

DIFUSÃO SONORA EM SALAS: PARADIGMAS DO PASSADO E ESTADO DA ARTE

Sylvio R. Bistafa

Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia Mecânica

e-mail: sbistafa@usp.br

Resumo: A difusão sonora em salas vem atraindo considerável interesse, principalmente após a introdução dos difusores com perfis numericamente otimizados, conhecidos genericamente como difusores de Schroeder. Tais difusores apresentam características estéticas a gosto das tendências arquitetônicas modernas, o que tem ajudado a popularizar o seu uso. Suas características físicas de espalhamento sonoro podem ser obtidas experimentalmente, com metodologias em avançado processo de normatização internacional. Não tão bem caracterizados entretanto, são os efeitos subjetivos do espalhamento sonoro, a necessidade e a quantidade de difusão sonora necessária em salas para os mais diversos usos e programas. Ainda incertos, são os efeitos da difusão na modelagem de salas com programas tipo traçado de raios e na construção da realidade virtual - auralização. A apresentação fornecerá uma visão de como a difusão sonora era incorporada nas salas do passado e que são paradigmas no presente, a evolução, o estado da arte, e como a difusão sonora vem sendo modernamente incorporada em salas para os mais diversos usos: pequenas salas tais como estúdios de gravação de áudio e salas de audição crítica, e grandes salas para música sinfônica e ópera.

1. INTRODUÇÃO

A difusão sonora vem sendo cada vez mais considerada no projeto acústico de salas, principalmente após a introdução dos difusores perfilados com seqüências numéricas, conhecidos genericamente como difusores de Schroeder. Tais difusores apresentam aspecto a gosto das tendências arquitetônicas modernas, o que tem ajudado a popularizar o seu uso. As características de espalhamento sonoro de difusores podem ser atualmente obtidas numérica e experimentalmente, estas últimas com metodologias normalizadas internacionalmente. Não tão bem caracterizados entretanto, são os efeitos subjetivos da difusão sonora e a quantidade de difusão necessária em salas para os mais diversos usos e programas. Ainda incerta é a modelagem de reflexões difusas em programas de simulação acústica de salas, e na construção da realidade virtual acústica — auralização. O presente trabalho fornece uma visão de como a difusão sonora era incorporada nas salas do passado e que são paradigmas no presente, a evolução, o estado da arte, e como a difusão sonora vem sendo modernamente incorporada em grandes salas de concerto.

2. SALAS PARADIGMAS DO PASSADO

A Figura 1 apresenta algumas salas de concerto construídas antes do século XX, consideradas de excelente qualidade acústica. As características arquitetônicas que parecem mais influenciar na qualidade acústica destas salas são: a forma retangular (“shoe-box”) e o relevo das superfícies.

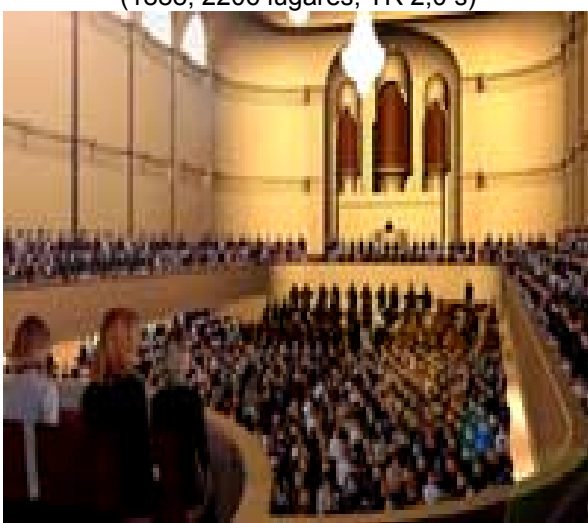
A Figura 2 mostra detalhes de paredes e teto do Wiener Konzerthaus Grossersaal, Vienna, que são característicos das salas pré-século XX. Observa-se nesta tomada fotográfica a presença de nichos, colunas, capitéis, lustres, e o relevo das superfícies densamente ornamentado, estruturas estas determinantes da difusão sonora da sala. A difusão sonora é considerada uma característica essencial da qualidade acústica de salas de concerto.



