



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,**  
**ARQUITETURA E URBANISMO**

**COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO SONORO DE PAINÉIS**  
**PERFURADOS**

**FABIANA RAMIRES**

**Campinas, SP**

**2011.**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

**FABIANA RAMIRES**

**COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO SONORO DE PAINÉIS PERFURADOS**

*Texto apresentado à Comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Concentração de Arquitetura e Construção.*

**ORIENTADORA: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Stelamaris Rolla Bertoli**

**Campinas, SP**

**2011**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

R145c Ramires, Fabiana  
Coeficiente de espalhamento sonoro de painéis  
perfurados / Fabiana Ramires. --Campinas, SP: [s.n.],  
2011.

Orientador: Stelamaris Rolla Bertoli.  
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e  
Urbanismo.

1. Espalhamento. 2. Simulação por computador. 3.  
Acústica. 4. Difusão. I. Bertoli, Stelamaris Rolla. II.  
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Título em Inglês: Scattering sound coefficient of perforated panels

Palavras-chave em Inglês: Scattering , Computer simulation, Acoustics, Diffusion

Área de concentração: Arquitetura e Construção

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Márcio Henrique de Avelar Gomes, José Augusto Mannis

Data da defesa: 10/08/2011

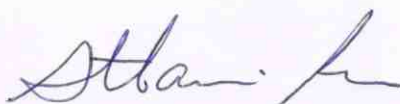
Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

FABIANA RAMIRES

**COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO SONORO DE PAINÉIS PERFURADOS**

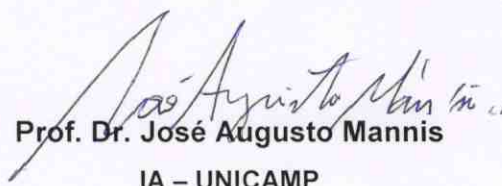
Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Stelamaris Rolla Bertoli  
Presidente e orientadora / FEC - UNICAMP



Prof. Dr. Márcio Henrique de Avelar Gomes  
UNB – Universidade de Brasília



Prof. Dr. José Augusto Mannis  
IA – UNICAMP

Campinas, 10 de Agosto de 2011.

*Aos meus pais **Francisco e Laureci,**  
pelo amor, dedicação e por tudo que aprendi,*

*Aos meus irmãos **Adriano e Juliano,**  
pelo carinho e amizade sempre,*

*Ao meu querido marido **André,**  
pelo seu amor, incentivo e paciência nas minhas ausências,*

*Aos meus queridos filhos **Caio e Maitê,**  
pela minha razão de existir.*

## AGRADECIMENTOS

À DEUS,

pela oportunidade maravilhosa do conhecimento,

À Professora Dr<sup>a</sup> Stelamaris Rolla Bertoli,

pela orientação e pela maneira carinhosa e cordial que se desenvolveu essa pesquisa

tornando-se uma professora-amiga nessa jornada,

Ao Dr. Eng<sup>o</sup> Márcio Henrique de Avelar Gomes,

pela amizade, conhecimento e contribuição durante a pesquisa,

Aos Srs. Obadias Pereira e Daniel Celente,

pelas colaborações nas montagens do sistema de medição e auxílio com os aparelhos do

Laboratório de Conforto da Faculdade de Engenharia Civil,

Ao amigo Eng<sup>o</sup> Jorge Monteiro,

pelo companheirismo e amizade durante toda a jornada,

Ao amigo Dr. Christian dos Santos,

pelas explicações e disponibilidade sempre para conversas sobre o tema,

Às amigas Eng<sup>a</sup> Aline Lisot, Dr<sup>a</sup> Maria de Fátima Ferreira Neto, Dr<sup>a</sup> Maria Lúcia Gondim da Rosa Oiticica,

pela grande amizade e pelas conversas sobre o grande universo da acústica,

Às amigas e amigos Arq<sup>a</sup> Juliana Costa, Arq<sup>a</sup> Luciana Oliveira Fernandes, Eng<sup>o</sup> Edson Matsumoto,

pela disponibilidade sempre,

À Empresa Knauf do Brasil, em especial ao Eng<sup>o</sup> Omair Zorzi e Arq<sup>a</sup> Valéria Eiras,

pelo apoio em ceder gentilmente os materiais utilizados na pesquisa,

À CAPES pela bolsa de fomento em forma de mestrado,

Enfim, agradeço a todos que de alguma maneira contribuíram para a realização desse trabalho.

*“Depois do silêncio, o que mais se aproxima de expressar o inexprimível é a música.”*

*Aldous Huxley*

## RESUMO

RAMIRES, Fabiana. **Coefficiente de espalhamento sonoro de painéis perfurados**. Campinas, 2011. 142 f. Mestrado em Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

Projetos de estúdios, salas de concerto, teatros ou locais que necessitem de qualidade acústica para atividades musicais, requerem estudos sobre sua volumetria, forma e composição de suas superfícies, a fim de se obter um ambiente que cumpra sua função acústica. Nos casos onde o volume e forma desses ambientes já se encontram definidos, cabe ao projetista acústico definir materiais que irão compor as superfícies, para garantir os requisitos acústicos do ambiente. Entre as características desejáveis para a percepção da música nos espaços, a sensação de envolvimento do ouvinte é uma das mais importantes, sendo obtida pelo espalhamento do som por superfícies irregulares. Essas superfícies são caracterizadas por um coeficiente chamado coeficiente de espalhamento sonoro, considerado como uma propriedade do material e utilizado em programas de simulação acústica de salas. Visando o estudo do espalhamento sonoro produzido por materiais que compõem as superfícies dos ambientes, a presente pesquisa estudou painéis acústicos perfurados de gesso acartonado para verificar se a variação das perfurações da sua superfície proporcionou espalhamento sonoro acústico. A avaliação do espalhamento da superfície foi obtida por meio de medidas dos tempos de reverberação dentro da câmara reverberante. Implementou-se o método de medição do coeficiente de espalhamento em campo difuso no Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada da Unicamp para se determinar as características relativas ao espalhamento sonoro de painéis acústicos perfurados de gesso acartonado encontrados no mercado. O método de medição do coeficiente de espalhamento foi baseado no método apresentado na norma “*ISO 17497 (2004) – Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room*”. Da análise dos resultados das medidas de coeficiente de espalhamento dos cinco tipos de painéis de gesso acartonado perfurados verificou-se que os valores são muito pequenos e que a contribuição dos painéis para espalhamento sonoro é mínima.

### **Palavras-chave**

Espalhamento, Simulação por Computador, Acústica, Difusão



## ABSTRACT

RAMIRES, Fabiana. **Scattering coefficient of perforated acoustics panels**. Campinas, 2011. 142 l. Master of Science (Msc in Civil Engineering) – School of Civil Engineering, Architecture and Planning, State University of Campinas, São Paulo, Brazil.

Project studios, concert halls, theaters or places that require quality acoustics for musical activities, require studies on its volume, shape and composition of their surfaces, in order to achieve a place that fulfills its function acoustics. In cases where the volume and shape of these rooms are already defined, it is the acoustic designer to define material that will form the surfaces, to ensure the requirements of the acoustic room. Desirable features for the perception of music in space, the sense of involvement of the listener is one of the most important being obtained by the sound scattered by rough surfaces. These surfaces are characterized by a coefficient called scattering coefficient, considered as a material property and used in simulation room acoustics programs. For studying the sound produced by scattering materials that make up the surfaces of room, this research studied perforated acoustic panels to verify that the variation of the irregularities of its surface acoustic scattering provided. The evaluation of the scattering surface was obtained by measuring the reverberation time in reverberation room. It was implemented the method for measuring the scattering coefficient in diffuse field in Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada - Unicamp to determine the scattering characteristics of acoustic perforated plasterboard in the market. The method of measuring the scattering coefficient was based on the method presented in “ISO 17497 (2004) – Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room”. Analyzing the results of scattering coefficient measured of the five types of perforated panels it was found that the values are very small and that the contribution of the panels for sound scattering is minimal.

### **Keywords:**

Scattering, Computer Simulation, Acoustics, Diffusion.

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 - Reflexão Especular</i>	6
<i>Figura 2.2 - Reflexão especular de feixe sonoro paralelo</i>	6
<i>Figura 2.3 - Reflexão Difusa</i>	7
<i>Figura 2.4 - Resposta polar de um difusor Skyline®</i>	8
<i>Figura 2.5 - Sistema de determinação do coeficiente de difusão sonora de uma superfície difusora 1D com goniômetro 2D.</i>	9
<i>Figura 2.6 - Sistema de determinação do coeficiente de difusão sonora com goniômetro 3D, (University of Salford).</i>	10
<i>Figura 2.7 - Diagrama esquemático de energia do som espalhado</i>	12
<i>Figura 2.8 - Resposta Impulsiva.</i>	15
<i>Figura 2.9 - Exemplo de pulsos refletidos (10kHz, 1/3 banda de oitava) obtidos por diferentes orientações da amostra.</i>	17
<i>Figura 2.10 - Sistema de medição para determinação do coeficiente de espalhamento</i>	18
<i>Figura 2.11 - Profundidade das irregularidades da amostra</i>	23
<i>Figura 3.1 - Espalhamento unidirecional (esquerda) e semi-esférico (direita) de dois difusores distintos.</i>	30
<i>Figura 3.2 - Grosser Musikvereinssaal (Viena)</i>	34
<i>Figura 3.3 - Seção de um período de difusor com uma seqüência de máximo comprimento N=7.</i>	37
<i>Figura 3.4 - Seção transversal de um difusor QRD (Quadratic Residue Diffusor)</i>	38
<i>Figura 3.5 - Difusor de Schroeder em 1D</i>	38

<i>Figura 3.6 - Nível de espalhamento de um Difusor de Schroeder (esquerda) e uma superfície plana (direita) com o mesmo tamanho.</i>	39
<i>Figura 3.7 - Seqüência de resíduos quadráticos para os números primos de 5 a 23.</i>	42
<i>Figura 3.8 - Variação do coeficiente de difusão em função da freqüência em diferentes difusores com poços estreitos, largos e superfície plana.</i>	44
<i>Figura 3.9 - Difusor de Schroeder em 2D</i>	46
<i>Figura 3.10 – Definição das dimensões das irregularidades da superfície da amostra 1D e 2D</i>	58
<i>Figura 4.1 - Amostras de painéis “Cleaneo Acústico”. (Fonte: Knauf do Brasil)</i>	63
<i>Figura 4.2 - Mesa giratória e base na câmara reverberante.</i>	66
<i>Figura 4.3 - Cinturão de blocos de concreto e placas de fibra de coco embaixo da mesa giratória.</i>	67
<i>Figura 4.4 - Difusor de madeira 1D com borda de PVC.</i>	69
<i>Figura 5.1 - Características dos painéis acústicos de gesso acartonado ensaiados.</i>	72
<i>Figura 5.2 - Geometria da câmara reverberante do Laboratório de Conforto Ambiental da Unicamp.</i>	73
<i>Figura 5.3 -Área de absorção sonora equivalente da câmara vazia.</i>	75
<i>Figura 5.4 - Amostra de espuma de poliuretano dentro da câmara reverberante</i>	75
<i>Figura 5.5 - Planta baixa da câmara reverberante com a posição da amostra e dos pontos de microfone e fonte sonora.</i>	76
<i>Figura 5.6 - Câmara reverberante com os difusores suspensos.</i>	77
<i>Figura 5.7 - Coeficiente de absorção sonora da espuma de poliuretano em função da freqüência.</i>	78
<i>Figura 5.8 - Coeficiente de absorção sonora da espuma de poliuretano por área de difusores instalados na câmara.</i>	79
<i>Figura 5.9 - Câmara reverberante com a configuração final dos difusores e amostra de teste.</i>	80
<i>Figura 5.10 - Painéis de lã de vidro dentro da câmara reverberante.</i>	81
<i>Figura 5.11 - Coeficiente de absorção sonora do painel de lã de vidro – valores determinados na câmara e valores de catálogo</i>	82

<i>Figura 5.12 – Comparação entre o coeficiente de espalhamento da base da mesa obtido e o máximo espalhamento permitido em norma.</i>	83
<i>Figura 5.13 - Coeficientes de Espalhamento e Absorção Sonora de Incidência Aleatória do painel Aleatória Furos Redondos</i>	84
<i>Figura 5.14 - Coeficientes de Espalhamento e Absorção Sonora de Incidência Aleatória do painel Retilínea Furos Quadrados</i>	85
<i>Figura 5.15 - Coeficientes de Espalhamento e Absorção Sonora de incidência Aleatória do painel Retilínea Furos Redondos</i>	85
<i>Figura 5.16 - Coeficientes de Espalhamento Absorção Sonora de Incidência Aleatória do</i>	86
<i>painel B4 8/18 Furos Quadrados</i>	86
<i>Figura 5.17 - Coeficientes de Espalhamento e Absorção Sonora de Incidência Aleatória do painel B6 8/18 Bloco Ranhurado</i>	86
<i>Figura 5.18 - Comparação dos coeficientes de espalhamentos dos painéis acústicos perfurados em função da frequência.</i>	88
<i>Figura 5.19 - Comparação dos coeficientes de absorção sonora dos painéis acústicos em função da frequência.</i>	89
<i>Figura 5.20 - Coeficiente de espalhamento e coeficiente de absorção do Difusor 1D medido na câmara reverberante.</i>	90
<i>Figura 5.21 - Comparação entre os coeficientes de espalhamento do difusor 1D medido na câmara reverberante e fornecidos pela literatura.</i>	91
<i>Figura 5.22 - Comparação entre os coeficientes de espalhamento dos painéis acústicos perfurados e os coeficientes de espalhamento do difusor de madeira 1D.</i>	92
<i>Figura A.1 -Geometria da câmara reverberante do LACAF.</i>	103
<i>Figura B.1 -Coeficientes de Espalhamento do painel Aleatória Furos Redondos com os desvios padrões</i>	112
<i>Figura C.1 -Coeficientes de Espalhamento do painel Retilínea Furos Quadrados com os desvios padrões</i>	114
<i>Figura D.1 -Coeficientes de Espalhamento do painel Retilínea Furos Redondos com os desvios padrões</i>	116
<i>Figura E.1 -Coeficientes de Espalhamento do painel B4 8/18 Furos Quadrados com os desvios padrões</i>	118



## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 2.1 - Máximos coeficientes de espalhamento da base da mesa giratória conforme norma ISO 17.497-1 (2004).</i>	22
<i>Tabela 2.2 - Valores de áreas de absorção sonora máximos da câmara vazia.</i>	28
<i>Tabela 3.1 - Principais características dos métodos teóricos de determinação do coeficiente de espalhamento.</i>	56
<i>Tabela 4.1 - Características Físicas das Placas Cleaneo.</i>	64
<i>Tabela 5.1 - Valores das relações entre as dimensões da câmara reverberante.</i>	74
<i>Tabela 5.2 - Coeficientes de absorção sonora da espuma de poliuretano por área de difusores.</i>	78
<i>Tabela B.1 - Coeficientes de absorção sonora por área instalada de difusores.</i>	105
<i>Tabela C.1 - Coeficientes de absorção sonora de painéis de lã de vidro determinados em diferentes câmaras.</i>	107
<i>Tabela D.1 - Tempos de reverberação da base da mesa giratória com a mesa parada (T1).</i>	109
<i>Tabela D. 2: Tempos de reverberação da base da mesa giratória com a mesa rotacionando (T3).</i>	109
<i>Tabela D. 3: Espalhamento da base da mesa giratória em função da frequência.</i>	110
<i>Tabela E. 1: Tempos de reverberação do painel Aleatória 8/15/20 - Furos redondos com a mesa giratória parada (T2).</i>	111
<i>Tabela E. 2: Tempos de reverberação do painel Aleatória 8/15/20 - Furos redondos com a mesa giratória rotacionando (T4).</i>	111
<i>Tabela E. 3: Coeficiente de espalhamento sonoro do painel Aleatória 8/15/20 - Furos redondos.</i>	112
<i>Tabela E. 4: Tempos de reverberação do painel Retilínea 12/25 - Furos quadrados com a mesa giratória parada (T2).</i>	113

<i>Tabela E. 5: Tempos de reverberação do painel Retilínea 12/25 - Furos quadrados com a mesa giratória rotacionando (T4).</i>	113
<i>Tabela E. 6: Coeficiente de espalhamento sonoro do painel Retilínea 12/25 - Furos quadrados.</i>	114
<i>Tabela E. 7: Tempos de reverberação do painel Retilínea 12/25 - Furos redondos com a mesa giratória parada (T2).</i>	115
<i>Tabela E. 8: Tempos de reverberação do painel Retilínea 12/25 - Furos redondos com a mesa giratória rotacionando (T4).</i>	115
<i>Tabela E. 9: Coeficiente de espalhamento sonoro do painel Retilínea 12/25 - Furos redondos.</i>	116
<i>Tabela E. 10: Tempos de reverberação do painel B4 8/18 - Furos quadrados com a mesa giratória parada (T2).</i>	117
<i>Tabela E. 11: Tempos de reverberação do painel B4 8/18 - Furos quadrados com a mesa giratória rotacionando (T4).</i>	117
<i>Tabela E. 12: Coeficiente de espalhamento sonoro do painel B4 8/18 - Furos quadrados.</i>	118
<i>Tabela E. 13: Tempos de reverberação do painel Slotline B6 8/18 – Bloco ranhurado com a mesa giratória parada (T2).</i>	119
<i>Tabela E. 14: Tempos de reverberação do painel Slotline B6 8/18 – Bloco ranhurado com a mesa giratória rotacionando (T4).</i>	119
<i>Tabela E. 15: Coeficiente de espalhamento sonoro do painel Slotline B6 8/18 – Bloco ranhurado.</i>	120

# SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 Objetivo geral .....	3
1.2 Objetivos específicos .....	3
1.3 Estrutura do trabalho .....	4
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>5</b>
2.1 Reflexões Difusas .....	5
2.2 Coeficiente de difusão sonora .....	7
2.3 Coeficiente de espalhamento sonoro .....	11
2.4 Considerações sobre a diferença entre os coeficientes .....	13
2.5 Técnica da Resposta Impulsiva e Tempo de Reverberação .....	14



2.6	Método de determinação do coeficiente de espalhamento em campo difuso conforme a norma ISO 17497-1 (2004).....	16
2.7	Características da câmara reverberante conforme a norma ISO 354 (2003) .....	25
<b>3</b>	<b><i>DIFUSORES: ESTADO DA ARTE</i></b> .....	<b>29</b>
3.1	Aplicações e princípios básicos dos difusores.....	33
3.2	Difusores de Schroeder .....	36
3.3	Melhorias de desempenho dos Difusores de Schroeder .....	48
3.4	Quantificação da difusão e do espalhamento sonoro. ....	49
3.5	Histórico sobre definição do coeficiente de espalhamento sonoro .....	51
3.6	Coeficiente de espalhamento e os programas de simulação computacional.....	58
<b>4</b>	<b><i>METODOLOGIA</i></b> .....	<b>63</b>
<b>5</b>	<b><i>RESULTADOS E DISCUSSÕES</i></b> .....	<b>71</b>
5.1	Caracterização da amostra.....	71
5.2	Qualificação da câmara reverberante.....	73
5.3	Coeficiente de espalhamento dos painéis perfurados de gesso acartonado .....	82
5.4	Comparação entre o desempenho dos painéis acústicos perfurados de gesso acartonado e um difusor de madeira 1D.....	89
<b>6</b>	<b><i>CONCLUSÕES</i></b> .....	<b>93</b>
	<b><i>REFERÊNCIAS</i></b> .....	<b>95</b>
	<b><i>APÊNDICE A: CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE DO LACAF</i></b> .....	<b>103</b>
	<b><i>APÊNDICE B: COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA POR ÁREA INSTALADA DE DIFUSORES</i></b> .....	<b>105</b>

<b>APÊNDICE C: COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA DOS PAINÉIS DE LÃ DE VIDRO .....</b>	<b>107</b>
<b>APÊNDICE D: COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO SONORO DA BASE DA MESA GIRATÓRIA.....</b>	<b>109</b>
<b><u>APÊNDICE E: TEMPOS DE REVERBERAÇÃO E COEFICIENTES DE ESPALHAMENTO SONORO DOS PAINÉIS ACÚSTICOS PERFURADOS DE GESSO ACARTONADO EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA. ....</u></b>	<b>111</b>
<b>APÊNDICE F: CONSIDERAÇÕES SOBRE AS MEDIÇÕES DENTRO DA CÂMARA REVERBERANTE DO LACAF-FEC .....</b>	<b>121</b>

# 1 INTRODUÇÃO

---

Para ambientes em que são desenvolvidas atividades musicais, o ideal é a determinação de cada atividade musical em um ambiente próprio e projetado para aquele tipo de música específico, como um concerto, ópera, música contemporânea, entre outras. Entretanto, por razões financeiras e de ordem prática, é quase impossível dedicar um espaço somente para um tipo específico de música.

Atualmente muitos espaços são projetados para serem espaços de múltiplos usos, isto é, dedicados a diversos tipos de músicas e atividades. Para um projeto com qualidade acústica, alguns parâmetros básicos, como a distribuição do som interno de um ambiente, devem ser estudados criteriosamente.

Analisando a distribuição interna do som, verifica-se que o som interno de um ambiente é resultado de uma combinação do som direto, proveniente das fontes sonoras, e de reflexões provenientes das superfícies que compõe esse ambiente. Quando a energia sonora incide sobre suas superfícies, como uma parede ou teto, parte dessa energia é refletida, parte é absorvida e parte é transmitida pela superfície que recebeu a energia (METHA et al, 1999).

No caso da energia refletida pelas superfícies, verifica-se que as reflexões sonoras podem ser redirecionadas por uma superfície refletora ou mesmo espalhadas por uma superfície difusora.

O espalhamento sonoro causado pela superfície difusora é uma das características acústicas importantes a serem observadas em salas que são utilizadas para apresentações musicais. O espalhamento pode ser obtido por painéis acústicos

chamados “difusores”. Uma sala com poucas reflexões difusas produz reflexões insuficientes para que o ouvinte tenha a sensação de envolvimento. O ideal para esta tipologia de sala é uma difusão sonora adequada, em que o ouvinte tenha a sensação que o som vem de todos os lados.

O envolvimento causado pelas reflexões sonoras difusas que chegam ao ouvinte proporciona a sensação de espacialidade do ambiente. Iazzeta et al (2004) definem essa sensação de espacialidade como impressão espacial (spatial impression). Beranek (1996) também caracteriza a espacialidade como sendo um parâmetro subjetivo, que envolve dois aspectos complementares: a extensão aparente da fonte e o envolvimento do ouvinte.

Tendo em vista a importância das reflexões sonoras nas salas voltadas para música, foram definidos dois coeficientes para serem utilizados em projetos de ambientes musicais: o coeficiente de difusão sonora e o coeficiente de espalhamento sonoro.

O coeficiente de difusão sonora representa a qualidade das reflexões de energia de uma superfície, evidenciando a uniformidade da reflexão direcional causada pela superfície do difusor. De maneira análoga, seria como verificar a uniformidade ou não do som emitido por uma fonte sonora.

O coeficiente de espalhamento sonoro representa a quantidade de energia espalhada por uma superfície irregular, sem determinar a direção dessa energia. Em síntese, o coeficiente de espalhamento é definido como a razão entre a energia sonora refletida não especular e a energia total refletida.

O coeficiente de espalhamento sonoro do material vem sendo utilizado nos programas de simulação acústica de salas. São poucos os materiais comerciais que apresentam o valor do coeficiente de espalhamento sonoro conhecido para que possa ser inserido nesses programas.

A falta dessas informações motivou o desenvolvimento desta pesquisa no qual se estudou alguns painéis acústicos perfurados em gesso acartonado. Verificou-se como a variação das perfurações de suas superfícies contribuiu nas reflexões sonoras difusas, por meio da obtenção do coeficiente de espalhamento desses painéis em função da frequência.

## **1.1 OBJETIVO GERAL**

- ✓ Identificar a potencialidade de painéis acústicos perfurados em gesso acartonado como elementos que promovem o espalhamento sonoro.

## **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ✓ Implementar o método de medição do coeficiente de espalhamento sonoro de superfícies em campo difuso.
- ✓ Determinar em laboratório as características relativas ao espalhamento sonoro de painéis perfurados de gesso acartonado em função da frequência.
- ✓ Comparar o desempenho de espalhamento sonoro dos painéis acústicos perfurados em gesso acartonado com outros materiais que possuam o coeficiente de espalhamento sonoro conhecido.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Neste primeiro capítulo apresenta-se a motivação que levou ao desenvolvimento da pesquisa bem como seu objetivo geral e os objetivos específicos.

A fundamentação teórica é apresentada no segundo capítulo, em que é feita uma breve revisão teórica dos assuntos abordados nesta pesquisa, como por exemplo, reflexões difusas, coeficiente de difusão sonora, coeficiente de espalhamento, técnica da resposta impulsiva e descrição do método de determinação do coeficiente de espalhamento em campo difuso.

No terceiro capítulo é apresentado o “Estado da Arte” sobre difusores e suas aplicações, sendo feito um histórico dos estudos desenvolvidos por Schroeder a cerca de difusores acústicos. Também nesse capítulo é apresentada a evolução das aplicações dos difusores desde Schroeder até a atualidade e um histórico sobre a determinação do coeficiente de espalhamento.

A metodologia a ser aplicada no trabalho é apresentada no quarto capítulo, apresentando o procedimento experimental de medição, bem como os materiais e equipamentos utilizados. No quinto capítulo são apresentados os resultados e as discussões da avaliação dos diferentes tipos de painéis acústicos perfurados estudados assim como a comparação desses painéis com um difusor de madeira tipo 1D. As conclusões são apresentadas no sexto capítulo.

Finalizando o texto, encontram-se as referências bibliográficas, os apêndices com as características físicas da câmara reverberante do Laboratório de Conforto Acústico e Física Aplicada (LACAF) da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC) da Universidade Estadual de Campinas, as tabelas dos resultados referentes às medições realizadas e as considerações sobre as medições dentro da câmara reverberante do LACAF.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

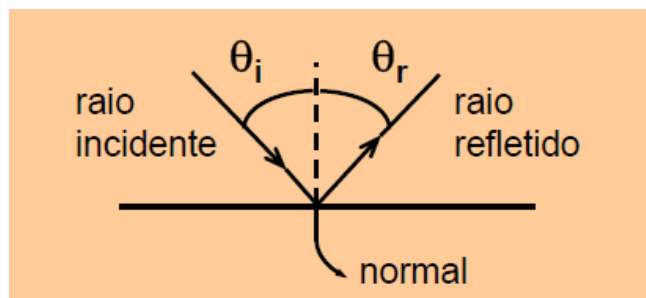
---

Neste capítulo apresenta-se uma breve revisão teórica sobre conceitos de difusão sonora, tais como reflexões difusas, coeficiente de difusão sonora, coeficiente de espalhamento. Posteriormente é abordado a técnica da resposta impulsiva e o método de determinação do coeficiente de espalhamento em campo difuso, conforme a Norma “ISO 17497 (2004) – Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room”.

### 2.1 REFLEXÕES DIFUSAS

As reflexões do som podem ser divididas em dois tipos: reflexões especulares e reflexões difusas.

Segundo Gerges et al (2004) a acústica geométrica ou acústica de raios assume que o som se comporta como raios de luz. Nessas condições é possível se representar a reflexão sonora como um raio sonoro (como o de luz) que ao atingir uma superfície pode ser refletido por ela. Geometricamente a Lei da Reflexão é aplicada às reflexões especulares do som e estabelece que o ângulo da onda sonora incidente é o mesmo que o ângulo da onda sonora refletida em relação à normal da superfície de incidência. A Lei da Reflexão é exemplificada na Figura 2.1.



**Figura 2.1 - Reflexão Especular**

Fonte: BERTOLI (2006)

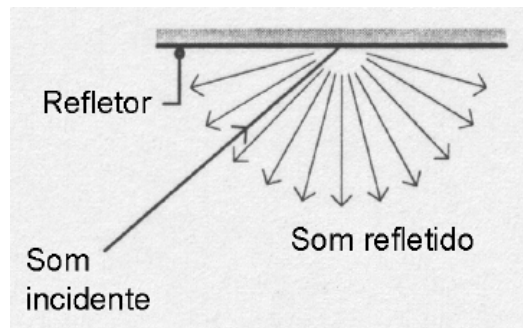
Para que a reflexão especular ocorra, a superfície de incidência da onda sonora deve ser uniforme e apresentar irregularidades bem menores que o comprimento de onda sonora. Neste caso, um feixe sonoro paralelo incidindo na superfície refletora gerará também um feixe paralelo refletido (Figura 2.2).



**Figura 2.2 - Reflexão especular de feixe sonoro paralelo**

Na reflexão difusa, um feixe de onda sonora incidente é refletido num feixe não paralelo distribuído em todas as direções, causando um espalhamento do som. Para uma reflexão sonora difusa, a superfície difusora deve apresentar irregularidades com dimensões iguais ou maiores que o comprimento de onda sonora, causando assim a reflexão difusa da energia, conforme Figura 2.3.





