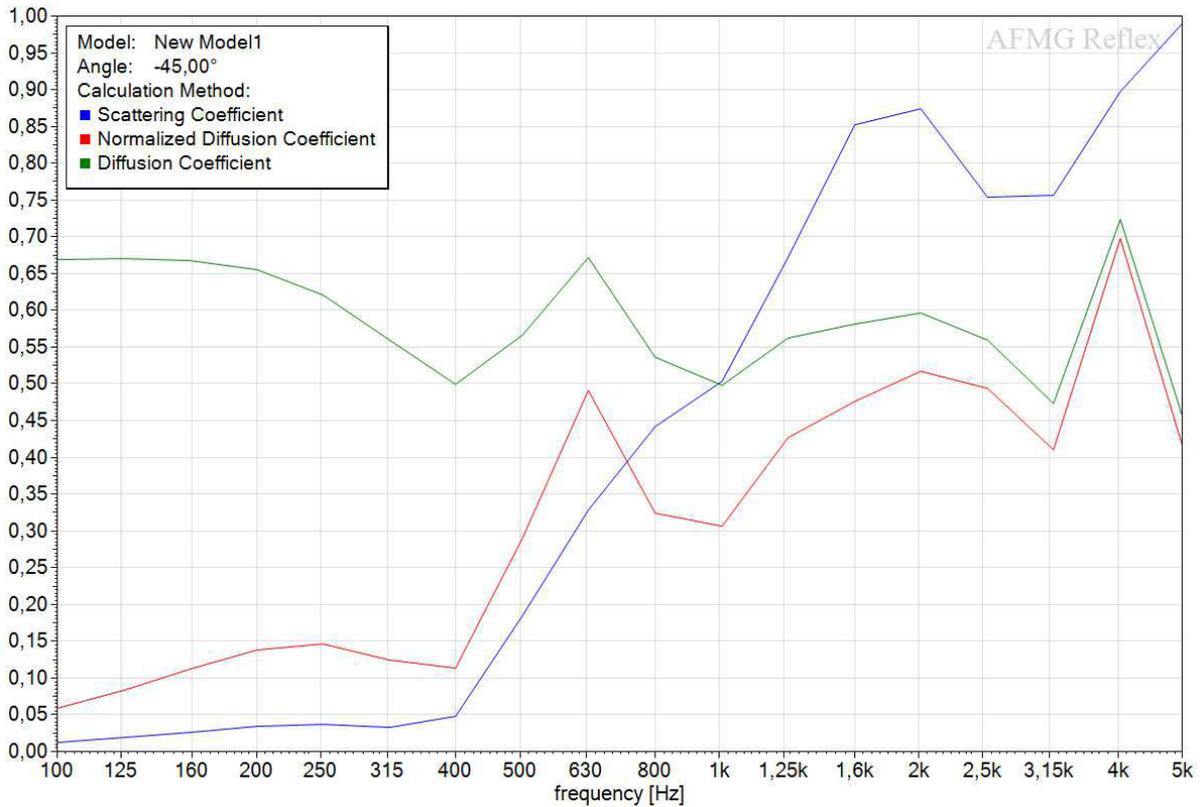
**Angle: Random Incidence, Frequency Range: [100 Hz, 5000 Hz]**



**Coefficients**

Frequency [Hz]	Scattering Coefficient	Normalized Diffusion Coefficient	Diffusion Coefficient
100	0,013	0,042	0,663
125	0,020	0,060	0,661
160	0,029	0,079	0,655
200	0,038	0,096	0,638
250	0,043	0,103	0,602
315	0,042	0,102	0,550
400	0,083	0,148	0,522
500	0,235	0,321	0,588
630	0,355	0,432	0,631
800	0,515	0,440	0,612
1000	0,572	0,403	0,563
1250	0,732	0,431	0,562
1600	0,868	0,402	0,520
2000	0,874	0,450	0,542
2500	0,690	0,501	0,570
3150	0,723	0,440	0,505
4000	0,902	0,513	0,559
5000	0,983	0,315	0,368

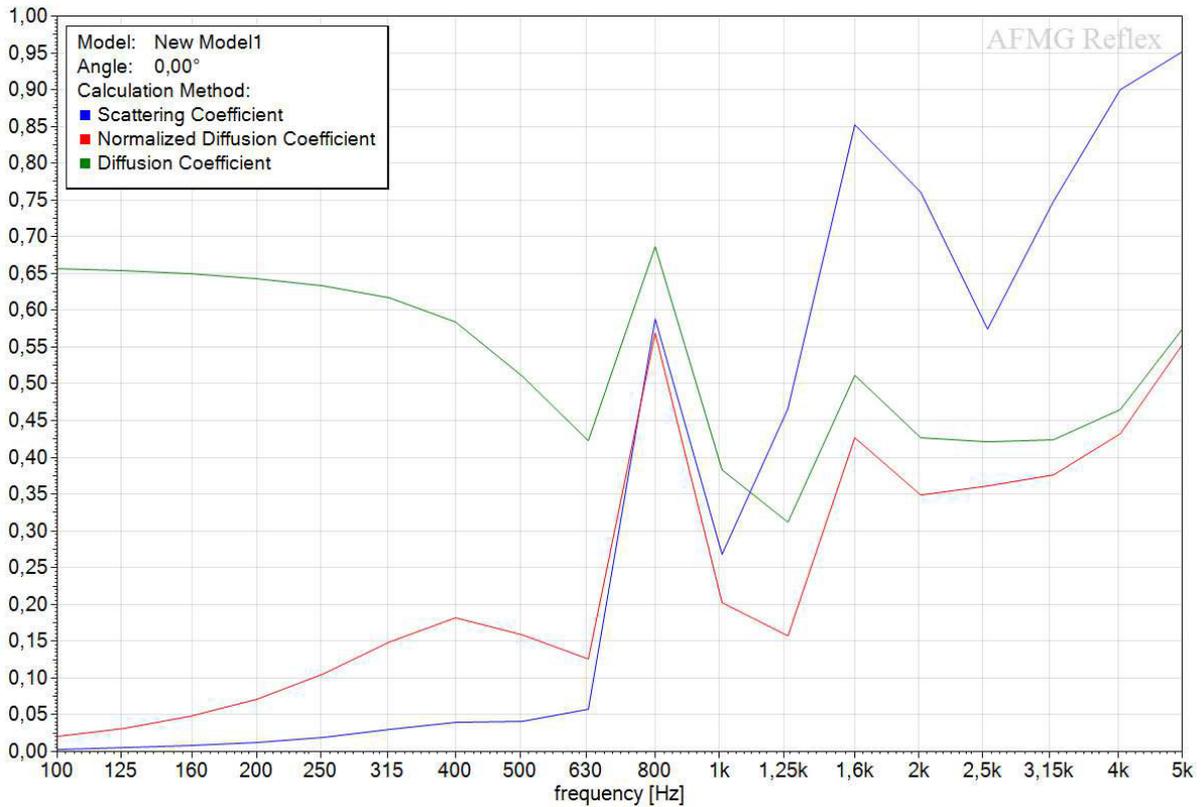
**Angle: -45°, Frequency Range: [100 Hz, 5000 Hz]**



**Coefficients**

Frequency [Hz]	Scattering Coefficient	Normalized Diffusion Coefficient	Diffusion Coefficient
100	0,013	0,058	0,669
125	0,019	0,084	0,670
160	0,026	0,113	0,667
200	0,034	0,138	0,655
250	0,038	0,146	0,622
315	0,033	0,125	0,560
400	0,048	0,114	0,499
500	0,185	0,289	0,566
630	0,328	0,491	0,671
800	0,442	0,325	0,536
1000	0,503	0,306	0,498
1250	0,672	0,426	0,563
1600	0,853	0,476	0,581
2000	0,874	0,518	0,596
2500	0,754	0,493	0,560
3150	0,757	0,411	0,473
4000	0,898	0,698	0,724
5000	0,995	0,399	0,439

Angle: 0°, Frequency Range: [100 Hz, 5000 Hz]



**Coefficients**

Frequency [Hz]	Scattering Coefficient	Normalized Diffusion Coefficient	Diffusion Coefficient
100	0,003	0,021	0,657
125	0,005	0,032	0,655
160	0,008	0,047	0,650
200	0,012	0,071	0,643
250	0,019	0,105	0,633
315	0,030	0,150	0,617
400	0,040	0,182	0,584
500	0,040	0,158	0,510
630	0,057	0,126	0,422
800	0,589	0,569	0,687
1000	0,268	0,202	0,383
1250	0,466	0,157	0,312
1600	0,853	0,427	0,512
2000	0,761	0,349	0,426
2500	0,575	0,361	0,421
3150	0,748	0,377	0,424
4000	0,900	0,432	0,466
5000	0,955	0,561	0,582



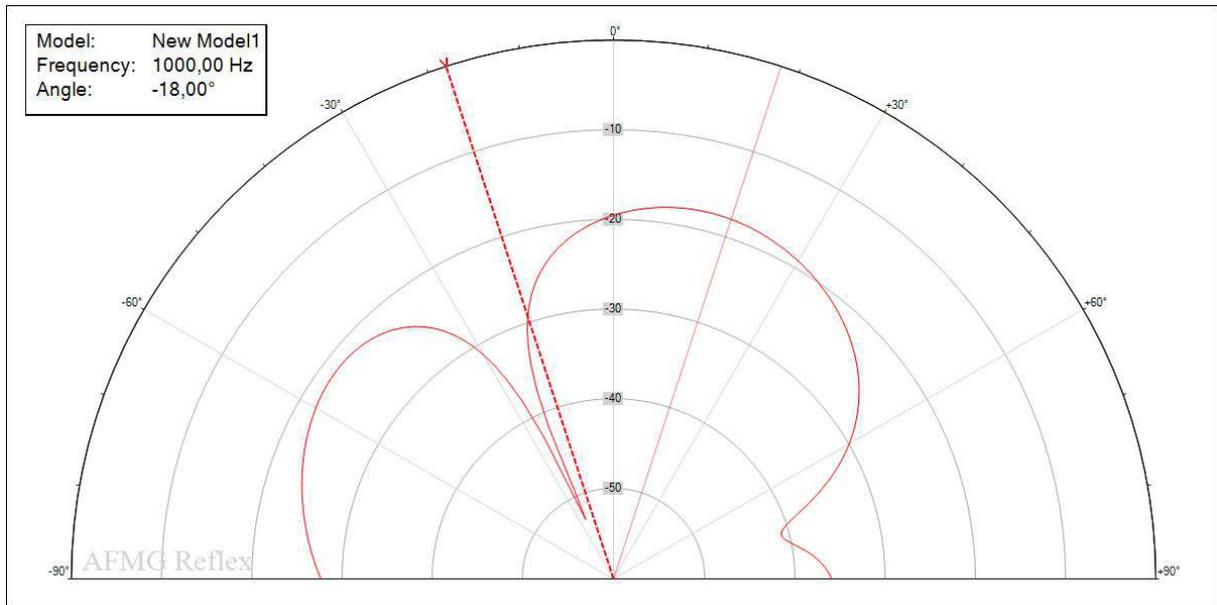
# AFMG Reflex Report

LINE B2 - sem inclinações



Creation date: 13/05/2013  
AFMG Reflex Version: 1.0.6

# 1. Spatial Response Plot

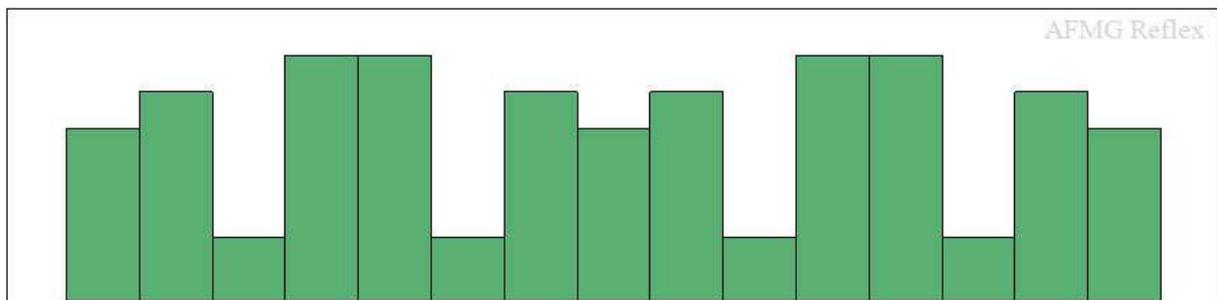


Spatial Response Plot

## 2. Models

### 2.1 New Model1

#### 2.1.1 Model Outline

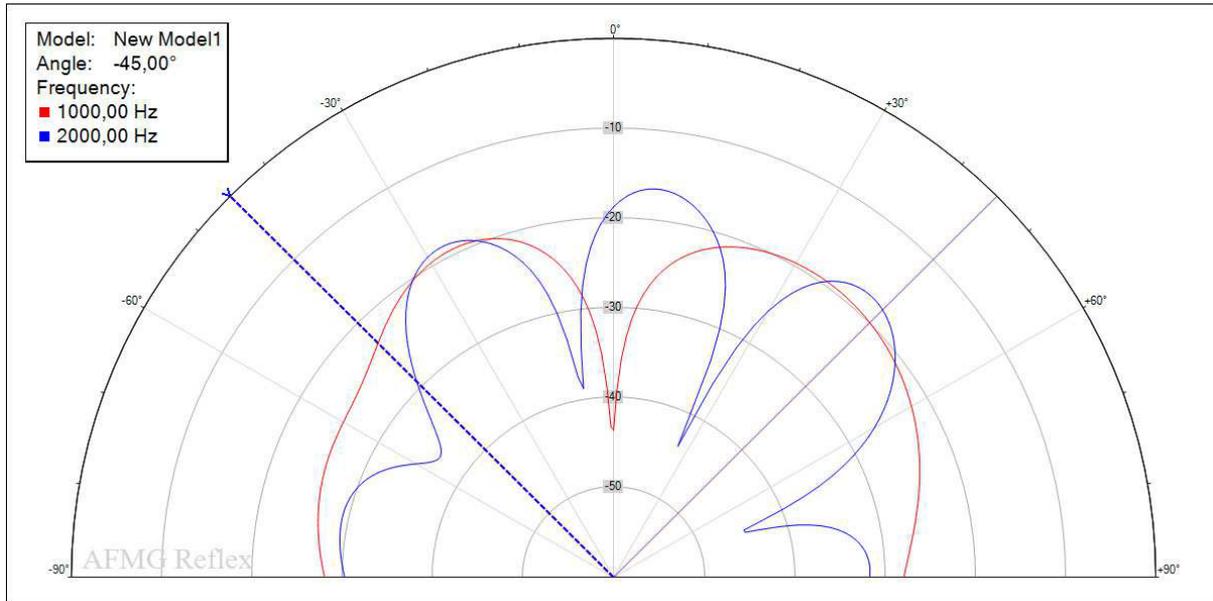


Model Outline

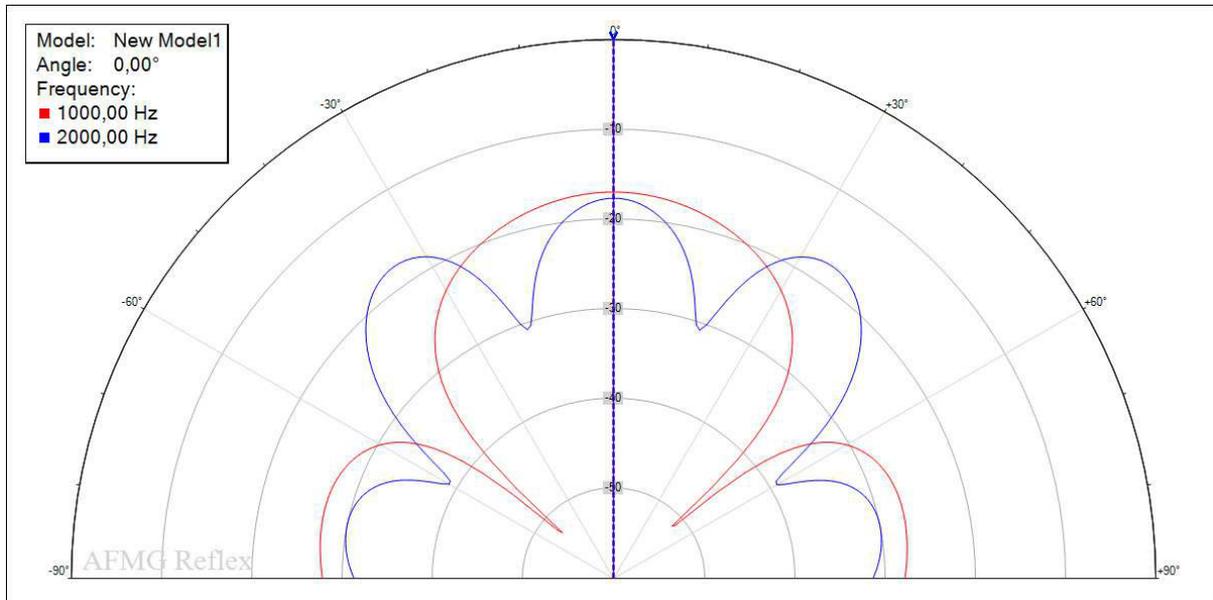
Element no.	Type	Width[cm]	Depth Base[cm]	Depth Top[cm]
1	Triangle	4,0	9,5	0,0
2	Triangle	4,0	11,5	0,0
3	Triangle	4,0	3,5	0,0
4	Triangle	4,0	13,5	0,0
5	Triangle	4,0	13,5	0,0
6	Triangle	4,0	3,5	0,0
7	Triangle	4,0	11,5	0,0
8	Triangle	4,0	9,5	0,0
9	Triangle	4,0	11,5	0,0