Concertgebouw, Amsterdam
(1888, 2206 lugares, TR 2,0 s)



Symphony Hall, Boston
(1900, 2631 lugares, TR 1,8 s)



Neues Gewandhaus, Leipzig
(1884-1944, 1560 lugares, TR 1,6 s)
*reconstrução digital



Grosser Musikvereinssaal, Vienna
(1870, 1680 lugares, TR 2 s)

Figura 1: Algumas salas de concerto pré-século XX consideradas como de excelente qualidade acústica.



Figura 2: Detalhes de paredes e teto do Wiener Konzerthaus Grossersaal, Vienna.

3. EFEITO DA FORMA E DO RELEVO NAS FRENTES DE ONDA

No projeto arquitetônico de salas de concerto, a forma retangular, em leque e elíptica são freqüentemente escolhidas. Estas formas conferem características acústicas variáveis à sala e portanto, a seleção da forma básica da sala é de fundamental importância não somente do ponto de vista arquitetônico, como também do ponto de vista acústico.

A Figura 3 apresenta os resultados de simulação da propagação sonora bidimensional através de flashes instantâneos na sala de formato retangular, em leque e elíptico, todas elas sem tratamento de difusão sonora e com a mesma área em planta de aproximadamente 518 m^2 . Estes resultados foram obtidos resolvendo numericamente, através do método das diferenças finitas, as equações diferenciais da continuidade e da quantidade de movimento em duas dimensões.