**Figura 2.3 - Reflexão Difusa**

**Fonte: BERTOLI (2006)**

Assim, por exemplo, para que uma superfície gere reflexões difusas na frequência de 1.000Hz (comprimento de onda  $\lambda = 0,34\text{m}$ ), as irregularidades da superfície devem ser superiores a 0,34m. Para essa frequência, irregularidades menores que 0,34m tornam as reflexões especulares.

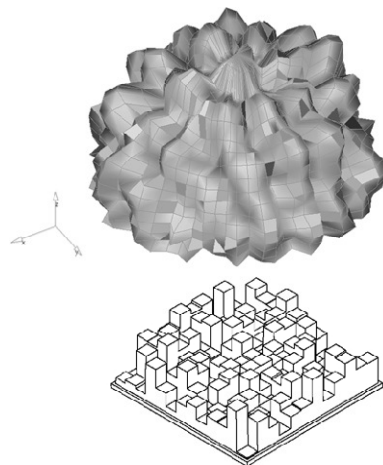
Com o objetivo de descrever as propriedades qualitativas e quantitativas das reflexões difusas pelas superfícies, dois coeficientes foram definidos: coeficiente de difusão sonora e o coeficiente de espalhamento sonoro. Ambos serão discutidos de forma mais detalhada a seguir.

## **2.2 COEFICIENTE DE DIFUSÃO SONORA**

O início dos estudos de difusão sonora teve como premissa o desenvolvimento de métodos para medir e caracterizar o espalhamento causado pelas superfícies difusoras. Sem estas medições do espalhamento produzido, seria impossível a realização do projeto e aplicação desses difusores. A representação qualitativa da

energia de reflexão de uma superfície considera, para um ângulo de energia incidente, a sua redistribuição refletida e representada por diagramas polares.

Com a resposta polar, é possível visualizar como a energia espalhada é espacialmente distribuída em bandas de frequência de 1/3 de oitava para um determinado ângulo de energia incidente. Quando se tem um difusor próximo do ideal, verifica-se que a resposta polar não varia com o ângulo da energia incidente do som, apresentando-se uniforme em todas as direções. A Figura 2.4 mostra uma representação espacial da resposta polar de um difusor tipo Skyline 3D para uma incidência normal de energia, em 2000Hz.



**Figura 2.4 - Resposta polar de um difusor Skyline®**

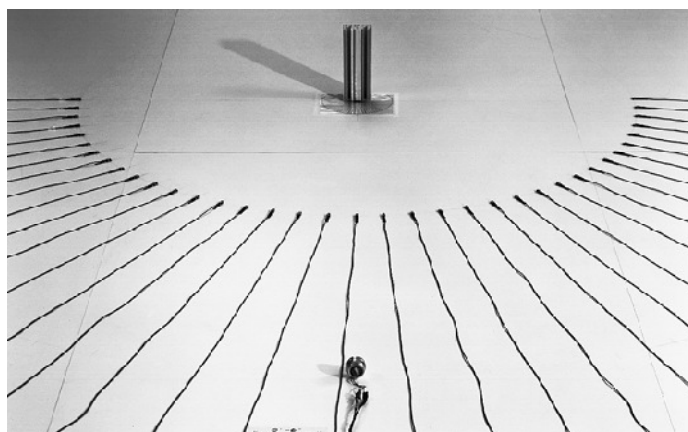
**Fonte: COX, D'ANTONIO (2004)**

Conceitualmente o coeficiente de difusão sonora está associado à uniformidade espacial do som e seu objetivo é quantificar a uniformidade espacial das reflexões produzidas pela superfície. O objetivo desse coeficiente é possibilitar aos projetistas o desenvolvimento de difusores e aos profissionais acústicos comparar a performance das superfícies da sala com as especificações determinadas pelos projetistas.

Para o cálculo do coeficiente de difusão, baseado na distribuição polar, existem alguns métodos propostos: desvio padrão (COX, 1995), directividade (TAKAHASHI, 1995), nível de zona especular (LAM, 1999) e auto-correlação (HARGREAVES et al, 2000).

Para o cálculo do coeficiente de difusão sonora, a redução da resposta polar em um número significativo foi idealizada a partir de uma função de auto-correlação dos valores obtidos para cada ângulo de direção. Uma normativa técnica emitida pela Audio Engineering Society considerou a função de auto-correlação mais vantajosa e usual sobre as outras técnicas (COX e D'ANTONIO, 2004).

A determinação experimental do coeficiente de difusão sonora, segundo a AES-4id-2001, pode ser realizada em condições acústicas de campo livre. Um dos sistemas práticos para determinação de reflexões de superfícies difusoras 1D utiliza uma fonte sonora que irradia o som direcionado para superfície de teste, sendo a resposta impulsiva captada por microfones colocados em posição de semicírculo em frente da amostra, todos no mesmo plano (Figura 2.5). Essa estrutura é conhecida como goniômetro em duas dimensões. Segundo Cox e D'Antonio (2004), sendo o sinal utilizado do tipo seqüência binária pseudorandômica, considerado mais eficiente.



**Figura 2.5 - Sistema de determinação do coeficiente de difusão sonora de uma superfície difusora 1D com goniômetro 2D.**

**Fonte: COX, D'ANTONIO (2004)**

A seqüência binária pseudorandômica considerada na determinação do coeficiente de difusão sonora em um goniômetro 2D é a seqüência de comprimento máximo (Maximum Length Sequence), ou MLS. Essa seqüência é uma forma especial de Ruído Pseudo-aleatório de Máximo Comprimento, que ao ser repetido periodicamente apresenta uma densidade espectral de potência plana, ou seja, o seu espectro é perfeitamente branco. Dentre todos os tipos de ruído, é o que proporciona a melhor Relação Sinal Ruído (SNR), (MÜLLER, MASSARANI, 2005).

Caso o objetivo é determinar a resposta polar de um difusor 2D, utiliza-se uma estrutura semicircular, chamada goniômetro em três dimensões. A fonte sonora é deslocada sobre a amostra em um semicírculo, assim como um microfone que se desloca em outro semicírculo, entre a fonte sonora e a amostra do difusor 2D. A amostra fica no centro do sistema, conforme Figura 2.6.



**Figura 2.6 - Sistema de determinação do coeficiente de difusão sonora com goniômetro 3D, (University of Salford).**

**Fonte: COX, D'ANTONIO (2004)**

Nos sistemas exemplificados, a fonte e o microfone devem estar localizados distantes da amostra e fora da área de reflexão especular, para que não interfiram no coeficiente de difusão da amostra.

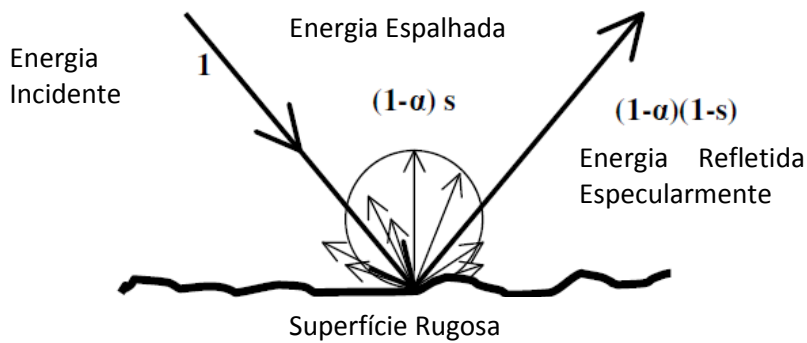
A finalidade da determinação experimental do coeficiente de difusão sonora de uma amostra é possibilitar maiores informações sobre o comportamento do difusor direcionando assim sua utilização em projetos práticos.

### **2.3 COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO SONORO**

Como visto anteriormente, em ambientes para música o espalhamento sonoro de algumas superfícies é de suma importância para promover o envolvimento do ouvinte. Com a evolução dos programas de simulação computacional de ambientes, além de se considerar as reflexões especulares, houve a necessidade de inserção de coeficientes que representassem as reflexões difusas, para que as simulações ficassem mais próximas dos ambientes reais (VÖRLANDER e MOMMERTZ, 2000).

Esse coeficiente, chamado de coeficiente de espalhamento, representa o espalhamento causado por uma superfície irregular, sem determinar a direção da energia espalhada. O princípio do coeficiente de espalhamento é obter a quantidade de energia que é refletida fora da zona especular. Os parâmetros necessários para sua determinação são a frequência e o ângulo de incidência sonora.

A Figura 2.7 representa as componentes da energia sonora incidente e refletida por uma superfície rugosa, separadas em energia espalhada e energia refletida especularmente.



**Figura 2.7 - Diagrama esquemático de energia do som espalhado**  
**Fonte: VÖRLANDER, MOMMERTZ (2000)**

Considerando a Energia Especular Refletida (Eq. 2.1) e a Energia Total Refletida (Eq. 2.2) como:

$$E_{spec} = (1 - \alpha)(1 - s) = (1 - a) \quad (Eq. 2.1)$$

$$E_{total} = (1 - \alpha) \quad (Eq. 2.2)$$

onde,

$E_{spec}$  - energia especular refletida;

$E_{total}$  - energia total refletida;

$a$  - coeficiente de absorção especular;

$\alpha$  - coeficiente de absorção sonora;

$s$  - coeficiente de espalhamento sonoro.

O coeficiente de espalhamento “s” pode ser determinado pela Equação 2.3:

$$s = 1 - \frac{E_{spec}}{E_{total}} = \frac{a-\alpha}{1-\alpha} \quad (Eq. 2.3)$$

## 2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A DIFERENÇA ENTRE OS COEFICIENTES

Tanto o coeficiente de difusão sonora como o coeficiente de espalhamento sonoro são representações simplificadas do comportamento das reflexões (COX and D'ANTONIO, 2004). A diferença entre o coeficiente de difusão sonora e o coeficiente de espalhamento sonoro é qual informação é mais importante para os projetistas quando são reduzidos em um único número. Para os projetistas de difusores o interesse está na uniformidade da energia refletida. Já para os projetistas acústicos que trabalham com modelos, o mais importante é saber quanto de energia espalhada existe fora das reflexões especulares. A diferença entre os dois coeficientes parece sutil, porém é bem significativa.

Em relação aos métodos de medição do coeficiente de difusão sonora e do coeficiente de espalhamento sonoro, o método da AES-4id-2001, que determina o coeficiente de difusão sonora, é mais apropriado para medir os efeitos da combinação do espalhamento da superfície do difusor e difração das bordas de painéis pequenos individuais. Já o método apresentado pela norma ISO 17497-1 (2004), que determina o coeficiente de espalhamento sonoro de incidência aleatória, é mais recomendado para um difusor de superfície grande e única ou um grupo deles. Assim, para a presente pesquisa foi escolhido o método da norma ISO 17497-1 (2004) para determinação do coeficiente de espalhamento sonoro.

## 2.5 TÉCNICA DA RESPOSTA IMPULSIVA E TEMPO DE REVERBERAÇÃO

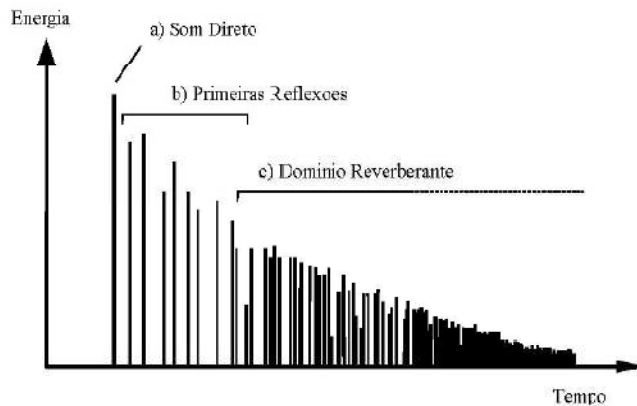
A resposta impulsiva de um ambiente é considerada uma característica da sala e é capaz de fornecer informações sobre a densidade e distribuição do som refletido no domínio de tempo. Por meio dela, vários parâmetros acústicos podem ser calculados, inclusive o tempo de reverberação.

A resposta impulsiva é uma função temporal da pressão sonora de um espaço acústico, que resulta da excitação desse espaço por um pulso ideal, uma função que se aproxima da função delta de Dirac, ou seja, um impulso unitário positivo de pressão, de duração temporal que tende a zero (MASIERO E IAZETTA, 2005).

Para se obter a resposta impulsiva de um sistema, basta medir a sua resposta a um impulso. O resultado da resposta será um gráfico da energia em função do tempo, que mostra as reflexões múltiplas do ambiente, similar ao que pode ser visto na Figura 2.8:

O primeiro traço vertical corresponde ao som direto, que chega ao microfone proveniente da fonte sonora. Os traços seguintes representam as sucessivas reflexões que diminuem em amplitude com o tempo.





**Figura 2.8 - Resposta Impulsiva.**

**Fonte: BERTOLI, GOMES (2005)**

Com a resposta impulsiva, pode-se calcular o tempo de reverberação do ambiente. O tempo de reverberação é um importante parâmetro acústico capaz de informar sobre a qualidade acústica de um ambiente. Ele corresponde ao tempo de decaimento do nível de pressão sonora, em 60dB, à partir do momento em que a fonte é desligada.

A relação entre o parâmetro tempo de reverberação e as características físicas dos ambientes (volume e área de absorção equivalente) foi proposta por Wallace Clement Sabine, Professor de Matemática e Filosofia na Universidade de Harvard, entre os anos de 1895 e 1915.

A Equação de Sabine mostra a relação entre o tempo de reverberação e as características do ambiente, conforme pode ser visto na Equação 2.4:

$$TR = 0,16 * \frac{V}{A} \quad (Eq.2.4)$$

onde,

V - volume do ambiente [m<sup>3</sup>];

A - absorção total [m<sup>2</sup>] obtida, conforme a Equação 2.5:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i * S_i \quad (Eq.2.5)$$

onde,

$\alpha_i$  - coeficiente de absorção sonora da superfície de cada material que compõe o ambiente;

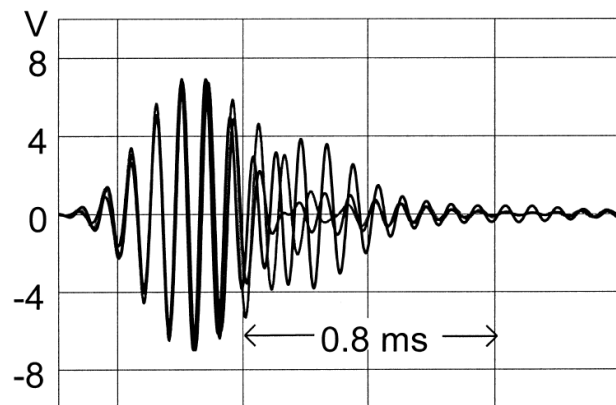
$S_i$  - área da superfície de cada material que compõe o ambiente [m<sup>2</sup>];

## **2.6 MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO EM CAMPO DIFUSO CONFORME A NORMA ISO 17497-1 (2004)**

Na literatura existem alguns métodos de determinação do coeficiente de espalhamento que diferem entre si pela maneira de separar a energia especular da energia difusa. O método que será usado nessa pesquisa é o método de determinação do coeficiente de espalhamento em campo difuso proposto por Vörländer e Mommertz (2000) e descrito na Norma “ISO 17497 (2004) – *Part. 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room*”.

Este método tem como princípio a medição da resposta impulsiva do ambiente, obtida com a amostra de difusor dentro da câmara reverberante em diferentes orientações, originando diferenças nas amplitudes e fase na configuração final do gráfico da resposta impulsiva. Este princípio pode ser melhor visualizado por meio do gráfico da resposta impulsiva, apresentado na Figura 2.9, com os efeitos das reflexões e espalhamento no domínio de tempo.

No gráfico da Figura 2.9 nota-se que a parte inicial das reflexões é altamente correlata. Esta parte coerente é idêntica a componente especular da reflexão. Do meio para o final, os pulsos do gráfico tornam-se fora de fase e dependem fortemente da orientação específica da amostra. A energia da extremidade dos pulsos refletidos contém a parte espalhada.



**Figura 2.9 - Exemplo de pulsos refletidos (10kHz, 1/3 banda de oitava) obtidos por diferentes orientações da amostra.**

**Fonte: VÖRLANDER, MOMMERTZ (2000)**

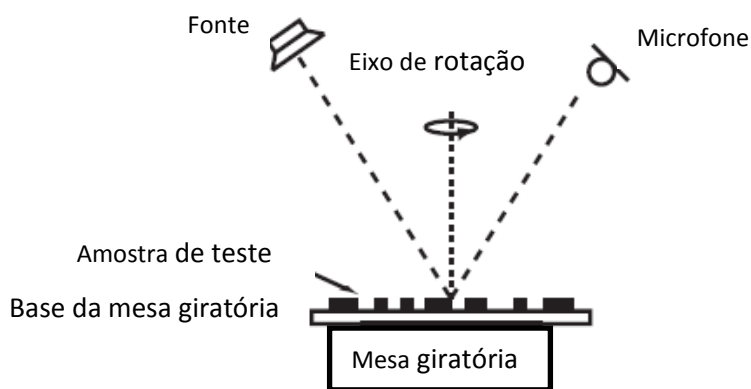
O princípio básico do método de medição é extrair a energia especular dos pulsos refletidos. Isso é feito sincronizando a média das respostas impulsivas obtidas por meio das diferentes orientações da amostra dentro da câmara. Essa sincronização significa colocar em fase todas as respostas impulsivas em que os gráficos das respostas impulsivas irão se iniciar no mesmo ponto. Após feito isso, as componentes especulares irão se somar, enquanto que a componente do som espalhado irá interferir destrutivamente.

Verifica-se que depois de sincronizar as  $n$  respostas impulsivas da câmara, assumindo que as componentes espalhadas são estatisticamente independentes entre

si, o decaimento inicial é uma combinação dos efeitos da absorção e de uma aparente energia perdida devido ao espalhamento sonoro da amostra.

Experimentalmente, a determinação do coeficiente de espalhamento é realizada em campo difuso com incidência aleatória no interior de uma câmara reverberante. A norma ISO 17497-1 (2004) permite a utilização de câmaras em escala reduzida (1:N), sendo o valor N a razão de qualquer dimensão linear em um modelo de escala física para a mesma dimensão linear em uma escala real.

O sistema de medição utilizado para obtenção das respostas impulsivas é composto por microfone, fonte sonora, amostra de teste, base para suporte da amostra e a mesa giratória. A mesa giratória deverá conter uma base circular rígida e simétrica em relação ao eixo rotacional. Essa mesa giratória servirá para rotacionar a amostra no experimento (Figura 2.10). Ela possui um sistema mecanizado que proporcionará a rotação da base da mesa e amostra de teste. O tamanho da base circular deverá corresponder à máxima dimensão da amostra de teste. O conjunto mesa giratória e base deverá ficar distante de  $N^{-1} \times 1,0\text{m}$  das paredes da sala. A base da mesa giratória, assim como a amostra a ser ensaiada, terão diâmetros de  $N^{-1} \times 3,0\text{m}$ .



**Figura 2.10 - Sistema de medição para determinação do coeficiente de espalhamento**

**Fonte: VÖRLANDER, MOMMERTZ (2000)**

Para o cálculo do coeficiente de espalhamento da amostra, conforme descrito na norma ISO 17497-1 (2004) é necessário obter os tempos de reverberação da câmara reverberante sem e com a amostra,  $T_1$  e  $T_2$ , respectivamente. Nessas situações, a mesa giratória estará parada, somente apoiando a amostra. Devem ser realizadas pelo menos seis medições, com a combinação de duas posições da fonte e três posições do microfone.

Além dos resultados dos tempos de reverberação  $T_1$  e  $T_2$ , é necessário obter os tempos de reverberação  $T_3$  e  $T_4$  da câmara reverberante, nas condições sem e com a amostra de teste, respectivamente e com a mesa rotacionando em torno do seu eixo.

O ambiente dentro da sala reverberante deve apresentar pouca variação em relação à temperatura e umidade no seu interior.

Com os valores dos tempos de reverberação  $T_1$  e  $T_2$ , obtidos em função da frequência em bandas de 1/3 de oitava na faixa de frequência de 100Hz a 5000Hz, calcula-se o coeficiente de absorção de incidência aleatória " $\alpha_s$ " definido pela Equação 2.6:

$$\alpha_s = 55,3 * \frac{V}{S} \left( \frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - \frac{4V}{S} (m_2 - m_1) \quad (\text{Eq. 2.6})$$

onde,

V - volume da câmara reverberante [m<sup>3</sup>];

S - área da amostra de teste [m<sup>2</sup>];

$c_1$  - velocidade do som durante a medição do  $T_1$  [m/s];

$c_2$  - velocidade do som durante a medição do  $T_2$  [m/s];

$T_1$  - tempo de reverberação obtido sem a amostra de teste, com a mesa giratória parada [s];

$T_2$  - tempo de reverberação obtido com a amostra de teste sobre a mesa giratória parada [s];

$m_1$  - energia do coeficiente de atenuação do ar, calculado de acordo com a Norma ISO 9613-1(1993) - Acoustics-Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1, utilizando a temperatura e a umidade relativa do ar durante a medição de  $T_1$  [m-1];

$m_2$  - energia do coeficiente de atenuação do ar, calculado de acordo com a Norma ISO 9613-1(1993), utilizando a temperatura e a umidade relativa do ar durante a medição de  $T_2$  [m-1].

Da mesma forma, com os valores dos tempos de reverberação  $T_3$  e  $T_4$ , obtidos em função da freqüência em bandas de 1/3 de oitava na faixa de freqüência de 100Hz a 5000Hz, calcula-se o coeficiente de absorção especular " $\alpha_{spec}$ " definido pela Equação 2.7:

$$\alpha_{spec} = 55,3 * \frac{V}{S} \left( \frac{1}{c_4 T_4} - \frac{1}{c_3 T_3} \right) - \frac{4V}{S} (m_4 - m_3) \quad (Eq. 2.7)$$

onde,

V - volume da câmara reverberante [m<sup>3</sup>];

S - área da amostra de teste [m<sup>2</sup>];

$c_3$  - velocidade do som durante a medição do  $T_3$  [m/s];

$c_4$  - velocidade do som durante a medição do  $T_4$  [m/s];

$T_3$  - tempo de reverberação obtido sem a amostra de teste, com a mesa giratória rotacionando [s];

$T_4$  - tempo de reverberação obtido com a amostra de teste sobre a mesa giratória rotacionando [s];

$m_3$  - energia do coeficiente de atenuação do ar, calculado de acordo com a Norma ISO 96131-1(1993), utilizando a temperatura e a umidade relativa do ar durante a medição de  $T_3$  [m-1];

$m_4$  - energia do coeficiente de atenuação do ar, calculado de acordo com a Norma ISO 96131-1(1993), utilizando a temperatura e a umidade relativa do ar durante a medição de  $T_4$  [m-1].

O cálculo do coeficiente de espalhamento “s” das amostras se faz aplicando os valores de  $\alpha_{spec}$  e  $\alpha_s$  na Equação 2.8:

$$s = 1 - \frac{1 - \alpha_{spec}}{1 - \alpha_s} = \frac{\alpha_{spec} - \alpha_s}{1 - \alpha_s} \quad (Eq. 2.8)$$

onde,

$\alpha_{spec}$  - coeficiente de absorção especular de incidência aleatória,

$\alpha_s$  - coeficiente de absorção de incidência aleatória.

O coeficiente de espalhamento da base da mesa giratória é definido pela Equação 2.9:

$$s_{base} = 55,3 * \frac{V}{S} \left( \frac{1}{c_3 T_3} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - \frac{4V}{S} (m_3 - m_1) \quad (Eq. 2.9)$$

onde os símbolos já foram definidos anteriormente.

O coeficiente de espalhamento da base da mesa giratória deve ser determinado para verificar a qualidade do ensaio de determinação do coeficiente de espalhamento

da amostra de teste. Os valores máximos do coeficiente de espalhamento para a base da mesa conforme norma ISO 17497-1 (2004) são especificados na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1 - Máximos coeficientes de espalhamento da base da mesa giratória conforme norma ISO 17.497-1 (2004).**

<b>Frequência (f/N) (Hz)</b>	100	125	160	200	250	315	400	500	630
<b>Coeficiente de Espalhamento da base (s<sub>base</sub>)</b>	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,10
<b>Frequência (f/N) (Hz)</b>	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<b>Coeficiente de Espalhamento da base (s<sub>base</sub>)</b>	0,10	0,10	0,15	0,15	0,15	0,20	0,20	0,20	0,25

As características da câmara reverberante utilizada para os ensaios de determinação do coeficiente de espalhamento sonoro deverão atender a Norma ISO 354 (2003) *Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room*. e, a norma ISO 17497-1 (2004) estabelece que a câmara reverberante pode ser em escala reduzida (1:N).

A norma ISO 17497-1 (2004) indica que o volume da câmara deverá atender a Equação 2.10:

$$V \geq 200 * N^{-3} \quad (Eq. 2.10)$$

onde,

V - volume da sala [m<sup>3</sup>];

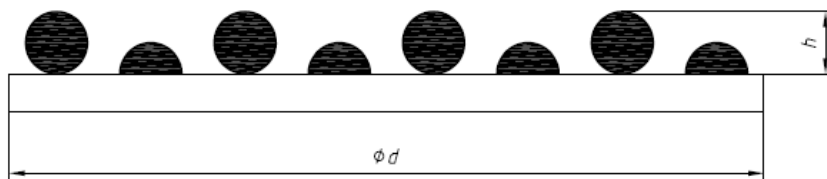
N - razão de qualquer dimensão linear em um modelo de escala física para a mesma dimensão linear em uma escala real.



No caso da câmara em escala, Nascimento (2005) coloca que como o meio de transmissão do modelo é o ar e a velocidade do som no ar se mantém constante e não depende da frequência, o tempo para energia sonora atravessar um caminho é reduzido no modelo a  $1/N$  do seu valor real. Assim, a escala de tempo no modelo é comprimida por  $N$ , ou seja, todas as frequências no modelo ( $f_{\text{mod}}$ ) devem ser ampliadas na mesma razão  $N$  em que as dimensões originais ( $f_{\text{or}}$ ) são reduzidas. No modelo então, a similaridade das frequências é obtida por  $f_{\text{mod}} = f_{\text{or}} \times N$ .

Em relação à superfície da amostra, esta deverá ser irregular de tal forma que a profundidade de suas irregularidades ( $h$ ) não ultrapasse o valor  $d/16$ , onde “ $d$ ” é o diâmetro da base da mesa giratória (Figura 2.11). Isso garantirá resultados confiáveis para esse método de medição.

Caso a amostra apresente uma simetria rotacional, o centro desta amostra simétrica deverá ser deslocado em relação ao centro da mesa giratória em  $d/8$ , em que “ $d$ ” representa o diâmetro da mesa.



**Figura 2.11 - Profundidade das irregularidades da amostra**

**Fonte: COX, D'ANTONIO (2004)**

O sinal sonoro recomendado para medição do tempo de reverberação são sinais periódicos pseudo-aleatórios, como o de seqüência de comprimento máximo (*Maximum Length Sequence*) para se obter a resposta impulsiva da sala. Podem

também ser utilizados outros tipos de sinais, como varredura de senos, conforme referenciado pela Norma ISO 354 (2003).

Em relação às incertezas de medição, o Anexo A da norma ISO 17497-1 (2004) orienta para o cálculo dos desvios padrões dos tempos de reverberação determinados no experimento. Para cada tempo de reverberação ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  e  $T_4$ ) utilizados nas equações 2.6, 2.7 e 2.9, os desvios padrões ( $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$  e  $\delta_4$ ) podem ser obtidos pela Equação 2.11:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2}{N(N-1)}} \quad (\text{Eq. 2.11})$$

onde,

$N$  – número de medições do tempo de reverberação

$\bar{T}$  - média espacial dos tempos de reverberação da câmara reverberante [s];

A média espacial dos tempos de reverberação é calculada conforme Equação 2.12:

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (\text{Eq. 2.12})$$

As incertezas dos coeficientes de absorção de incidência aleatória ( $\alpha_s$ ) e coeficientes de absorção especular ( $\alpha_{\text{spec}}$ ) são calculadas conforme Equações 2.13 e 2.14 respectivamente:

$$\delta_{\alpha_s} = \frac{55,3 V}{cS} \sqrt{\left\{ \left( \frac{\delta_2}{T_2} \right)^2 + \left( \frac{\delta_1}{T_1} \right)^2 \right\}} \quad (\text{Eq. 2.13})$$

$$\delta_{\alpha_{spec}} = \frac{55,3 V}{cS} \sqrt{\left\{ \left( \frac{\delta_4}{T_4^2} \right)^2 + \left( \frac{\delta_3}{T_3^2} \right)^2 \right\}} \quad (\text{Eq. 2.14})$$

Finalmente o desvio padrão do coeficiente de espalhamento sonoro é obtido por meio da Equação 2.15:

$$\delta_s = \left| \frac{\alpha_{spec}-1}{1-\alpha_s} \right|^2 \sqrt{\left\{ \left( \frac{\delta_{\alpha_{spec}}}{\alpha_{spec}-1} \right)^2 + \left( \frac{\delta_{\alpha_s}}{1-\alpha_s} \right)^2 \right\}} \quad (\text{Eq. 2.15})$$

O limite de confiança de 95% nos valores do coeficiente de espalhamento sonoro pode ser estimado considerando duas vezes o desvio padrão.