10	Triangle	4,0	3,5	0,0
11	Triangle	4,0	13,5	0,0
12	Triangle	4,0	13,5	0,0
13	Triangle	4,0	3,5	0,0
14	Triangle	4,0	11,5	0,0
15	Triangle	4,0	9,5	0,0

### 2.1.2 Spatial Response Plots



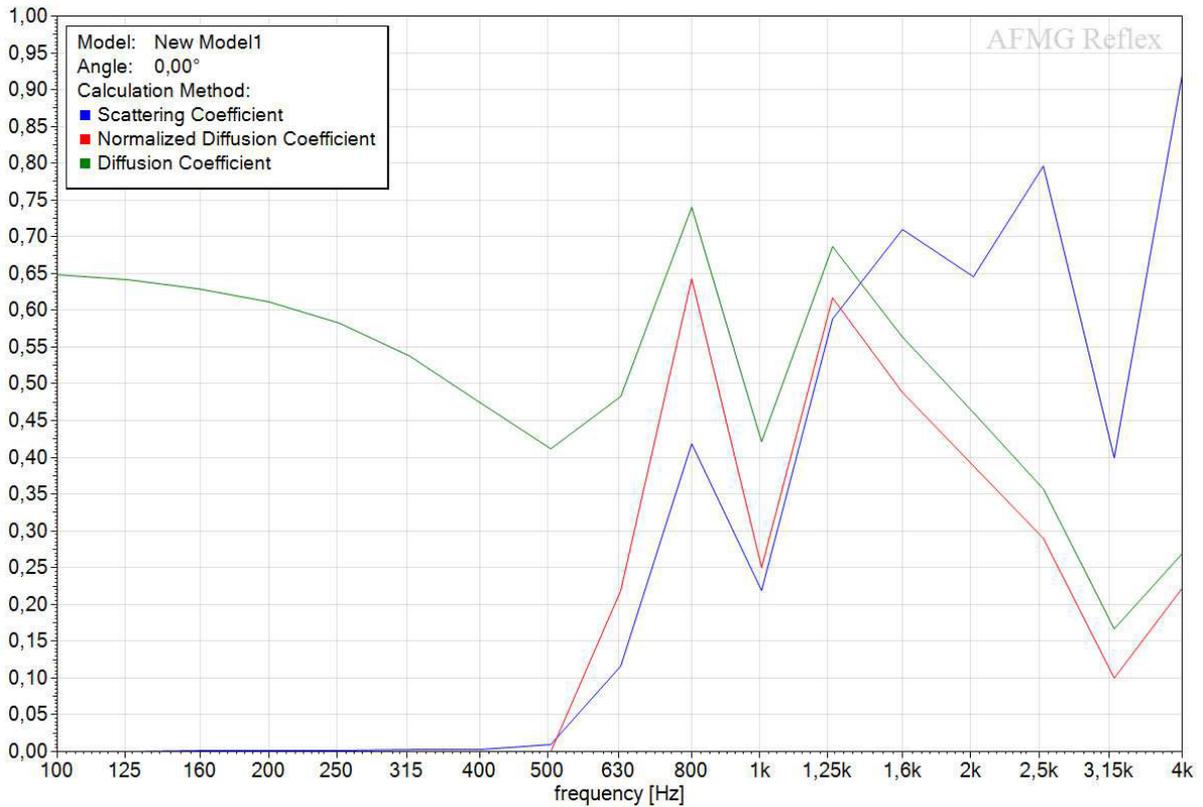
Spatial Response



Spatial Response

### 2.1.3 Coefficients Plots

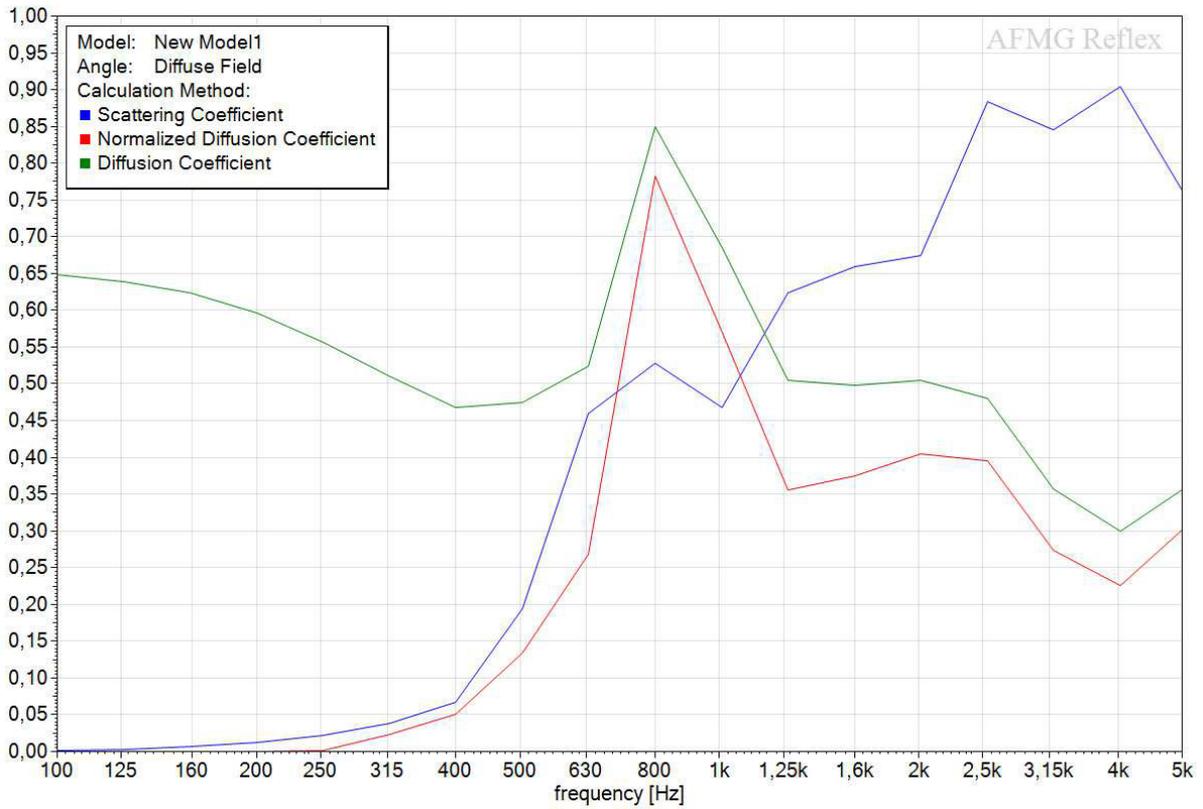
Angle: 0°, Frequency Range: [100 Hz, 4000 Hz] (From Current Selection)



**Coefficients (From Current Selection)**

Frequency [Hz]	Scattering Coefficient	Normalized Diffusion Coefficient	Diffusion Coefficient
100	0,000	0,000	0,648
125	0,000	0,000	0,641
160	0,001	0,000	0,630
200	0,001	0,000	0,611
250	0,002	0,000	0,583
315	0,002	0,000	0,538
400	0,003	0,000	0,474
500	0,009	0,000	0,411
630	0,116	0,218	0,483
800	0,418	0,642	0,741
1000	0,219	0,251	0,421
1250	0,588	0,617	0,687
1600	0,710	0,488	0,564
2000	0,646	0,388	0,461
2500	0,797	0,290	0,357
3150	0,399	0,100	0,168
4000	0,935	0,226	0,272

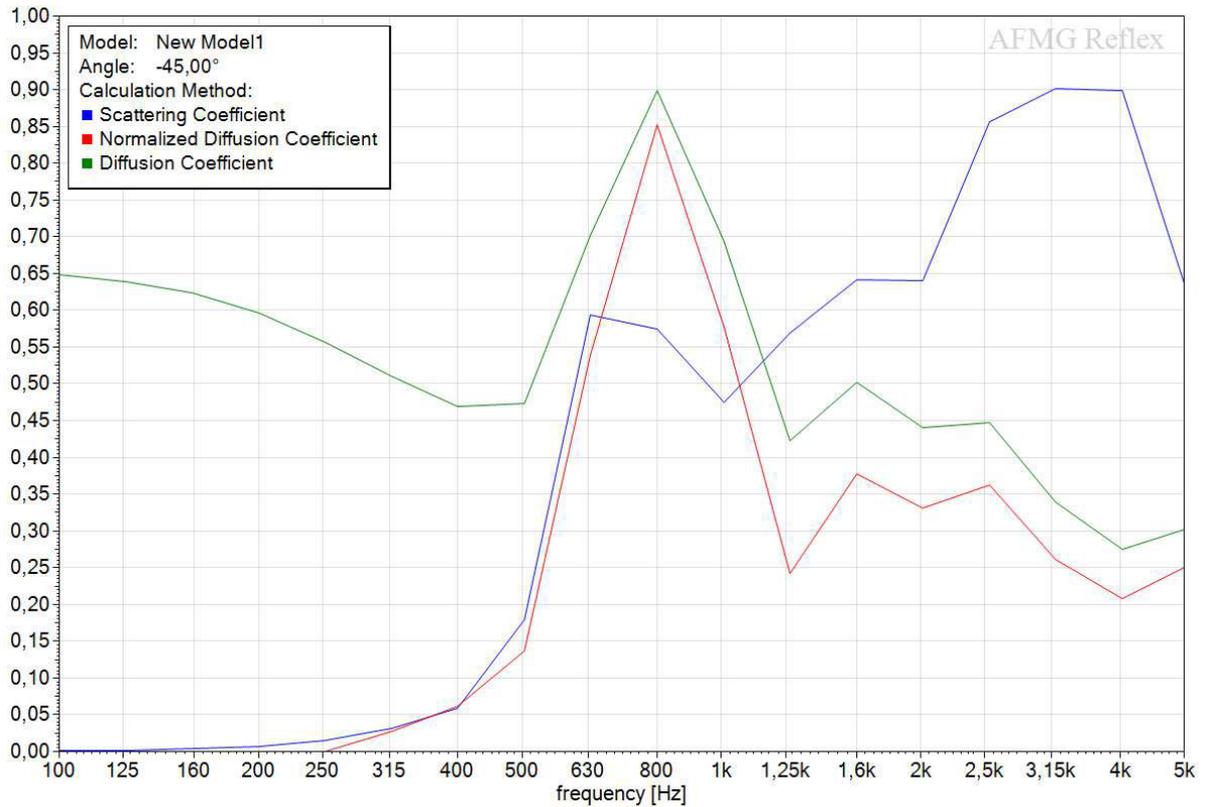
**Angle: Random Incidence, Frequency Range: [100 Hz, 5000 Hz]**



**Coefficients**

Frequency [Hz]	Scattering Coefficient	Normalized Diffusion Coefficient	Diffusion Coefficient
100	0,002	0,000	0,648
125	0,003	0,000	0,639
160	0,006	0,000	0,624
200	0,012	0,000	0,597
250	0,022	0,001	0,557
315	0,038	0,024	0,511
400	0,067	0,051	0,467
500	0,194	0,134	0,474
630	0,459	0,268	0,525
800	0,528	0,782	0,849
1000	0,468	0,570	0,686
1250	0,624	0,356	0,505
1600	0,659	0,376	0,499
2000	0,674	0,405	0,504
2500	0,884	0,396	0,480
3150	0,846	0,274	0,357
4000	0,904	0,226	0,300
5000	0,754	0,306	0,359

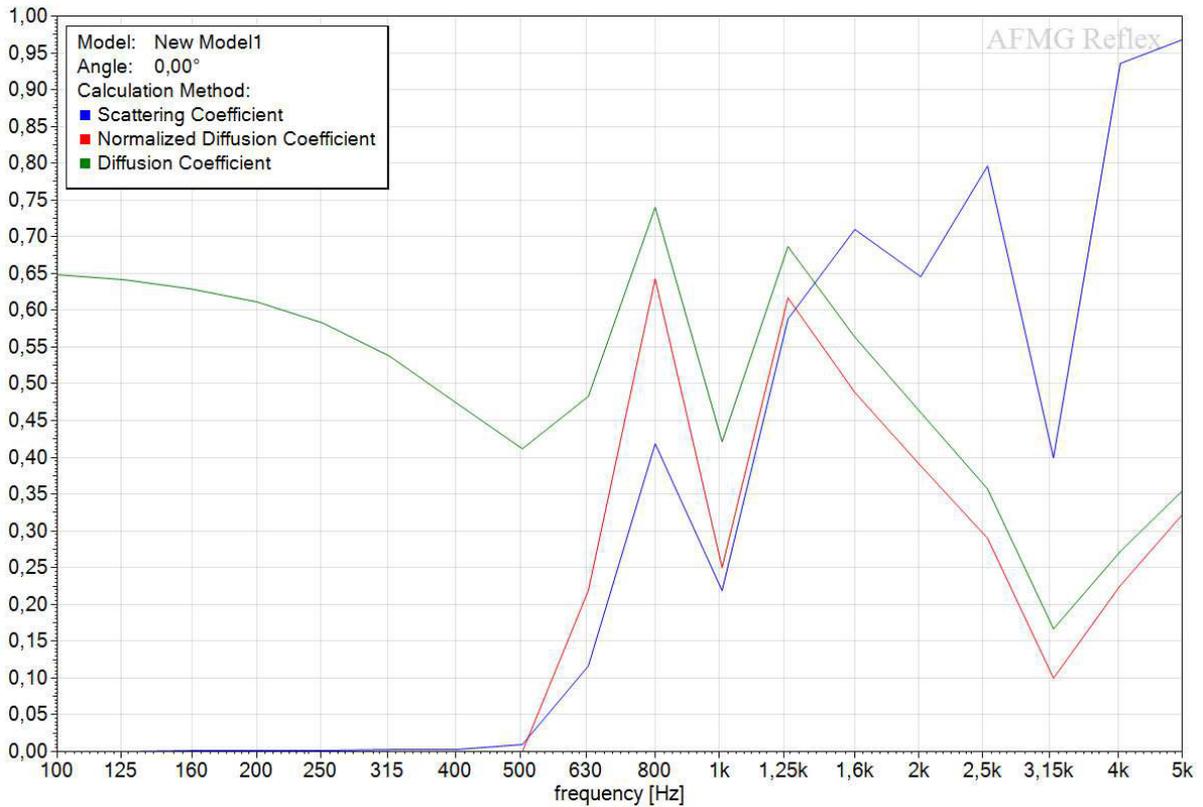
**Angle: -45°, Frequency Range: [100 Hz, 5000 Hz]**