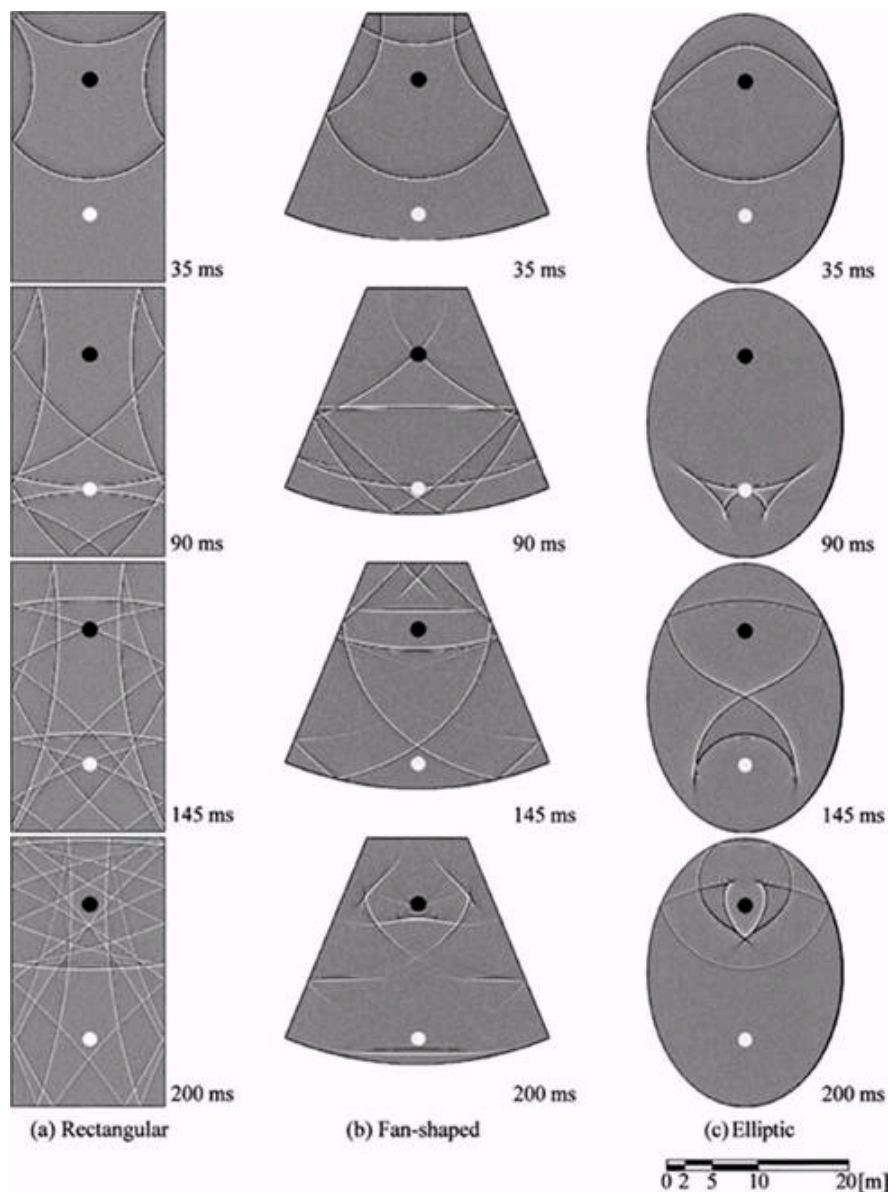


Figura 3: Propagação sonora na sala retangular, em leque e elíptica sem tratamento de difusão sonora (Fonte: T. Yokota *et al.* [1]).

Em cada uma das ilustrações da Figura 3, os círculos escuros indicam a posição da fonte e os claros a posição do receptor, no cálculo da resposta impulsiva a ser apresentada mais adiante. Uma análise comparativa destas ilustrações revela que a propagação das frentes de onda é bastante distinta em cada uma das salas. Observa-se claramente, na sala retangular, que o número de frentes de onda aumenta à medida que o tempo avança, enquanto que na sala em leque e elíptica, há uma tendência à concentração, e ao desenvolvimento de frentes de ondas “defeituosas”. Particularmente na sala elíptica, e como era de se esperar, a frente de onda é focada alternadamente na região da fonte, e na sua posição simétrica junto ao receptor.

A Figura 4(a) apresenta as respostas impulsivas no receptor, em cada uma das salas sem tratamento de difusão sonora. Estes resultados revelam que as reflexões são densas e com decaimento suave no caso da sala retangular, enquanto que as reflexões são esparsas e irregulares nas salas em leque e elíptica.