## 2.7 CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE CONFORME A NORMA ISO 354 (2003)

A norma ISO 354 (2003) apresenta em seu item 6.1 algumas exigências em relação à forma e ao campo sonoro dentro da câmara reverberante. O volume indicado nessa norma deve ser pelo menos 150m<sup>3</sup> para câmaras existentes e 200m<sup>3</sup> para câmaras novas, não ultrapassando 500m<sup>3</sup> na escala real.

É definido um limite inferior para o volume da câmara a fim de garantir difusão sonora para baixas freqüências, por meio de uma alta densidade modal. O volume máximo também é delimitado devido ao efeito da absorção sonora pelo volume de ar dentro da câmara, prejudicando a difusão sonora nas altas freqüências.

Quanto à forma da câmara a norma ISO 354 (2003) recomenda que ela atenda a condição de comprimento máximo ( $L_{m\acute{a}x}$ ), conforme a Equação 2.16:

$$L_{\max} < 1,9V^{1/3} \quad (\text{Eq. 2.16})$$

onde,

V - volume da câmara [m<sup>3</sup>];

Considera-se “L<sub>max</sub>” o comprimento da maior linha reta que se pode obter no interior da câmara, no caso de uma câmara retangular esse parâmetro é a diagonal maior. Essa condição visa evitar formatos de câmaras muito alongados ou achatados, dificultando assim a criação de um campo sonoro difuso (KUTTRUFF, 2000).

Quanto ao campo difuso a norma ISO 17497-1 (2004) recomenda que o campo seja suficientemente difuso e devido a esse fator recomenda que sejam instalados difusores no interior da câmara reverberante.

O estudo desenvolvido pelos pesquisadores Nèlisse e Nicolas (1997), baseado nos estudos de Schroeder (1954, 1962, 1996), determinam uma freqüência mínima para qual há campo difuso em câmara reverberante. A freqüência crítica (f<sub>c</sub>) é apresentada na Equação 2.17.

$$f_c = \frac{1190}{V^{1/3}} \quad (\text{Eq. 2.17})$$

onde,

f<sub>c</sub> - freqüência crítica [Hz];

V - volume da câmara [m<sup>3</sup>].

Em relação às dimensões da câmara a norma ISO 354 (2003) estabelece que elas não poderão ter duas dimensões iguais ou múltiplas entre si, garantindo assim uma distribuição uniforme de freqüências naturais, especialmente nas bandas de baixas freqüências.

Segundo a norma ISO 354 (2003), a curva de absorção sonora (ou área de absorção sonora equivalente) da câmara vazia ( $A_1$ ) em função da frequência, deve ser suave e não deve apresentar picos ou vales que difiram mais de 15% da média dos valores de faixas de frequências adjacentes. O cálculo da área de absorção sonora equivalente da câmara vazia ( $A_1$ ) é dado pela Equação 2.18.

$$A_1 = \frac{55,3 V}{c T_1} - 4Vm_1 \quad (\text{Eq. 2.18})$$

onde,

$V$  - volume da câmara reverberante [ $\text{m}^3$ ];

$c$  - velocidade do som durante a medição do  $T_1$  [ $\text{m/s}$ ];

$T_1$  - tempo de reverberação da câmara vazia [ $\text{s}$ ];

$m_1$  - energia do coeficiente de atenuação do ar, calculado de acordo com a Norma ISO 9613-1(1993), utilizando a temperatura e a umidade relativa do ar durante a medição de  $T_1$  [ $\text{m}^{-1}$ ];

Essa condição busca garantir que a câmara não possua absorções sonoras localizadas em certas faixas de frequências, ou que o tempo de reverberação seja elevado em certas faixas de frequências devido a certos modos normais. A norma ISO 354 (2003) também apresenta uma tabela com valores máximos de absorção sonora,  $A_1$ , para câmara vazia. Os valores da Tabela 2.2 devem ser corrigidos pelo fator  $(V/200)^{2/3}$ , caso a câmara seja uma câmara em escala reduzida.

**Tabela 2.2 - Valores de áreas de absorção sonora máximos da câmara vazia.**

<b>Frequência (Hz)</b>	<b>A<sub>1</sub> (m<sup>2</sup>)</b>
100	6,5
125	6,5
160	6,5
200	6,5
250	6,5
315	6,5
400	6,5
500	6,5
630	6,5
800	6,5
1000	7,0
1250	7,5
1600	8,0
2000	9,5
2500	10,5
3150	12,0
4000	13,0
5000	14,0

**Fonte: ISO 354 (2003).**

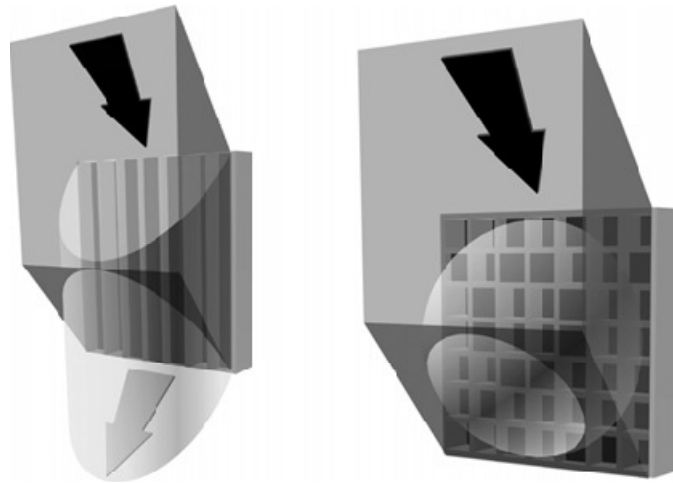
### 3 DIFUSORES: ESTADO DA ARTE

---

O som produzido em uma sala é uma combinação do som direto e de reflexões indiretas das superfícies do ambiente e de qualquer outro objeto que o compõe. A definição das características acústicas dessas superfícies depende do objetivo de projeto da sala e é um dos principais pontos de análise da acústica de salas.

Conforme visto anteriormente, a energia sonora gerada dentro da sala é transmitida por meio das superfícies para outros ambientes ou refletida, retornando ao ambiente. Essa energia refletida pode ser atenuada por uma superfície absorvente, redirecionada por uma superfície refletora ou espalhada por uma superfície difusora.

O elemento de superfícies difusoras é conhecido como difusores. Os difusores podem ser divididos em dois principais tipos: o difusor unidirecional e o difusor bidirecional (D'ANTONIO E COX, 2000). O difusor unidirecional é composto por superfícies com profundidades variadas em uma direção e profundidades constantes na direção ortogonal, causando o espalhamento do som em uma direção. O difusor bidirecional é composto por superfícies com profundidades variadas em duas direções, distribuindo uniformemente o som em uma superfície semi-esférica, conforme Figura 3.1.



**Figura 3.1 - Espalhamento unidirecional (esquerda) e semi-esférico (direita) de dois difusores distintos.**

**Fonte: D'Antonio, Cox (2000)**

Segundo Beranek (1996), para uma sala de concerto, a qualidade acústica é melhorada quando as primeiras reflexões são suaves e o som reverberante provém uniformemente de todas as direções. As irregularidades das salas de concerto, como cavidades, superfícies curvas, adornos, colunas, relevos, consideradas superfícies difusoras, contribuem tanto para uniformizar as primeiras reflexões como para distribuir uniformemente o som reverberante.

Anterior aos estudos de difusão sonora, o início do século XX foi marcado pelos estudos dos efeitos da absorção sonora das superfícies num ambiente, verificando como a absorção interferia no som interno. Os estudos de absorção iniciaram-se com o físico americano Wallace Clement Sabine.

Naquela época poucos estudos sistematizados foram desenvolvidos em relação à energia sonora refletida redirecionada ou espalhada pelas superfícies e adornos principalmente nas salas de grandes dimensões, como as salas para concertos e teatros.



Com o desenvolvimento de estudos de percepção subjetiva do som, área conhecida como “psicoacústica”, em décadas recentes, houve necessidade de relacionar as percepções subjetivas com fenômenos físicos para entender como os parâmetros acústicos se modificavam, dependendo do local da fonte e do receptor (GOMES, 2002). Parâmetros como clareza, definição e rugosidade começaram a fazer parte das discussões de projetos acústicos de ambientes, tornando-se importante a relação entre o local que o som era produzido e o local de um ouvinte específico. Até então, esse fato não era previsto nos estudos de acústica no início do século XX.

Somente por volta de 1970 é que as reflexões difusas começaram a ser estudadas cientificamente e apresentaram descobertas significativas no que se refere aos desenhos, medição e quantificação de superfícies difusoras. O resultado foi o crescimento e aprimoramento dos métodos de medição do espalhamento sonoro (D’ANTONIO e COX, 2000).

Nesta mesma época, outro tipo de estudo sobre difusividade, a difusividade do campo sonoro em salas reverberantes, foi inicialmente discutida por Shultz (1971), que apresentou a definição de campo sonoro difuso e as razões para se ter um campo difuso. Schultz também expôs alguns métodos para se avaliar o grau de difusão sonora dentro da câmara reverberante e apresentou diferentes dispositivos para se obter um determinado grau de difusão.

Segundo Schultz (1971) a definição de campo sonoro difuso conhecida como sendo “o campo sonoro será garantido se, a pressão sonora for uniforme em todas as posições da sala”, não representava a prática. O autor apresentou algumas definições de campo difuso mais aceitável para a época, porém colocou que, do ponto de vista prático, não se tinha como avaliar quanto de difusão existia realmente em uma sala.

Em relação à discussão sobre campo sonoro difuso, Araujo (2002) apresentou uma revisão sobre o tema em sua tese, discutindo os métodos reportados por Schultz (1971) para avaliação da difusão sonora do campo sonoro em regime transitório.

Godoy (2004) também apresentou outras definições de campo difuso feitas por autores como Jacobsen (1979) que definiu que qualquer ponto de um campo sonoro difuso apresenta a mesma probabilidade de fluxo de energia acústica em todas as direções. Em outra definição, dada por Kuttruff (1991) o campo sonoro difuso é composto de infinitas ondas planas com fases aleatórias, com sua propagação sendo uniforme em todas as direções.

Apesar de todas as definições de campo sonoro difuso seguirem a mesma linha de raciocínio, a realidade mostra que em um campo sonoro perfeitamente difuso, a razão de decaimento é exponencial. A curva do nível de pressão sonora do decaimento em função do tempo deve ser uma reta. Porém já se sabe que, principalmente nas baixas frequências, onde existem poucos modos acústicos, as linhas de decaimento apresentam curvaturas que poderiam ser relacionadas aos diferentes graus de difusão encontrados entre as salas de teste.

Essa preocupação sobre a difusão sonora é devido à limitação das análises de situações reais, em comparação com os modelos matemáticos. Atualmente para a maioria dos autores, a difusão sonora pode ser suficientemente aproximada em uma câmara reverberante grande e vazia, contendo em seu interior difusores estáticos. Essa difusão só não é alcançada para as baixas frequências, a saber, frequências abaixo da “frequência de Schroeder” (SCHROEDER, 1996), que apresentam baixa densidade modal no interior da câmara reverberante.

Talvez a contribuição mais direta de Schultz (1971) para os estudos de difusores foi em relação à descrição de possíveis caminhos para se atingir a difusão sonora. Mesmo em se tratando de câmara reverberante, ele listou algumas maneiras de obter o campo difuso como, por exemplo, utilizando elementos difusores nas paredes, ou distribuindo painéis pendurados dentro da câmara ou utilizando palhetas móveis. Esses estudos contribuíram indiretamente na época para as discussões sobre a difusão sonora e arranjos de difusores.

O conceito de difusores era conhecido pelos acústicos daquela época, porém as propriedades de difusão do som pelos materiais eram limitadas a determinados comprimentos de ondas da energia sonora incidente. O desafio era criar uma estrutura de superfície que gerasse uma excelente difusão sonora em uma faixa de frequência significativa (SCHROEDER, 1979).

### 3.1 APLICAÇÕES E PRINCÍPIOS BÁSICOS DOS DIFUSORES

A característica de dispersão sonora de uma superfície difusora é de grande importância para salas destinadas a música, pois colaboram com a redução de reflexões especulares concentradas e indesejadas que causam “*image shift*” e coloração. Outra contribuição desejada da dispersão sonora, segundo D’Antonio e Cox (2000), é a formação do campo sonoro difuso.

As superfícies difusoras possuem a característica de “espalhar” o som incidente, podendo melhorar a espacialidade e remover ecos. Pesquisas em modelagem computacional de salas estão incluindo propriedades de superfícies difusoras nas simulações acústicas e os resultados alcançados indicam melhora nas características acústicas dos ambientes.

Em algumas das principais salas de concerto, as reflexões difusas já ocorriam mesmo sem serem intencionalmente previstas e detalhadas. Isso acontecia devido ao estilo arquitetônico em que foram concebidas, com superfícies e adornos naturalmente difusivos. Uma das salas mais famosas, por mesclar com tanta perfeição a arquitetura e a acústica, é o *Grosser Musikvereinssaal*, em Viena, ilustrado na Figura 3.2.

Verifica-se pela Figura 3.2 que todas as superfícies são altamente moduladas, com grandes colunas ornamentadas e capitéis sustentando os balcões, portas nos

arredores e janelas no último piso com adornos e teto formado por “caixotes” ornamentados, garantindo uma alta difusão sonora. Interessante verificar que na época de construção dessa sala o grau de difusão produzido e a preocupação com essa característica da sala não foram quantificadas, sendo provavelmente resultado da estética visual.



**Figura 3.2 - Grosser Musikvereinssaal (Viena)**

**Fonte: <<http://www.musikverein.at>> (2010)**

Com a evolução dos materiais, técnicas construtivas e modificação da arquitetura de interiores, em especial para grandes salas dedicadas a música, a difusão sonora hoje é obtida com a aplicação de superfícies difusoras e não mais somente pelos adornos e ornamentos.

Com a ausência de adornos e ornamentos, reflexões tardias passaram a causar defeitos acústicos, como por exemplo, ecos. Em grandes auditórios, as reflexões das paredes do fundo da sala tornaram-se fonte de sons não integrados causando

problemas para os ouvintes e para os músicos (COX E D'ANTONIO, 2004). Para resolver esse problema, elementos difusores passaram a ser utilizados nas paredes do fundo das salas para garantir a ausência de sons não integrados e criar um ambiente acusticamente envolvente. Outra característica dos difusores é a redução do efeito da coloração que ocorrem naturalmente em pequenas salas, como salas técnicas de estúdios.

São várias as aplicações dos difusores, como amenizar as reflexões tardias isoladas ou *flutter echoes*, o qual atrapalha a uniformidade da energia indireta e causa a baixa inteligibilidade. Destaca-se também a função de aumentar a sensação de espacialidade atenuando as primeiras reflexões; promover a distribuição uniforme do som espalhado em uma ampla gama de freqüências; prover um conjunto de reflexões benéficas de modo que os músicos se percebam entre si, proporcionando um *feedback* positivo entre eles.

Difusores também podem promover reflexões laterais contribuindo para o senso de envolvimento e impressão espacial nas salas (BARRON, 1971).

Apesar de todos os benefícios proporcionados pelos elementos difusores, Jeon et al (2004) levantaram a questão que muitos dos difusores instalados em salas de concertos não possuem dados ou base científica sobre seu desenho e sua atuação no local com elemento difusor.

Procurando dar sua contribuição, Jeon et al (2004) estudaram desenhos de difusores para instalação em salas de concerto por meio de métodos qualitativos levando em conta os tipos, tamanhos e números de elementos instalados na superfície (densidade). Seus resultados demonstraram que essas características estudadas afetam a difusão sonora em algumas freqüências características, dependendo do tipo e tamanho dos difusores, assim com a densidade com que são instalados.

Atualmente com a utilização de sonorização nas salas de concertos, os difusores são amplamente utilizados nas paredes para redistribuição do som e

adequação dos parâmetros acústicos, devido à forma das salas, geralmente retangulares. Essa solução também é bem aceita pelos arquitetos como um elemento decorativo.

Enfim, é possível criar difusores e aplicá-los de maneira que atenda as exigências arquitetônicas e acústicas de um projeto. Desta maneira, elementos modernos de difusão tornaram-se parte integrante do desenho arquitetônico, comparando-se qualitativamente aos adornos e ornamentos existentes nas grandes salas de concerto do passado.

### **3.2 DIFUSORES DE SCHROEDER**

Inicialmente Schroeder (1975), em seu artigo sobre reflexões sonoras difusas, levantou a questão sobre qual a melhor forma possível de um difusor para se alcançar uma difusão sonora das ondas incidentes aleatórias com um espalhamento uniforme em todas as direções.

Para isso, Schroeder (1975) propôs um difusor de seqüência periódica de máximo comprimento como contribuição para a difusão sonora em salas reverberantes e salas de concerto, podendo ser aplicados nas paredes laterais e tetos. Esta seqüência era capaz de produzir uma boa difusão sobre uma faixa maior de freqüência, possivelmente devido à superfície do difusor, que era composta por poços de diferentes profundidades. O número de poços de um período é representado pela letra "N". A Figura 3.3 mostra um período de uma superfície baseada na seqüência { 0,0,1,0,1,1,1}, no caso N=7.

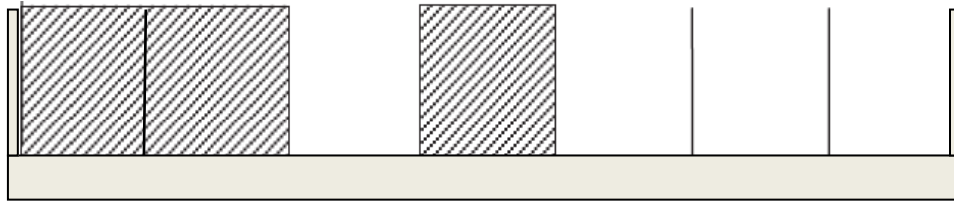


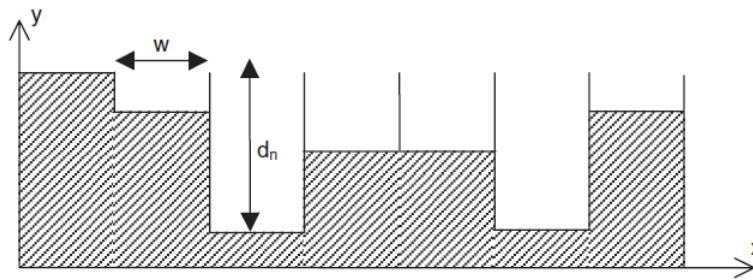
Figura 3.3 - Seção de um período de difusor com uma seqüência de máximo comprimento  $N=7$ .

Fonte: COX, D'ANTONIO (2004)

As pesquisas de Schroeder, sobre desenhos de difusores, tinham como objetivo alcançar e medir a difusão sonora do ambiente em uma ampla faixa de freqüência, devido as suas descobertas sobre “dissimilaridade binaural” referente ao ouvido humano (SCHROEDER, 1978).

Com o trabalho sobre dissimilaridade binaural, Schroeder deu sua enorme contribuição para as questões de difusão sonora, talvez a maior contribuição até hoje, com os estudos sobre as reflexões com interferência de fases (*reflection phase-grating*). O difusor de Schoeder produzia uma excelente difusão sonora com um número pequeno e simples de equações para o cálculo dos desenhos dos difusores.

Com as pesquisas, difusores de seqüência de máximo comprimento (*maximum-length sequences*) foram capazes de distribuir o som em uma grande faixa de freqüência, possivelmente devido às diferenças de profundidade das faixas que compunham o difusor. Testes foram feitos para desenvolver uma seqüência matemática que atendesse certas freqüências, gerando assim o Difusor de Resíduo Quadrático (QRD), baseado no modelo de Schroeder (Figura 3.4). O Difusor QRD consiste em uma seqüência de poços de largura “ $w$ ” e profundidade “ $d_n$ ”.



**Figura 3.4 - Seção transversal de um difusor QRD (Quadratic Residue Diffusor)**

**Fonte: COX, D'ANTONIO (2004)**

O princípio do Difusor de Schroeder, em uma dimensão, consiste em uma montagem de vários “poços” com a mesma largura e profundidades diferentes. Os poços são separados por estreitas paredes compostas do mesmo material (Figura 3.5). Difusores 1D causam espalhamento em uma direção, comportando-se como uma superfície plana na direção ortogonal a este plano.



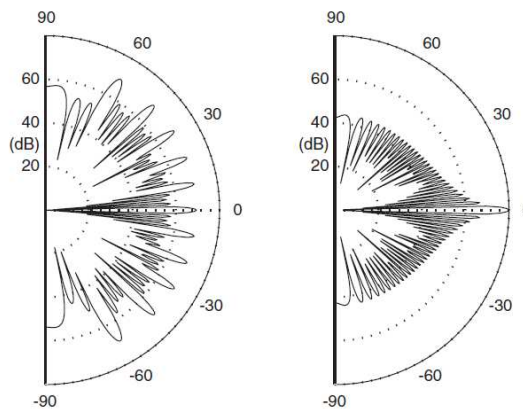
**Figura 3.5 - Difusor de Schroeder em 1D**

**Fonte: COX, D'ANTONIO (2004)**



As pesquisas de Schroeder coincidiram com o desenvolvimento de estudos da energia sonora em salas pequenas, envolvendo reflexões temporais livres e zonas difusas. (DAVIS E DAVIS, 1980 apud COX ,2006).

O princípio do comportamento dos difusores mostra que a pressão em um ponto externo próximo ao difusor é determinada pela interferência das ondas irradiadas de cada poço. Conseqüentemente, a distribuição polar do espalhamento é determinada pela escolha da profundidade dos poços. Foi demonstrado por Schroeder (1975) que, escolhendo-se uma seqüência quadrática residual, a energia espalhada pelo difusor em cada direção é a mesma. A Figura 3.6 exemplifica o espalhamento de uma superfície considerada um bom difusor, onde se encontra espalhado onze lóbulos de mesma energia. Esses lóbulos são gerados devido ao período da superfície.



**Figura 3.6 - Nível de espalhamento de um Difusor de Schroeder (esquerda) e uma superfície plana (direita) com o mesmo tamanho.**

**Fonte: COX, D'ANTONIO (2004)**

A teoria dos Difusores de Schroeder se baseia na propagação de ondas planas dentro dos poços do difusor. Todas essas ondas têm a mesma amplitude, porém diferentes fases, pois a fase de cada uma delas é determinada pelo tempo que cada onda leva para ir até o fundo do poço que a gerou e voltar.

Para a atuação do difusor existe uma largura de banda, composta pela frequência mais baixa  $f_{\min}$  e a frequência mais alta  $f_{\max}$ . Essas frequências são consideradas parâmetros de projeto. A frequência limite inferior ( $f_{\min}$ ) é calculada pela Equação 3.1:

$$f_{\min} = c / \lambda_{\max} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

onde,

$c$  - velocidade do som [m/s];

$\lambda_{\max}$  - comprimento de onda máximo dentro do poço [m].

Da mesma maneira, a frequência limite superior ( $f_{\max}$ ) para um difusor de resíduo quadrático é dada pela Equação 3.2:

$$f_{\max} = c / \lambda_{\min} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

onde,

$c$  - velocidade do som [m/s];

$\lambda_{\min}$  - comprimento de onda mínimo dentro do poço [m].

Para uma correta atuação do difusor de Schroeder, a largura do poço ( $w$ ) irá depender do comprimento de onda mínimo dentro do poço do difusor, dada pela Equação 3.3:

$$w = \lambda_{\min} / 2 \quad (\text{Eq. 3.3})$$

onde,

$\lambda_{\min}$  - comprimento de onda mínimo dentro do poço [m].

Para o cálculo das profundidades dos poços, a Seqüência de Resíduos Quadráticos é a seqüência matemática mais comum de ser utilizada. A seqüência de números de poços,  $s_n$ , para um dado “n” é obtida pela Equação 3.4:

$$s_n = n^2 \times \text{módulo } N \quad (\text{Eq. 3.4})$$

onde,

n - número de ordem de poços;

N - número primo gerador da seqüência e que também determina o número de poços por período.

Observa-se na Figura 3.7 um quadro com seqüências de resíduos quadráticos para os números primos de 5 a 23.

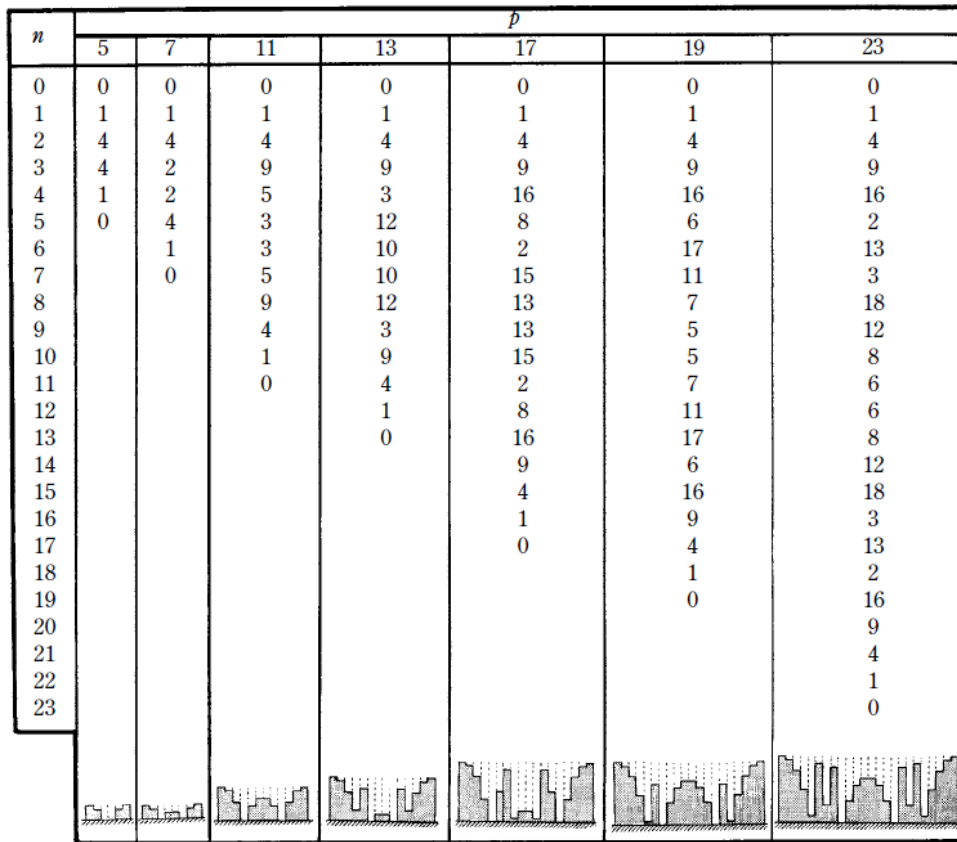


Figura 3.7 - Seqüência de resíduos quadráticos para os números primos de 5 a 23.

Fonte: EVEREST (1994)

A profundidade do  $n$ -ésimo poço “ $d_n$ ” é determinada a partir da seqüência por meio da Equação 3.5:

$$d_n = s_n \lambda_{\max} / 2N \quad (\text{Eq. 3.5})$$

onde,

$s_n$  - seqüência dos poços;

$\lambda_{\max}$  - comprimento de onda máximo [m].

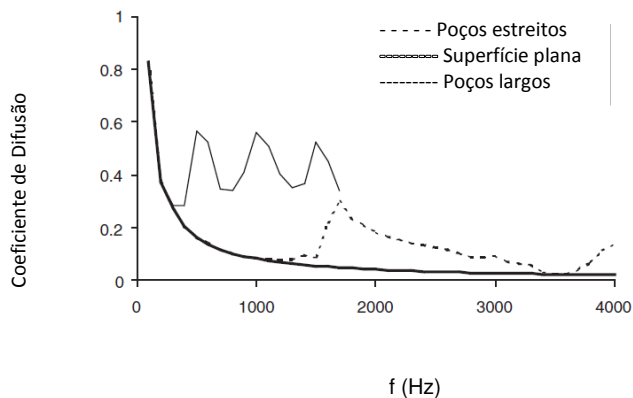
A frequência de projeto não é a menor frequência na qual um difusor é capaz de gerar mais espalhamento que uma superfície plana, mas representa a menor frequência onde a difração se dá ainda na forma de lóbulos de mesma energia.

Para o projeto de um bom difusor algumas considerações em relação ao período e a frequência de projeto do difusor são importantes. Uma das considerações é em relação ao comprimento do período " $N \times w$ " que é quase sempre determinante no desempenho do difusor. Difusores compostos por períodos mais largos e poços mais largos alcançam um campo sonoro difuso mais rapidamente do que difusores com períodos e poços mais estreitos.