**Coefficients**

Frequency [Hz]	Scattering Coefficient	Normalized Diffusion Coefficient	Diffusion Coefficient
100	0,001	0,000	0,648
125	0,002	0,000	0,639
160	0,004	0,000	0,623
200	0,007	0,000	0,596
250	0,016	0,000	0,556
315	0,031	0,027	0,511
400	0,058	0,062	0,469
500	0,179	0,137	0,474
630	0,593	0,539	0,702
800	0,574	0,852	0,898
1000	0,475	0,577	0,694
1250	0,570	0,243	0,423
1600	0,642	0,378	0,502
2000	0,640	0,331	0,440
2500	0,856	0,363	0,447
3150	0,902	0,261	0,339
4000	0,899	0,208	0,275
5000	0,619	0,253	0,303

Angle: 0°, Frequency Range: [100 Hz, 5000 Hz]



**Coefficients**

Frequency [Hz]	Scattering Coefficient	Normalized Diffusion Coefficient	Diffusion Coefficient
100	0,000	0,000	0,648
125	0,000	0,000	0,641
160	0,001	0,000	0,630
200	0,001	0,000	0,611
250	0,002	0,000	0,583
315	0,002	0,000	0,538
400	0,003	0,000	0,474
500	0,009	0,000	0,411
630	0,116	0,218	0,483
800	0,418	0,642	0,741
1000	0,219	0,251	0,421
1250	0,588	0,617	0,687
1600	0,710	0,488	0,564
2000	0,646	0,388	0,461
2500	0,797	0,290	0,357
3150	0,399	0,100	0,168
4000	0,935	0,226	0,272
5000	0,970	0,328	0,359



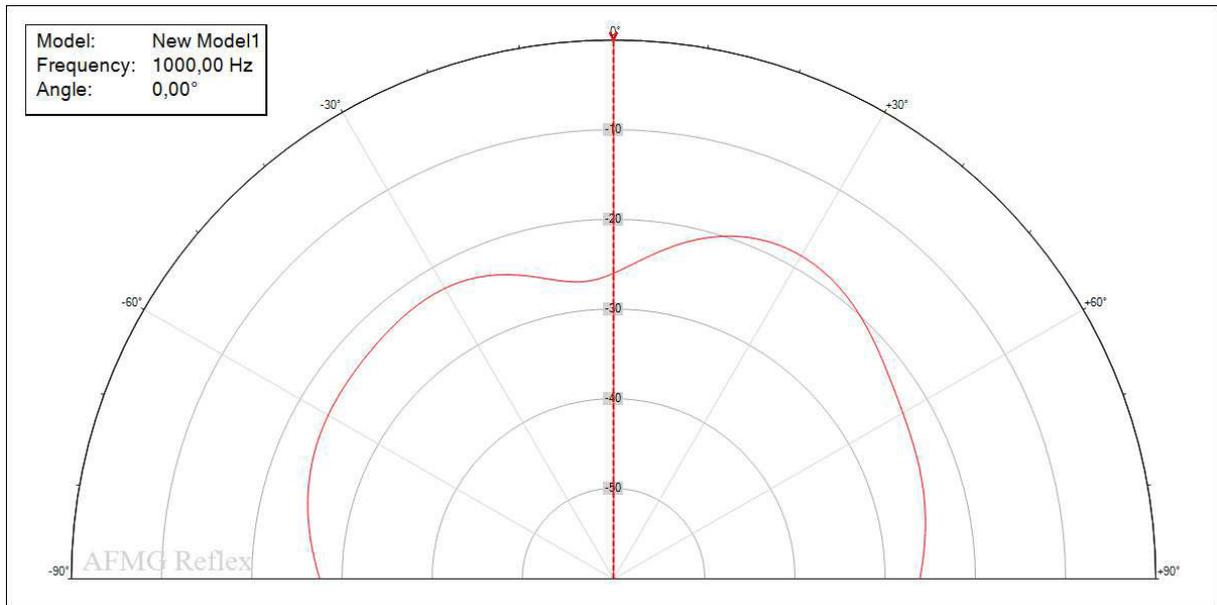
# AFMG Reflex Report

LINE B2 - inclinações



Creation date: 13/05/2013  
AFMG Reflex Version: 1.0.6

# 1. Spatial Response Plot

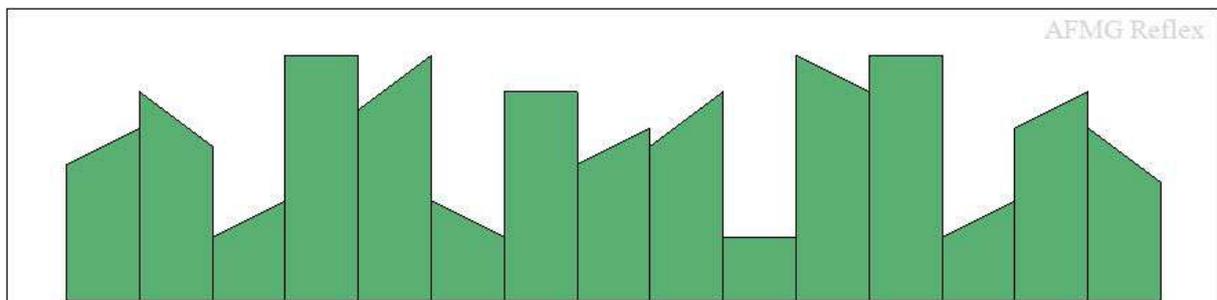


Spatial Response Plot

## 2. Models

### 2.1 New Model1

#### 2.1.1 Model Outline

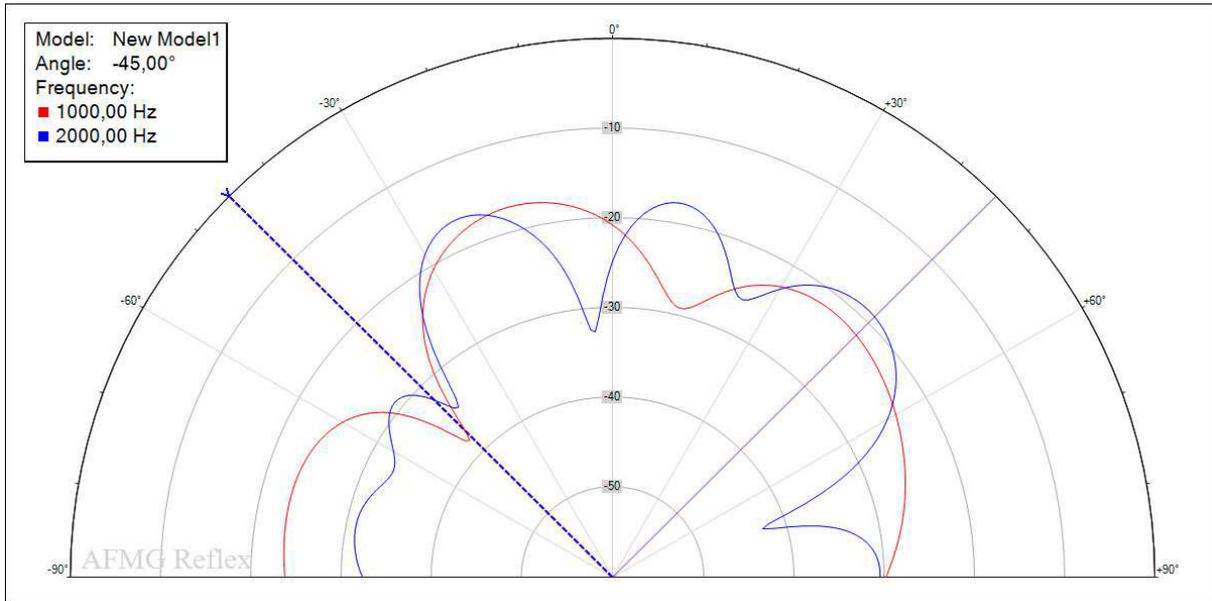


Model Outline

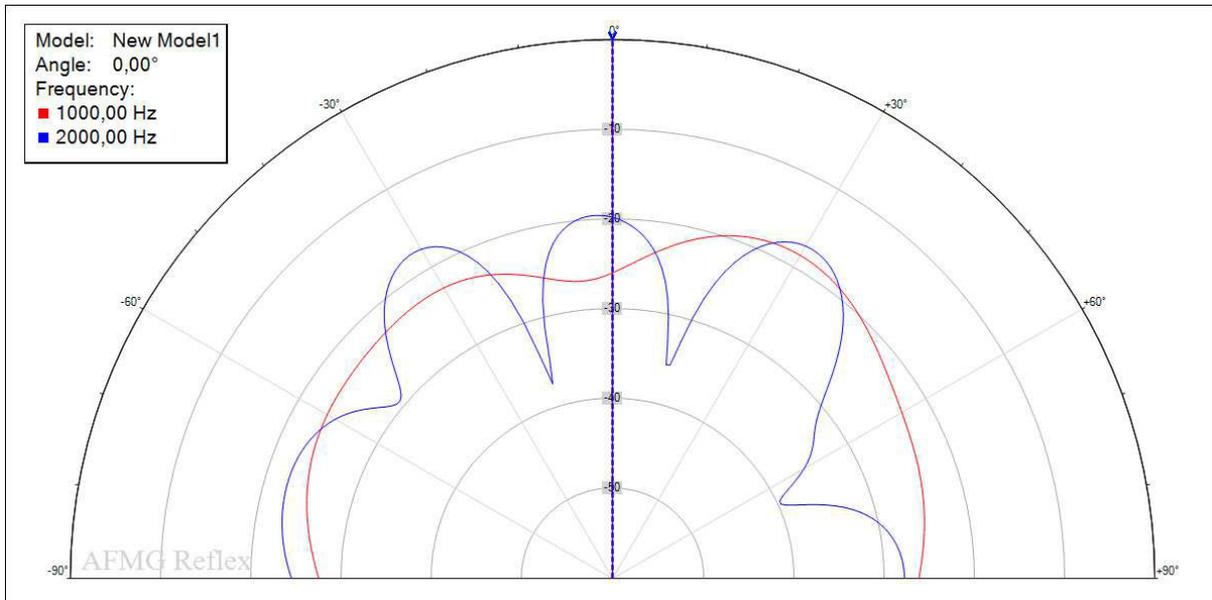
Element no.	Type	Width[cm]	Depth Base[cm]	Depth Top[cm]
1	Triangle	4,0	9,5	2,0
2	Triangle	4,0	11,5	3,0
3	Triangle	4,0	5,5	2,0
4	Triangle	4,0	13,5	0,0
5	Triangle	4,0	13,5	3,0
6	Triangle	4,0	5,5	2,0
7	Triangle	4,0	11,5	0,0
8	Triangle	4,0	9,5	2,0
9	Triangle	4,0	11,5	3,0

10	Triangle	4,0	3,5	0,0
11	Triangle	4,0	13,5	2,0
12	Triangle	4,0	13,5	0,0
13	Triangle	4,0	5,5	2,0
14	Triangle	4,0	11,5	2,0
15	Triangle	4,0	9,5	3,0