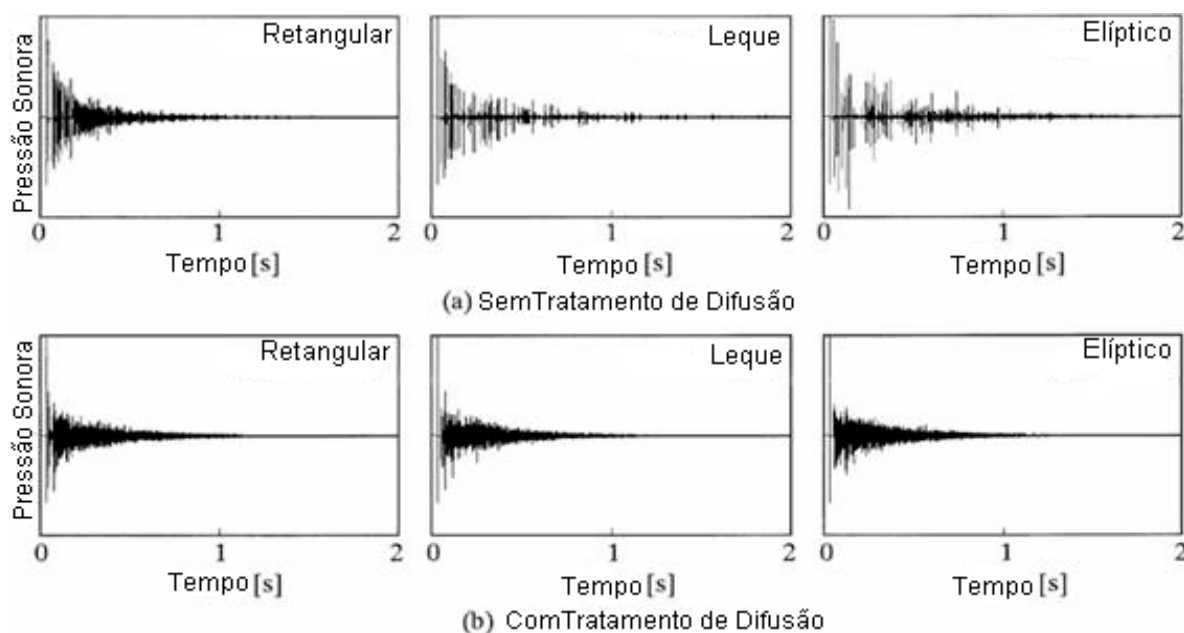


Figura 4: Respostas impulsivas calculadas nos receptores das Figuras 3 e 5 (Fonte: T. Yokota *et al.* [1]).

A Figura 5 ilustra o efeito do tratamento de difusão na propagação sonora. Aqui, o tratamento de difusão consiste de relevo na forma de zig-zag (Tipo 2 na Figura 6) introduzido nos contornos de cada sala. A comparação destes resultados com aqueles da Figura 3 revela que a introdução do tratamento de difusão ameniza e espalha consideravelmente as frentes de onda nas três salas.

O efeito do tratamento de difusão nas respostas impulsivas poderá ser visualizado na Figura 4(b). Fica óbvio que as respostas impulsivas tornaram-se mais densas e suavizadas quando comparadas com as respostas impulsivas das respectivas salas sem tratamento de difusão sonora (Fig. 4a).

A Figura 6 ilustra o efeito de quatro diferentes tratamentos de difusão na sala retangular. Os resultados apresentados nesta figura são para os relevos esquematizados na parte inferior desta figura. Observa-se que o espalhamento depende das dimensões do relevo. Para o relevo Tipo 1, frentes de onda relativamente intensas e contínuas são ainda detectadas, havendo uma suavização progressiva com o tempo para os relevos Tipo 2 e 3. Observa-se claramente a eficácia do relevo Tipo 4 em amenizar as frentes de onda.