Considerando um difusor com período estreito e poços estreitos, a frequência limite inferior é determinada pela largura do período e não pela profundidade dos poços. Difusores com essas características somente causam difusão significativa quando é atingida a frequência de, aproximadamente, três vezes a frequência de projeto. A partir dessa frequência os lóbulos laterais de espalhamento começam a ser significativos.

Outra consequência do período estreito, é que nas primeiras frequências múltiplas da frequência de projeto o difusor tem seu comportamento idêntico a uma superfície plana. Para um período estreito e larguras de poços maiores, os lóbulos laterais de espalhamento aparecem abaixo da frequência de projeto, sendo atingido o espalhamento mais rápido do que os difusores com períodos mais estreitos.

A Figura 3.8 apresenta a relação do coeficiente de difusão desses tipos de difusores (com poços mais estreitos e maiores de mesmo período e mesma frequência de projeto) em função da frequência, comparando-os com uma superfície plana de mesma dimensão.



**Figura 3.8 - Variação do coeficiente de difusão em função da frequência em diferentes difusores com poços estreitos, largos e superfície plana.**

**Fonte: Adaptado de COX, D'ANTONIO (2004)**

Outra consideração importante sobre difusores é em relação a sua periodicidade. Quanto mais períodos formarem o difusor, o comportamento do espalhamento será irregular, pois aumentará um número considerável de posições angulares sem espalhamento. Inversamente, quanto menor o número de períodos, mais uniforme será a distribuição do som.

Tendo em vista essas considerações sobre os difusores, verificou-se que um difusor eficiente possui um número relativamente pequeno de períodos, por volta de cinco períodos, garantindo um espalhamento mais uniforme. O período, por sua vez, deve ser comprido, de maneira a garantir grande número de lóbulos laterais. Os poços devem ser relativamente estreitos, para que as reflexões em altas frequências não sejam especulares, atingindo uma gama de frequência. Também não podem ser muito estreitos devido ao custo e dificuldade de fabricação e, outro fator a ser considerado neste caso, é a absorção causada pelo efeito de viscosidade. Recomenda-se como largura ideal de poço valores entre 2,5 cm e 5,0 cm.

Fujiwara et al (2000) estudaram o efeito do campo sonoro próximo a superfície do difusor de Schroeder. Utilizaram o método do Tubo de Kundt para visualizar o campo sonoro nessa região. Esse método consiste em colocar um difusor em uma das

extremidades dentro de um Tubo de Kundt, e uma fonte sonora na outra extremidade. O som produzido pelo alto-falante excita as partículas de pó de cortiça fina, existentes dentro do tubo, tornando possível a visualização do comportamento do campo sonoro próximo ao difusor e dentro dos poços que o compõe. Foram feitos vários ensaios com as freqüências abaixo de 500Hz para verificar a absorção sonora próxima ao difusor.

Qualitativamente, verificou-se que houve absorção nas freqüências 63 e 80 Hz para a região de até 35cm do difusor. Isso mostra que para o projeto de difusores de resíduo quadrático, deve-se levar em consideração a largura dos poços para que o efeito de absorção pelos mesmos seja diminuído.

A profundidade dos poços de um difusor deve também ser limitada. Para uma freqüência de projeto, considerada mínima ( $f_{min}$ ), a profundidade dos poços ( $d_{máx}$ ) pode ser calculada pela Equação 3.6:

$$f_{min} = \frac{s_{máx} c}{N 2d_{máx}} \quad (Eq.3.6)$$

onde,

$s_{máx}$  - maior número da seqüência;

$N$  - número primo gerador da seqüência.

Algumas modificações podem ser feitas quando se deseja atingir um intervalo máximo de freqüências levando em consideração a razão entre o maior número da seqüência ( $s_{máx}$ ) e o número primo gerador da seqüência ( $N$ ).

Para uma redução no número da seqüência visando a ampliação das respostas nas baixas freqüências, permanecendo o número primo gerador da seqüência ( $N$ ) grande, é possível manipular a seqüência introduzindo um deslocamento de fase

constante “m”, conforme Equação 3.7. Com a introdução da fase “m” pode-se rebaixar a frequência de projeto em 1/3, caso necessário.

$$s_n = (n^2 + m) \times \text{mod } N \quad (\text{Eq. 3.7})$$

onde,

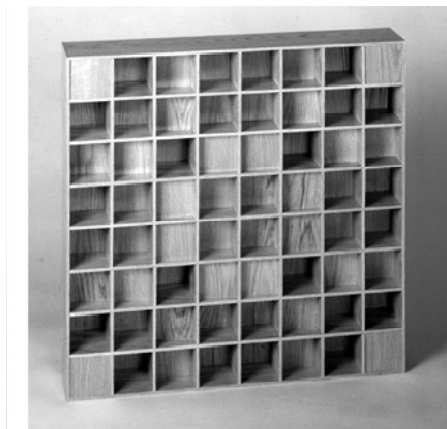
$s_n$  - seqüência dos poços;

$n$  - número de ordem de poços;

$m$  - número inteiro constante;

$N$  - número primo gerador da seqüência e que também determina o número de poços por período.

Existem outros tipos de difusores que geram espalhamento hemisférico. Esses difusores podem ser formados da combinação de um difusor de Schroeder na direção  $x$ , com outro difusor na direção  $y$ , sendo considerado um difusor 2D, conforme Figura 3.9.



**Figura 3.9 - Difusor de Schroeder em 2D**

**Fonte: COX, D'ANTONIO (2004)**



A construção de um difusor 2D passa pela definição do seqüenciamento de profundidades e saliências dos difusores bidimensionais. Exemplos de difusores 2D podem ser visualizados em Mannis (2008) páginas de 159 a 162. A dimensão de um difusor possui o valor de “N x w”.

Um difusor de Schroeder em 2D possui dimensões N.w x N.w possuindo o quadrado do número de lóbulos do difusor de 1D de comprimento N.w. Por conseqüência produz espalhamento em vários planos.

A seqüência que forma um difusor 2D é dada pela Equação 3.8:

$$s_{n,m} = (n^2 + m^2) \times \text{mod } N \quad (\text{Eq. 3.8})$$

onde,

n e m - números inteiros e fornecem a profundidade do poço de ordem (n,m).

Os difusores 2D geralmente apresentam menor eficiência em baixas frequências em comparação com difusores 1D, pois a razão  $s_{\text{máx}}/N$  tende a 1 nos dispositivos 2D.

Os difusores de Schroeder foram os precursores dos estudos de difusores com cálculo de suas melhores formas, tamanhos e profundidades de seus poços. Baseado nos estudos de Schroeder, as pesquisas sobre difusão sonora avançaram objetivando um melhor aproveitamento dos difusores.

### 3.3 MELHORIAS DE DESEMPENHO DOS DIFUSORES DE SCHROEDER

Em locais que necessitam de uma grande área de difusão sonora, normalmente tem-se utilizado a mesma seqüência dos difusores de Schroeder. Porém, foi visto que o efeito dessa grande área coberta pelo mesmo tipo de difusor causa a diminuição da difusão a um número finito de direções comparado ao desempenho do difusor instalado isoladamente (ANGUS, 2000).

Visando estudar esse problema, Angus (2000) propôs a modulação entre dois difusores por reflexão com interferência de fase, com o objetivo de alcançar uma maior difusividade sonora em arranjo periódico do Difusor de Resíduo Quadrático. Baseou-se na Teoria de Fourier, que transforma a distribuição complexa de pressão em objeto uniforme do som.

Angus (2000) fez vários ensaios da difusão sonora obtida por meio do difusor de resíduo quadrático em seqüências invertidas do mesmo difusor. Colocou-os em seqüência e mediu a difusividade do conjunto. Alcançou bons resultados de difusão para uma grande área em comparação com o difusor instalado isoladamente.

Na mesma época, D'Antonio e Cox (2000) fizeram uma revisão sobre conceitos de Difusores de Raiz Primitiva (PRD), desenvolvido por Schroeder, que possuem a característica de reduzir a reflexão especular, aumentando o efetivo espalhamento sonoro lateralmente. Os Difusores de Raiz Primitiva são bem menos utilizados do que os Difusores Quadráticos Residuais.

No estudo proposto por D'Antonio e Cox (2000), utilizando o mesmo princípio de Angus (2000), foram escolhidas duas seqüências do difusor de raiz primitiva instalando-os aleatoriamente na parede. Verificou-se que a modificação de instalação dos difusores de maneira aleatória, tornou a pressão nula na direção da reflexão especular, aumentando o espalhamento nas outras direções. Constatou-se também

que uma melhor difusão foi alcançada utilizando-se um número pequeno de período com um grande número de poços por períodos.

Mannis (2008) propôs em seus estudos maneiras de concepção dos difusores a fim de melhorar seu desempenho em relação a difusão sonora. Com esses estudos mais recentes, pode-se verificar que a difusão sonora não está apenas relacionada com o tamanho do período e a profundidade dos poços dos difusores, conforme proposto por Schroeder inicialmente. Ela também está intimamente ligada à maneira de montagem dos elementos difusores, sejam esses do tipo de resíduos quadrático (QRD) ou de raiz primitiva (PRD).

Baseado nessa premissa sobre a maneira de montagem dos elementos difusores, outros tipos de elementos, como cilindros, pirâmides e superfícies planas, sendo estas últimas por meio de suas bordas, também podem ser consideradas superfícies difusoras, conforme suas instalações nos ambientes. Superfícies curvas também são utilizadas como difusores, não somente uma esfera isolada ou mesmo um único cilindro. Devem-se utilizar várias esferas uma ao lado da outra, assim como uma seqüência de cilindros lado a lado para se alcançar a difusão desejada (COX E D'ANTONIO, 2004).

### **3.4 QUANTIFICAÇÃO DA DIFUSÃO E DO ESPALHAMENTO SONORO.**

Com o surgimento dos difusores e o estudo sobre sua caracterização, muitos profissionais, como designers de difusores e projetistas de salas, sentiram necessidade de uma simplificação nos dados obtidos pela resposta polar de cada elemento de difusão (COX E D'ANTONIO, 2004).

Para os projetos dessas superfícies era necessário resumir em um valor as informações presentes nos gráficos das respostas polares, pois não se conseguia perceber como o difusor atuava, somente observando sua resposta polar. Havia necessidade de transformar esses dados em um dado único, para a possível comparação dos elementos difusores entre si.

Com o avanço da modelagem de salas e o desenvolvimento de programas de simulação computacional, a determinação do coeficiente de espalhamento da superfície tornou-se importante para utilização nesses programas, para que os resultados do modelo ficassem mais próximos do objetivo real.

Segundo Gomes (2002), para a determinação dos coeficientes de difusão e espalhamento sonoro alguns grupos de pesquisadores se reuniram para estudar o tema. O procedimento de medição do coeficiente de difusão em campo livre foi estudado pelo grupo da *Audio Engineering Society* (AES) em 2001. Em relação ao coeficiente de espalhamento, o estudo foi desenvolvido pelo grupo da ISO (*International Organization for Standardization*) que estabeleceu o método de medição do coeficiente de espalhamento de incidência aleatória baseado nos estudos de Mommertz (1995) e Vörländer (1989).

Assim como os membros da AES, Hargreaves et al (2000) concentraram seus estudos no cálculo do coeficiente de difusão sonora derivado de resposta polar em campo livre. Paralelamente, Vörländer e Mommertz desenvolviam experimentos para o cálculo do coeficiente de espalhamento em campo difuso.

Ainda hoje há certa confusão na escolha de qual coeficiente deve ser utilizado, nas atividades para confecção de um difusor, para projeto acústico de uma sala ou para a simulação acústica de salas por meio de programas computacionais.

### **3.5 HISTÓRICO SOBRE DEFINIÇÃO DO COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO SONORO**

O coeficiente de espalhamento foi conceitualmente determinado por meio de estudos desenvolvidos por Michael Vörländer e Eckard Mommertz em trabalhos de definição e medição do coeficiente de espalhamento de incidência aleatória, que resultou no artigo publicado no ano 2000 (VÖRLÄNDER e MOMMERTZ, 2000).

Em conjunto a esse trabalho, Mommertz (2000) primeiramente definiu que as propriedades de espalhamento de superfícies não homogêneas poderiam ser descritas pela distribuição direcional da energia refletida, chamada de directividade reflexiva. Essa distribuição da energia poderia ser calculada ou medida por amostras com tamanho finito em condições de campo livre ou em câmara reverberante. O autor desenvolveu o modelo matemático para o cálculo da distribuição direcional da energia refletida da amostra. Para simplificação dos cálculos, a directividade é dada por ângulos determinados, como  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $60^\circ$  e em função das bandas de frequência de 1/3 de oitava.

Simultaneamente as pesquisas de Mommertz (2000), Vörländer e Mommertz (2000) resultaram em dois métodos de determinação do coeficiente de espalhamento, sendo um método de determinação em campo livre e outro método em câmara reverberante.

O método de determinação do coeficiente de espalhamento de um material em câmara reverberante é o mais utilizado e está descrito na norma ISO 17.497-1 (2004), podendo ser realizado em câmara reverberante real ou em escala. Nesse método, o coeficiente de espalhamento de um difusor é obtido por meio da média de várias respostas impulsivas de uma câmara reverberante com a amostra sobre uma superfície nas condições em movimento de rotação e parada.

Vörlander e Mommertz (2000) fizeram algumas considerações entre as medições com os métodos em campo livre e em câmara reverberante. Observaram que nas medidas em baixas e médias frequências, os resultados dos dois métodos mostraram-se coerentes. Porém nas altas frequências alguns desvios foram observados. Esses desvios foram atribuídos ao formato da amostra. No ensaio do método experimental em campo livre a amostra apresentou-se no formato quadrado e no método experimental da câmara reverberante, seu formato era circular. Em relação aos efeitos do tamanho e formato da base na determinação do coeficiente, Vörlander e Mommertz (2000) colocam que deveriam ser estudados com mais detalhes.

Outro fator importante foi o tempo de medição para determinação do coeficiente de espalhamento. Verificou-se que o método da câmara reverberante é muito mais rápido do que o método em campo livre.

Em paralelo aos estudos de Vörlander e Mommertz (2000), Farina (2000a) fez experimentos para determinação do coeficiente de espalhamento sonoro e coeficiente de difusão sonora por meio do método de Síntese do Campo de Ondas (*Wave Field Synthesis*). Com os resultados, Farina (2000a) conseguiu introduzir em seu programa de simulação de salas, utilizando o traçado piramidal de raios, separadamente o espalhamento das bordas da superfície do material e o coeficiente de espalhamento da superfície.

Pela técnica de Síntese do Campo de Ondas, foi possível caracterizar as propriedades do material em relação ao espalhamento sonoro de sua superfície, para uma superfície de tamanho finito por um número de medições de respostas impulsivas. Segundo Farina (2000a), a medição pela técnica de Síntese do Campo de Ondas é longa e requer um pouco de esforço para executá-la.

Em outro artigo, apresentado no Simpósio Internacional de Difusão de Superfícies em Acústica de salas, realizado em Liverpool, Inglaterra, Farina (2000b) comparou dois métodos de determinação do coeficiente de espalhamento em campo

livre: o método apresentado por Vörländer e Mommertz (2000) e o método proposto por ele próprio baseado no método de Síntese do Campo de Ondas. Farina (2000b) testa experimentalmente os dois métodos, chegando às seguintes conclusões: o método do campo livre implementado por Vörländer e Mommertz (2000) possui falhas ao testar amostras de tamanho reduzido. Conclui que o coeficiente de espalhamento obtido é maior, pois possui também a parcela de espalhamento das bordas das amostras.

Com os resultados das comparações dos métodos de determinação experimental do coeficiente de espalhamento sonoro, uma discussão que Farina (2000b) propôs foi sobre a comparação dos programas de simulação acústica que utilizavam o coeficiente de espalhamento. Alguns programas consideravam que a energia difusa era irradiada uniformemente. Outros programas já colocavam a energia difusa sendo re-irradiada conforme a lei dos Cossenos de Lambert. Alguns programas tratavam do efeito de borda separadamente. Outros já o incluíam “dentro” do coeficiente de espalhamento do material.

Outros estudos também foram realizados quanto à determinação experimental do coeficiente de espalhamento sonoro. Geetere e Vermeir (2002) e Embrechts (2002) fizeram experimentos para determinação experimental do coeficiente de espalhamento em câmaras reverberantes reais, discutindo pontos relevantes, como a rotação da mesa manualmente ou motorizada, tamanho da amostra e tempo de medição.

Geetere e Vermeir (2002) concluíram que medições em câmaras reais são muito sensíveis às condições de reverberação da sala, dependendo do volume. Outro fator que deve ser levado em conta são as mudanças de temperatura e umidade relativa do ar dentro da câmara. Em relação ao tempo de medição, os resultados dos coeficientes de espalhamento ficam mais próximos da realidade quando medidos em um menor espaço de tempo, preferencialmente utilizando a rotação motorizada da mesa de teste. Em relação à rotação da amostra, os autores perceberam que o melhor resultado do coeficiente de espalhamento foi obtido para a rotação mecânica comparado com a rotação manual.

Embrechts (2002) também chegou a algumas conclusões em relação às medições em câmaras reverberantes reais. O primeiro problema encontrado foi o tamanho da amostra para entrar na câmara reverberante (diâmetro=3,0m para câmaras com volume 200 m<sup>3</sup>). Outra conclusão foi em relação à motorização da mesa giratória. Com a rotação motorizada, o tempo de medição torna-se bem menor, anulando interferências nas medições com aberturas de porta para rotacionar a amostra de teste manualmente.

Em meio às discussões sobre a determinação experimental do coeficiente de espalhamento em câmaras reais e em escala, Vörländer *et al* (2004), apresentaram um trabalho de medição do coeficiente de espalhamento de incidência aleatória em três laboratórios diferentes, fazendo a comparação entre eles. Apesar do método já ter sido desenvolvido, alguns aspectos ainda precisavam de melhor investigação, como por exemplo, a área da amostra, assim como sua forma, o fator de escala e operações práticas de medição entre outros (VÖRLÄNDER *et al*, 2004).

Comparando as medições entre as câmaras em escala e em tamanho real, Vörländer *et al* (2004) chegaram a resultados bem próximos, confirmando a reprodutibilidade dos ensaios tanto em câmaras reais como em escala.

Medições do coeficiente de espalhamento em câmaras em escala possuem a vantagem em relação ao tamanho da amostra e ao sistema de medição, como o tamanho da base da mesa giratória. Com o sistema em escala, fica mais fácil e ágil a criação de um banco de dados composto por vários materiais para serem inseridos nos programas de simulação computacional devido ao tamanho das amostras.

Geetere e Vermeir (2002) também concluíram que um parâmetro que deve ser levado em conta nas medições em escala é a estabilidade da temperatura e umidade relativa do ar. O tipo de gás no interior da câmara pode causar absorção elevada, reduzindo o tempo de reverberação das medições, alterando desta forma o coeficiente



de espalhamento da amostra. Uma das alternativas é substituir o ar por outro gás, como por exemplo, o nitrogênio.

Em relação ao efeito de borda, Vörlander *et al* (2004) constataram que utilizando amostra circular, esse efeito torna-se muito pequeno, não interferindo nos resultados obtidos para câmaras em escala. A norma ISO 17.497-1 (2004) considera que o coeficiente de espalhamento de incidência aleatória corresponde a uma superfície infinita, independentemente dos limites dessa superfície ou como ela é instalada na prática.

Com relação aos métodos teóricos de determinação do coeficiente de espalhamento, um estudo interessante foi proposto por Embrechts *et al* (2001). Os autores propuseram o cálculo do coeficiente de espalhamento por meio do método de aproximação de Kirchhoff, cujo método analisa as superfícies com irregularidades aleatórias. Expressões teóricas são utilizadas para ilustrar a dependência do coeficiente de espalhamento para cada frequência, ângulo de incidência sonoro e o perfil geométrico de irregularidades da superfície da amostra. Foi utilizada a fórmula proposta por Mommertz (2000) para o cálculo do coeficiente de espalhamento.

Nesse estudo, Embrechts *et al* (2001) concluíram que Mommertz (2000) extraiu corretamente a componente especular do difusor 1D em suas análises teóricas, confirmando portanto que o coeficiente de espalhamento proposto por Mommertz (2000) não incluía a difração das bordas, sendo incluído esse efeito na contribuição especular da mesma.

Outros métodos teóricos de determinação do coeficiente de espalhamento sonoro foram resumidos por Cox e D'Antonio (2004), e está apresentado na Tabela 3.1. As colunas de Precisão e Tempo de Processamento Computacional são apenas indicativas, podendo variar a ordem de desempenho dependendo do tipo de superfície que será considerada e da implementação particular do algoritmo.

Tabela 3.1 - Principais características dos métodos teóricos de determinação do coeficiente de espalhamento.

Fonte: COX, D'ANTONIO (2004)

Modelo	Precisão	Tempo de Processamento	Observações
<b>Método Elemento Finito (BEM)</b>	Melhor	Lento	É possível introduzir superfícies exatas, sendo as perdas da camada limite pequenas. Lento para grandes superfícies ou altas frequências.
<b>Painel estreito (BEM)</b>			Método eficiente para superfícies estreitas.
<b>Kirchhoff</b>	↑ ↓	↑ ↓	Utilizado para aproximação de superfícies, tornando-se mais rápido. Menos preciso para receptores e fontes oblíquas, baixas frequências e superfícies com grande variação de profundidade.
<b>Fresnel</b>			Substitui a integração numérica resultante do método Kirchhoff por integrais mais rápidas. Demonstra espalhamento por meio da largura e comprimento da superfície sendo ortogonal.
<b>Fraunhofer ou Fourier</b>	Pior	Rápido	Simplifica a integral numérica do método de Kirchhoff, somente usado para campos distantes. Bom para entender o processo físico e o desenho, porém considerado o menos preciso.

Outro estudo em relação ao coeficiente de espalhamento foi desenvolvido por Embrechts *et al* (2006) com o objetivo de comparar valores do coeficiente de espalhamento com cálculos teóricos e determinados experimentalmente.

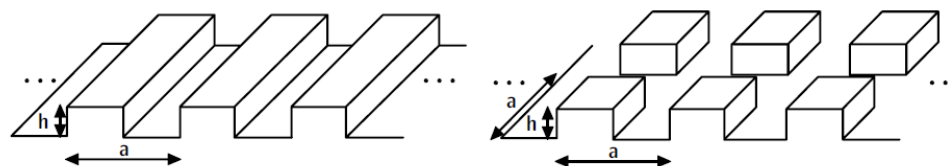
Embrechts *et al* (2006) basearam suas comparações nos resultados determinados experimentalmente por Vörländer *et al* (2004) para uma amostra específica. Nesse trabalho, Embrechts *et al* (2006) calcularam teoricamente, por meio

de duas técnicas, o coeficiente de espalhamento, uma considerando a amostra finita e outra considerando a amostra infinita. Os valores teóricos e experimentais do coeficiente de espalhamento foram comparados entre si e notou-se grande proximidade entre eles. Para frequências abaixo de 2000Hz, os valores dos coeficientes de espalhamento ficaram mais próximos.

Embrechts *et al* (2006) concluíram que a comparação entre os valores determinados experimentalmente e calculados teoricamente apresentaram boa aproximação entre si, confirmando assim o método de determinação do coeficiente de espalhamento de incidência aleatória em câmara reverberante, descrito na norma ISO 17.497-1 (2004).

É possível também estimar o espalhamento de difusores com padrões de irregularidades (furos e saliências) conforme apresentado por Vörländer em seu livro sobre Auralização (2008). Vörländer especifica que alguns parâmetros relevantes das superfícies para a determinação do coeficiente de espalhamento sonoro são o tamanho e profundidades das irregularidades. Para considerar a quantidade de espalhamento sonoro é essencial que a superfície seja descrita em relação às suas características dimensionais, como a profundidade e a distância entre essas profundidades.

Considerando que a profundidade das irregularidades da amostra de difusor é representada por “h” e a distância entre profundidades representada por “a”, conforme Figura 3.10, tem-se que o coeficiente de espalhamento sonoro de incidência aleatória é dependente da frequência normalizada  $a/\lambda = f a/c$ , onde “ $\lambda$ ” é o comprimento de onda sonoro e “c” a velocidade do som durante a medição. Valores abaixo de  $a/\lambda = 0,125$ , o coeficiente de espalhamento sonoro de incidência aleatória é geralmente menor que 0,05 (VÖRLÄNDER, 2008).



**Figura 3.10 – Definição das dimensões das irregularidades da superfície da amostra 1D e 2D**

**Fonte: VÖRLANDER (2008)**

Vörlander (2008) apresenta tabelas com os valores de coeficiente de espalhamento sonoro de superfícies 1D, superfícies 2D, superfícies sinusoidais periódicas, alguns tipos de difusores comerciais e também alguns resultados do Round Robin III.

### **3.6 COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO E OS PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

As pesquisas sobre determinação do coeficiente de espalhamento levaram ao estabelecimento da norma ISO 17.497-1 (2004) e a comparações entre os resultados obtidos das medições em câmaras reverberantes reais e em escala. O próximo passo nas pesquisas foi a introdução do coeficiente de espalhamento em programas de simulação computacional, visando analisar qual a contribuição desse coeficiente nos modelos acústicos de salas

Os estudos tiveram início com um projeto desenvolvido na Alemanha que realizou a comparação de 14 programas de simulação acústica de salas, originários de diferentes países. O objetivo maior do projeto foi avaliar a capacidade dos programas de simulação em prever os parâmetros acústicos medidos. O objeto de estudo de

simulação foi o auditório da Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB), na Alemanha, com volume aproximado de 1800 m<sup>3</sup> (GOMES, 2002).

Esse estudo ficou conhecido como International Round Robin I. Escolheram-se oito parâmetros acústicos para serem simulados (tempo de reverberação, tempo de decaimento inicial, definição, clareza, tempo central, fração lateral e o coeficiente de correlação interaural). Os resultados do International Round Robin I foram apresentados por Vörländer (1995) no 15th Congresso Internacional de Acústica (1995) realizado em Trondheim. Nesse estudo concluiu-se que somente três programas de simulação alcançaram resultados próximos da realidade em relação aos parâmetros avaliados. Esses programas apresentaram um tempo de execução bom para o cálculo dos parâmetros propostos e não precisaram de muitos detalhes da sala analisada. Verificou-se que os três programas escolhidos incluíram reflexões difusas em seus cálculos.

Após alguns anos, aconteceu o International Round Robin II que foi desenvolvido e orientado por Bork (2000). Nessa etapa para as comparações dos programas de simulação foi escolhida uma sala multiuso na Suécia (Elmia Hall), com volume de 11000 m<sup>3</sup>. No Round Robin I a frequência utilizada para comparação dos resultados foi 1000Hz, enquanto no Round Robin II, foram analisadas seis bandas de frequência de oitava, na faixa de frequência entre 125Hz e 4000Hz. Dezesesseis grupos de usuários e programadores fizeram parte desse projeto. Todos os institutos utilizaram a técnica MLS de medição e se basearam na norma ISO 3382 (1997) – Acoustics – Measurement of reverberation time of rooms with reference to order acoustical parameters.

Diferentemente do Round Robin I, no Round Robin II a difusão foi inserida em quase todos os programas de simulação computacional. Foram levados em conta não somente a qualidade dos programas, mas também a habilidade dos operadores. No caso de falta de dados dos valores de difusão dos materiais que compunham a sala avaliada, alguns valores foram estimados pelo coordenador do projeto. Eram esperados

nessa etapa melhores resultados do que a primeira fase de comparações (Round Robin I).

Com a análise dos parâmetros propostos (tempo de reverberação, tempo de decaimento inicial, definição, clareza, tempo central, fração lateral e coeficiente de correlação interaural), notou-se variação dos resultados entre os programas. O tempo de cálculo também variou bastante entre eles, mesmo com a utilização da mesma configuração de hardware.

Christensen e Rindel (2005) participaram do Round Robin II utilizando o programa ODEON para modelagem do teatro Elmia Hall. Na simulação levaram em consideração dois valores do coeficiente de espalhamento: o espalhamento causado pela difração das bordas do material que compõe o teatro e o espalhamento da superfície do material. Os resultados obtidos na simulação foram mais próximos dos resultados reais medidos, com menos tempo de cálculo.

Com o Round Robin II, concluiu-se que a qualidade dos programas de simulação acústica de salas depende fortemente da correta inserção dos dados e das habilidades do operador em manuseá-lo. Constatou-se também a necessidade de dados mais reais das superfícies das salas como o coeficiente de absorção dos materiais e o coeficiente de espalhamento das superfícies.

Em 2002 foi apresentado os resultados do International Round Robin III realizado na Alemanha. No Round Robin III utilizou-se um estúdio de gravação localizado em Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB), na Alemanha, com volume aproximado de 360 m<sup>3</sup>, como objeto de medição e simulação computacional. Também nesse estudo comparativo, as características geométricas do estúdio, assim como os coeficientes de absorção e espalhamento dos materiais foram inseridos no programa.

Para Bork (2002) as três salas de diferentes tamanhos e finalidades foram utilizadas como objeto de comparação entre os Round Robin I, II e III afim de verificar os resultados para diferentes volumes de salas.