### 2.1.2 Spatial Response Plots



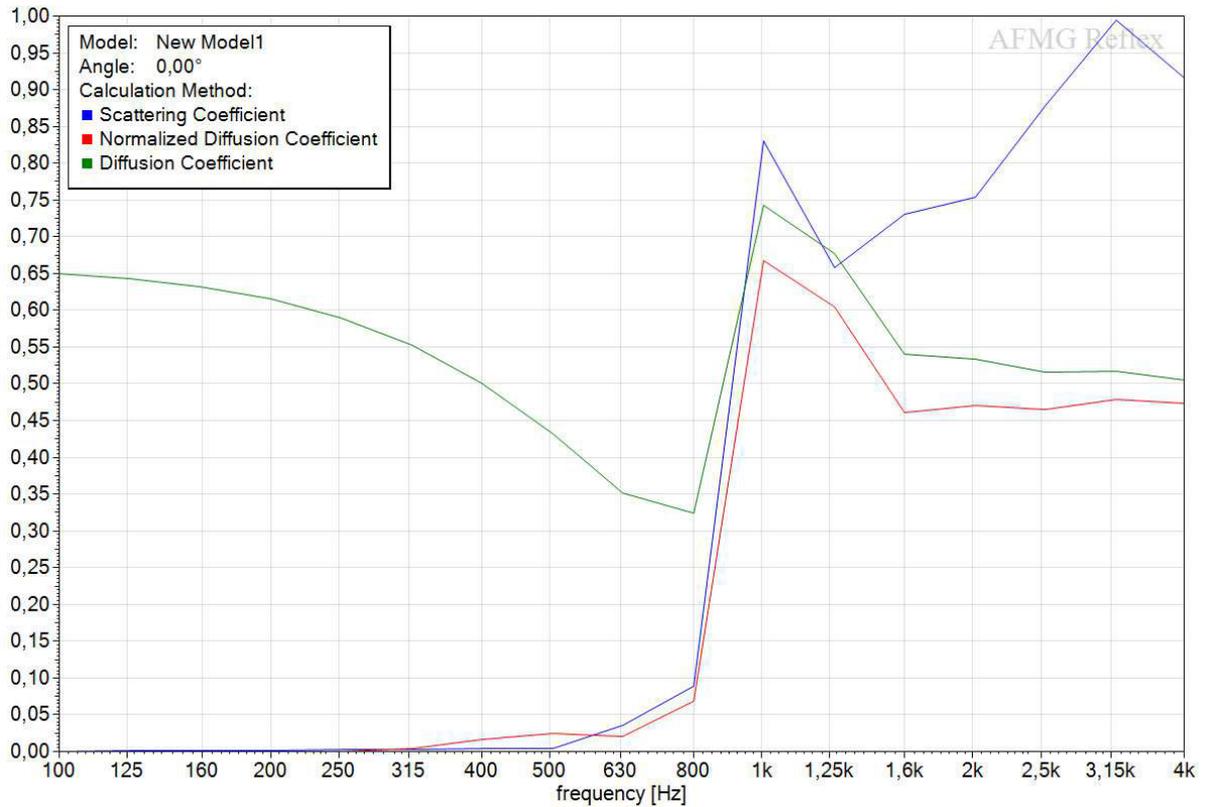
Spatial Response



Spatial Response

### 2.1.3 Coefficients Plots

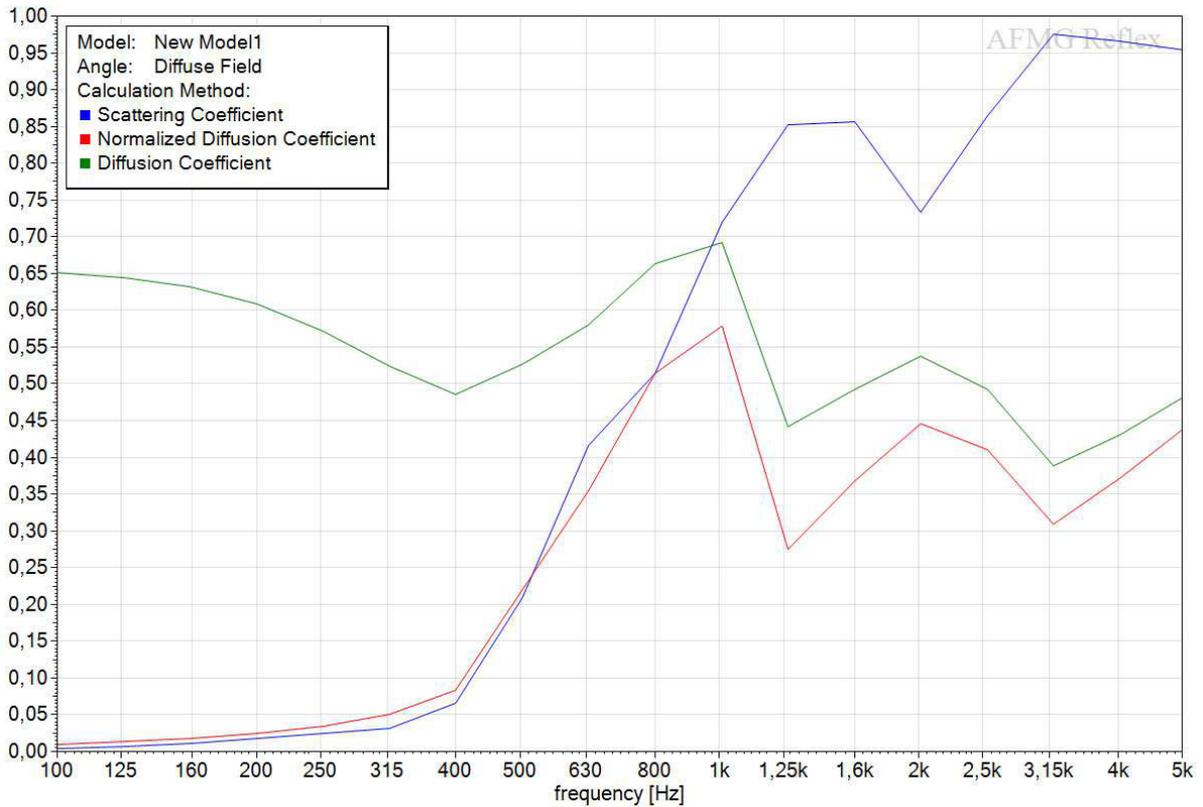
Angle: 0°, Frequency Range: [100 Hz, 4000 Hz] (From Current Selection)



**Coefficients (From Current Selection)**

Frequency [Hz]	Scattering Coefficient	Normalized Diffusion Coefficient	Diffusion Coefficient
100	0,000	0,000	0,649
125	0,001	0,000	0,643
160	0,001	0,000	0,632
200	0,001	0,000	0,616
250	0,002	0,000	0,590
315	0,003	0,004	0,552
400	0,004	0,016	0,500
500	0,004	0,025	0,432
630	0,036	0,020	0,352
800	0,089	0,068	0,325
1000	0,830	0,668	0,743
1250	0,658	0,605	0,677
1600	0,730	0,460	0,541
2000	0,754	0,471	0,534
2500	0,879	0,465	0,516
3150	0,995	0,478	0,518
4000	0,914	0,473	0,504

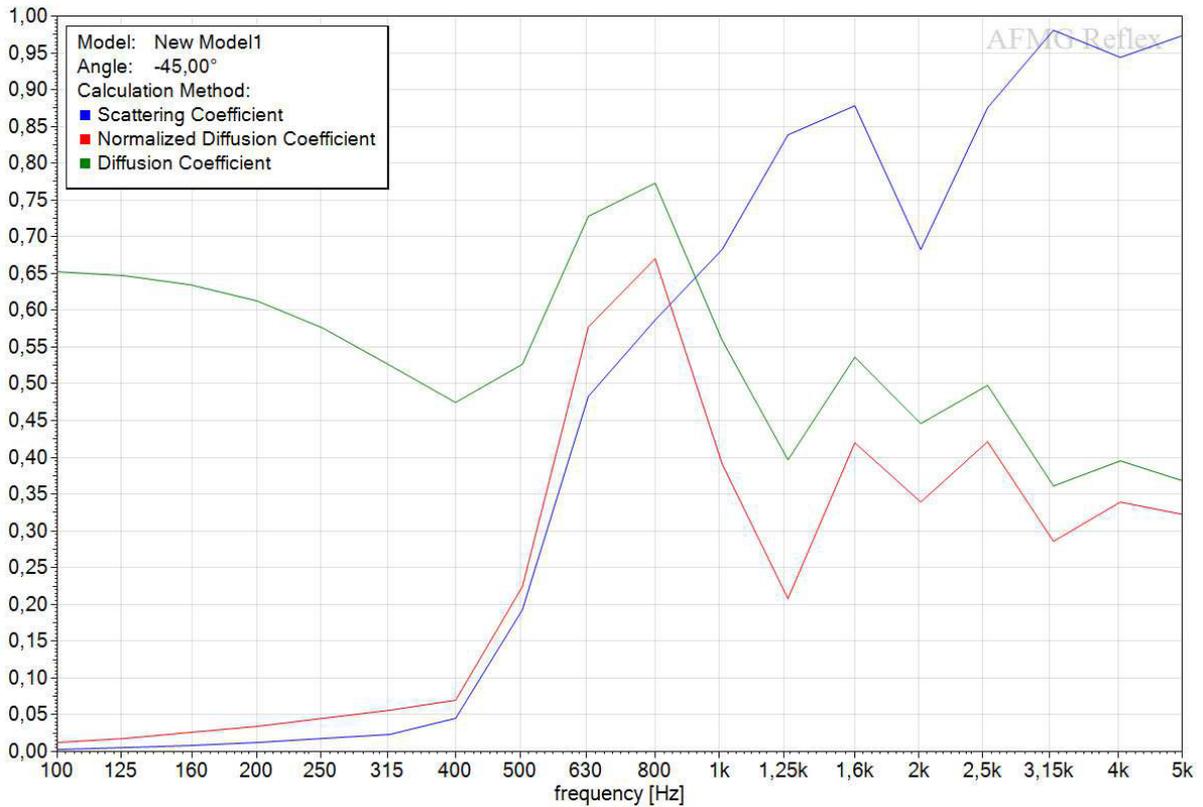
**Angle: Random Incidence, Frequency Range: [100 Hz, 5000 Hz]**



**Coefficients**

Frequency [Hz]	Scattering Coefficient	Normalized Diffusion Coefficient	Diffusion Coefficient
100	0,005	0,009	0,652
125	0,007	0,013	0,645
160	0,011	0,018	0,632
200	0,017	0,024	0,609
250	0,024	0,035	0,572
315	0,032	0,050	0,524
400	0,065	0,083	0,486
500	0,210	0,221	0,527
630	0,416	0,354	0,580
800	0,514	0,514	0,664
1000	0,720	0,579	0,692
1250	0,852	0,275	0,442
1600	0,857	0,368	0,493
2000	0,733	0,446	0,538
2500	0,864	0,410	0,492
3150	0,975	0,309	0,389
4000	0,965	0,372	0,431
5000	0,954	0,442	0,485

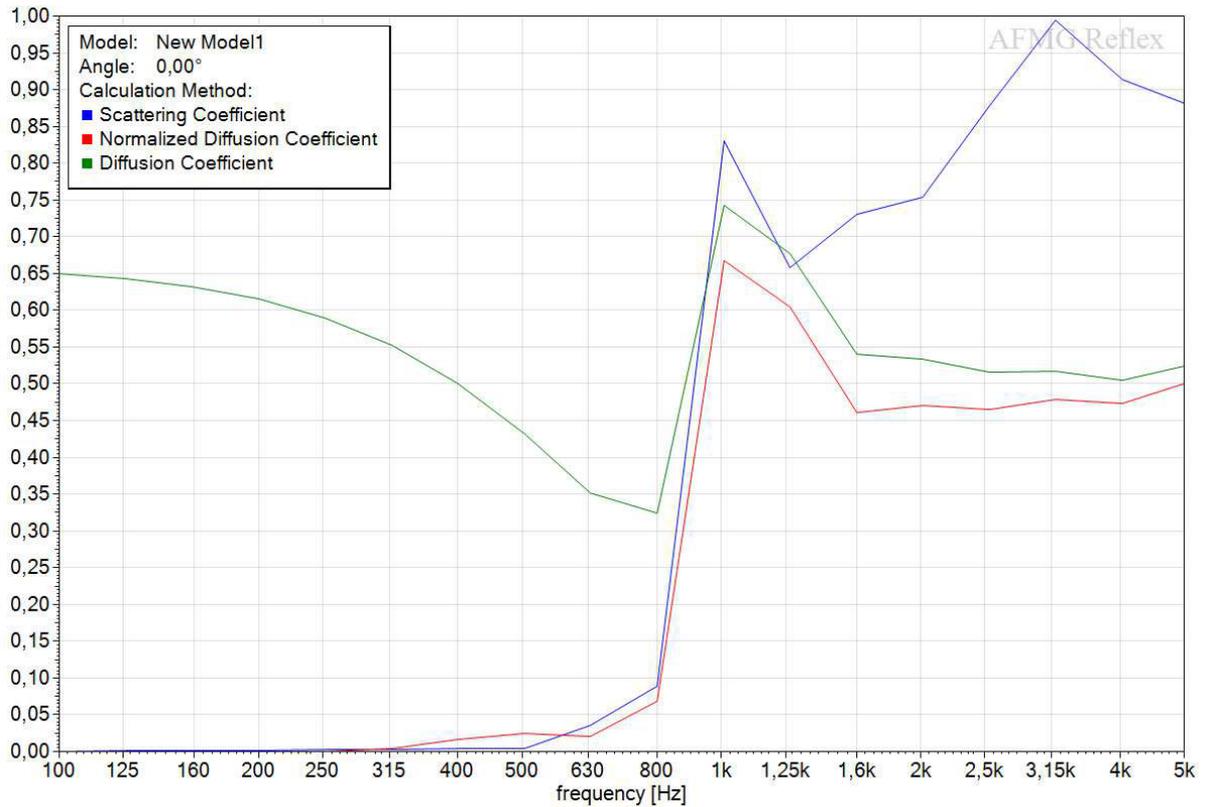
**Angle: -45°, Frequency Range: [100 Hz, 5000 Hz]**



**Coefficients**

Frequency [Hz]	Scattering Coefficient	Normalized Diffusion Coefficient	Diffusion Coefficient
100	0,003	0,012	0,653
125	0,005	0,018	0,647
160	0,008	0,025	0,635
200	0,013	0,034	0,613
250	0,018	0,045	0,576
315	0,024	0,056	0,525
400	0,045	0,070	0,474
500	0,193	0,224	0,526
630	0,483	0,578	0,727
800	0,587	0,670	0,774
1000	0,683	0,391	0,559
1250	0,838	0,208	0,396
1600	0,878	0,420	0,536
2000	0,682	0,339	0,447
2500	0,875	0,422	0,498
3150	0,981	0,286	0,362
4000	0,944	0,340	0,395
5000	0,975	0,322	0,367

Angle: 0°, Frequency Range: [100 Hz, 5000 Hz]



**Coefficients**

Frequency [Hz]	Scattering Coefficient	Normalized Diffusion Coefficient	Diffusion Coefficient
100	0,000	0,000	0,649
125	0,001	0,000	0,643
160	0,001	0,000	0,632
200	0,001	0,000	0,616
250	0,002	0,000	0,590
315	0,003	0,004	0,552
400	0,004	0,016	0,500
500	0,004	0,025	0,432
630	0,036	0,020	0,352
800	0,089	0,068	0,325
1000	0,830	0,668	0,743
1250	0,658	0,605	0,677
1600	0,730	0,460	0,541
2000	0,754	0,471	0,534
2500	0,879	0,465	0,516
3150	0,995	0,478	0,518
4000	0,914	0,473	0,504
5000	0,880	0,502	0,525



## **ANEXO B**

### **ENSAIO CDS**

**B.1 - Registo dos vários tempos de reverberação, Tr**

**B.2 - Folha de cálculo da atenuação do ar**

**B.3 - Folha de cálculo do coeficiente de dispersão, s,  
para a amostra ensaiada à escala real**



Hz	TR ref	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	Tr médio
<b>100</b>	8,80	8,14	8,01	8,26	8,11	8,54	7,90	8,06	8,22	8,10	8,25	8,26	8,16	8,12	8,32	8,24	8,45	8,33	8,16	8,42	8,21
<b>125</b>	9,75	8,74	8,99	8,94	8,70	8,31	8,40	8,81	8,79	8,52	8,99	8,77	8,67	8,41	8,62	8,46	8,56	8,69	8,88	9,78	8,74
<b>160</b>	8,91	8,01	7,71	7,77	8,14	7,69	7,76	7,35	7,45	7,39	8,05	9,25	7,90	7,90	7,69	7,62	7,15	7,34	7,49	7,92	7,77
<b>200</b>	10,17	9,36	8,88	8,98	9,32	9,51	9,09	9,06	9,12	9,22	9,19	8,41	8,93	9,11	9,42	9,11	9,38	9,88	8,98	9,15	9,16
<b>250</b>	9,79	9,51	8,47	8,20	8,30	8,63	8,58	8,68	8,76	9,12	8,77	9,23	8,29	8,24	8,54	8,61	8,97	8,97	9,05	9,21	8,74
<b>315</b>	10,65	9,54	9,43	9,63	9,12	9,15	9,49	9,38	9,33	9,52	9,16	9,67	9,35	9,27	8,97	9,27	9,48	9,37	9,43	9,12	9,35
<b>400</b>	9,62	8,45	8,99	9,06	8,36	8,53	8,51	8,87	9,15	8,75	8,59	8,96	9,09	8,08	8,59	8,64	9,19	9,33	8,68	8,09	8,73
<b>500</b>	10,19	8,41	8,72	8,41	8,33	8,38	8,51	8,61	8,43	8,32	8,53	8,86	8,43	8,38	8,43	8,44	8,31	8,50	8,39	8,43	8,46
<b>630</b>	9,55	8,20	8,71	8,03	8,04	8,09	8,22	8,03	8,25	8,09	8,03	8,37	8,05	7,85	8,07	7,97	8,22	8,23	7,93	8,20	8,14
<b>800</b>	8,92	7,55	7,30	7,29	7,35	7,48	7,19	7,40	7,49	7,47	7,35	7,36	7,36	7,26	7,54	7,27	7,46	7,39	7,26	7,37	7,37
<b>1 000</b>	8,13	6,67	6,58	6,71	6,58	6,53	6,65	6,63	6,75	6,47	6,62	6,65	6,60	6,57	6,54	6,71	6,76	6,59	6,50	6,50	6,61
<b>1 250</b>	7,52	5,84	5,77	5,87	5,83	5,80	5,82	5,85	5,87	5,77	5,71	5,81	5,91	5,79	5,84	5,95	5,82	5,73	5,82	5,84	5,82
<b>1 600</b>	6,86	5,59	5,58	5,65	5,54	5,52	5,54	5,47	5,56	5,62	5,58	5,50	5,54	5,49	5,49	5,60	5,44	5,57	5,55	5,49	5,54
<b>2 000</b>	6,09	5,35	5,32	5,30	5,28	5,30	5,33	5,36	5,34	5,31	5,25	5,34	5,26	5,26	5,31	5,32	5,28	5,37	5,41	5,36	5,32
<b>2 500</b>	5,46	4,83	4,98	4,86	4,94	4,82	4,85	4,85	4,90	4,87	4,89	4,96	4,94	4,92	4,88	4,81	4,87	4,88	4,94	4,86	4,89
<b>3 150</b>	4,63	4,30	4,35	4,33	4,41	4,33	4,36	4,37	4,38	4,36	4,36	4,42	4,34	4,33	4,40	4,41	4,40	4,36	4,37	4,46	4,37
<b>4 000</b>	3,86	3,55	3,72	3,68	3,67	3,69	3,71	3,67	3,68	3,65	3,72	3,65	3,71	3,67	3,68	3,70	3,68	3,73	3,73	3,72	3,68
<b>5 000</b>	3,02	2,79	2,94	2,92	2,88	2,95	2,95	2,94	2,95	2,97	2,95	2,98	2,96	2,92	2,95	2,96	2,97	2,97	2,94	2,96	2,94
<b>6 300</b>	2,34	2,15	2,35	2,28	2,27	2,27	2,29	2,26	2,31	2,29	2,28	2,27	2,29	2,30	2,27	2,29	2,30	2,28	2,28	2,28	2,28
<b>8 000</b>	1,71	1,59	1,74	1,72	1,72	1,70	1,74	1,71	1,72	1,71	1,74	1,75	1,74	1,74	1,74	1,73	1,72	1,70	1,72	1,74	1,72
<b>10 000</b>	1,24	1,17	1,30	1,26	1,27	1,26	1,28	1,26	1,27	1,29	1,30	1,32	1,28	1,28	1,30	1,30	1,29	1,29	1,30	1,29	1,28