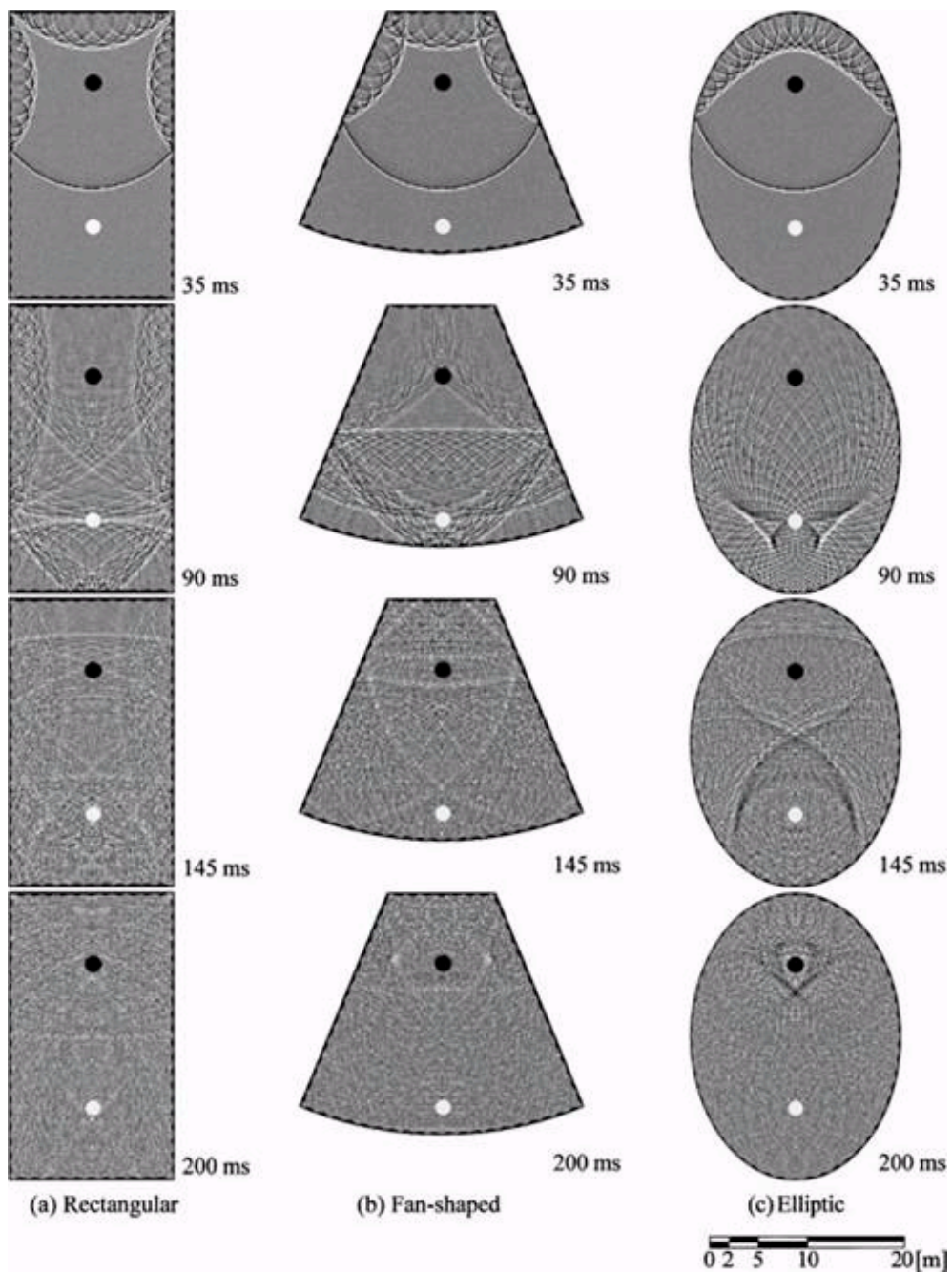


Figura 5: Propagação sonora na sala retangular, em leque e elíptica com tratamento de difusão sonora através de relevo na forma de zig-zag (Tipo 2 na Figura 6) (Fonte: T. Yokota *et al.* [1]).