Concluiu-se com o Round Robin III que a confiabilidade dos softwares de simulação de salas tem aumentado para salas pequenas. Com o passar do tempo, os programas de simulação tornaram-se mais precisos assim como as técnicas de medição dos parâmetros acústicos. Programas comerciais mostraram boa concordância com os valores medidos em locais pequenos. Uma consequência desse fator é que alguns consultores acústicos estão preferindo utilizar os programas de simulação ao invés de construir modelos em escala.

Em 2002 Gomes comentou que mesmo com os avanços da tecnologia, a precisão dos programas de simulação dependia de vários fatores como, por exemplo, algumas limitações nas baixas frequências. A teoria geométrica do traçado de raios utilizada nos programas de simulação computacionais ainda é limitada quando se trata do comprimento de onda relativo às baixas frequências comparado com as dimensões da sala. Essas limitações estão sendo estudadas e alguns programas híbridos estão em desenvolvimento, no qual se utiliza uma mistura da teoria ondulatória para baixas frequências e teoria geométrica para altas frequências.





## 4 METODOLOGIA

---

Nesse item é apresentada a metodologia que foi utilizada nesse trabalho para a determinação experimental do coeficiente de espalhamento de incidência aleatória de painéis acústicos perfurados de gesso acartonado, cujo método de medição foi baseado na Norma “ISO 17497 (2004) – Part. 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room”.

O objeto de estudo desta pesquisa foram painéis acústicos perfurados de gesso acartonado encontrados comercialmente. Os painéis acústicos escolhidos foram os painéis de gesso acartonado modelo “Cleaneo Acústico” da empresa Knauf do Brasil. Existem seis modelos de chapas que diferem entre si pelas disposições, formas e tamanhos de furos em suas placas (Figura 4.1). Nesta pesquisa foram utilizados 5 modelos de chapas, cujas características físicas são apresentadas na Tabela 4.1.



Figura 4.1 - Amostras de painéis “Cleaneo Acústico”. (Fonte: Knauf do Brasil)

**Tabela 4.1 - Características Físicas das Placas Cleaneo.**

<b>Nome</b>	<b>Tipo Abertura</b>	<b>Ø Furos (mm)</b>	<b>Tamanho placa (mm)</b>	<b>% Perfuração</b>
<b>Aleatória</b>	Redondo	8 / 15 / 20	1200 x 2000 e 1875 x 2000	9,9
<b>Retilínea 12/25</b>	Quadrado	12 x 12	1200 x 2000	23
<b>Retilínea 12/25</b>	Redondo	12	1200 x 2000	18,1
<b>B4 8/18</b>	Quadrado	8 x 8	1200 x 1800	12,1
<b>Slotline B6 8/18</b>	Retangular		1200 x 1800	15,7

Para os ensaios das amostras escolhidas, foi realizada a qualificação da câmara reverberante do Laboratório de Conforto Acústico e Física Aplicada (LACAF) da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC) da Unicamp conforme Norma ISO 354 (2003) – Anexo A. A qualificação da câmara reverberante foi necessária para garantir o campo difuso dentro da câmara a fim de realizar os ensaios propostos.

Segundo a norma ISO 354 (2003), para a obtenção de um campo suficientemente difuso dentro da câmara reverberante, devem ser instalados difusores com baixa absorção sonora e com densidade superficial de, pelo menos, 5 kg/m<sup>2</sup>. A norma recomenda também que os difusores tenham áreas diferentes, entre 0,8 m<sup>2</sup> e 3 m<sup>2</sup> de cada lado do painel. As chapas podem ser levemente curvadas e orientadas aleatoriamente por toda a câmara.

Para a qualificação da câmara reverberante, inicialmente foi realizado um ensaio de determinação do coeficiente de absorção sonora de uma amostra conhecida (espuma de poliuretano) na câmara sem difusores. Em seguida, um grupo de difusores,

com áreas variando entre 0,76 m<sup>2</sup> e 1,53 m<sup>2</sup> por face, totalizando áreas entre 1,52 m<sup>2</sup> e 3,06 m<sup>2</sup> por difusor (ambas as faces), foi posicionado aleatoriamente na câmara. A determinação do coeficiente de absorção sonora da amostra foi se repetindo, inserindo a cada ensaio um grupo de 3 m<sup>2</sup> de difusores, até que o valor do coeficiente de absorção sonora médio da amostra, calculado no intervalo de frequência 500Hz a 5000Hz, atingiu-se um valor constante. Nessa condição, o campo sonoro no interior da câmara é considerado difuso.

Uma vez realizada a qualificação da câmara reverberante, partiu-se para a determinação experimental do coeficiente de espalhamento sonoro dos painéis acústicos perfurados.

Segundo a Norma ISO 17497-1 (2004), as características da câmara reverberante devem atender a norma ISO 354 (2003), com a utilização do fator de escala "N". Em relação à escala da câmara do LACAF, o fator de escala "N" é de 1,4, e corresponde à raiz cúbica da relação do volume real da câmara (71,84 m<sup>3</sup>) com o volume de 200 m<sup>3</sup> especificado na norma citada.

Para atender o fator de escala, a base da mesa rotatória, assim como as amostras dos painéis, foram confeccionadas com diâmetros de  $N^{-1} \times 3,0\text{m}$ , conforme indicação da norma. Como a escala da câmara reverberante era de 1 : 1,4 adotou-se diâmetro mínimo de 2,14m para a base da mesa e para as amostras. O conjunto mesa rotatória e base ficou distante de  $N^{-1} \times 1,0\text{m}$  das paredes da sala, ou seja, 0,71m de distância. A Figura 4.2 ilustra a mesa giratória com a base em MDF lisa.



**Figura 4.2 - Mesa giratória e base na câmara reverberante.**

Para a obtenção do coeficiente de espalhamento dos painéis acústicos perfurados, primeiramente foram determinados os tempos de reverberação da câmara em função da frequência em bandas de 1/3 de oitava, com a da mesa giratória com a base parada ( $T_1$ ) e depois rotacionando ( $T_3$ ). Os decaimentos sonoros foram medidos com 2 posições da fonte (F1 e F2) e 3 posições de microfones (P1, P2 e P3), sem as amostras.

O microfone utilizado foi o modelo omnidirecional da marca Brüel & Kjaer colocado em 3 posições distintas, obedecendo a distância de 1,5m entre posições de medida, distante 2,0m de qualquer posição de fonte sonora e 1,0m de qualquer superfície da sala e da amostra de teste. A fonte sonora utilizada foi o dodecaedro marca Brüel & Kjaer com radiação omnidirecional do som, sendo posicionada em 2 posições, mantendo pelo menos 3,0m de distância uma da outra.

Com os tempos de reverberação  $T_1$  e  $T_3$  foi calculado o coeficiente de espalhamento da base da mesa giratória em função da frequência ( $s_{base}$ ) conforme Equação 2.9 apresentada no capítulo da Fundamentação Teórica.

Para a obtenção do espalhamento da base da mesa, foram colocados blocos de concreto apoiados no chão formando um “cinturão” fechando o perímetro da mesa e o espaço vazio embaixo da mesa foi preenchido com placas de fibra de coco (Figura 4.3). Essa configuração foi testada por Embrechts (2002) que colocou blocos de concreto em volta da base da mesa giratória, eliminando as ondas sonoras que propagaram na cavidade entre a mesa e o piso, obtendo-se desta forma somente o espalhamento da base da mesa giratória.



**Figura 4.3 - Cinturão de blocos de concreto e placas de fibra de coco embaixo da mesa giratória.**

Após o cálculo do coeficiente de espalhamento da base da mesa ( $s_{base}$ ) em função da frequência, esses valores foram comparados com os valores máximos

permitidos de coeficiente de espalhamento relativos à base da mesa, segundo a norma ISO 17497-1 (2004).

Para a rotação da mesa foi adotado um tempo de revolução total para uma volta completa de 6 min e 33 s com 66 varreduras e comprimento de 5,76 s cada varredura. Portanto a cada 5 graus e 46 minutos de rotação da base da mesa e das amostras, um sinal sonoro foi emitido.

Após a determinação do coeficiente de espalhamento da base da mesa, realizaram-se os ensaios para a determinação do coeficiente de espalhamento das placas de gesso perfuradas. Foram determinados os tempos de reverberação da câmara em função da frequência em bandas de 1/3 de oitava, com as placas perfuradas de gesso acartonado paradas ( $T_2$ ) e depois rotacionando ( $T_4$ ). Para as medidas foram utilizadas 2 posições da fonte (F1 e F2) e 3 posições de microfones (P1, P2 e P3). Com os resultados obtidos dos tempos de reverberação da câmara em função da frequência, calcularam-se os coeficientes de absorção de incidência aleatória ( $\alpha_s$ ) e os coeficientes de absorção especular de incidência aleatória ( $\alpha_{spec}$ ) em função da frequência, por meio das Equações 2.6 e 2.7, apresentadas no capítulo da Fundamentação Teórica. As condições de temperatura e umidade dentro da câmara foram registradas durante as medições.

Com os valores dos coeficientes de absorção de incidência aleatória ( $\alpha_s$ ) e coeficientes de absorção especular de incidência aleatória ( $\alpha_{spec}$ ), calculou-se os coeficientes de espalhamento (s) das amostras de placas de gesso perfuradas, em função da frequência, segundo a Equação 2.8.

Com o objetivo de avaliar o potencial de espalhamento das amostras dos painéis de gesso perfurado, foi comparado o coeficiente de espalhamento dos diversos painéis com um difusor cuja capacidade de espalhamento já era conhecida. Para isso construiu-se um difusor de madeira 1D, cujos coeficientes de espalhamentos tinham sido medidos por Lee *et al* (2010). Determinou-se na câmara em escala do LACAF os

coeficientes de espalhamento sonoro do difusor 1D em função da frequência, sendo depois comparados com a literatura para complementação dos estudos.

O difusor 1D foi construído com caibros de madeira 6,5 x 6,5 cm. Esses caibros foram distribuídos sobre a base da mesa rotatória, de modo que a distância entre um caibro e outro fosse de 6,5 cm. Colocou-se uma chapa de PVC de 3 mm cobrindo a borda da madeira, conforme Figura 4.4.



**Figura 4.4 - Difusor de madeira 1D com borda de PVC.**

Para os ensaios propostos nesta pesquisa foram utilizados para as medições do tempo de reverberação os seguintes equipamentos: microfone marca Brüel & Kjaer modelo Investigator 2260 D, fonte sonora marca Brüel & Kjaer modelo OmniPower 4296, amplificador marca Brüel & Kjaer modelo 2716 e programa para avaliação acústica de salas DIRAC - Room Acoustics Software – Type 7841 da Brüel & Kjaer.

O programa de computador para avaliação acústica de salas DIRAC foi desenvolvido para medidas dos diversos parâmetros acústicos de salas como tempo de

reverberação, tempo de decaimento inicial, definição, clareza, inteligibilidade da fala. Nesse trabalho foram utilizados apenas os resultados de tempo de reverberação. Os cálculos dos parâmetros acústicos são baseados nas medições das respostas impulsivas do ambiente a um sinal pseudo-aleatório. Para a determinação do tempo de reverberação, o sinal sonoro utilizado foi do tipo varredura de senos, por apresentar boa distribuição da energia em seu espectro (espectro rosa) para aplicações acústicas e por não ser suscetível a não-linearidades das medições. O programa computacional DIRAC permite trabalhar com a questão de escala, pois possui uma rotina de compensação da atenuação do ar para as altas freqüências, que otimiza a determinação dos tempos de reverberação para modelos em escala. Foi utilizada essa rotina nesta pesquisa, utilizando as condições da umidade relativa do ar e da temperatura registradas durante o ensaio para o cálculo do coeficiente de atenuação sonora para altas freqüências, de acordo com a norma ISO 9613-1 (1993).



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

---

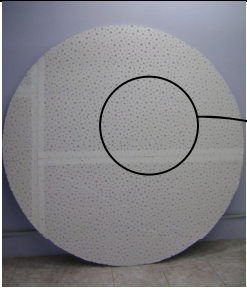
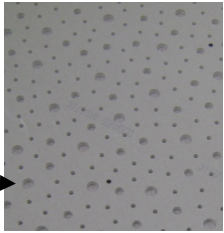
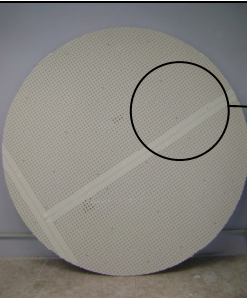
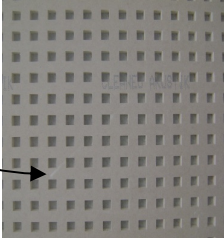
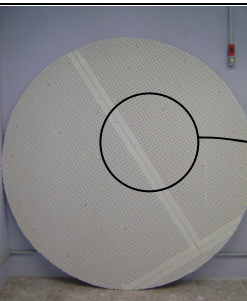
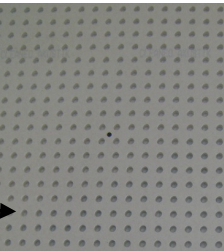
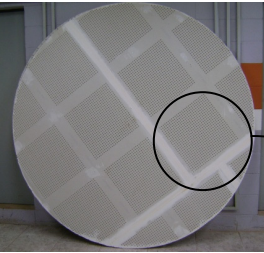
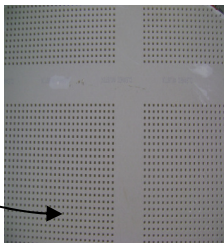
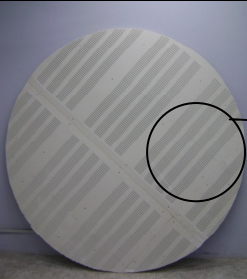
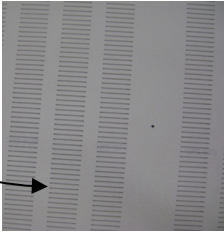
Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões dos ensaios de determinação do coeficiente de espalhamento sonoro em função da frequência dos painéis acústicos perfurados de gesso acartonado.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

As medições para a determinação do coeficiente de espalhamento sonoro foram realizadas com as cinco amostras diferentes de painéis acústicos perfurados de gesso acartonado. Como o material é vendido na forma de painéis retangulares, foi preciso adaptá-los para a forma circular. Para a montagem foi necessário utilizar duas placas de gesso de cada amostra, uní-las e cortá-las de maneira que formassem uma circunferência de 2,14m de diâmetro (Figura 5.1).

Em relação à superfície das amostras, a profundidade de suas irregularidades não ultrapassou o valor  $d/16$ , em que “d” é o diâmetro das amostras de teste. Considerando diâmetro de 2,14m, tem-se que a profundidade das irregularidades não poderia ultrapassar 0,13m ou 13cm. A profundidade das irregularidades das amostras dos painéis perfurados de gesso apresentou 1,2 cm, não ultrapassando, portanto, o valor estipulado em norma.

Em relação ao efeito de espalhamento sonoro causado pelas bordas das amostras, os painéis perfurados de gesso foram instalados sobre toda a base da mesa, sendo desprezível o efeito de espalhamento das bordas. Além disso, as reentrâncias das bordas do material foram fechadas com gesso e desprovidas de quaisquer aberturas laterais.

<p><i>Aleatória 8/15/20 – Furos redondos</i></p>		
<p><i>Retilínea 12/25 – Furos quadrados</i></p>		
<p><i>Retilínea 12/25 – Furos redondos</i></p>		
<p><i>B4 - 8/18 – Furos quadrados</i></p>		
<p><i>Slotline B6 - 8/18 – Bloco ranhurado</i></p>		

**Figura 5.1 - Características dos painéis acústicos de gesso acartonado ensaiados.**

Esse material é utilizado, em geral, para forros suspensos espaçados do teto e preenchido ou não com lã de rocha ou lã de vidro para promover absorção sonora. Devido ao design inovador e características diferenciadas, esse material também tem sido usado por profissionais para recobrir paredes.

## 5.2 QUALIFICAÇÃO DA CÂMARA REVERBERANTE

A Câmara Reverberante do LACAF-FEC foi construída com paredes de bloco de concreto preenchidas de areia e laje de concreto maciço. Seu formato é próximo a um formato retangular, com paredes não paralelas. Seu volume é de  $71,84 \text{ m}^3$  e área total de  $105,24 \text{ m}^2$ .

A Figura 5.2 representa a planta baixa da câmara reverberante. Suas dimensões e detalhamento são apresentados no Anexo 1.

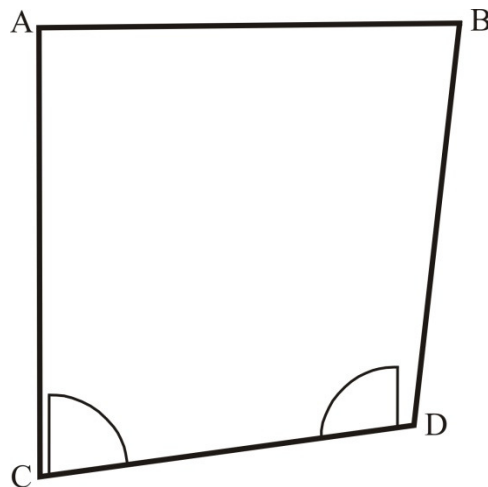


Figura 5.2 - Geometria da câmara reverberante do Laboratório de Conforto Ambiental da Unicamp.

Baseado na norma ISO 354 (2003), alguns dos parâmetros relacionados às características da câmara reverberante foram analisados. Em relação ao formato da câmara reverberante, o comprimento da maior reta em seu interior, conforme Equação 2.16, deve ser de, no máximo, 7,9 m. Pelo programa de computador Autocad, a maior diagonal encontrada na câmara do laboratório foi de 6,8 m, atendendo portanto a exigência de norma em relação a maior diagonal.

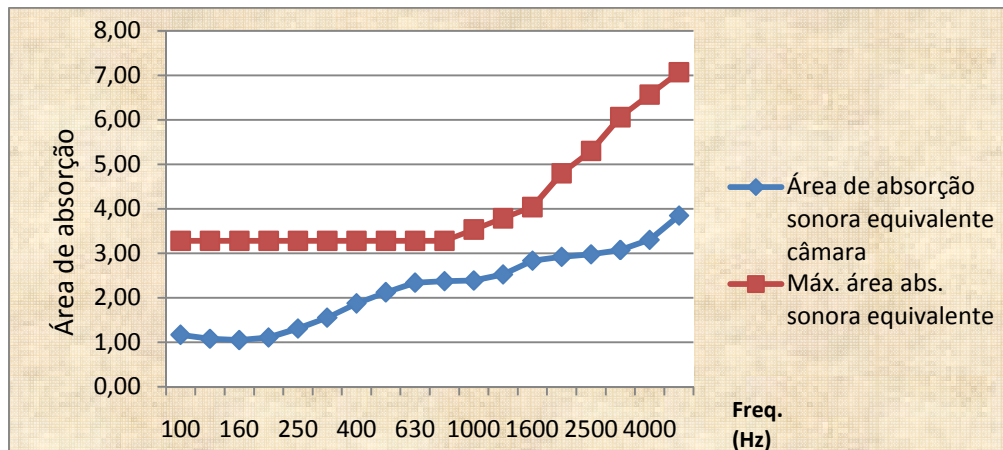
No que se refere às dimensões da câmara para uma distribuição uniforme de freqüências, especialmente as baixas freqüências, verificou-se que algumas relações entre comprimento, largura e altura apresentaram valores próximos ao de números inteiros pequenos. A Tabela 5.1 apresenta os valores extremos de razões entre elas.

Embora o valor extremo entre comprimento máximo e largura mínima tenha apresentado razão próxima de um número inteiro (1,04), o campo no interior da câmara, após a qualificação, apresentou uma distribuição de freqüências praticamente uniforme.

**Tabela 5.1 - Valores das relações entre as dimensões da câmara reverberante.**

<b>Relação de Dimensões</b>	<b>Razão</b>	<b>Valor</b>
Comprimento máximo / largura mínima	4,79 / 4,59	1,04
Comprimento máximo / altura mínima	4,79 / 3,305	1,45
Largura máxima / altura mínima	4,59 / 3,305	1,38
Largura mínima / altura máxima	4,59 / 3,245	1,41

Em relação à curva de absorção sonora (ou área de absorção sonora equivalente) da câmara vazia (A1), determinada nas freqüências de banda de 1/3 de oitava entre 125Hz e 5000Hz, verificou-se que os resultados foram inferiores aos valores máximos recomendados por norma, conforme Figura 5.3.



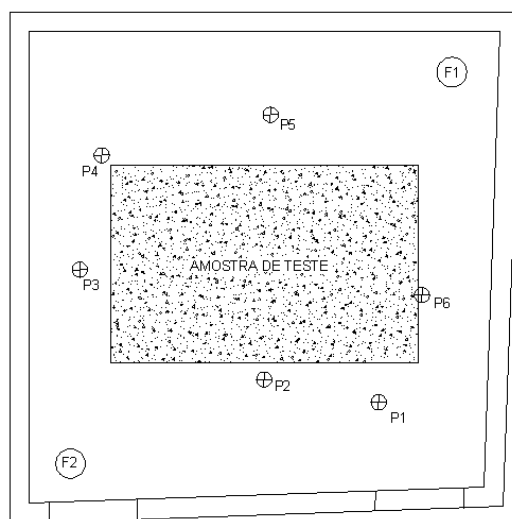
**Figura 5.3 -Área de absorção sonora equivalente da câmara vazia.**

Para o ensaio de qualificação da câmara, a área da amostra de teste na câmara real deve estar no intervalo entre 10 m<sup>2</sup> e 12 m<sup>2</sup>. No caso da espuma de poliuretano (1000 mm x 1000 mm x 50 mm) para a câmara em escala, a área da amostra obedeceu ao fator de escala “N”, o que representa uma área de 6 m<sup>2</sup>. A amostra foi disposta na forma de um retângulo (Figura 5.4).



**Figura 5.4 - Amostra de espuma de poliuretano dentro da câmara reverberante**

Para o cálculo do coeficiente de absorção sonora foram medidos os tempos de reverberação em 12 pontos, resultados da combinação de 2 posições de fontes e 6 posições de microfones. A Figura 5.5 apresenta a planta da câmara reverberante com a marcação da amostra, as posições do microfone (P1 a P6) e as posições da fonte (F1 e F2). As alturas dos microfones variaram sendo adotado 1,12m para as posições P3 e P6, 1,20m para as posições P2 e P5 e 1,35m para as posições P1 e P4.



**Figura 5.5 - Planta baixa da câmara reverberante com a posição da amostra e dos pontos de microfone e fonte sonora.**

Os difusores estáticos utilizados na qualificação do campo difuso da câmara foram confeccionados em placas de policarbonato transparentes de espessura 3,0mm levemente curvadas. A Figura 5.6 mostra a configuração final dos difusores instalados.



**Figura 5.6 - Câmara reverberante com os difusores suspensos.**

A Tabela 5.2 apresenta os resultados dos coeficientes de absorção sonora calculados para a amostra de teste em função de frequência em bandas de 1/3 de oitava, conforme o aumento de área de difusores no interior da câmara. A Figura 5.7 mostra graficamente os resultados da Tabela 5.2.

Conforme Figura 5.8, verificou-se que a média dos coeficientes de absorção sonora da amostra de espuma de poliuretano ensaiada atingiu um valor estável para as frequências de 500 a 5000Hz, com aproximadamente 19,84 m<sup>2</sup> de área de difusores, equivalente a 10 difusores.

Tabela 5.2 - Coeficientes de absorção sonora da espuma de poliuretano por área de difusores.

Frequência (Hz)	$\alpha$						
	0 m <sup>2</sup>	3,06 m <sup>2</sup>	6,12 m <sup>2</sup>	9,68 m <sup>2</sup>	13,24 m <sup>2</sup>	16,80 m <sup>2</sup>	19,84 m <sup>2</sup>
100	0,22	0,26	0,25	0,24	0,23	0,27	0,28
125	0,23	0,28	0,29	0,35	0,31	0,31	0,28
160	0,28	0,30	0,31	0,41	0,38	0,36	0,40
200	0,36	0,41	0,41	0,54	0,55	0,54	0,58
250	0,53	0,63	0,65	0,69	0,68	0,77	0,70
315	0,73	0,76	0,76	0,81	0,88	0,87	0,89
400	0,84	0,88	0,87	0,90	0,88	0,93	0,95
500	0,76	0,85	0,81	0,99	0,94	1,03	1,05
630	0,71	0,89	0,84	1,03	0,99	1,00	1,07
800	0,74	0,82	0,79	0,89	0,95	0,93	0,98
1000	0,70	0,76	0,76	0,86	0,87	0,90	0,95
1250	0,71	0,81	0,84	0,85	0,87	0,87	0,92
1600	0,74	0,83	0,84	0,89	0,90	0,96	0,97
2000	0,76	0,77	0,85	0,91	0,89	0,93	0,96
2500	0,73	0,75	0,76	0,86	0,79	0,87	0,89
3150	0,64	0,68	0,67	0,83	0,70	0,86	0,84
4000	0,62	0,64	0,65	0,69	0,67	0,85	0,86
5000	0,43	0,45	0,48	0,51	0,50	0,73	0,74

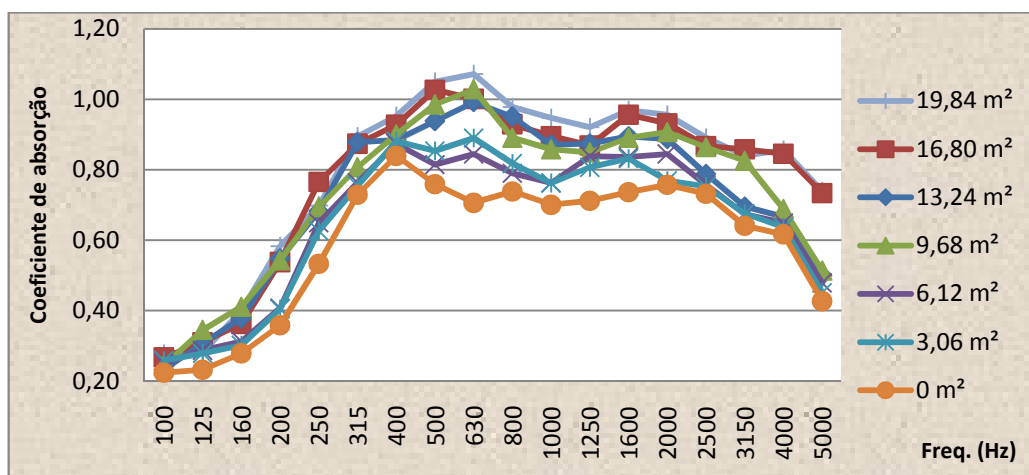
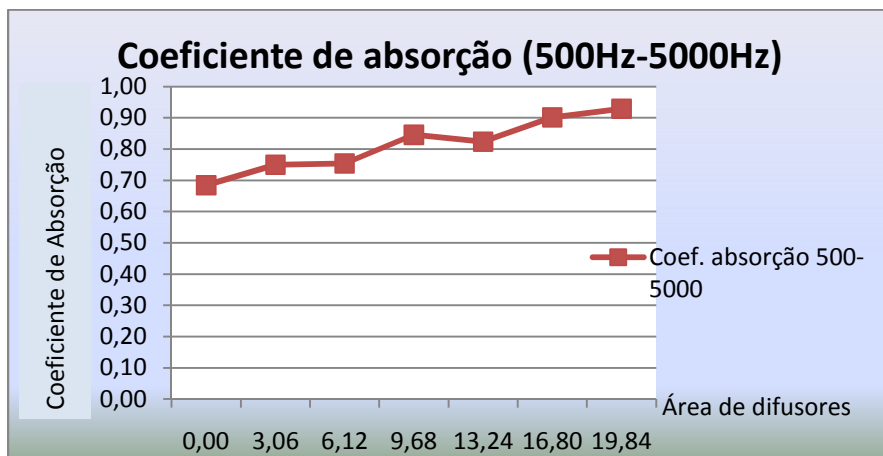


Figura 5.7 - Coeficiente de absorção sonora da espuma de poliuretano em função da frequência.





**Figura 5.8 - Coeficiente de absorção sonora da espuma de poliuretano por área de difusores instalados na câmara.**

Conforme descrito na norma ISO 354 (2003), para a obtenção do campo sonoro difuso em câmaras reverberantes retangulares, a área total de difusores (considerando ambos os lados) para se atingir um campo sonoro difuso satisfatório deve ser de aproximadamente 15% a 25% da área total da superfície interna da câmara. Na pesquisa, verificou-se que a área ideal de difusores para um campo difuso encontrou-se em 18,85% da área total da câmara, o que satisfaz o valor proposto pela norma ISO 354 (2003).

A Figura 5.9 ilustra a configuração final dos difusores no interior da câmara e os painéis de espuma de poliuretano.