**B.3 - Folha de cálculo do coeficiente de dispersão, s, para a amostra ensaiada à escala real**

Freq (Hz)	c <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	m <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	T <sub>2</sub>	m <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>	T <sub>3</sub>	m <sub>3</sub>	c <sub>4</sub>	T <sub>4</sub>	m <sub>4</sub>	αs	αspec	s
<b>100</b>	345,59	8,80	0,0000	345,18	8,14	0,0000	345,59	8,80	0,0000	345,59	8,21	0,0000	0,11	0,09	<b>0,00</b>
<b>125</b>		9,75	0,0000		8,74	0,0000		9,75	0,0000		8,74	0,0000	0,14	0,14	<b>0,00</b>
<b>160</b>		8,91	0,0000		8,01	0,0000		8,91	0,0000		7,77	0,0000	0,15	0,19	<b>0,05</b>
<b>200</b>		10,17	0,0000		9,36	0,0000		10,17	0,0000		9,16	0,0000	0,10	0,12	<b>0,03</b>
<b>250</b>		9,79	0,0000		9,51	0,0000		9,79	0,0000		8,74	0,0000	0,04	0,14	<b>0,11</b>
<b>315</b>		10,65	0,0000		9,54	0,0000		10,65	0,0000		9,35	0,0000	0,13	0,15	<b>0,03</b>
<b>400</b>		9,62	0,0000		8,45	0,0000		9,62	0,0000		8,73	0,0000	0,17	0,12	<b>0,00</b>
<b>500</b>		10,19	0,0000		8,41	0,0000		10,19	0,0000		8,46	0,0000	0,24	0,23	<b>0,00</b>
<b>630</b>		9,55	0,0000		8,20	0,0000		9,55	0,0000		8,14	0,0000	0,20	0,21	<b>0,01</b>
<b>800</b>		8,92	0,0026		7,55	0,0027		8,92	0,0026		7,37	0,0027	0,20	0,25	<b>0,06</b>
<b>1 000</b>		8,13	0,0026		6,67	0,0027		8,13	0,0026		6,61	0,0027	0,28	0,30	<b>0,03</b>
<b>1 250</b>		7,52	0,0026		5,84	0,0027		7,52	0,0026		5,82	0,0027	0,41	0,42	<b>0,02</b>
<b>1 600</b>		6,86	0,0040		5,59	0,0040		6,86	0,0040		5,54	0,0040	0,38	0,40	<b>0,02</b>
<b>2 000</b>		6,09	0,0040		5,35	0,0040		6,09	0,0040		5,32	0,0040	0,27	0,27	<b>0,01</b>
<b>2 500</b>		5,46	0,0040		4,83	0,0040		5,46	0,0040		4,89	0,0040	0,27	0,25	<b>0,00</b>
<b>3 150</b>		4,63	0,0200		4,30	0,0223		4,63	0,0200		4,37	0,0216	-0,47	-0,33	<b>0,09</b>
<b>4 000</b>		3,86	0,0200		3,55	0,0223		3,86	0,0200		3,68	0,0216	-0,40	-0,33	<b>0,05</b>
<b>5 000</b>		3,02	0,0200		2,79	0,0223		3,02	0,0200		2,94	0,0216	-0,35	-0,37	<b>0,00</b>
<b>6 300</b>		2,34	0,0246		2,15	0,0194		2,34	0,0246		2,28	0,0209	1,94	1,20	<b>0,79</b>
<b>8 000</b>		1,71	0,0246		1,59	0,0194		1,71	0,0246		1,72	0,0209	2,02	1,05	<b>0,95</b>
<b>10 000</b>	1,24	0,0246	1,17	0,0194	1,24	0,0246	1,28	0,0209	2,09	0,79	<b>1,19</b>				



## **ANEXO C**

### **ENSAIO HCS**

**C.1 – Determinação do nível sonoro equivalente para 0,5 s, com e sem o difusor na sala**

**C.2 - Determinação do nível sonoro equivalente para 5 s, com e sem o difusor na sala**

**C.3 - Determinação do nível sonoro equivalente no meio da sala, para uma amostragem de 20 medições por posição para 1 s e sem difusores na sala**

**C.4 - Determinação do nível sonoro equivalente no meio da sala, para uma amostragem de 20 medições por posição para 1 s e com difusores na sala**

**C.5 - Determinação do nível sonoro equivalente no meio da sala, para uma amostragem de 20 medições por posição para 5 s e sem difusores na sala**

**C.6 - Determinação do nível sonoro equivalente no meio da sala, para uma amostragem de 20 medições por posição para 5 s e com difusores na sala**



**C.1 – Determinação do nível sonoro equivalente para 0,5 s, com e sem o difusor na sala**

**Medição do Leq aos 0,5 seg**

Freq (Hz)	Sem difusores									Com os difusores								
	Frente da sala			Meio da sala			Trás da sala			Frente da sala			Meio da sala			Trás da sala		
	Mic 1	Mic 2	Mic 3	Mic 1	Mic 2	Mic 3	Mic 1	Mic 2	Mic 3	Mic 1	Mic 2	Mic 3	Mic 1	Mic 2	Mic 3	Mic 1	Mic 2	Mic 3
<b>100</b>	50,1	58,9	51,4	58,1	63,5	56,5	60,0	67,5	64,5	59,6	68,9	59,3	59,1	62,3	53,9	68,3	73,4	70,8
<b>125</b>	61,6	61,6	60,9	59,0	58,5	58,7	58,9	58,8	55,8	62,5	62,5	61,9	59,6	58,3	58,5	62,8	63,5	60,7
<b>160</b>	59,8	61,3	60,4	60,5	59,4	58,6	59,6	58,5	55,5	63,5	63,9	62,4	60,2	60,3	59,9	68,6	67,7	65,6
<b>200</b>	58,6	59,9	61,6	67,3	67,2	64,5	63,9	60,7	61,7	61,1	63,8	64,6	68,5	68,3	66,0	66,2	67,7	66,2
<b>250</b>	62,8	62,3	59,1	63,2	59,3	55,7	56,3	60,3	56,4	63,4	57,9	60,2	63,7	57,6	58,3	63,3	63,9	59,2
<b>315</b>	62,3	65,2	65,6	60,9	65,7	65,2	62,5	60,2	59,1	65,4	64,2	65,2	62,1	65,2	64,4	66,8	65,7	65,1
<b>400</b>	65,9	62,7	62,9	61,4	64,6	62,4	59,9	62,3	63,4	66,8	63,3	64,4	64,1	64,4	62,5	65,0	67,4	68,2
<b>500</b>	59,4	60,5	59,9	57,2	61,3	62,5	59,8	58,5	60,8	59,3	62,0	59,7	59,9	62,0	62,1	63,9	63,6	65,3
<b>630</b>	58,1	57,2	58,7	56,6	58,8	58,5	55,3	53,2	55,2	58,1	60,8	60,0	57,4	60,0	58,6	59,8	59,1	59,7
<b>800</b>	59,6	58,6	59,1	55,9	59,4	54,9	56,7	59,2	55,6	60,1	59,3	58,1	54,3	58,3	55,4	58,5	61,0	58,2
<b>1 000</b>	53,5	53,3	53,8	52,7	55,1	54,1	54,5	54,2	55,3	54,1	54,4	52,5	52,6	52,0	52,1	57,3	57,3	58,5
<b>1 250</b>	53,8	54,8	53,8	53,2	54,9	52,5	56,2	51,6	56,1	54,6	55,4	54,8	53,4	54,9	53,5	57,9	55,4	58,2
<b>1 600</b>	54,3	53,9	54,5	53,3	57,7	54,8	56,2	54,4	56,2	54,6	55,3	55,7	53,6	57,2	55,4	58,5	57,2	59,1
<b>2 000</b>	57,4	58,2	57,1	56,9	57,0	56,0	58,2	55,2	58,3	56,4	58,9	58,4	57,4	56,9	56,1	61,5	58,6	61,0
<b>2 500</b>	57,5	57,7	57,6	58,3	59,4	58,5	59,8	56,6	58,6	57,1	57,6	57,8	59,5	59,9	58,2	62,5	59,8	61,7
<b>3 150</b>	55,0	57,4	56,9	57,0	57,9	57,9	57,4	56,8	58,5	56,2	57,4	57,4	58,2	58,4	58,1	60,2	60,4	61,8
<b>4 000</b>	55,2	55,0	52,8	54,3	54,6	54,3	55,5	54,2	54,7	54,9	54,1	53,5	54,6	55,1	54,7	58,2	57,7	57,8
<b>5 000</b>	56,8	56,3	56,3	55,8	55,8	55,2	56,2	56,8	57,0	57,4	54,0	55,9	56,3	55,5	56,0	59,3	59,9	59,8

**C.2 - Determinação do nível sonoro equivalente para 5 s, com e sem o difusor na sala**

Medição do Leq aos 5 seg																		
Freq (Hz)	Sem difusores									Com os difusores								
	Frente da sala			Meio da sala			Trás da sala			Frente da sala			Meio da sala			Trás da sala		
	Mic 1	Mic 2	Mic 3	Mic 1	Mic 2	Mic 3	Mic 1	Mic 2	Mic 3	Mic 1	Mic 2	Mic 3	Mic 1	Mic 2	Mic 3	Mic 1	Mic 2	Mic 3
<b>100</b>	66,1	72,3	65,6	67,3	70,9	66,5	70,5	73,8	71,7	66,3	72,1	65,9	65,9	69,6	64,8	70,3	73,6	71,5
<b>125</b>	73,1	72,3	71,2	70,0	70,2	67,7	68,4	69,7	67,1	73,0	72,0	71,0	69,4	69,3	66,7	68,1	69,3	66,8
<b>160</b>	73,4	75,0	72,9	72,5	71,8	70,0	74,0	73,8	72,2	73,1	74,7	72,6	71,7	71,2	69,4	73,0	72,9	71,2
<b>200</b>	71,0	71,9	71,2	72,8	73,4	72,1	73,5	73,3	72,6	69,9	73,2	71,8	72,7	73,6	72,9	72,5	73,8	71,7
<b>250</b>	72,7	72,4	69,4	72,2	69,4	67,4	69,6	70,0	67,4	71,8	68,4	68,8	71,3	67,4	67,2	70,6	68,8	66,9
<b>315</b>	71,1	71,7	71,4	69,6	71,3	72,0	70,8	69,8	68,2	72,2	71,0	71,1	68,7	70,7	70,5	70,6	70,3	68,2
<b>400</b>	72,2	69,6	69,7	68,8	70,9	68,9	67,9	70,4	70,4	72,6	69,4	70,0	69,6	70,1	68,3	68,6	70,2	70,6
<b>500</b>	66,5	67,2	67,5	64,8	68,4	68,0	66,7	65,9	67,9	66,6	67,1	66,9	66,0	68,2	67,3	67,5	66,6	69,0
<b>630</b>	65,4	65,9	66,7	64,8	66,6	66,1	64,6	63,4	64,2	65,2	67,9	66,7	64,4	66,0	66,5	64,0	63,6	64,6
<b>800</b>	64,9	64,8	64,9	63,1	65,6	62,7	62,6	64,7	62,0	64,8	65,1	64,4	63,1	64,0	61,9	61,2	63,5	61,6
<b>1 000</b>	60,0	60,2	60,1	58,9	60,9	60,0	60,6	60,6	61,6	60,7	60,2	58,6	59,0	58,0	58,2	59,6	60,3	61,0
<b>1 250</b>	58,7	59,7	58,1	58,3	59,5	58,3	59,7	58,0	60,7	59,1	59,8	59,1	58,2	59,4	57,8	59,5	58,1	60,4
<b>1 600</b>	61,3	61,0	60,7	60,1	63,1	61,8	62,1	61,2	62,3	60,8	61,8	62,0	59,5	62,7	60,9	61,5	60,9	61,9
<b>2 000</b>	63,1	64,0	63,2	63,1	62,4	62,4	63,6	61,9	63,8	62,8	64,8	63,4	62,4	62,5	61,9	63,8	62,1	63,8
<b>2 500</b>	62,8	62,7	62,8	63,4	64,6	63,4	64,2	62,5	63,7	62,7	63,1	62,9	63,2	64,2	62,7	64,4	62,3	63,5
<b>3 150</b>	60,6	61,8	61,8	62,1	63,1	62,7	62,2	62,3	63,1	61,4	62,3	62,1	61,9	62,5	62,5	62,1	62,1	63,3
<b>4 000</b>	60,4	59,5	58,9	59,9	60,1	59,6	60,5	59,7	59,9	59,9	59,3	59,5	59,3	60,0	59,5	60,3	59,9	60,2
<b>5 000</b>	61,5	61,2	61,1	60,7	60,8	60,5	61,3	61,4	61,5	61,7	59,2	60,5	60,4	60,2	60,6	61,3	61,6	61,5

**C.3 - Determinação do nível sonoro equivalente no meio da sala, para uma amostragem de 20 medições por posição para 1 s e sem difusores na sala**