**Figura 5.9 - Câmara reverberante com a configuração final dos difusores e amostra de teste.**

Nestas condições a câmara reverberante foi considerada qualificada para ensaios de coeficiente de absorção e espalhamento sonoro. Para complementar a qualificação da câmara reverberante, foi realizado um ensaio para a determinação do coeficiente de absorção de uma amostra cujos valores do coeficiente de absorção são conhecidos. Foi feita a comparação dos valores do coeficiente de absorção sonora do material determinados na câmara qualificada com os valores de catálogo.

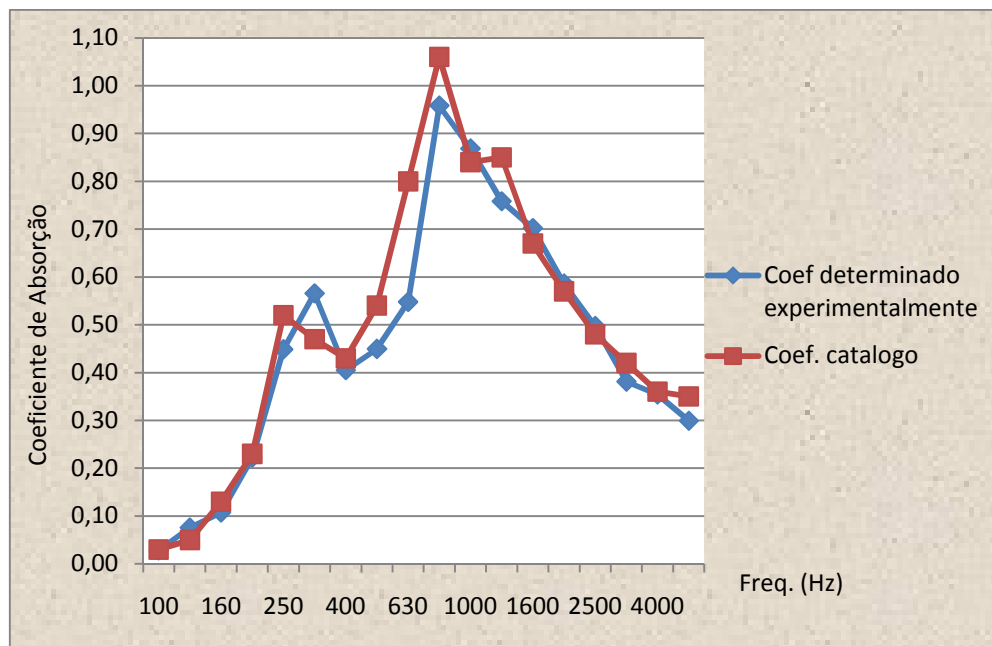
O material proposto para o ensaio foi a lã de vidro. Foram os painéis de lã de vidro, com revestimento em PVC microperfurado com acabamento Boreal, da linha Forrovid Isover. Cada painel tem dimensões de 1.250 mm x 625 mm x 20 mm.

Os painéis foram dispostos sobre o piso da câmara reverberante. As faces revestidas foram dispostas para cima, e as laterais dos painéis foram justapostas de modo a formar um retângulo (Figura 5.10). As bordas do retângulo foram recobertas com perfil de alumínio, de acordo com o ensaio realizado e apresentado no catálogo do material.



**Figura 5.10 - Painéis de lã de vidro dentro da câmara reverberante.**

Na Figura 5.11 verifica-se que o formato da curva do coeficiente de absorção sonora em função da frequência teve o mesmo comportamento nos dois casos (valores determinados na câmara e obtidos pelo catálogo). Na Tabela B.1 do Apêndice B, encontra-se os valores do coeficiente de absorção da amostra dos painéis de lã de vidro em função da frequência medidos na câmara reverberante do LACAF e os resultados do laudo do IPT.



**Figura 5.11 - Coeficiente de absorção sonora do painel de lã de vidro – valores determinados na câmara e valores de catálogo**

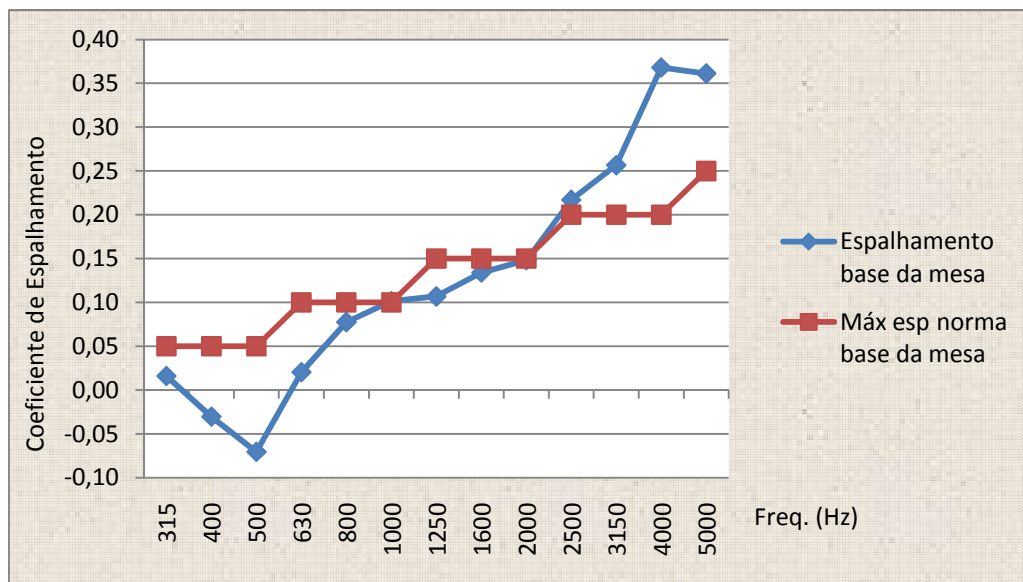
### **5.3 COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO DOS PAINÉIS PERFURADOS DE GESSO ACARTONADO**

Para a determinação experimental do coeficiente de espalhamento sonoro dos painéis acústicos perfurados de gesso acartonado, primeiramente foi definida a frequência crítica da câmara reverberante, baseada na definição de Nélisse e Nicolas (1997), a partir da qual o campo interno se encontra difuso.

Para a câmara reverberante utilizada nos ensaios, a frequência crítica determinada foi de 286 Hz, conforme Equação 2.17 apresentada no capítulo de Fundamentação Teórica. A frequência 286 Hz encontra-se no intervalo de frequências de 1/3 de oitava da banda central de 315 Hz, que vai de 282 Hz a 355 Hz. Portanto, a faixa inferior para a realização dos ensaios de determinação dos tempos de reverberação foi de 315Hz a 5000Hz.

Definido o intervalo de freqüências para as medições dos tempos de reverberação da câmara, foram determinados os coeficientes de espalhamento da base da mesa e comparados com os valores máximos permitidos conforme norma ISO 17497-1 (2004) e apresentados na Figura 5.12.

Segundo a Figura 5.12, para freqüências acima de 2000Hz, o coeficiente de espalhamento da base da mesa ficou acima dos valores dos coeficientes de espalhamento permitidos em norma. Portanto, foi considerado para o cálculo dos coeficientes de espalhamento dos painéis acústicos perfurados o intervalo de freqüência entre 315Hz a 2000Hz, cujos limites atendem a freqüência crítica da câmara reverberante e a norma ISO 17.497-1 (2004) em relação ao espalhamento máximo permitido da base da mesa.

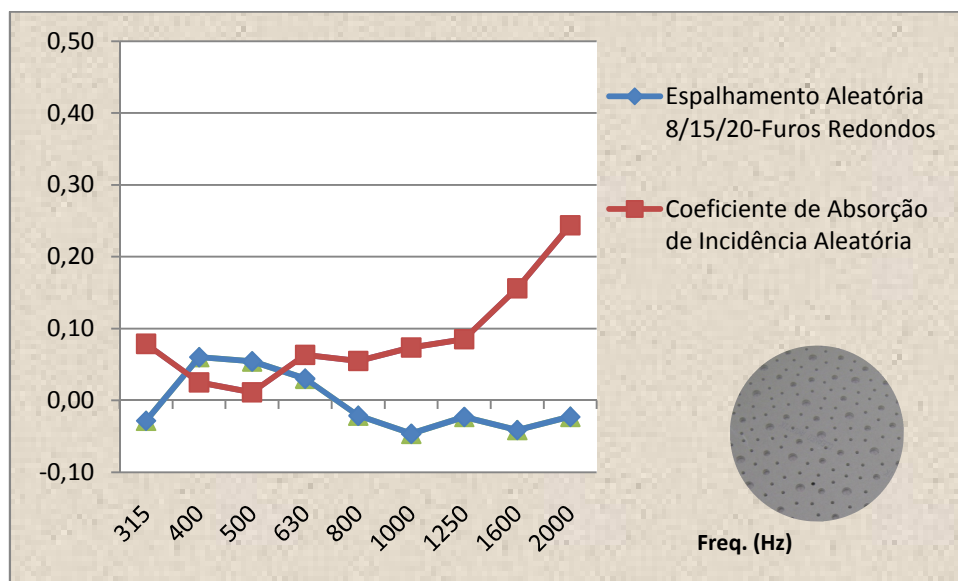


**Figura 5.12 – Comparação entre o coeficiente de espalhamento da base da mesa obtido e o máximo espalhamento permitido em norma.**

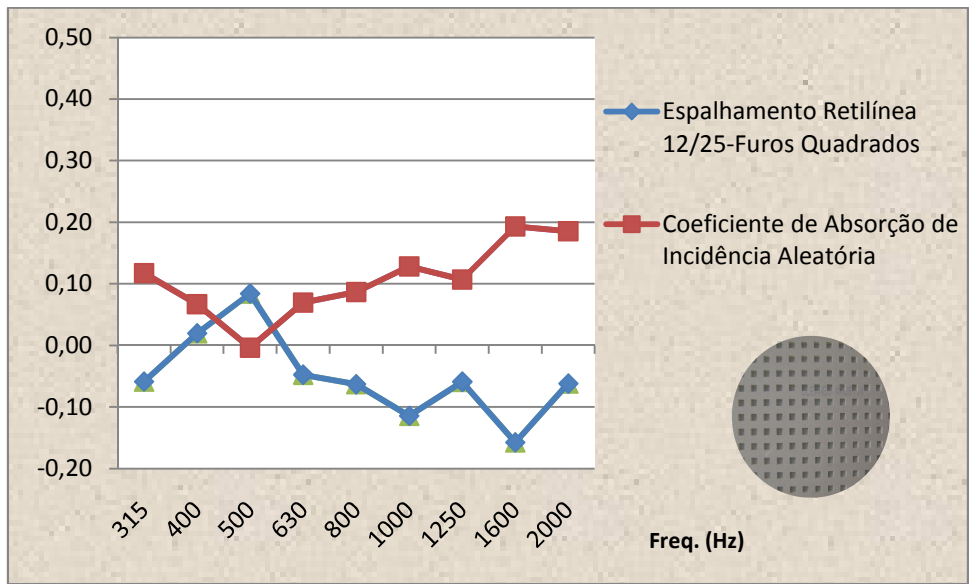
As Figuras de 5.13 a 5.17 mostram graficamente os resultados dos coeficientes de espalhamento sonoro dos painéis acústicos perfurados obtidos em função da freqüência. Para análise dos resultados, os coeficientes de espalhamento dos painéis

foram apresentados nos gráficos juntamente com os coeficientes de absorção de incidência aleatória de cada painel, como recomendado pela norma ISO 17497-1 (2004).

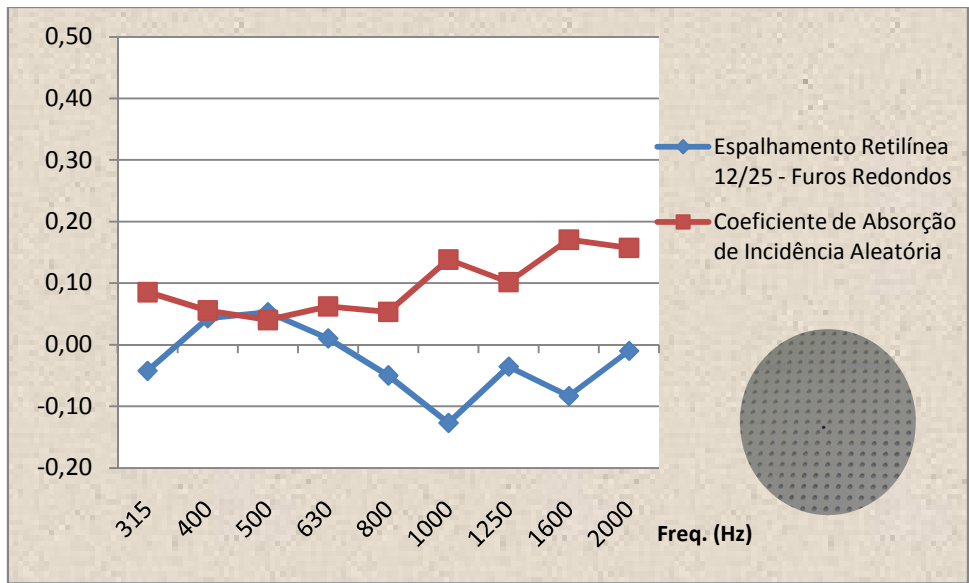
Os valores que deram origem aos gráficos das Figuras 5.13 a 5.17 estão apresentados no Apêndice E. Os desvios dos tempos de reverberação e dos coeficientes de espalhamento foram calculados segundo o item 2.6. Os valores dos desvios são apresentados dentro das tabelas do no Apêndice E. Também nesse apêndice foram reproduzidos os gráficos das Figuras 5.13 a 5.17 inserindo os desvios dos coeficientes para cada placa estudada.



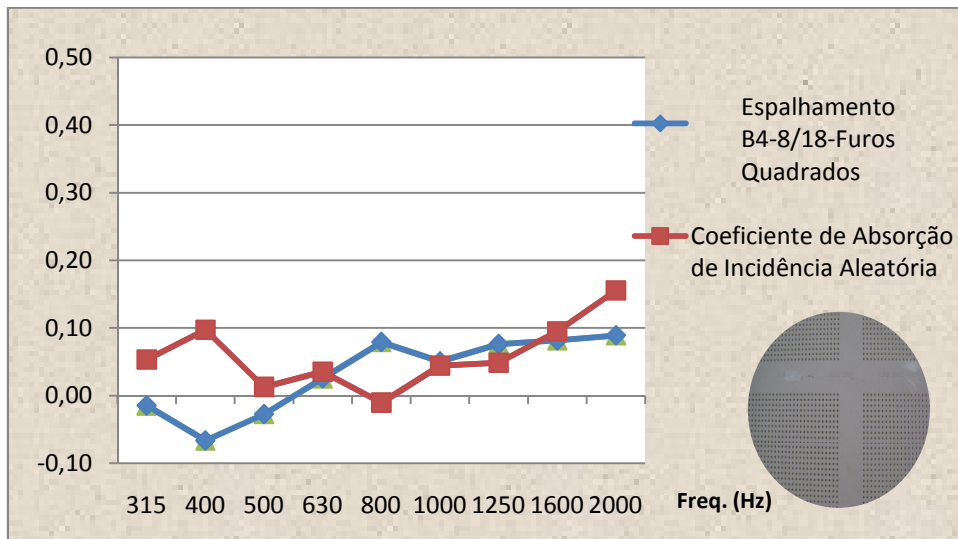
**Figura 5.13 - Coeficientes de Espalhamento e Absorção Sonora de Incidência Aleatória do painel Aleatória Furos Redondos**



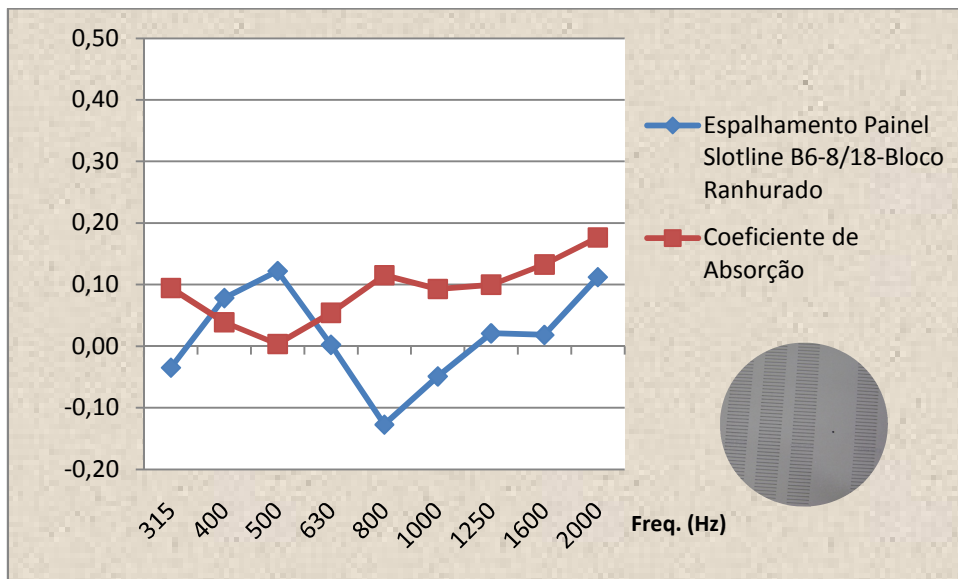
**Figura 5.14 - Coeficientes de Espalhamento e Absorção Sonora de Incidência Aleatória do painel Retilínea Furos Quadrados**



**Figura 5.15 - Coeficientes de Espalhamento e Absorção Sonora de incidência Aleatória do painel Retilínea Furos Redondos**



**Figura 5.16 - Coeficientes de Espalhamento Absorção Sonora de Incidência Aleatória do painel B4 8/18 Furos Quadrados**



**Figura 5.17 - Coeficientes de Espalhamento e Absorção Sonora de Incidência Aleatória do painel B6 8/18 Bloco Ranhurado**

Em relação ao coeficiente de absorção das amostras em função das frequências, a norma ISO 17.497-1 (2004) orienta para que o mesmo não exceda o valor de 0,5 ( $\alpha_s < 0,5$ ), pois o método de determinação do coeficiente de espalhamento

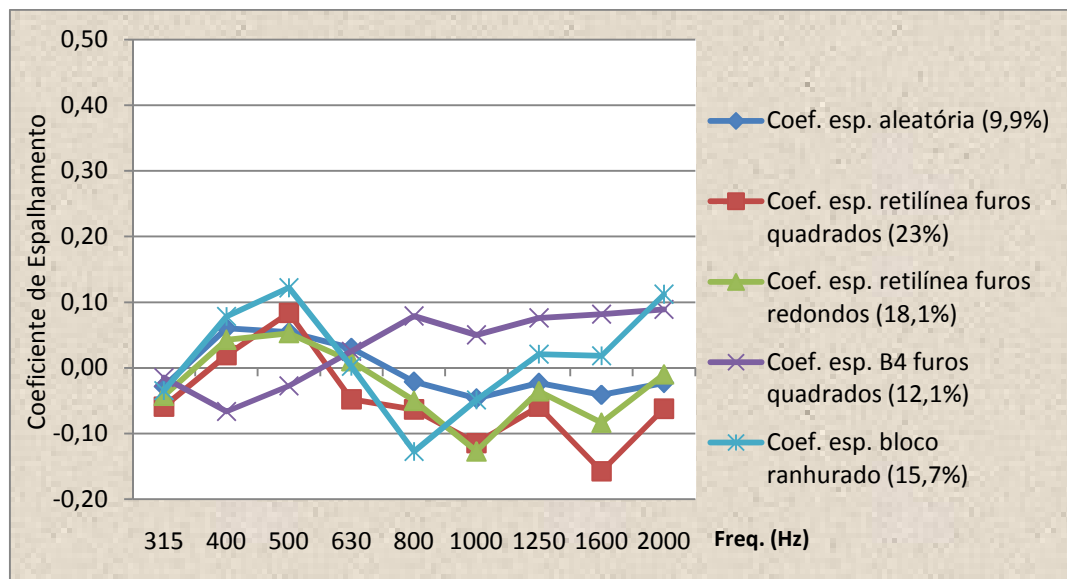


sonoro não irá produzir resultados confiáveis, caso o coeficiente de absorção das amostras sejam maiores que 0,5. No caso dos painéis acústicos perfurados de gesso acartonado o coeficiente de absorção sonora apresentaram valores abaixo de 0,5 nas frequências centrais de 1/3 de oitava escolhidas.

Verificou-se com os resultados dos gráficos que os painéis acústicos não possuem um coeficiente de espalhamento significativo, inclusive apresentando alguns coeficientes com valores negativos para as altas frequências.

Na Figura 5.18 os coeficientes de espalhamento sonoro dos diversos painéis foram comparados entre si. Observa-se que a maioria dos painéis acústicos possui coeficiente de espalhamento baixo ( $s < 0,10$ ) para as frequências mais baixas ( $< 630\text{Hz}$ ) e coeficiente de espalhamento negativo para médias e altas frequências ( $> 630\text{Hz}$ ).

Um aspecto observado no gráfico da Figura 5.18 é que existem pontos de mínimos e máximos que se repetem nos resultados dos coeficientes de espalhamento de cada painel. Isso pode estar associado à influência da ordem das aberturas dos furos existentes em cada amostra. Esse fenômeno está sendo estudado pelo pesquisador José Augusto Mannis no trabalho de ordenamento de difusores policilíndricos em que foi observado uma variação de 20% no desempenho do espalhamento desses difusores, merecendo um estudo mais detalhado sobre esse fenômeno nos painéis perfurados em questão (MANNIS, 2011).



**Figura 5.18 - Comparação dos coeficientes de espalhamentos dos painéis acústicos perfurados em função da frequência.**

Da mesma forma, os coeficientes de absorção sonora dos diferentes painéis foram comparados entre si, conforme Figura 5.19. Verifica-se que nas frequências de 500Hz e 800Hz alguns painéis perfurados apresentaram coeficientes de absorção próximos de zero. Devido a isso eles são empregados afastados da superfície e preenchidos com lã de vidro para se obter coeficiente de absorção sonora significativo. Porém, para essa pesquisa, as amostras não poderiam apresentar coeficientes de absorção sonora elevados.

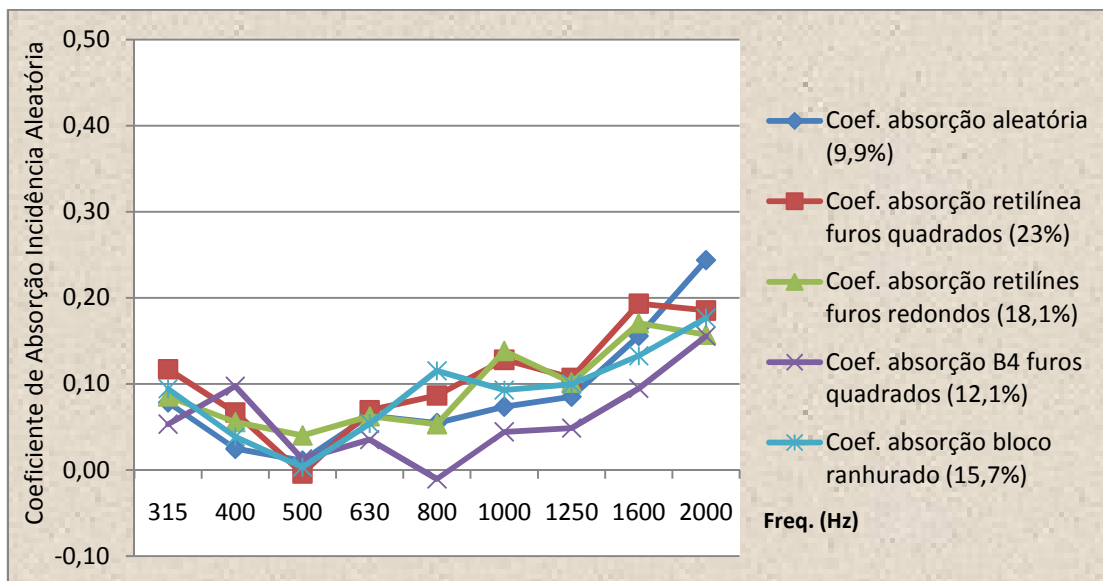


Figura 5.19 - Comparação dos coeficientes de absorção sonora dos painéis acústicos em função da frequência.

#### 5.4 COMPARAÇÃO ENTRE O DESEMPENHO DOS PAINÉIS ACÚSTICOS PERFURADOS DE GESSO ACARTONADO E UM DIFUSOR DE MADEIRA 1D.

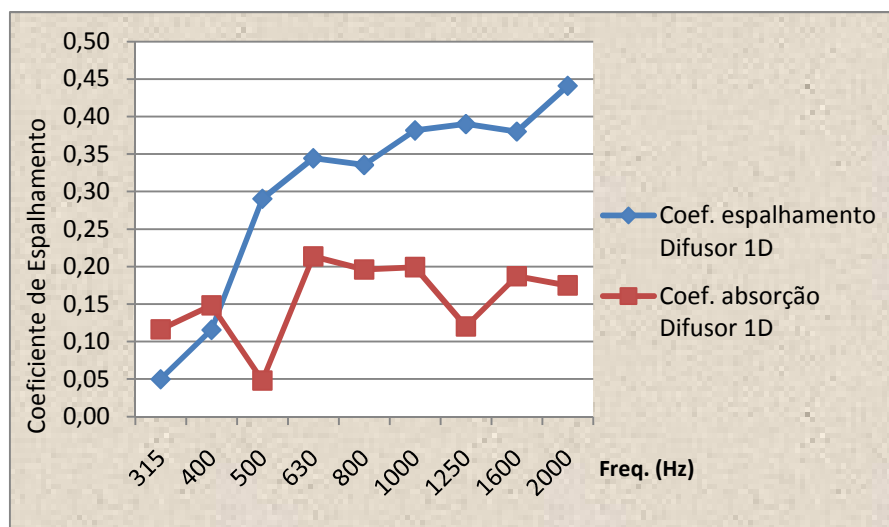
Para verificar o desempenho acústico dos painéis perfurados de gesso acartonado, foi comparado os coeficientes de espalhamento sonoro dos diversos painéis com os coeficientes de espalhamento sonoro de um difusor de madeira 1D. Esse difusor foi construído com caibros de madeira 6,5 x 6,5 cm, em que foram distribuídos sobre a base da mesa rotatória, de modo que a distância entre um caibro e outro fosse de 6,5 cm.

Os coeficientes de espalhamento sonoro do difusor de madeira foram determinados por meio de medições dos tempos de reverberação da câmara reverberante do LACAF. Para complementar o estudo, foi realizada a comparação dos resultados dos coeficientes de espalhamento sonoro do difusor de madeira

determinados experimentalmente com outro difusor de madeira 1D com as mesmas características e apresentado na literatura por Lee *et al* (2010).

Em seu trabalho, Lee *et al* (2010) estudaram o efeito de borda de alguns difusores de madeira 1D em câmara em escala reduzida e verificaram que o espalhamento da borda pode ser anulado cobrindo-se a borda do difusor em todo seu perímetro. Para efeito de comparação com os resultados obtidos por LEE *et al* (2010), colocou-se uma chapa de PVC de 3 mm cobrindo a borda do difusor 1D ensaiado na câmara reverberante.

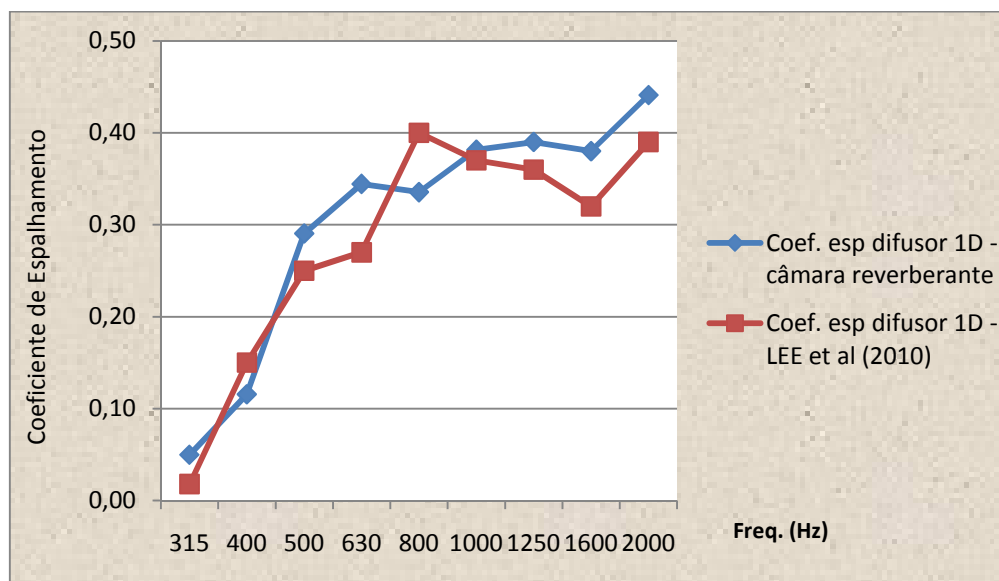
Na Figura 5.20 é apresentado o gráfico dos coeficientes de espalhamento sonoro e coeficientes de absorção sonora de incidência aleatória em função da frequência do difusor de madeira 1D, determinados experimentalmente no laboratório.