**NÍVEL SONORO EQUIVALENTE NO MEIO DA SALA - SEM DIFUSORES - 1s (dB)**

	Leitura 1			Leitura 2			Leitura 3			Leitura 4			Leitura 5			Leitura 6			Leitura 7			Leitura 8			Leitura 9			Leitura 10			
	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	
100	65.3	67.5	64.8	64.6	67.1	64.1	64.2	66.8	63.3	65.4	68.9	65.4	64.9	67.2	64.1	64.2	67.0	63.7	64.5	66.9	63.8	65.0	67.3	64.4	65.2	67.3	64.5	66.1	67.9	65.2	
125	66.9	66.8	66.1	66.6	66.4	65.8	65.3	65.1	64.4	67.2	66.8	66.1	66.9	66.5	65.9	65.5	65.4	64.8	65.7	66.5	64.9	66.8	66.6	66.0	66.9	66.6	66.0	67.6	67.4	66.7	
160	69.5	67.5	67.8	69.0	66.4	66.8	68.9	66.6	66.0	69.1	66.8	66.6	69.2	66.7	66.6	68.9	66.4	66.1	68.9	66.5	66.3	69.4	67.1	67.6	69.1	66.7	66.7	70.3	68.4	68.3	
200	71.0	71.5	71.2	70.7	71.2	70.8	70.7	70.9	70.7	70.9	71.2	70.9	71.2	70.9	71.2	71.0	70.6	70.9	70.8	70.7	71.0	70.8	70.9	71.4	71.0	70.9	71.4	70.9	71.8	72.1	71.8
250	69.6	66.8	66.1	69.1	66.7	65.5	68.9	66.4	65.0	68.9	66.4	65.4	69.2	66.7	65.5	69.0	66.4	65.1	69.6	66.9	66.1	69.1	66.7	65.5	69.1	66.7	65.5	70.2	67.5	66.6	
315	69.7	72.2	71.0	69.4	72.0	70.7	68.4	71.2	70.4	68.6	71.6	70.7	68.8	71.9	70.9	68.5	71.4	70.5	68.5	71.4	70.5	69.7	72.2	71.0	69.4	71.0	69.4	70.1	72.4	71.5	
400	67.5	69.1	67.7	67.3	68.9	67.4	66.8	68.8	67.2	67.1	69.0	67.3	67.4	69.2	67.5	67.1	68.9	67.2	67.1	68.9	67.2	67.6	69.1	67.7	67.2	69.0	67.5	67.9	69.6	68.0	
500	64.4	67.1	66.7	64.1	66.8	66.3	63.7	66.8	66.0	64.1	66.9	66.3	64.3	67.1	66.5	63.8	66.9	66.1	63.8	66.9	66.1	64.4	67.0	66.6	64.4	67.0	66.5	64.9	67.4	67.2	
630	65.8	66.1	65.4	65.4	65.7	64.9	64.8	65.3	64.8	65.2	65.6	64.9	65.4	65.8	65.1	64.9	65.4	64.8	64.9	65.4	64.8	65.6	65.9	65.2	65.5	65.8	65.1	66.3	66.6	65.9	
800	62.9	63.7	61.9	62.6	63.4	61.6	62.3	63.3	61.6	62.6	63.5	61.6	62.8	63.7	61.8	62.4	63.4	61.6	62.9	63.4	61.6	62.9	63.7	61.8	62.7	63.6	61.8	63.4	64.2	62.3	
1 000	57.9	59.4	59.6	57.6	58.9	59.2	57.1	58.8	59.0	57.4	59.1	59.2	57.6	59.2	59.3	57.2	58.8	59.0	57.2	58.8	59.1	57.8	59.3	59.5	57.7	59.2	59.4	58.6	59.9	60.0	
1 250	57.1	59.0	57.9	56.8	58.8	57.6	56.4	58.8	57.6	56.7	58.9	57.7	56.8	59.1	57.9	56.5	58.8	57.6	56.5	58.8	57.6	57.0	59.0	57.9	56.9	59.0	57.9	57.5	59.6	58.3	
1 600	59.0	62.1	60.5	58.7	61.8	60.2	58.3	61.6	60.0	58.5	61.8	60.3	58.8	62.0	60.4	58.4	61.7	60.1	58.4	61.7	60.1	58.9	62.0	60.5	58.8	62.0	60.4	59.6	62.5	61.0	
2 000	62.5	61.1	61.4	62.2	60.9	61.2	62.1	60.8	61.1	62.3	61.0	61.2	62.4	61.1	61.4	62.1	60.8	61.1	62.1	60.9	61.1	62.4	61.1	61.4	62.3	61.1	61.3	63.0	61.6	62.0	
2 500	62.7	62.8	61.8	62.4	62.6	61.6	62.2	62.4	61.4	62.4	62.6	61.6	62.6	62.7	61.8	62.3	62.4	61.4	62.3	62.4	61.4	62.6	62.8	61.8	62.6	62.7	61.8	63.1	63.3	62.5	
3 150	61.2	61.9	61.9	60.9	61.6	61.6	60.9	61.5	61.4	61.1	61.7	61.5	61.2	61.9	61.7	60.9	61.6	61.4	60.9	61.6	61.4	61.2	61.9	61.8	61.1	61.8	61.7	61.6	62.5	62.4	
4 000	58.8	59.4	59.9	58.5	59.1	59.5	58.3	58.9	59.2	58.5	59.1	59.5	58.7	59.2	59.7	58.3	58.9	59.3	58.4	58.9	59.3	58.7	59.3	58.8	58.6	59.3	59.6	59.2	59.8	60.2	
5 000	60.1	60.2	59.7	59.8	59.9	59.4	59.6	59.8	59.2	59.8	60.0	59.4	58.0	60.2	59.6	59.7	58.9	59.3	59.7	59.8	59.3	60.1	60.2	59.6	59.9	60.1	59.5	60.6	60.8	60.2	

**NÍVEL SONORO EQUIVALENTE NO MEIO DA SALA - SEM DIFUSORES - 1s (dB)**

	Leitura 11			Leitura 12			Leitura 13			Leitura 14			Leitura 15			Leitura 16			Leitura 17			Leitura 18			Leitura 19			Leitura 20		
	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3
66.2	69.4	66.1	64.7	66.8	63.9	64.1	67.9	64.1	64.9	67.2	64.3	64.8	67.3	64.4	65.1	68.0	64.8	65.6	68.6	65.4	65.5	67.7	64.8	64.6	66.8	63.8	65.9	68.7	65.3	
67.3	66.9	66.2	65.7	65.4	64.7	65.7	65.5	64.8	66.7	66.5	65.9	66.7	66.3	65.7	66.9	66.8	66.2	67.2	66.8	66.2	67.2	66.9	66.2	65.6	65.4	64.8	67.0	66.6	66.0	66.0
69.1	66.9	66.8	68.9	66.6	66.0	68.9	66.4	66.2	69.1	66.6	67.1	69.0	66.4	66.5	69.6	67.5	67.9	69.2	67.0	66.6	69.3	67.0	68.9	66.5	66.0	69.1	66.7	66.6	66.8	
70.9	71.5	71.0	70.7	71.0	70.8	70.6	71.0	70.8	70.8	71.2	70.9	70.6	71.1	70.8	71.1	71.6	71.2	71.1	71.3	71.1	71.1	71.4	71.1	70.7	71.0	70.8	70.9	71.4	70.9	
69.1	66.7	65.7	68.8	66.3	64.9	69.1	66.5	65.1	69.2	66.6	65.7	69.0	66.6	65.4	69.8	67.0	66.3	69.0	66.5	65.5	69.1	66.8	65.6	68.9	66.3	65.0	69.0	66.6	65.5	
69.3	72.1	70.7	68.4	71.2	70.4	68.5	71.4	70.5	69.5	72.0	70.7	69.2	72.0	70.7	69.9	72.3	71.2	68.7	71.7	70.7	69.6	72.2	70.9	68.5	71.3	70.4	69.4	72.1	70.7	
67.2	69.0	67.4	66.8	68.8	67.2	67.1	68.9	67.2	67.3	68.9	67.4	67.2	68.9	67.3	67.7	69.3	67.9	67.2	69.1	67.4	67.4	69.1	67.6	66.9	68.8	67.2	67.2	69.0	67.4	
64.2	66.8	66.4	63.7	66.8	66.1	63.8	66.8	66.1	64.2	66.8	66.4	64.2	66.8	66.3	64.5	67.2	66.8	64.2	67.1	66.5	64.4	67.1	66.6	63.8	66.9	66.1	64.3	68.9	66.4	
65.5	65.7	65.0	64.8	65.3	64.8	64.9	65.4	64.8	65.4	65.8	65.0	65.3	65.7	65.0	66.0	66.3	65.5	65.2	65.8	65.0	65.6	65.9	65.2	64.8	65.4	64.8	65.5	65.7	65.0	
62.7	63.5	61.7	62.3	63.3	61.6	62.4	63.4	61.6	62.6	63.5	61.7	63.0	63.8	62.0	62.7	63.7	61.8	62.8	63.7	61.8	62.8	63.7	61.8	62.3	63.3	61.6	62.6	63.5	61.7	
57.6	59.1	59.2	57.1	58.9	59.0	57.2	58.8	59.0	57.6	59.1	59.2	57.5	59.1	59.2	58.0	59.6	59.7	57.6	59.2	59.3	57.8	59.2	59.4	57.2	58.9	59.0	57.6	59.1	59.2	
56.8	58.9	57.7	56.4	58.8	57.6	56.5	58.8	57.6	56.9	58.8	57.7	56.8	58.9	57.7	57.2	59.2	58.1	56.7	59.1	57.9	57.0	59.1	57.9	56.5	58.8	57.6	56.9	59.0	57.8	
58.7	61.8	60.3	58.3	61.7	60.1	58.4	61.7	60.1	58.7	61.8	60.3	58.6	61.8	60.3	59.1	62.2	60.7	58.6	62.0	60.4	58.8	62.0	60.5	58.3	61.7	60.1	58.7	61.9	60.3	
62.2	61.0	61.2	62.1	60.8	61.0	62.1	60.8	61.1	62.3	60.9	61.2	62.2	60.9	61.2	62.6	61.3	61.6	62.4	61.1	61.3	62.4	61.1	61.4	62.1	60.8	61.0	62.3	61.0	61.2	
62.4	62.6	61.7	62.2	62.3	61.4	62.3	62.4	61.4	62.4	62.6	61.7	62.4	62.6	61.6	62.8	63.0	62.0	62.5	62.6	61.7	62.6	62.8	61.9	62.3	62.4	61.4	62.5	62.6	61.7	
61.0	61.7	61.6	60.9	61.5	61.4	60.9	61.5	61.4	61.0	61.7	61.6	61.0	61.7	61.5	61.4	62.1	62.1	62.1	61.8	61.7	61.2	61.9	61.8	60.9	61.5	61.4	61.1	61.7	61.6	
58.5	59.1	59.5	58.3	58.9	59.2	58.3	58.9	59.3	58.5	59.2	59.6	58.4	59.1	59.5	58.8	59.5	60.0	58.6	59.2	59.6	58.7	59.3	58.3	58.9	59.2	58.5	59.2	59.8	59.5	
59.8	60.0	59.4	59.6	59.8	59.2	59.6	59.9	59.3	59.8	60.0	59.4	59.8	60.0	59.4	60.2	60.4	59.8	59.9	60.2	59.5	60.0	60.2	59.6	59.6	59.9	59.2	59.8	60.1	59.4	

**C.4 - Determinação do nível sonoro equivalente no meio da sala, para uma amostragem de 20 medições por posição para 1 s e com difusores na sala**

**NÍVEL SONORO EQUIVALENTE NO MEIO DA SALA - COM DIFUSORES - 1s (dB)**

	Leitura 1			Leitura 2			Leitura 3			Leitura 4			Leitura 5			Leitura 6			Leitura 7			Leitura 8			Leitura 9			Leitura 10			
	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	
100	64,9	67,5	64,1	64,7	67,5	64,5	64,4	66,7	63,8	65,8	68,5	65,4	64,6	67,1	64,2	64,8	66,8	64,2	63,6	66,2	63,0	64,1	66,3	63,3	64,6	66,6	63,8	66,2	68,1	65,7	
125	66,6	65,5	65,5	66,4	65,4	65,4	66,4	65,3	67,3	66,6	66,2	66,5	65,4	65,4	66,7	65,6	65,6	65,0	64,1	64,0	65,8	64,7	64,6	66,4	65,4	65,4	67,6	66,8	66,6		
160	68,7	67,3	66,9	68,5	66,8	66,8	68,6	66,9	66,7	68,8	67,5	67,5	68,6	67,0	66,8	68,7	67,0	67,0	68,4	66,5	66,3	68,5	66,6	66,5	68,6	66,8	67,1	69,3	67,9	67,9	
200	71,1	71,0	71,6	71,1	70,9	71,4	71,1	70,9	71,6	71,6	71,5	71,7	71,2	71,0	71,6	71,4	71,1	71,6	70,9	70,7	71,4	71,0	70,8	71,5	71,1	71,0	71,4	72,5	72,2	72,5	
250	68,9	65,8	66,1	68,8	65,9	65,9	68,9	65,7	66,1	69,3	66,3	66,7	68,9	65,9	66,1	68,9	66,1	66,1	68,9	65,5	66,0	68,9	65,5	66,0	68,9	65,5	66,0	66,2	70,0	66,8	67,2
315	68,3	72,2	70,3	68,6	72,2	70,1	68,3	72,2	70,3	68,9	72,4	70,4	68,8	72,4	70,3	68,8	72,4	70,3	68,0	71,8	69,9	68,0	71,9	70,1	68,7	72,2	70,2	69,1	72,8	70,8	
400	68,6	68,9	67,5	68,6	68,8	67,4	68,6	68,9	67,7	68,6	69,0	67,7	68,6	69,0	67,6	68,8	69,0	67,6	68,4	68,9	67,4	68,4	68,8	67,3	68,7	68,9	67,4	69,2	69,6	68,1	
500	66,0	66,9	66,2	66,1	66,9	66,0	66,0	66,9	66,2	66,3	67,0	66,3	66,3	66,9	66,2	66,3	67,0	66,3	65,5	66,6	65,8	65,5	66,8	66,0	66,1	66,8	66,0	66,7	67,6	67,0	
630	64,2	65,8	65,4	64,4	65,9	65,4	64,3	65,9	65,4	64,6	66,1	65,7	64,4	65,9	65,6	64,6	66,1	65,7	64,0	65,5	65,3	64,0	65,6	65,3	64,4	65,9	65,5	65,3	66,7	66,2	
800	61,4	62,6	61,2	61,3	62,5	61,0	61,4	62,6	61,2	61,6	62,7	61,4	61,4	62,6	61,2	61,5	62,7	61,3	61,1	62,2	61,1	61,2	62,4	61,1	61,3	62,5	61,2	62,1	63,1	61,9	
1 000	57,7	57,6	57,0	57,7	57,5	56,9	57,7	57,6	57,0	57,9	57,8	57,2	57,9	57,7	57,0	57,9	57,7	57,1	57,5	57,3	56,7	57,6	57,4	56,8	57,7	57,5	56,9	58,6	58,5	57,8	
1 250	56,6	58,5	57,8	56,7	58,4	57,6	56,6	58,5	57,8	56,9	58,6	57,9	56,8	58,6	57,9	56,9	58,6	57,9	56,4	58,3	57,6	56,5	58,4	57,7	56,7	58,4	57,7	57,4	59,1	58,4	
1 600	58,7	61,7	59,5	58,6	61,5	59,4	58,7	61,7	59,6	58,9	61,8	59,8	58,7	61,7	59,6	58,8	61,8	59,7	58,5	61,5	59,4	58,5	61,6	59,4	58,7	61,6	59,5	59,6	62,3	60,3	
2 000	61,6	61,6	61,2	61,5	61,5	61,1	61,6	61,6	61,2	61,8	61,7	61,3	61,6	61,7	61,3	61,7	61,8	61,3	61,4	61,4	60,9	61,5	61,0	61,5	61,0	61,5	61,1	62,4	62,3	61,9	
2 500	62,3	62,3	61,9	62,2	62,2	61,8	62,3	62,3	61,9	62,5	62,5	62,1	62,4	62,4	62,0	62,5	62,5	62,1	62,1	62,1	61,7	62,2	62,2	61,8	62,3	62,3	61,9	63,1	63,1	62,6	
3 150	61,3	61,5	61,9	61,1	61,4	61,8	61,3	61,5	61,9	61,4	61,7	62,1	61,3	61,6	61,9	61,4	61,7	62,1	61,0	61,4	61,7	61,1	61,4	61,8	61,2	61,5	61,9	61,9	62,3	62,6	
4 000	58,5	59,2	59,5	58,5	59,0	59,4	58,5	59,2	59,5	58,7	59,4	59,7	58,6	59,2	59,6	58,7	59,3	59,6	58,3	59,0	59,2	58,4	59,0	59,3	58,5	59,1	59,5	59,2	59,9	60,3	
5 000	59,5	60,2	60,0	59,5	60,1	59,9	59,6	60,2	60,0	59,7	60,4	60,1	59,6	60,3	60,0	59,7	60,4	60,1	59,3	60,0	59,8	59,4	60,0	59,8	59,5	60,2	59,9	60,3	60,9	60,6	

**NÍVEL SONORO EQUIVALENTE NO MEIO DA SALA - COM DIFUSORES - 1s (dB)**

	Leitura 11			Leitura 12			Leitura 13			Leitura 14			Leitura 15			Leitura 16			Leitura 17			Leitura 18			Leitura 19			Leitura 20		
	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3
64,9	66,8	64,2	64,5	66,8	63,6	64,4	67,2	64,1	64,3	66,6	63,8	64,6	66,4	63,7	64,9	66,8	64,2	65,0	67,3	64,7	63,5	66,0	62,8	64,2	67,5	64,1	65,2	67,4	64,5	
66,6	65,7	65,7	66,1	65,0	64,8	66,5	65,3	65,3	66,2	65,2	65,2	66,4	65,2	65,3	66,6	65,7	65,7	66,6	65,8	65,7	66,6	65,8	63,8	66,3	65,3	65,3	67,1	66,2	66,1	
68,9	67,2	67,5	68,6	66,8	66,5	68,5	67,0	66,7	68,5	66,8	66,7	68,6	66,9	66,7	68,8	67,1	67,4	68,8	67,2	67,5	68,4	66,5	66,3	68,5	66,8	68,8	69,3	67,7	67,6	
71,4	71,4	71,6	71,0	70,9	71,5	71,1	70,9	71,6	71,0	70,9	71,4	71,0	70,9	71,5	71,4	71,6	71,5	71,5	71,7	70,9	70,7	71,4	71,0	70,9	71,4	71,6	71,5	71,7	71,7	
69,5	66,4	66,7	68,9	65,6	66,1	68,9	65,7	66,1	69,0	65,9	66,0	68,9	65,6	66,1	69,4	66,2	66,7	69,5	66,3	66,8	68,8	65,5	65,9	68,9	65,9	66,0	69,5	66,5	66,8	
69,0	72,5	70,5	68,1	71,9	70,1	68,4	72,3	70,3	68,7	72,3	70,3	68,0	72,1	70,2	68,9	72,4	70,4	68,8	72,3	70,4	68,0	71,7	69,9	68,7	72,3	70,2	69,0	72,5	70,5	
69,1	69,2	67,8	68,5	68,9	67,3	68,6	68,9	67,5	68,6	68,9	67,5	68,6	68,9	67,4	68,9	69,0	67,7	68,9	69,2	67,6	68,3	68,8	67,3	68,6	68,9	67,5	69,1	69,2	67,8	
66,4	67,1	66,4	65,5	66,8	66,0	66,1	66,9	66,2	66,1	66,8	66,1	65,8	66,9	66,1	66,3	66,9	66,3	66,2	67,0	66,4	65,4	66,6	65,7	66,2	66,8	66,1	66,4	67,1	66,4	
64,7	66,2	65,8	64,0	65,6	65,3	64,3	65,8	65,4	64,3	65,7	65,5	64,1	65,7	65,4	64,6	66,1	65,6	64,7	66,2	65,7	63,8	65,5	65,3	64,4	65,8	65,6	64,7	66,2	65,8	
61,7	62,8	61,5	61,2	62,4	61,1	61,4	62,6	61,2	61,3	62,5	61,1	61,4	62,6	61,2	61,6	62,7	61,4	61,6	62,7	61,4	61,1	62,2	61,1	61,3	62,6	61,1	61,7	62,8	61,5	
58,0	57,9	57,3	57,6	57,4	56,8	57,7	57,6	57,0	57,7	57,5	56,9	57,7	57,5	57,0	57,9	57,8	57,2	58,0	57,9	57,3	57,5	57,3	56,7	57,8	57,6	56,9	58,0	57,9	57,3	
57,0	58,7	58,0	56,5	58,4	57,7	56,7	58,5	57,8	56,7	58,5	57,7	56,6	58,5	57,7	56,9	58,6	57,9	56,9	58,6	57,9	56,4	58,3	57,6	56,7	58,5	57,8	57,0	58,7	58,0	
59,0	61,9	59,9	58,5	61,6	59,4	58,7	61,7	59,6	58,6	61,6	59,5	58,6	61,6	59,5	58,9	61,8	59,8	59,0	61,8	59,8	58,4	61,4	59,3	58,6	61,6	59,6	61,9	59,9	61,9	
61,9	61,8	61,4	61,5	61,5	61,0	61,6	61,6	61,2	61,5	61,6	61,1	61,6	61,6	61,1	61,8	61,7	61,3	61,8	61,7	61,3	61,4	61,4	60,9	61,6	61,6	61,2	61,9	61,8	61,5	
62,6	62,6	62,2	62,2	62,2	61,8	62,3	62,4	61,9	62,2	62,3	61,9	62,2	62,3	61,9	62,5	62,5	62,1	62,6	62,5	62,1	62,1	62,1	61,6	62,3	62,3	61,9	62,6	62,6	62,2	
61,5	61,8	62,2	61,1	61,4	61,8	61,3	61,6	61,9	61,2	61,5	61,8	61,2	61,3	61,8	61,4	61,7	62,1	61,4	61,7	62,1	61,0	61,3	61,7	61,2	61,5	61,9	61,5	61,8	62,2	
58,8	59,4	59,8	58,4	59,0	59,2	58,5	59,2	59,5	58,5	59,1	59,4	58,5	59,1	59,4	58,7	59,3	59,7	58,7	59,3	59,8	58,3	59,0	59,1	58,5	59,1	59,5	58,8	59,5	59,8	
59,8	60,5	60,2	59,4	60,0	59,8	59,6	60,2	60,0	59,5	60,1	59,9	59,5	60,2	59,9	59,7	60,4	60,1	59,7	60,4	60,1	59,3	60,0	59,7	59,5	60,1	59,9	59,8	60,5	60,2	

**C.5 - Determinação do nível sonoro equivalente no meio da sala, para uma amostragem de 20 medições por posição para 5 s e sem difusores na sala**

**NÍVEL SONORO EQUIVALENTE NO MEIO DA SALA - SEM DIFUSORES - 5s (dB)**

	Leitura 1			Leitura 2			Leitura 3			Leitura 4			Leitura 5			Leitura 6			Leitura 7			Leitura 8			Leitura 9			Leitura 10					
	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3			
100	67,7	69,6	66,8	67,5	69,1	66,5	67,7	70,1	67,0	67,6	69,3	66,7	67,6	69,5	66,8	67,6	69,9	66,9	67,6	69,5	66,8	67,6	69,9	66,8	67,6	69,9	66,8	67,6	69,9	66,8	67,7	69,9	66,9
125	70,3	69,8	67,9	70,3	69,6	67,7	70,4	69,9	67,9	70,3	69,8	67,8	70,3	69,8	67,8	70,2	69,8	67,8	70,2	69,8	67,9	70,2	69,8	67,9	70,2	69,8	67,9	70,3	69,8	67,9	70,3	69,8	67,9
160	72,3	71,9	70,1	72,3	71,9	70,2	72,5	72,0	70,2	72,3	71,9	70,1	72,3	71,9	70,1	72,3	71,9	70,1	72,3	71,9	70,1	72,3	71,9	70,1	72,3	71,9	70,1	72,3	71,9	70,1	72,3	71,9	70,1
200	73,5	73,3	72,9	73,5	73,1	72,9	73,5	73,3	73,0	73,5	73,1	72,9	73,5	73,2	72,9	73,4	73,2	72,9	73,4	73,3	72,8	73,3	73,1	72,7	73,4	73,2	72,8	73,4	73,2	72,8	73,4	73,2	72,8
250	73,4	69,8	69,3	73,4	69,8	69,3	73,5	69,9	69,4	73,3	69,8	69,3	73,3	69,8	69,3	73,4	69,8	69,3	73,4	69,7	69,3	73,4	69,7	69,3	73,4	69,7	69,3	73,4	69,6	69,3	73,4	69,6	69,3
315	71,4	72,8	72,8	71,4	72,7	72,7	71,5	72,9	72,9	71,4	72,7	72,8	71,4	72,8	72,7	71,4	72,8	72,8	71,6	73,0	72,8	71,6	73,0	72,8	71,5	72,9	72,7	71,6	73,0	72,7	71,6	73,0	72,7
400	69,8	71,9	70,2	69,9	72,0	70,2	69,9	72,0	70,3	69,9	71,9	70,2	69,8	71,9	70,1	69,8	71,9	70,1	69,8	72,1	70,3	69,7	72,1	70,3	69,8	72,1	70,3	69,8	72,1	70,3	69,8	72,1	70,3
500	66,4	69,4	69,1	66,4	69,4	69,1	66,5	69,5	69,1	66,4	69,4	69,0	66,4	69,4	69,0	66,4	69,4	69,0	66,4	69,4	69,0	66,4	69,4	69,0	66,4	69,4	69,0	66,3	69,4	69,1	66,3	69,5	69,1
630	67,6	68,0	67,2	67,6	68,0	67,2	67,7	68,1	67,3	67,6	68,0	67,2	67,5	68,0	67,1	67,5	68,0	67,2	67,6	68,0	67,1	67,6	68,0	67,0	67,6	68,0	67,0	67,6	68,0	67,0	67,6	68,0	67,1
800	64,8	66,4	64,4	64,8	66,4	64,4	64,9	66,5	64,5	64,8	66,4	64,4	64,8	66,4	64,3	64,7	66,4	64,4	64,8	66,2	64,5	64,7	66,1	64,4	64,7	66,2	64,4	64,8	66,2	64,4	64,8	66,2	64,4
1 000	59,6	61,6	61,3	59,6	61,5	61,2	59,7	61,7	61,4	59,6	61,5	61,2	59,6	61,5	61,2	59,6	61,6	61,2	59,8	61,0	60,8	59,7	60,9	60,8	59,7	61,0	60,8	59,7	61,0	60,8	59,7	61,0	60,8
1 250	58,4	60,1	59,1	58,3	60,1	59,1	58,5	60,2	59,2	58,3	60,1	59,1	58,3	60,1	59,1	58,3	60,1	59,1	58,3	60,3	59,2	58,2	60,2	59,2	58,2	60,3	59,2	58,3	60,3	59,2	58,3	60,3	59,2
1 600	60,8	63,3	62,2	60,7	63,2	62,2	60,9	63,4	62,3	60,7	63,2	62,2	60,7	63,2	62,2	60,7	63,3	62,2	60,8	63,2	62,1	60,7	63,1	62,1	60,7	63,2	62,1	60,8	63,2	62,1	60,8	63,2	62,1
2 000	64,6	63,5	63,3	64,5	63,5	63,3	64,6	63,6	63,4	64,5	63,4	63,3	64,5	63,4	63,3	64,5	63,5	63,3	64,4	63,2	63,7	64,4	63,1	63,6	64,4	63,1	63,6	64,4	63,1	63,6	64,4	63,1	63,6
2 500	64,4	64,8	63,6	64,4	64,8	63,6	64,5	64,9	63,7	64,4	64,7	63,6	64,4	64,7	63,5	64,4	64,7	63,5	64,3	64,7	63,7	64,2	64,7	63,6	64,2	64,7	63,6	64,2	64,7	63,6	64,2	64,7	63,6
3 150	62,4	63,6	63,0	62,4	63,6	63,0	62,5	63,7	63,1	62,3	63,6	63,0	62,3	63,6	63,0	62,3	63,6	63,0	62,4	63,6	63,0	62,3	63,5	62,9	62,3	63,5	62,9	62,3	63,5	62,9	62,3	63,5	62,9
4 000	60,4	61,1	61,2	60,4	61,1	61,2	60,5	61,2	61,3	60,4	61,1	61,2	60,4	61,1	61,2	60,4	61,1	61,2	60,4	61,2	61,1	60,3	61,1	61,1	60,3	61,1	61,1	60,3	61,1	61,1	60,3	61,1	61,1
5 000	61,3	61,8	60,9	61,2	61,8	60,9	61,4	61,9	61,0	61,2	61,7	60,8	61,2	61,7	60,8	61,3	61,7	60,9	61,2	61,8	61,0	61,2	61,8	61,0	61,2	61,7	60,9	61,2	61,7	60,9	61,2	61,7	60,9