**Figura 5.20 - Coeficiente de espalhamento e coeficiente de absorção do Difusor 1D medido na câmara reverberante.**

Na Figura 5.21 é apresentado o gráfico de comparação entre os coeficientes de espalhamento do difusor de madeira 1D medido na câmara reverberante com os coeficientes de espalhamento do difusor de madeira 1D proposto por Lee *et al* (2010)

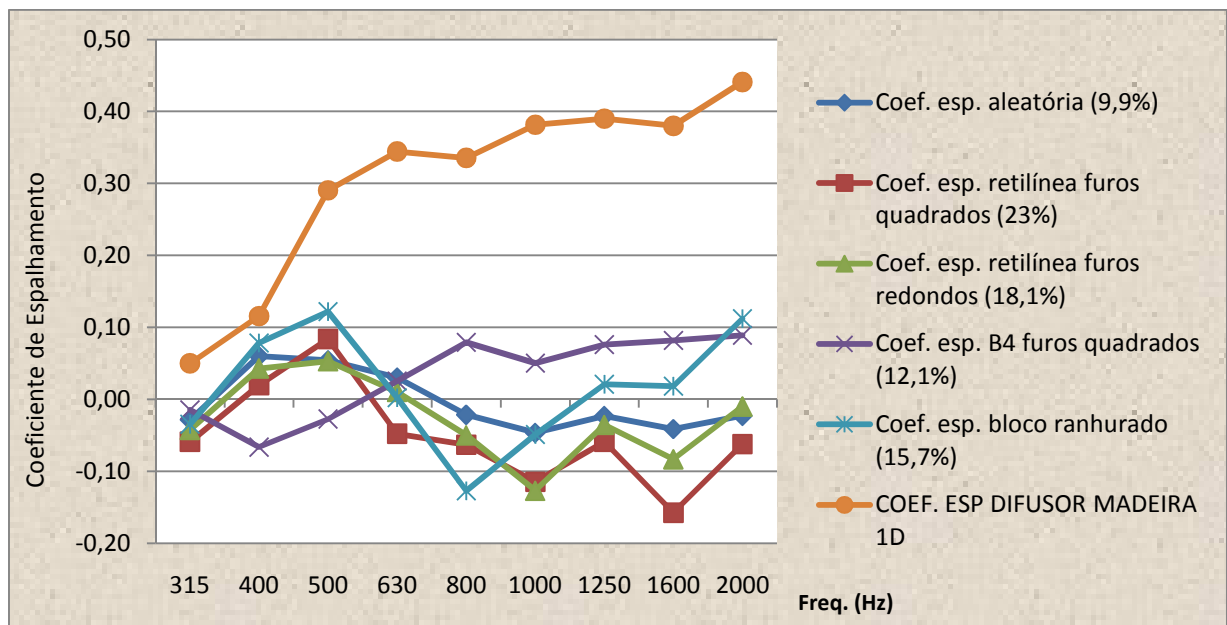
na câmara em escala reduzida. Verificou-se que os valores medidos dos coeficientes de espalhamento sonoro comparados com os valores apresentados no trabalho desenvolvido por LEE *et al* (2010) encontraram-se bem próximos o que indica que o procedimento e as condições de ensaios do coeficiente de espalhamento estão adequados.



**Figura 5.21 - Comparação entre os coeficientes de espalhamento do difusor 1D medido na câmara reverberante e fornecidos pela literatura.**

Baseando-se nesses resultados, é apresentada na Figura 5.22 a comparação entre os coeficientes de espalhamento dos painéis acústicos perfurados de gesso acartonado com o difusor de madeira 1D medido na câmara reverberante. Verificou-se que os painéis acústicos perfurados possuem valores de coeficiente de espalhamento sonoro bem abaixo dos valores apresentados pelo difusor de madeira 1D.

Nestas condições pode-se considerar que os painéis acústicos perfurados de gesso acartonado estudados não apresentam espalhamento sonoro suficiente para sua utilização em projetos que requeiram essa característica do material.



**Figura 5.22 - Comparação entre os coeficientes de espalhamento dos painéis acústicos perfurados e os coeficientes de espalhamento do difusor de madeira 1D.**

Os valores negativos encontrados para o coeficiente de espalhamento em alguns painéis perfurados chamam a atenção. Reflexões sobre esse tipo de comportamento nos levam a olhar com atenção os valores de desvios encontrados e os valores absolutos de coeficientes medidos.

As tabelas dos dados dos coeficientes de espalhamento sonoro e dos seus respectivos desvios apresentados no Apêndice E, mostram que os valores dos desvios padrão são da mesma ordem de grandeza que os coeficientes de espalhamento medidos, portanto pequenas variações em sentidos opostos permitiriam encontrar valores negativos para o coeficiente de espalhamento sonoro dos painéis. No momento não se consegue explicar fisicamente o que isso significa, e merece um estudo um pouco mais aprofundado sobre essa questão.

## 6 CONCLUSÕES

---

O método de determinação dos coeficientes de espalhamento de painéis acústicos perfurados de gesso acartonado em campo difuso foi implantado, sendo possível obter os coeficientes de espalhamento dos painéis acústicos perfurados ou de qualquer outro material desejado.

Foi possível determinar em laboratório as características relativas ao espalhamento sonoro dos painéis perfurados de gesso acartonado e do difusor de madeira 1D. Com os experimentos realizados concluiu-se que as variações das perfurações da superfície dos painéis acústicos perfurados de gesso não contribuíram para as reflexões sonoras difusas de forma significativa.

Em relação ao difusor de madeira 1D, verificou-se que os valores obtidos dos coeficientes de espalhamento sonoro na câmara reverberante foram bem próximos dos valores dos coeficientes de espalhamento sonoro do artigo utilizado para a comparação demonstrando que o método foi implantado com êxito.

Para trabalhos futuros, recomenda-se o cálculo teórico dos coeficientes de espalhamento desses painéis acústicos perfurados em gesso acartonado para comprovar os resultados dos experimentos realizados nessa pesquisa. Outra sugestão seria determinar os coeficientes de espalhamento sonoro de superfícies difusoras comerciais de grande utilização no mercado, para que seja criado um banco de dados dos coeficientes de espalhamento sonoro desses materiais visando a inserção desses dados em programas de simulação acústica de salas.





## REFERÊNCIAS

AES-4id-2001: **AES Information document for room acoustics and sound reinforcement systems – characterization and measurement of surface scattering uniformity**. Journal of Audio Engineering Society, v. 49, p. 149-165, 2001.

ANGUS, J. A. S. **Using grating modulation to achieve wideband large area diffusers**. Applied Acoustic, v. 60, p.143-165, 2000.

ARAUJO, M. A. NABUCO de. **Investigações sobre os parâmetros envolvidos na medição de absorção sonora em câmaras reverberantes**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002

BARRON, M. **The subjective effects of first reflections in concert halls – the need for lateral reflections**. Journal of Sound Vibration, v.15, p.475-94, 1971.

BERANEK, L. L.; **Concert and opera halls: how they sound**. New York: Acoustical Society of America, 1996. 643p.

BERTOLI, S. R.; GOMES, M. H. A. **Técnicas de medição para acústica de salas**. Campinas: [S.n.], 2005. 65 p.

BERTOLI, S. R. **Acústica I**. 2006. 20 transparências, color, 25 x 20 cm.

BORK, L. **A Comparison of room simulation software – the 2nd Round Robin on room acoustical computer simulation**. Acustica united with Acta Acustica, v. 86, n.6, p. 943-956, 2000.

BORK, L. **Simulation and measurement of auditorium acoustics – the Round Robins on room acoustical simulation**. Proceedings of the Institute of Acoustics. 2002. Disponível em <[http://www.ptb.de/en/org/1/16/163/roundrobin/rr\\_london.pdf](http://www.ptb.de/en/org/1/16/163/roundrobin/rr_london.pdf)> Acesso em: 25 out. 2010

CHRISTENSEN, C. L.; RINDEL, J. H. **A new scattering method that combines roughness and diffraction effects**. In: Forum Acusticum, Budapest. Anais....., 2005.

COX, T. J. **Optimization of profile diffusers.** Journal of the Acoustics Society of America, v. 97, n. 5, p. 2928-2941, 1995.

COX, T. J.; D'ANTONIO, P. **Acoustics Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application.** New York, 2004. 405p.

COX, T. J.; DALENBACK, B. I. L.; D'ANTONIO, P.; EMBRECHTS, J. J.; JEON, J. Y.; MOMMERT, E.; VORLANDER, M. **A tutorial on scattering and diffusion coefficients for room acoustic surfaces.** Acta Acustica, v. 92, p. 1-15, 2006.

D'ANTONIO, P; COX, T. J. **Difusor application in rooms.** Applied Acoustic, v. 60, p.113-142, 2000.

DAVIS, D.; DAVIS, C.; **The LEDE concept for the control of acoustic and psychoacoustic parameters in recording control rooms.** Journal of the Audio Engineering Society, v. 28, p. 585-95, 1980.

EVEREST, F. A. **The Master Handbook of Acoustic.** TAB Books. Imprint of McGraw-Hill, New York, 1994.

EMBRECHTS, J.J.; ARCHAMBEAU, D.; STAN, G.B. **DETERMINATION OF THE SCATTERING COEFFICIENT OF RANDOM ROUGH DIFFUSING SURFACES FOR ROOM ACOUSTICS APPLICATIONS.** ACTA ACUSTICA, v.87, p.482-494, 2001.

EMBRECHTS, J.J. **Practical aspects of the ISO procedure for measuring the scattering coefficient in a real scale experiment.** In: Forum Acusticum, Sevilla. Anais..., 2002.

EMBRECHTS, J.J.; DE GEETERE, L.; VERMEIR, G.; VÖRLANDER, M.; SAKUMA, T. **Calculation of the random-incidence scattering coefficients of a sine-shaped surface.** Acta Acustica, v.92, p.593-603, 2006.

FARINA, A. **A new method for measuring the scattering coefficient and the diffusion coefficient of panels.** Acta Acustica [S.I.], v.86, n.6, p.928-942, 2000a.

FARINA, A. **Measurement of the scattering coefficient: comparison of the Mommertz/Vorlander approach with the new Wave Field Synthesis method.** In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SURFACE DIFFUSION IN ROOM ACOUSTICS, 2000, Liverpool. Anais....., Liverpool: editora, 2000b.

FUJIWARA, K.; NAKAI, H.; TORIHARA, H. **Visualization of the sound Field around a Schroeder diffuser.** Applied Acoustics, v.60, p.225-235, 2000

GEETERE, L; VERMEIR, G. **Investigations on real-scale experiments for the measurement of the ISO scattering coefficient in the reverberation room.**In: FORUM ACUSTICUM, Sevilha. Anais..., 2002

GEETERE, L. **Analysis and improvement of the experimental techniques to assess the acoustical reflection properties of boundary surfaces.** Tese de Doutorado. Katholieke Universiteit Leuven. Belgium, 2004.

GERGES, N. Y.; GOMES, M.H.A; LIMA, F. **Qualidade sonora dos ambientes e produtos.** I Seminário Música Ciência Tecnologia: Acústica Musical. São Paulo. Anais..., 2004

GODOY, M. **Estudos da influência de parâmetros práticos de montagem nos resultados de ensaios de absorção sonora de sistemas de forro suspenso.** Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

GOMES, M.H.A. **Determination of the acoustical random-incidence scattering coefficient.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002.

GROSSER MUSIKVEREINSSAAL. Disponível em : <<http://www.musikverein.at>> . Acesso em: 10 de agosto de 2010.

HARGREAVES, T. J.; COX, T. J.; LAM, Y. W. **Surface diffusion coefficients for room acoustics: Free-field measures**. Journal of the Acoustics Society of America, v. 108, n. 4, p. 1710-1720, 2000.

IAZZETTA, F.; FIGUEIREDO, F. L.; MASIERO, B. S. **Parâmetros subjetivos em salas destinadas à prática musical**. In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE ACÚSTICA, 4, 2004<sup>a</sup>, Portugal. Anais...p.1-8, 2004.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION **ISO 17497-1**. Acoustics - Sound-scattering properties of surfaces - Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room, Geneve, 2004.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION **ISO 354**. Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room, Geneve, 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION **ISO 3382** – Acoustics – Measurement of reverberation time of rooms with reference to order acoustical parameters, Geneve, 1997.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION **ISO 9613-1**. Acoustics- Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1, Geneve, 1993.

JACOBSEN, F. The diffuse sound field. The Acoustic Laboratory of University of Denmark, Report 27. Dinamarca, 1979.

JEON, J. Y.; LEE, S. C.; VORLANDER, M. **Development of scattering surfaces for concert halls**. Applied Acoustics, v.65, n.4, p 341-355, 2004.

KUTTRUFF, H. **Room acoustics**. 3 ed. New York, 1991. 329p.

KUTTRUFF, H. **Room acoustics**. 4 ed. New York, 2000. 249p.

LAM, Y. W. **A boundary integral formulation for the prediction of acoustic scattering from periodic structures**. Journal of the Acoustics Society of America, v. 105, n. 2, p. 762-769, 1999.

LEE, H.; TSUCHIYA, Y.; SAKUMA, T. **Issues on the reverberation room method for measuring the scattering coefficients – border setting and revolution of test sample.** In: 39th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Lisbon, Portugal. 2010.

MANNIS, J. A. **Design de difusores sonoros a partir de processo serial: adequação acústica de pequenas salas à performance e audição musical.** Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP. 2008.

MANNIS, J. A.; SANTOS, C.; BERTOLI, S. R.; PUPO, R.; OLIVEIRA, M. F.; SILVA, J. V. L. **Avaliação de medições de coeficiente de espalhamento de amostras de difusores sonoros com elementos semicilíndricos e cilíndricos concebidos a partir de design serial: influência da natureza dos elementos e da qualidade de ordenação.** In: 9º CONGRESSO DE ENGENHARIA DE ÁUDIO. São Paulo. Anais.... 2011.

MASIERO, B. S.; IAZETTA, F. **Estudo e Implementação de métodos de medição de resposta impulsiva.** Acústica e Vibrações, v. 36, p. 34-40, 2005.

MEHTA, M.; JOHNSON, J.; ROCAFORT, J. **Architectural acoustics principles and design.** Columbus: Prentice Hall, 1999. 446p.

MOMMERTZ, E. **Angle dependent in-situ measurements of reflection coefficients using a subtraction technique.** Applied Acoustics, v. 46, p. 251-263, 1995

MOMMERTZ, E. **Determination of scattering coefficients from the reflection directivity of architectural surfaces.** Applied Acoustics, v. 60, p. 201-203, 2000.

MÜLLER, S. ; MASSARANI, P. **Medições da Resposta em Frequência de Sistemas de Sonorização.** In: Duque de Caxias: Laena - Inmetro, p. 1-8, 2005.

NASCIMENTO, R. L. X. **Medição dos coeficientes de absorção sonora de materiais utilizados em modelos reduzidos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2005.

NÉLISSE, H.; NICOLAS, J. **Characterization of a diffuse field in a reverberant room.** Journal of the Acoustical Society of America, v.101, n.6, p.3517-3524, 1997.

SCHROEDER, M. R. Die **statischen parameter der frequenzkurve von groß enräumen.** Acustica, v.4, p.594-600, 1954.

\_\_\_\_\_. **Frequency-correlation functions of frequency response inrooms.** Journal of the Acoustical Society of America, v.34, n.2, p.1819-1823, 1962.

\_\_\_\_\_. **Diffuse sound reflection by maximum-length sequences.** Journal of the Acoustical Society of America, v.57, p.149-150, 1975

\_\_\_\_\_. **Music perceptions in concert halls.** Royal Swedish Academy of Music 26, Stockholm 1978.

\_\_\_\_\_. **Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls: more lateral sound diffusion.** The Journal of the Acoustic Society of America, v.65, p.958-63, 1979.

\_\_\_\_\_. **The “Schroeder frequency” revisited.** Journal of Acoustical Society of America, v.99, n.5, p. 3240-3241. 1996.

SHULTZ, T. J. **Diffusion in reverberation rooms.** Journal of Sound Vibration, v. 16, p. 17-28, 1971.

TAKAHASHI, D. **Development of optimum acoustic diffusers.** Journal of the Acoustics Society of America, v. 16, n. 2, p. 51-58, 1995.

VORLÄNDER, M., **Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit des raumakustischenSchallteilchenmodells.** Doktorarbeit. RWTH-Aachen, 145p., 1989.

VÖRLANDER, M. **International Round Robin on room acoustics computer simulations.** In: 15<sup>th</sup> International Congress on Acoustics, Trondheim, Norway. Anais..., p.577-580, 1995.

VORLÄNDER, M., MOMMERTZ, E., **Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients**. Applied Acoustics, v.60, p.187-199, 2000.

VORLANDER, M.; EMBRECHTS, J. J.; GEETERE, L. D.; VERMEIR, G.; GOMES, M. H. A. **Case studies in measurement of random incidence scattering coefficients**. Acta Acustica, v.90, p. 858-867, 2004.

VORLANDER, M. **Auralization**. 1ed. Germany, 2008. 348p.





## APÊNDICE A : CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA REVERBERANTE DO LACAF

---

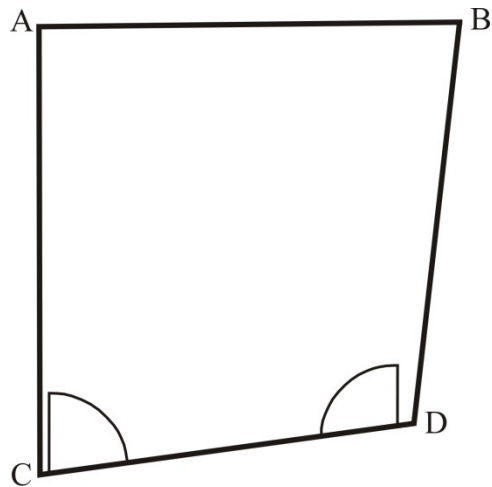


Figura A.1 - Geometria da câmara reverberante do LACAF.

Dimensões da câmara reverberante:

- $AB = 4,78\text{m}$
- $BD = 4,59\text{m}$
- $DC = 4,59\text{m}$
- $CA = 4,78\text{m}$

Altura das paredes:

- Ponto A =  $3,245\text{m}$
- Ponto B =  $3,305\text{m}$
- Ponto C =  $3,245\text{m}$
- Ponto D =  $3,310\text{m}$



**APÊNDICE B : COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA POR ÁREA  
INSTALADA DE DIFUSORES.**

---

**Tabela B.1 - Coeficientes de absorção sonora por área instalada de difusores.**

<b>Área de difusores</b>	<b>Coeficiente de absorção sonora médio (500-5000 Hz)</b>
<b>0,00</b>	0,68
<b>3,06</b>	0,75
<b>6,12</b>	0,75
<b>9,68</b>	0,85
<b>13,24</b>	0,82
<b>16,80</b>	0,90
<b>19,84</b>	0,93



**APÊNDICE C : COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA DOS PAINÉIS DE LÃ DE VIDRO**

**Tabela C.1 - Coeficientes de absorção sonora de painéis de lã de vidro determinados em diferentes câmaras.**

<b>Freqüência (Hz)</b>	<b>Coefficiente de Absorção Sonora Medido(<math>\alpha</math>)</b>	<b>Coefficiente de Absorção Sonora – Laudo IPT</b>
100	0,03	0,03
125	0,08	0,05
160	0,11	0,13
200	0,22	0,23
250	0,45	0,52
315	0,57	0,47
400	0,40	0,43
500	0,45	0,54
630	0,55	0,80
800	0,96	1,06
1000	0,87	0,84
1250	0,76	0,85
1600	0,70	0,67
2000	0,59	0,57
2500	0,50	0,48
3125	0,38	0,42
4000	0,35	0,36
5000	0,30	0,35



**APÊNDICE D : COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO SONORO DA BASE DA MESA GIRATÓRIA.**

**Tabela D.1 - Tempos de reverberação da base da mesa giratória com a mesa parada (T1).**

Freqüência (Hz)	F1P1	F1P2	F1P3	F2P1	F2P2	F2P3	T <sub>1</sub> (s)	δ
<b>315</b>	4,54	4,81	4,86	5,05	4,87	5,29	4,90	0,10
<b>400</b>	4,00	4,64	4,68	4,40	4,63	4,58	4,49	0,11
<b>500</b>	3,15	3,62	3,69	3,48	3,71	3,74	3,57	0,09
<b>630</b>	3,43	3,50	3,65	3,27	3,44	3,28	3,43	0,06
<b>800</b>	3,66	3,70	3,85	3,75	3,51	3,75	3,70	0,05
<b>1000</b>	3,76	3,87	3,71	3,35	3,52	3,54	3,63	0,08
<b>1250</b>	3,53	3,45	3,48	3,44	3,46	3,49	3,48	0,01
<b>1600</b>	3,32	3,23	3,26	3,33	3,20	3,23	3,26	0,02
<b>2000</b>	3,19	3,22	3,24	3,22	2,77	3,13	3,13	0,07
<b>2500</b>	3,09	3,18	3,02	3,18	3,10	2,99	3,10	0,03
<b>3150</b>	3,03	2,98	2,91	3,11	3,06	3,06	3,02	0,03
<b>4000</b>	2,90	2,91	2,89	2,91	2,87	2,92	2,90	0,01
<b>5000</b>	2,62	2,58	2,64	2,63	2,69	2,65	2,64	0,01

**Tabela D. 1: Tempos de reverberação da base da mesa giratória com a mesa rotacionando (T3).**

Freqüência (Hz)	F1P1	F1P2	F1P3	F2P1	F2P2	F2P3	T <sub>3</sub> (s)	δ
<b>315</b>	4,85	4,29	4,86	4,70	4,87	5,35	4,82	0,14
<b>400</b>	4,53	4,45	4,94	4,46	4,73	4,66	4,63	0,08
<b>500</b>	3,61	4,10	3,68	3,69	3,83	3,75	3,78	0,07
<b>630</b>	3,46	3,43	3,38	3,33	3,38	3,27	3,37	0,03
<b>800</b>	3,51	3,34	3,48	3,49	3,51	3,55	3,48	0,03
<b>1000</b>	3,37	3,42	3,21	3,36	3,38	3,36	3,35	0,03
<b>1250</b>	3,11	3,02	3,27	3,28	3,28	3,30	3,21	0,05
<b>1600</b>	2,85	2,83	3,03	2,99	3,09	3,03	2,97	0,04
<b>2000</b>	2,63	2,87	2,78	2,96	2,84	2,91	2,83	0,05
<b>2500</b>	2,69	2,70	2,75	2,60	2,74	2,67	2,69	0,02
<b>3150</b>	2,69	2,62	2,52	2,45	2,62	2,57	2,58	0,03
<b>4000</b>	2,33	2,36	2,29	2,32	2,39	2,36	2,34	0,01
<b>5000</b>	2,15	2,21	2,29	2,14	2,09	2,16	2,17	0,03

**Tabela D. 2: Espalhamento da base da mesa giratória em função da frequência.**

<b>Frequência (Hz)</b>	<b>T<sub>1</sub></b>	<b>T<sub>3</sub></b>	<b>S<sub>base</sub></b>	<b>Espalhamento base (máx. norma)</b>
<b>315</b>	4,90	4,82	0,02	0,05
<b>400</b>	4,49	4,63	-0,03	0,05
<b>500</b>	3,57	3,78	-0,07	0,05
<b>630</b>	3,43	3,37	0,02	0,10
<b>800</b>	3,70	3,48	0,08	0,10
<b>1000</b>	3,63	3,35	0,10	0,10
<b>1250</b>	3,48	3,21	0,11	0,15
<b>1600</b>	3,26	2,97	0,13	0,15
<b>2000</b>	3,13	2,83	0,15	0,15
<b>2500</b>	3,10	2,69	0,22	0,20
<b>3150</b>	3,02	2,58	0,26	0,20
<b>4000</b>	2,90	2,34	0,37	0,20
<b>5000</b>	2,64	2,17	0,36	0,25



**APÊNDICE E : TEMPOS DE REVERBERAÇÃO E COEFICIENTES DE ESPALHAMENTO SONORO DOS PAINÉIS ACÚSTICOS PERFURADOS DE GESSO ACARTONADO EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA.**

**Tabela E. 1: Tempos de reverberação do painel Aleatória 8/15/20 - Furos redondos com a mesa giratória parada (T<sub>2</sub>).**

Frequência (Hz)	F1P1	F1P2	F1P3	F2P1	F2P2	F2P3	T <sub>2</sub>	δ <sub>2</sub>
315	4,634	4,765	4,189	4,523	4,456	4,498	4,51	0,08
400	4,327	4,268	4,298	4,294	4,508	4,556	4,38	0,05
500	3,446	3,528	3,571	3,32	3,514	3,808	3,53	0,07
630	3,411	3,509	3,318	3,181	3,197	2,984	3,27	0,08
800	3,423	3,5	3,894	3,097	3,614	3,713	3,54	0,11
1000	3,609	3,441	3,485	3,309	3,377	3,296	3,42	0,05
1250	3,319	3,384	3,067	3,113	3,355	3,308	3,26	0,05
1600	2,874	2,951	2,881	2,854	3,086	2,917	2,93	0,03
2000	2,641	2,733	2,627	2,731	2,675	2,605	2,67	0,02
2500	2,555	2,603	2,595	2,616	2,597	2,5	2,58	0,02
3150	2,382	2,357	2,443	2,416	2,372	2,37	2,39	0,01
4000	2,202	2,251	2,281	2,35	2,214	2,245	2,26	0,02
5000	2,306	2,364	2,462	2,445	2,422	2,419	2,40	0,02

**Tabela E. 2: Tempos de reverberação do painel Aleatória 8/15/20 - Furos redondos com a mesa giratória rotacionando (T<sub>4</sub>).**

Frequência (Hz)	F1P1	F1P2	F1P3	F2P1	F2P2	F2P3	T <sub>4</sub>	δ <sub>4</sub>
315	4,765	4,569	4,406	4,456	4,44	4,704	4,56	0,06
400	4,33	4,254	4,4	3,781	4,39	4,387	4,26	0,10
500	3,621	3,586	3,494	3,416	3,462	3,889	3,58	0,07
630	3,16	3,162	3,329	3,134	3,065	3,074	3,15	0,04
800	3,192	3,301	3,491	3,312	3,578	3,441	3,39	0,06
1000	3,059	3,306	3,32	3,353	3,213	3,385	3,27	0,05
1250	3,113	2,973	2,966	3,291	3,007	3,044	3,07	0,05
1600	2,713	2,69	2,767	2,759	2,783	2,778	2,75	0,02
2000	2,52	2,412	2,656	2,307	2,52	2,434	2,47	0,05
2500	2,226	2,373	2,295	2,217	2,308	2,241	2,28	0,02
3150	2,169	2,156	2,085	1,855	2,15	2,098	2,09	0,05
4000	1,918	1,965	2,003	1,858	1,981	1,926	1,94	0,02
5000	2,093	2,002	1,98	1,891	1,967	2,059	2,00	0,03

Tabela E. 3: Coeficiente de espalhamento sonoro do painel Aleatória 8/15/20 - Furos redondos.

Frequência (Hz)	$\alpha_{spec}$	$\delta \alpha_{spec}$	$\alpha_s$	$\delta \alpha_s$	s	$\delta s$
315	0,05	0,02	0,08	0,02	-0,03	0,03
400	0,08	0,02	0,02	0,02	0,06	0,03
500	0,06	0,02	0,01	0,03	0,05	0,04
630	0,09	0,01	0,06	0,03	0,03	0,03
800	0,03	0,02	0,05	0,03	-0,02	0,04
1000	0,03	0,02	0,07	0,02	-0,05	0,03
1250	0,06	0,02	0,09	0,02	-0,02	0,03
1600	0,12	0,02	0,16	0,01	-0,04	0,03
2000	0,23	0,03	0,24	0,03	-0,02	0,05

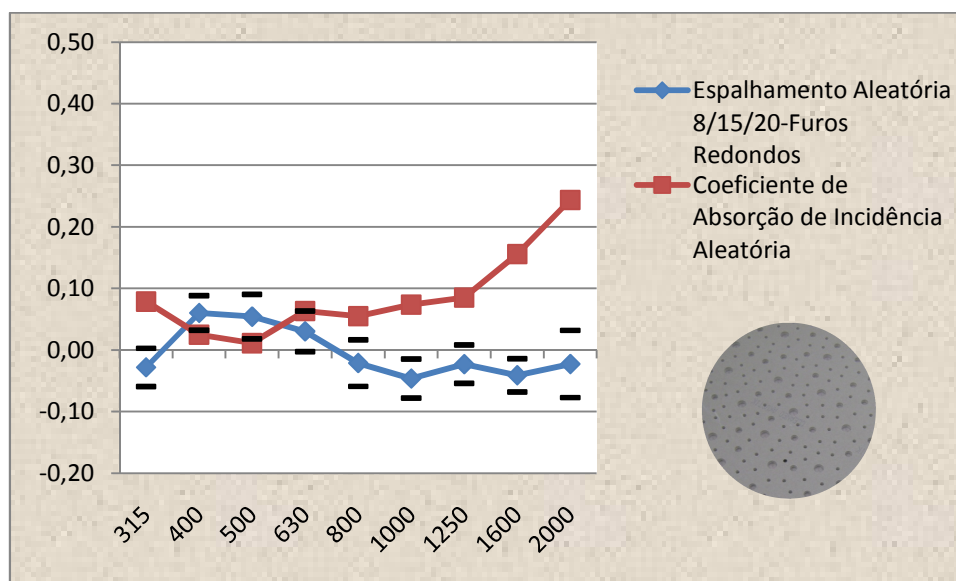


Figura B.1 - Coeficientes de Espalhamento do painel Aleatória Furos Redondos com os desvios padrões

**Tabela E. 4: Tempos de reverberação do painel Retilínea 12/25 - Furos quadrados com a mesa giratória parada ( $T_2$ ).**

Frequência (Hz)	F1P1	F1P2	F1P3	F2P1	F2P2	F2P3	$T_2$	$\delta_2$
315	4,135	4,208	4,245	4,237	4,52	4,709	4,34	0,09
400	4	4,344	4,303	4,016	4,136	4,416	4,20	0,07
500	3,452	3,764	3,427	3,592	3,511	3,692	3,57	0,06
630	3,418	3,22	3,325	3,138	3,264	3,144	3,25	0,04
800	3,378	3,484	3,434	3,601	3,479	3,344	3,45	0,04
1000	2,87	3,55	3,54	3,051	3,364	3,322	3,28	0,11
1250	3,037	3,151	3,257	3,323	3,194	3,278	3,21	0,04
1600	2,762	2,883	2,922	2,932	2,922	2,722	2,86	0,04
2000	2,624	2,778	2,864	2,819	2,814	2,69	2,76	0,04
2500	2,495	2,59	2,677	2,636	2,574	2,391	2,56	0,04
3150	2,231	2,385	2,354	2,315	2,385	2,377	2,34	0,02
4000	2,032	2,203	2,261	2,331	2,295	2,237	2,23	0,04
5000	2,153	2,208	2,228	2,26	2,29	2,265	2,23	0,02

**Tabela E. 5: Tempos de reverberação do painel Retilínea 12/25 - Furos quadrados com a mesa giratória rotacionando ( $T_4$ ).**

Frequência (Hz)	F1P1	F1P2	F1P3	F2P1	F2P2	F2P3	$T_4$	$\delta_4$
315	4,712	4,334	4,468	4,3	4,483	4,702	4,50	0,07
400	4,227	4,369	4,172	4,16	4,152	4,428	4,25	0,05
500	3,529	3,693	3,265	3,585	3,425	3,709	3,53	0,07
630	3,326	3,325	3,375	3,125	3,304	3,402	3,31	0,04
800	3,432	3,374	3,408	3,45	3,407	3,338	3,40	0,02
1000	3,224	3,209	3,431	3,406	3,249	3,155	3,28	0,05
1250	3,12	3,002	3,183	3,076	3,062	3,08	3,09	0,02
1600	2,803	2,804	2,959	2,812	2,871	2,819	2,84	0,03
2000	2,571	2,484	2,657	2,727	2,634	2,572	2,61	0,03
2500	2,464	2,556	2,471	2,516	2,47	2,421	2,48	0,02
3150	2,229	2,301	2,232	2,22	2,296	2,307	2,26	0,02
4000	2,075	2,134	2,194	2,06	2,152	2,121	2,12	0,02
5000	2,143	2,043	2,153	2,135	2,175	2,163	2,14	0,02

Tabela E. 6: Coeficiente de espalhamento sonoro do painel Retilínea 12/25 - Furos quadrados.

Frequência (Hz)	$\alpha_{spec}$	$\delta \alpha_{spec}$	$\alpha_s$	$\delta \alpha_s$	s	$\delta s$
315	0,07	0,03	0,12	0,03	-0,06	0,05
400	0,09	0,02	0,07	0,03	0,02	0,04
500	0,08	0,03	0,00	0,04	0,08	0,05
630	0,03	0,02	0,07	0,03	-0,05	0,04
800	0,03	0,01	0,09	0,02	-0,06	0,03
1000	0,03	0,02	0,13	0,05	-0,11	0,07
1250	0,05	0,02	0,11	0,02	-0,06	0,03
1600	0,07	0,03	0,19	0,02	-0,16	0,05
2000	0,13	0,03	0,19	0,04	-0,06	0,07

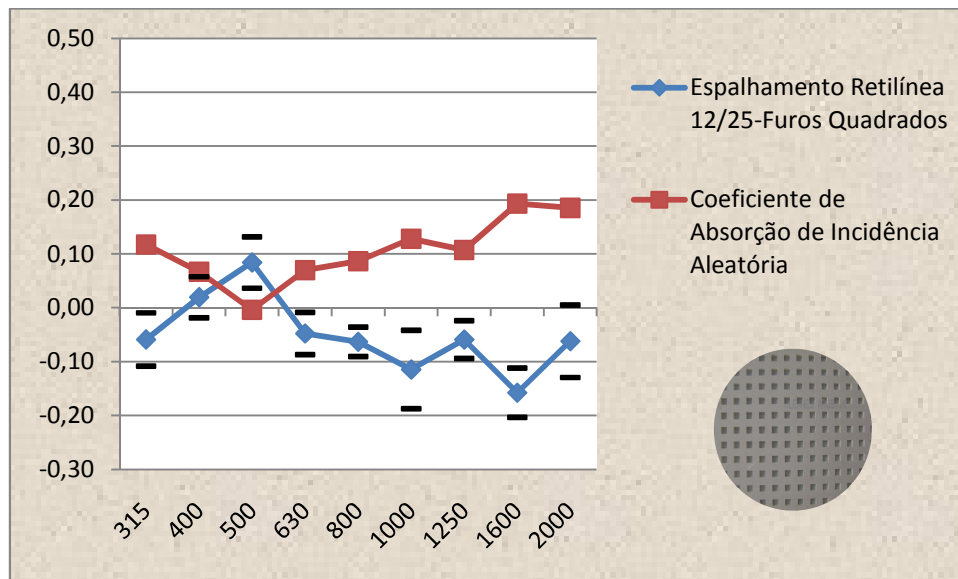


Figura C.1 - Coeficientes de Espalhamento do painel Retilínea Furos Quadrados com os desvios padrões

**Tabela E. 7: Tempos de reverberação do painel Retilínea 12/25 - Furos redondos com a mesa giratória parada ( $T_2$ ).**

Frequência (Hz)	F1P1	F1P2	F1P3	F2P1	F2P2	F2P3	$T_2$	$\delta_2$
315	4,488	4,58	4,344	4,617	4,422	4,428	4,48	0,04
400	3,946	4,294	4,482	4,151	4,241	4,367	4,25	0,08
500	3,379	3,757	3,439	3,467	3,153	3,513	3,45	0,08
630	3,304	3,282	3,263	3,333	3,288	3,139	3,27	0,03
800	3,511	3,506	3,551	3,644	3,392	3,658	3,54	0,04
1000	3,156	3,414	3,235	3,208	3,142	3,392	3,26	0,05
1250	3,19	3,168	3,186	3,326	3,09	3,35	3,22	0,04
1600	2,89	2,927	3,006	3,026	2,683	2,86	2,90	0,05
2000	2,792	2,775	2,72	2,933	2,839	2,82	2,81	0,03
2500	2,533	2,592	2,521	2,548	2,687	2,562	2,57	0,02
3150	2,36	2,335	2,403	2,286	2,463	2,284	2,36	0,03
4000	2,202	2,243	2,193	2,171	2,193	2,097	2,18	0,02
5000	2,34	2,39	2,391	2,291	2,318	2,303	2,34	0,02

**Tabela E. 8: Tempos de reverberação do painel Retilínea 12/25 - Furos redondos com a mesa giratória rotacionando ( $T_4$ ).**

Frequência (Hz)	F1P1	F1P2	F1P3	F2P1	F2P2	F2P3	$T_4$	$\delta_4$
315	4,418	4,417	4,608	4,773	4,409	4,883	4,58	0,08
400	4,033	4,424	4,188	4,114	4,104	4,377	4,21	0,06
500	3,251	3,556	3,819	3,476	3,432	3,495	3,50	0,08
630	3,159	3,413	3,168	2,884	3,352	3,212	3,20	0,08
800	3,438	3,459	3,524	3,255	3,482	3,606	3,46	0,05
1000	3,347	3,232	3,214	3,146	3,324	3,396	3,28	0,04
1250	3,082	3,131	3,02	3,123	2,963	3,004	3,05	0,03
1600	2,808	2,887	2,838	2,701	2,776	2,68	2,78	0,03
2000	2,622	2,603	2,574	2,607	2,547	2,561	2,59	0,01
2500	2,401	2,399	2,322	2,357	2,404	2,394	2,38	0,01
3150	2,228	2,315	2,074	2,099	2,151	2,257	2,19	0,04
4000	1,987	2,123	2,065	1,891	2,156	2,056	2,05	0,04
5000	1,874	1,967	1,971	1,865	2,079	2,144	1,98	0,05

Tabela E. 9: Coeficiente de espalhamento sonoro do painel Retilínea 12/25 - Furos redondos.

Frequência (Hz)	$\alpha_{spec}$	$\delta \alpha_{spec}$	$\alpha_s$	$\delta \alpha_s$	s	$\delta s$
315	0,05	0,03	0,09	0,02	-0,04	0,04
400	0,10	0,02	0,06	0,03	0,04	0,04
500	0,09	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06
630	0,07	0,03	0,06	0,03	0,01	0,05
800	0,01	0,02	0,05	0,02	-0,05	0,03
1000	0,03	0,02	0,14	0,03	-0,13	0,05
1250	0,07	0,02	0,10	0,02	-0,04	0,03
1600	0,10	0,03	0,17	0,03	-0,08	0,05
2000	0,15	0,03	0,16	0,04	-0,01	0,06

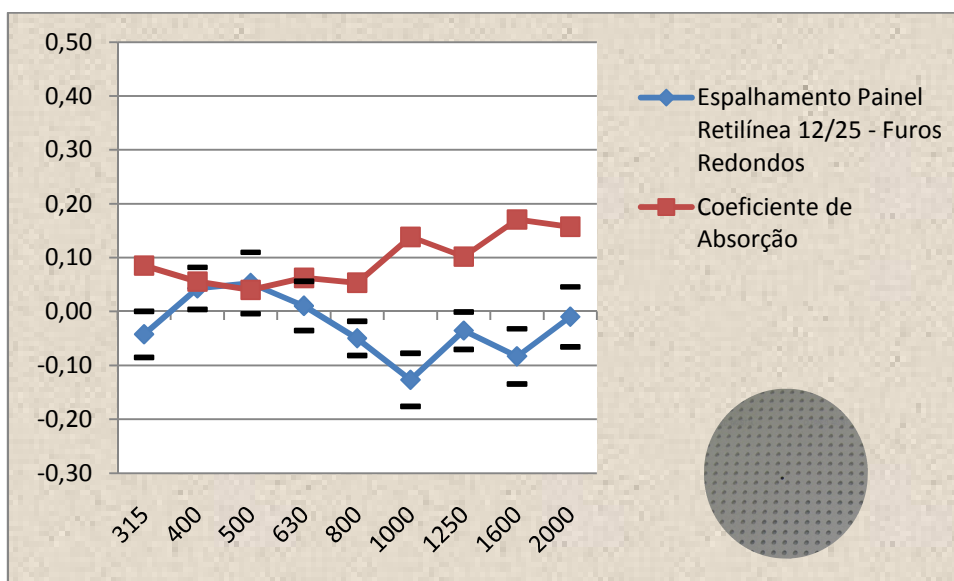


Figura D.1 - Coeficientes de Espalhamento do painel Retilínea Furos Redondos com os desvios padrões

**Tabela E. 10: Tempos de reverberação do painel B4 8/18 - Furos quadrados com a mesa giratória parada ( $T_2$ ).**

Frequência (Hz)	F1P1	F1P2	F1P3	F2P1	F2P2	F2P3	$T_2$	$\delta_2$
315	4,83	4,725	4,571	4,44	4,415	4,437	4,57	0,07
400	3,862	3,965	4,346	4,20	4,546	4,477	4,23	0,11
500	3,114	3,351	3,694	3,42	3,095	3,484	3,36	0,09
630	2,745	3,27	3,1	3,25	3,223	3,246	3,14	0,08
800	3,577	3,675	3,322	3,65	3,566	3,081	3,48	0,09
1000	3,3	3,566	3,365	3,31	3,476	3,391	3,40	0,04
1250	3,225	3,393	3,147	3,33	3,328	3,034	3,24	0,05
1600	2,882	2,83	2,988	3,00	2,938	2,816	2,91	0,03
2000	2,847	2,673	2,642	2,50	2,606	2,66	2,65	0,05
2500	2,358	2,378	2,15	2,34	2,456	2,527	2,37	0,05
3150	2,083	2,168	2,083	2,09	2,082	2,124	2,10	0,01
4000	1,76	1,818	1,782	1,89	1,858	1,802	1,82	0,02
5000	1,742	1,679	1,657	1,70	1,673	1,767	1,70	0,02

**Tabela E. 11: Tempos de reverberação do painel B4 8/18 - Furos quadrados com a mesa giratória rotacionando ( $T_4$ ).**

Frequência (Hz)	F1P1	F1P2	F1P3	F2P1	F2P2	F2P3	$T_4$	$\delta_4$
<b>315</b>	5,50	6,30	6,21	5,47	5,92	5,94	5,89	0,14
<b>400</b>	5,00	5,05	5,42	4,78	5,02	5,19	5,08	0,09
<b>500</b>	4,43	4,59	4,72	4,50	4,40	4,60	4,54	0,05
<b>630</b>	4,09	3,89	4,02	3,61	3,77	3,77	3,86	0,07
<b>800</b>	3,81	3,83	4,07	3,82	4,04	3,64	3,87	0,06
<b>1000</b>	3,37	3,89	3,51	3,50	3,43	3,55	3,54	0,07
<b>1250</b>	3,15	3,48	3,27	2,95	3,08	3,24	3,19	0,07
<b>1600</b>	2,62	3,01	2,85	2,56	2,82	2,72	2,76	0,07
<b>2000</b>	2,31	2,51	2,50	2,15	2,41	2,51	2,40	0,06
<b>2500</b>	2,01	2,19	2,24	1,80	2,14	2,25	2,11	0,07
<b>3150</b>	1,70	1,88	1,90	1,48	1,86	1,78	1,77	0,07
<b>4000</b>	1,40	1,66	1,60	1,25	1,59	1,61	1,52	0,06
<b>5000</b>	1,26	1,45	1,44	1,12	1,35	1,40	1,34	0,05

Tabela E. 12: Coeficiente de espalhamento sonoro do painel B4 8/18 - Furos quadrados.

Frequência (Hz)	$\alpha_{spec}$	$\delta \alpha_{spec}$	$\alpha_s$	$\delta \alpha_s$	s	$\delta s$
315	0,04	0,02	0,05	0,02	-0,01	0,03
400	0,04	0,03	0,10	0,03	-0,07	0,05
500	-0,01	0,03	0,01	0,05	-0,03	0,06
630	0,06	0,03	0,04	0,05	0,03	0,06
800	0,07	0,04	-0,01	0,06	0,08	0,07
1000	0,09	0,03	0,04	0,02	0,05	0,04
1250	0,12	0,03	0,05	0,03	0,08	0,05
1600	0,17	0,03	0,09	0,03	0,08	0,04
2000	0,23	0,04	0,16	0,03	0,09	0,06

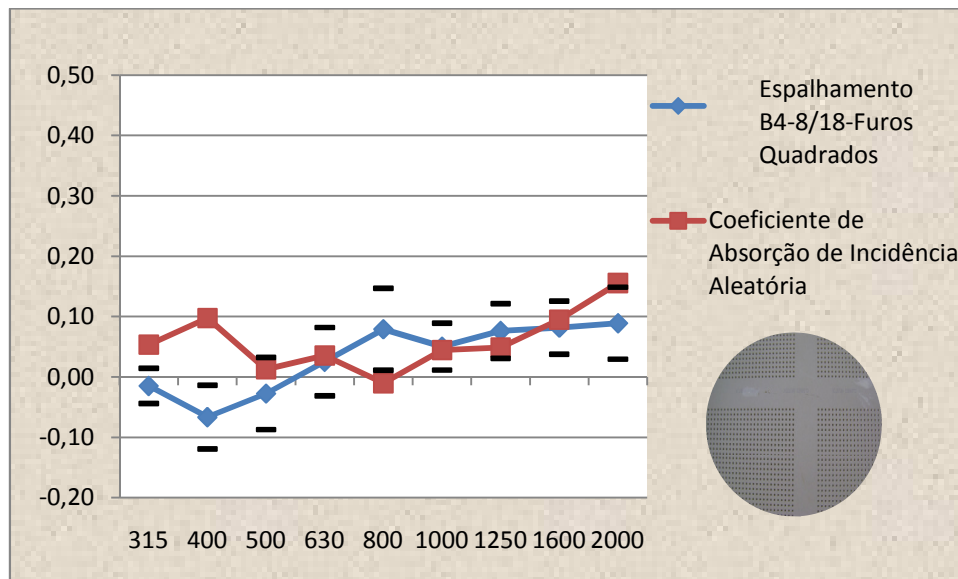


Figura E.1 - Coeficientes de Espalhamento do painel B4 8/18 Furos Quadrados com os desvios padrões



**Tabela E. 13: Tempos de reverberação do painel Slotline B6 8/18 – Bloco ranhurado com a mesa giratória parada ( $T_2$ ).**

Frequência (Hz)	F1P1	F1P2	F1P3	F2P1	F2P2	F2P3	$T_2$	$\delta_2$
315	4,573	4,191	4,431	4,47	4,488	4,488	4,44	0,05
400	4,314	4,435	4,284	4,093	4,327	4,445	4,32	0,05
500	3,643	3,592	3,586	3,514	3,408	3,57	3,55	0,03
630	3,239	3,425	3,223	3,424	3,183	3,236	3,29	0,04
800	3,464	3,006	3,806	3,531	2,94	3,524	3,38	0,14
1000	3,408	3,454	3,328	3,397	3,25	3,381	3,37	0,03
1250	3,167	3,261	3,34	3,222	3,069	3,28	3,22	0,04
1600	2,907	3,139	3,117	3,022	2,815	2,833	2,97	0,06
2000	2,765	2,836	2,679	2,725	2,722	2,953	2,78	0,04
2500	2,595	2,546	2,626	2,674	2,688	2,595	2,62	0,02
3150	2,4	2,424	2,514	2,489	2,622	2,467	2,49	0,03
4000	2,109	2,352	2,338	2,268	2,372	2,431	2,31	0,05
5000	1,988	2,256	2,187	2,253	2,192	2,272	2,19	0,04

**Tabela E. 14: Tempos de reverberação do painel Slotline B6 8/18 – Bloco ranhurado com a mesa giratória rotacionando ( $T_4$ ).**

Frequência (Hz)	F1P1	F1P2	F1P3	F2P1	F2P2	F2P3	$T_4$	$\delta_4$
315	4,18	4,3	4,517	4,688	4,453	4,914	4,51	0,11
400	4,031	4,172	4,005	4,228	4,2	4,185	4,14	0,04
500	3,301	3,415	3,697	3,42	3,161	3,485	3,41	0,07
630	3,014	3,374	3,32	3,165	3,249	3,283	3,23	0,05
800	3,401	3,451	3,459	3,477	3,408	3,621	3,47	0,03
1000	3,256	3,294	3,335	3,133	3,12	3,243	3,23	0,04
1250	2,904	2,932	2,94	3,096	2,884	2,975	2,96	0,03
1600	2,693	2,73	2,748	2,755	2,578	2,712	2,70	0,03
2000	2,413	2,457	2,445	2,399	2,319	2,475	2,42	0,02
2500	2,27	2,191	2,298	2,239	2,193	2,364	2,26	0,03
3150	2,085	1,946	2,032	2,084	1,861	2,041	2,01	0,04
4000	1,985	1,778	1,844	1,909	1,765	1,826	1,85	0,03
5000	1,96	1,671	1,904	1,797	1,625	1,846	1,80	0,05

Tabela E. 15: Coeficiente de espalhamento sonoro do painel Slotline B6 8/18 – Bloco ranhurado.

Frequência (Hz)	$\alpha_{spec}$	$\delta \alpha_{spec}$	$\alpha_s$	$\delta \alpha_s$	s	$\delta s$
315	0,06	0,04	0,09	0,02	-0,03	0,05
400	0,11	0,02	0,04	0,03	0,08	0,03
500	0,13	0,04	0,00	0,03	0,12	0,05
630	0,06	0,02	0,05	0,03	0,00	0,04
800	0,00	0,02	0,12	0,06	-0,13	0,07
1000	0,05	0,02	0,09	0,03	-0,05	0,04
1250	0,12	0,03	0,10	0,02	0,02	0,03
1600	0,15	0,03	0,13	0,03	0,02	0,05
2000	0,27	0,03	0,18	0,04	0,11	0,06

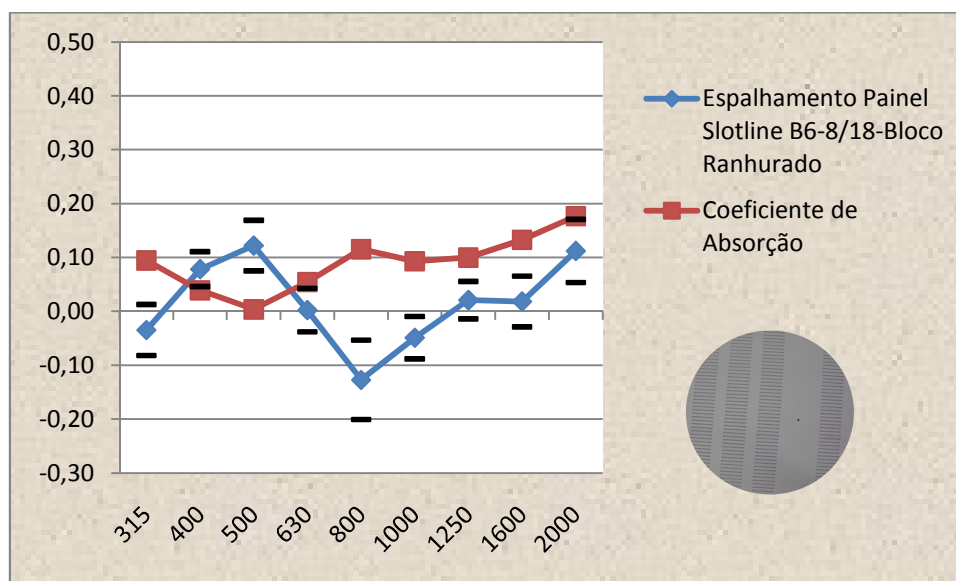


Figura F.1 - Coeficientes de Espalhamento do painel Slotline B6 8/18 Bloco Ranhurado

## **APÊNDICE F : CONSIDERAÇÕES SOBRE AS MEDIÇÕES DENTRO DA CÂMARA REVERBERANTE DO LACAF-FEC**

---

Neste apêndice são apresentadas algumas considerações práticas relevantes, observadas nesta pesquisa e que servirão de guia para novas pesquisas de determinação do coeficiente de espalhamento sonoro em câmaras reverberantes reais ou com escala próxima do real.

- Painéis difusores dentro da câmara reverberante:

De acordo com a norma ISO 17497-1 (2004), as especificações sobre a câmara reverberante devem atender a norma ISO 354 (2003). Uma das exigências especificadas é que o campo no interior da câmara reverberante deve ser suficientemente difuso. Para tal, devem-se instalar difusores com baixa absorção sonora, conforme descrito no Anexo A da referida norma.

Para que fosse atendida a norma ISO 17497-1 (2004), foi realizada a qualificação da câmara reverberante do LACAF e fixados difusores em policarbonato no seu interior, conforme descrito na metodologia apresentada. Porém, durante a pesquisa da literatura, verificou-se que alguns autores não instalaram difusores em suas medições do coeficiente de espalhamento sonoro quando se tratava de medições em câmaras em escala real ou próxima da real (VORLANDER et al, 2004; EMBRECHTS, 2002; DE GEETERE, VERMEIR, 2002).

De Geetere (2004) em seu trabalho descreve que foram realizadas medições com e sem difusores dentro da câmara reverberante real para comparar os resultados. Concluiu que as instalações de difusores fixos dentro da câmara tornavam a curva de Schroeder menos linear para baixas frequências. Pressupôs que talvez esse efeito fosse causado pela vibração desses painéis nas baixas frequências, dificultando o

cálculo do tempo de reverberação para essas freqüências. Por essa razão, Geetere removeu os painéis difusores fixos do experimento realizado.

No caso da presente pesquisa, os painéis difusores permaneceram dentro da câmara reverberante, visto que a mesma foi qualificada e constatou-se o campo sonoro difuso em seu interior. Optou-se por seguir as recomendações da norma à remoção dos painéis difusores fixos de dentro da câmara. Talvez esse fato possa ter interferido nos resultados do coeficiente de espalhamento dos painéis perfurados em gesso acartonado para baixas freqüências.

- Umidade e temperatura das medições:

A norma ISO 17497-1(2004) considera que o interior da câmara reverberante deve ser o mais invariante possível. A temperatura e umidade do seu interior devem ser monitoradas, pois possuem um efeito significativo nas medições. Mudanças na temperatura e umidade relativa durante as medições podem causar alterações nos resultados, principalmente nas altas freqüências e baixa umidade relativa.

Para determinação do coeficiente de espalhamento sonoro em câmaras reais, as medições das respostas impulsivas da câmara são longas e demoradas, podendo causar variações na temperatura e umidade relativa do ar no interior da câmara. Essas variações são devidas as aberturas de portas para mudança do equipamento de recepção ou da amostra, o que também causa movimentação de ar dentro da câmara influenciando no resultado e qualidade das medições.

A norma ISO 17497-1 (2004) recomenda um tempo de espera de  $15/N$  para iniciar as medições, após deixar o interior da câmara e feito o fechamento da porta. Segundo De Geetere (2004) a norma não especifica se esse tempo de espera é após a mudança da amostra e sua rotação ou modificação dos equipamentos de lugar no interior da câmara reverberante. No primeiro caso torna-se inviável a determinação do coeficiente de espalhamento sonoro em câmaras de tamanho real, devido ao tempo que levaria cada medição, de forma que a duração do experimento levaria mais que um

dia. Foi testado por De Geetere (2004) esse tempo de espera para modificação dos equipamentos de lugar e constatou-se que não houve modificação expressiva nos resultados com a espera ou não do tempo determinado em norma para o início das medições, após o fechamento da porta.

No presente trabalho também foram testadas as opções do tempo de espera para abertura e fechamento da porta e realização das medições. Não houve alteração significativa nos resultados.

Em relação ao tempo de duração das medições no interior da câmara, verificou-se que a medição de cada amostra de painel perfurado de gesso acartonado levou em média 6 horas para ser realizada. Isso fez com que a temperatura e umidade relativa tivessem variações expressivas ao longo de algumas medições. Principalmente quando a temperatura e umidade exterior apresentavam alterações. Mesmo sendo corrigidas pelo programa de computador DIRAC, é provável que essa variação tenha contribuído para algumas alterações dos resultados dos coeficientes de espalhamento sonoro, sendo um fator muito importante e que deve ser verificado quando são realizadas medições em câmaras reverberantes em escalas reais ou próximas a ela.

- Tamanho da base da mesa e amostra de teste:

Pela norma ISO 17497-1 (2004) a base da mesa deve corresponder à máxima dimensão da amostra, ou seja,  $3 \times N^{-1}$  m. No caso da câmara reverberante do laboratório da Unicamp, a amostra de teste e a base da mesa tinham diâmetro de 2,14m. Isso fez com que os painéis em madeira, que formavam a base da mesa, e os painéis perfurados em gesso acartonado fossem unidos para formar uma circunferência com esse diâmetro.

Um dos problemas encontrados com o tamanho da base da mesa foi a falta de estabilidade quando essa base girava em torno do seu eixo. Por ser grande, mesmo com a estrutura de ferro que a sustentava, quando girava em torno do eixo, apresentava uma pequena variação na rotação. O mesmo acontecia com a amostra de

gesso, em que girava em torno do eixo da mesa, não ficando a amostra completamente paralela ao chão.

Na prática para as medidas de coeficiente de espalhamento sonoro determinados em câmaras em escala real ou próxima a esta devem ser observados alguns fatores como tamanho da amostra, tamanho da base da mesa, dimensões da porta da câmara para verificar se a amostra deverá ser dividida em duas partes para entrar no interior da câmara ou não entre outros. Outro fator que deve ser observado é em relação ao motor de rotação da mesa giratória, devendo ser o mais silencioso possível, evitando assim influências nas respostas impulsivas da sala. Esses fatores interferem fortemente nos resultados obtidos.