**NÍVEL SONORO EQUIVALENTE NO MEIO DA SALA - SEM DIFUSORES - 5s (dB)**

	Leitura 11			Leitura 12			Leitura 13			Leitura 14			Leitura 15			Leitura 16			Leitura 17			Leitura 18			Leitura 19			Leitura 20				
	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3		
67,6	69,2	66,7	67,7	69,9	67,0	67,6	70,4	67,0	67,7	70,1	67,0	67,7	69,1	66,7	67,6	69,4	66,7	67,7	70,1	67,0	67,6	69,8	66,8	67,6	69,2	66,7	67,5	69,1	66,5			
70,2	69,8	67,8	70,3	69,8	67,9	70,2	69,7	67,8	70,3	69,9	67,9	70,3	69,8	67,9	70,2	69,7	67,8	70,3	69,8	67,9	70,2	69,8	67,8	70,2	69,7	67,8	70,2	69,7	67,8	70,2	69,7	67,8
72,3	71,9	70,1	72,4	72,0	72,3	71,9	70,1	72,4	71,9	70,2	72,3	71,9	70,1	72,3	71,8	70,1	72,3	71,8	70,1	72,3	71,9	70,1	72,3	71,9	70,1	72,3	71,9	70,1	72,3	71,9	70,1	
73,4	73,2	72,7	73,5	73,4	72,8	73,4	73,2	72,7	73,4	73,4	72,8	73,4	73,2	72,8	73,3	73,3	72,8	73,4	73,3	72,8	73,4	73,3	72,8	73,3	73,1	72,7	73,3	73,1	72,7	73,3	73,1	72,7
73,4	69,6	69,3	73,5	69,7	69,3	73,4	69,6	69,2	73,6	69,7	69,4	73,5	69,7	69,3	73,4	69,6	69,2	73,5	69,7	69,3	73,4	69,6	69,2	73,4	69,6	69,2	73,4	69,6	69,2	73,4	69,6	69,2
71,5	72,9	72,7	71,6	73,1	72,8	71,5	73,0	72,7	71,6	73,1	72,8	71,5	73,0	72,8	71,5	73,0	72,7	71,5	73,0	72,8	71,5	72,9	72,7	71,5	72,9	72,7	71,5	72,9	72,7	71,5	72,9	72,7
69,7	72,0	70,2	69,8	72,1	70,3	69,7	72,0	70,2	69,8	72,1	70,3	69,8	72,1	70,3	69,7	72,0	70,2	69,7	72,1	70,3	69,7	72,0	70,2	69,7	72,0	70,2	69,7	72,1	70,2	69,7	72,1	70,2
66,3	69,4	69,0	66,4	69,5	69,2	66,3	69,4	69,1	66,4	69,6	69,2	66,4	69,6	69,2	66,3	69,4	69,0	66,3	69,4	69,0	66,3	69,4	69,0	66,3	69,4	69,0	66,3	69,4	69,0	66,3	69,4	69,0
67,5	68,0	67,0	67,6	68,0	67,1	67,5	67,9	67,0	67,6	68,0	67,1	67,6	68,0	67,1	67,5	67,9	67,0	67,6	68,0	67,1	67,5	68,0	67,0	67,5	67,9	67,0	67,5	67,9	67,0	67,5	67,9	67,0
64,7	66,2	64,4	64,8	66,2	64,5	64,7	66,1	64,4	64,8	66,3	64,5	64,8	66,2	64,5	64,7	66,1	64,4	64,8	66,2	64,5	64,7	66,1	64,4	64,7	66,1	64,4	64,7	66,1	64,4	64,7	66,1	64,4
59,7	60,9	60,7	59,8	61,0	60,8	59,7	60,9	60,8	59,9	61,1	60,9	59,7	61,0	60,8	59,7	60,9	60,8	59,8	61,1	60,9	59,7	60,9	60,7	59,7	60,9	60,7	59,7	60,9	60,7	59,7	60,9	60,7
58,2	60,2	59,2	58,3	60,3	59,3	58,2	60,2	59,2	58,3	60,3	59,3	58,3	60,3	59,3	58,2	60,2	59,2	58,3	60,3	59,3	58,2	60,2	59,2	58,2	60,2	59,2	58,2	60,2	59,2	58,2	60,2	59,2
60,7	63,2	62,1	60,8	63,3	62,2	60,7	63,2	62,1	60,8	63,3	62,2	60,8	63,2	62,1	60,7	63,2	62,1	60,8	63,3	62,2	60,7	63,2	62,1	60,7	63,2	62,1	60,7	63,1	62,1	60,7	63,1	62,1
64,4	63,1	63,6	64,5	63,2	63,7	64,4	63,1	63,6	64,5	63,3	63,7	64,4	63,2	63,6	64,4	63,1	63,6	64,4	63,2	63,7	64,4	63,1	63,6	64,3	63,1	63,6	64,3	63,1	63,6	64,3	63,1	63,6
64,2	64,7	63,6	64,3	64,8	63,7	64,2	64,7	63,6	64,3	64,8	63,7	64,2	64,7	63,6	64,1	64,7	63,6	64,2	64,8	63,7	64,2	64,7	63,6	64,1	64,7	63,6	64,1	64,7	63,6	64,1	64,7	63,6
62,3	63,5	62,9	62,4	63,6	63,0	62,3	63,5	62,9	62,5	63,7	63,0	62,4	63,6	63,0	62,3	63,5	62,9	62,4	63,6	63,0	62,3	63,5	62,9	62,3	63,5	62,9	62,3	63,5	62,9	62,3	63,5	62,9
60,3	61,1	61,1	60,4	61,2	61,2	60,3	61,1	61,1	60,4	61,3	61,2	60,3	61,2	61,1	60,3	61,1	61,1	60,4	61,2	61,2	60,3	61,1	61,1	60,3	61,1	61,1	60,3	61,1	61,1	60,3	61,1	61,1
61,2	61,7	60,9	61,3	61,8	61,0	61,2	61,7	60,9	61,3	61,8	61,1	61,2	61,7	61,0	61,2	61,7	60,9	61,3	61,7	61,0	61,2	61,7	60,9	61,2	61,7	60,9	61,2	61,7	60,9	61,2	61,7	60,9

**C.6 - Determinação do nível sonoro equivalente no meio da sala, para uma amostragem de 20 medições por posição para 5 s e com difusores na sala**

**NÍVEL SONORO EQUIVALENTE NO MEIO DA SALA - COM DIFUSORES - 5s (dB)**

	Leitura 1			Leitura 2			Leitura 3			Leitura 4			Leitura 5			Leitura 6			Leitura 7			Leitura 8			Leitura 9			Leitura 10		
	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3
100	67,2	69,1	66,4	67,2	68,4	66,1	67,2	69,5	66,5	67,2	69,2	66,4	67,3	69,0	66,3	67,2	68,4	66,1	67,2	69,0	66,4	67,1	69,1	66,4	67,1	68,8	66,3	67,1	68,8	66,3
125	70,2	69,2	67,7	70,1	69,1	67,6	70,1	69,1	67,7	70,2	69,2	67,7	70,1	69,1	67,6	70,1	69,1	67,6	70,2	69,2	67,7	70,1	69,1	67,6	70,1	69,1	67,6	70,1	69,1	67,6
160	72,1	71,7	69,7	72,0	71,7	69,6	72,1	71,7	69,7	72,0	71,7	69,7	72,0	71,7	69,6	72,0	71,6	69,6	72,1	71,7	69,7	72,1	71,7	69,7	72,0	71,7	69,7	72,0	71,6	69,6
200	73,8	73,3	73,5	73,7	73,1	73,3	73,8	73,3	73,5	73,8	73,2	73,4	73,7	73,1	73,4	73,7	73,0	73,3	73,8	73,3	73,5	73,7	73,2	73,4	73,7	73,2	73,4	73,7	73,2	73,4
250	73,0	69,0	69,2	72,8	68,8	69,1	73,0	69,0	69,2	72,8	68,9	69,1	72,8	68,9	69,1	72,8	68,8	69,1	73,0	69,0	69,3	72,9	69,0	69,2	72,8	68,9	69,1	72,8	68,9	69,1
315	70,7	73,0	72,1	70,6	72,9	72,0	70,6	73,0	72,1	70,6	73,0	72,0	70,6	72,9	72,0	70,6	72,9	72,0	70,7	73,0	72,1	70,6	72,9	72,0	70,6	72,9	72,0	70,6	72,9	72,0
400	70,9	71,6	69,9	70,8	71,6	69,8	70,8	71,6	69,8	70,8	71,6	69,9	70,8	71,6	69,8	70,8	71,6	69,8	70,9	71,6	69,9	70,8	71,6	69,8	70,8	71,6	69,8	70,8	71,6	69,8
500	67,5	69,2	69,7	67,4	69,1	68,6	67,5	69,2	68,7	67,5	69,1	68,6	67,4	69,1	68,6	67,4	69,1	68,6	67,5	69,2	68,7	67,4	69,1	68,6	67,4	69,1	68,6	67,4	69,1	68,6
630	67,0	67,9	67,5	67,0	67,9	67,4	67,0	67,9	67,5	67,0	67,9	67,5	67,0	67,9	67,5	67,0	67,9	67,5	67,0	67,9	67,5	67,0	67,9	67,5	67,0	67,9	67,5	67,0	67,9	67,5
800	64,2	64,8	64,0	64,1	64,7	63,8	64,1	64,8	64,0	64,1	64,7	63,9	64,1	64,7	63,9	64,1	64,7	63,8	64,2	64,8	64,0	64,1	64,7	63,9	64,1	64,7	63,9	64,1	64,7	63,9
1000	59,9	60,0	59,5	59,8	59,9	59,3	59,9	60,0	59,5	59,8	59,9	59,4	59,8	59,8	59,3	59,8	59,8	59,3	59,9	59,9	59,5	59,8	59,9	59,4	59,8	59,8	59,3	59,8	59,8	59,3
1250	58,4	60,3	59,4	58,2	60,2	59,3	58,4	60,3	59,4	58,3	60,2	59,3	58,3	60,2	59,3	58,3	60,2	59,3	58,4	60,3	59,4	58,3	60,2	59,3	58,3	60,2	59,3	58,3	60,2	59,3
1600	60,6	63,2	61,7	60,5	63,0	61,5	60,6	63,2	61,6	60,5	63,1	61,6	60,5	63,1	61,5	60,5	63,1	61,5	60,6	63,2	61,7	60,5	63,2	61,6	60,5	63,1	61,6	60,5	63,1	61,5
2000	63,7	63,9	63,0	63,5	63,7	62,8	63,7	63,8	62,9	63,6	63,7	62,9	63,6	63,7	62,8	63,7	63,8	63,0	63,6	63,7	62,8	63,7	63,8	63,0	63,6	63,8	62,9	63,6	63,7	62,8
2500	64,2	64,5	63,5	64,1	64,4	63,3	64,2	64,4	63,5	64,2	64,4	63,4	64,1	64,4	63,3	64,1	64,3	63,3	64,2	64,5	63,5	64,2	64,4	63,4	64,2	64,4	63,4	64,1	64,3	63,3
3150	62,6	63,3	63,6	62,5	63,1	63,4	62,5	63,2	63,5	62,5	63,2	63,5	62,5	63,2	63,5	62,4	63,3	63,3	62,6	63,2	63,6	62,5	63,2	63,5	62,5	63,2	63,4	62,5	63,2	63,4
4000	60,1	61,0	61,2	60,1	60,8	61,1	60,2	60,9	61,2	60,1	60,9	61,1	60,1	60,9	61,1	60,1	60,9	61,1	60,2	61,0	61,2	60,1	60,9	61,1	60,1	60,9	61,1	60,1	60,9	61,1
5000	61,0	61,9	61,4	60,9	61,8	61,3	61,1	61,9	61,4	61,0	61,9	61,4	60,9	61,8	61,3	60,9	61,7	61,3	60,9	61,7	61,3	60,9	61,8	61,4	61,0	61,8	61,3	60,9	61,8	61,3

**NÍVEL SONORO EQUIVALENTE NO MEIO DA SALA - COM DIFUSORES - 5s (dB)**

	Leitura 11			Leitura 12			Leitura 13			Leitura 14			Leitura 15			Leitura 16			Leitura 17			Leitura 18			Leitura 19			Leitura 20		
	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 1	MIC 2	MIC 3
67,2	69,7	66,6	67,3	68,9	66,3	67,2	69,0	66,4	67,3	69,1	66,5	66,9	69,2	66,1	66,9	68,9	66,0	66,9	68,7	65,9	66,8	68,2	65,7	67,0	68,7	66,1	67,0	68,7	66,1	
70,1	69,2	67,7	70,1	69,1	67,6	70,1	69,1	67,6	70,1	69,1	67,6	69,9	69,0	67,3	70,0	69,0	67,4	70,0	69,0	67,4	69,9	68,9	67,3	69,9	68,9	67,3	69,9	69,0	67,3	
72,1	71,6	69,7	72,0	71,7	69,6	72,0	71,6	69,6	72,0	71,6	69,6	71,9	71,6	69,6	71,9	71,6	69,6	71,9	71,6	69,6	71,8	71,5	69,5	71,7	71,5	69,4	71,7	71,6	69,5	
73,8	73,2	73,4	73,7	73,1	73,4	73,7	73,2	73,4	73,7	73,2	73,4	73,8	73,2	73,5	73,9	73,3	73,5	73,9	73,3	73,5	73,8	73,2	73,4	73,7	73,1	73,3	73,8	73,2	73,4	
72,9	69,0	69,2	72,9	68,9	69,1	72,8	68,9	69,1	72,8	68,9	69,1	73,0	69,1	69,2	73,0	69,0	69,3	73,0	69,0	69,3	72,9	68,9	69,2	72,8	68,8	69,1	72,8	68,9	69,1	
70,6	72,9	72,0	70,7	73,0	70,6	72,9	72,0	70,6	72,9	72,0	70,6	72,9	72,0	70,7	73,0	72,1	70,7	73,0	72,1	70,5	72,8	71,9	70,6	72,9	71,9	70,6	72,8	71,9	70,6	
70,8	71,5	69,8	70,9	71,6	69,9	70,8	71,5	69,8	70,8	71,6	69,8	70,9	71,7	69,9	70,9	71,7	69,9	70,9	71,6	69,9	70,8	71,5	69,8	70,8	71,6	69,8	70,8	71,6	69,8	
67,4	69,1	68,6	67,4	69,1	68,6	67,4	69,1	68,6	67,4	69,1	68,6	67,5	69,3	68,7	67,4	69,3	68,7	67,4	69,3	68,7	67,3	69,1	68,6	67,3	69,2	68,6	67,3	69,2	68,6	
66,9	67,9	67,5	67,0	67,9	67,5	66,9	67,8	67,4	67,0	67,8	67,4	66,9	68,0	67,6	66,9	68,0	67,5	66,9	68,0	67,5	66,8	67,9	67,4	66,8	67,9	67,4	66,8	67,9	67,4	
64,1	64,7	63,9	64,1	64,7	63,9	64,1	64,7	63,8	64,1	64,7	63,8	64,1	64,9	63,9	64,2	64,8	63,9	64,2	64,8	63,9	64,0	64,7	63,8	64,0	64,7	63,7	64,1	64,7	63,7	
59,8	59,9	59,4	59,8	59,8	59,3	59,8	59,8	59,3	59,8	59,8	59,3	60,0	59,4	60,0	59,9	59,4	60,0	59,9	59,4	60,0	59,9	59,8	59,8	59,3	59,8	59,8	59,3	59,8	59,8	
58,3	60,2	59,3	58,3	60,2	59,4	58,3	60,2	59,3	58,3	60,2	59,3	58,3	60,2	59,4	58,4	60,2	59,4	58,4	60,2	59,4	58,3	60,1	59,3	58,2	60,1	59,3	58,3	60,1	59,3	
60,5	63,1	61,6	60,5	63,1	61,6	60,5	63,1	61,5	60,5	63,1	61,5	60,6	63,2	61,6	60,6	63,2	61,6	60,6	63,2	61,6	60,5	63,1	61,5	60,5	63,0	61,4	60,6	63,1	61,4	
63,6	63,8	62,9	63,6	63,7	62,9	63,5	63,7	62,8	63,6	63,7	62,8	63,8	63,0	63,8	63,0	63,8	63,0	63,8	63,8	63,0	63,7	62,9	63,7	62,9	63,6	62,9	63,7	62,9	63,7	
64,1	64,4	63,4	64,2	64,4	63,3	64,1	64,3	63,3	64,1	64,3	63,4	64,2	64,4	63,6	64,2	64,3	63,6	64,2	64,3	63,6	64,1	64,2	63,5	64,1	64,2	63,5	64,1	64,2	63,5	
62,5	63,2	63,5	62,5	63,2	63,5	62,4	63,1	63,4	62,4	63,2	63,4	62,7	63,3	63,6	62,7	63,3	63,5	62,7	63,3	63,6	62,6	63,2	63,4	62,5	63,2	63,4	62,6	63,2	63,4	
60,1	60,9	61,1	60,1	60,9	61,1	60,0	60,9	61,1	60,0	60,9	61,1	60,3	61,0	61,2	60,3	61,0	61,2	60,3	61,0	61,2	60,2	60,9	61,1	60,2	60,8	61,1	60,2	60,9	61,1	
61,0	61,8	61,4	61,0	61,8	61,3	60,9	61,7	61,3	60,9	61,8	61,3	61,1	62,0	61,5	61,2	62,0	61,5	61,2	62,0	61,5	61,0	61,9	61,4	61,0	61,8	61,3	60,9	61,8	61,3	