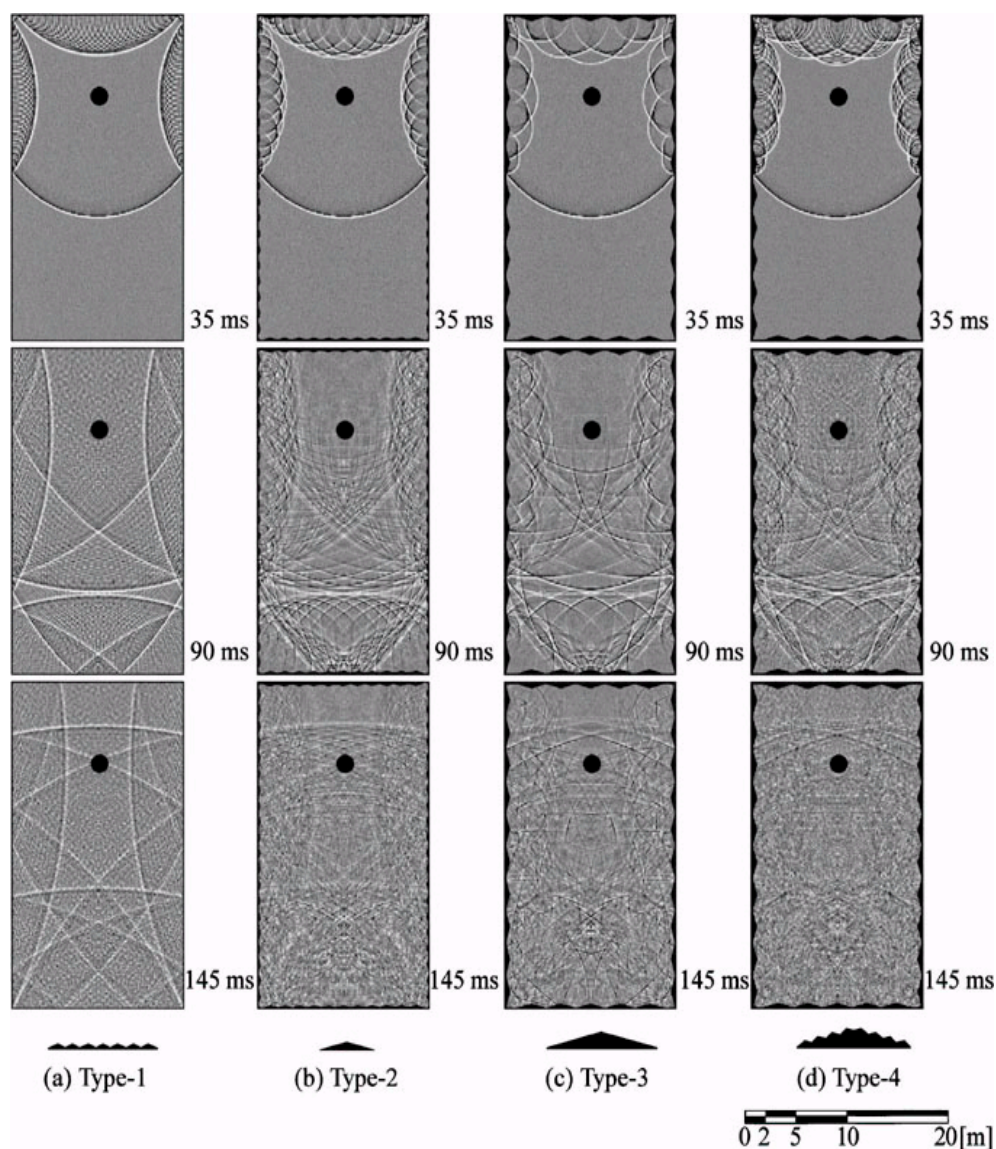


Figura 6: Propagação sonora na sala retangular com tratamento de difusão sonora (Fonte: T. Yokota *et al.* [1]).

4. AVALIAÇÃO VISUAL DO ÍNDICE DE DIFUSÃO DE SUPERFÍCIES

A Figura 7 apresenta um quadro onde consta a classificação do *índice de difusão de superfícies* de 44 salas de concerto, obtidas por meio de inspeção visual do relevo das superfícies de paredes e teto destas salas. Como o quadro apresenta a compilação de 5 levantamentos realizados por diferentes autores, o índice de difusão de superfícies teve que ser normalizado numa escala de 0 a 1.

Observa-se que três salas apresentadas na Figura 1, e que são consideradas paradigmas de qualidade acústica, apresentam índice de difusão igual a 1, que é o valor máximo possível para este índice neste trabalho. A exceção ocorre para os resultados apresentados na terceira coluna, identificada como YH, com as três salas apresentando índice de difusão de apenas 0,3. Isto se deve ao fato de que estes resultados em particular foram obtidos tão somente por inspeção de tomadas fotográficas, e sem o acompanhamento e orientação dos avaliadores participantes do estudo.

Five visual assessments of the surface diffusivity indices of concert halls^a

| Name of hall | SDI | | | | |
|--|------------|----------|------------|----------|----------|
| | FF | SC | YH | CH | LB |
| Festspielhaus, Salzburg, Austria | 0.8 | 1 | 0.5 | 0.8 | 1 |
| Grosser Musikvereinssaal, Vienna, Austria | 0.8 | 1 | 0.3 | 1 | 1 |
| Palais des Beaux-Arts, Brussels, Belgium | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.3 | |
| Radiohuset Studio 1, Copenhagen, Denmark | 0.5 | 0.3 | 0.5 | 0.3 | 0.5 |
| Tivoli Koncertsal, Copenhagen, Denmark | 0.5 | 0.5 | 0.3 | 0.5 | |
| Carl Nielsen Hall, Odense, Denmark | 0.5 | 0.5 | 0.3 | 0.5 | |
| National Concert Hall, Dublin, Eire | 1 | 1 | 0.3 | 0.5 | |
| Berliner Philharmonie Hall, Berlin, Germany | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.8 |
| Beethovenhalle, Bonn, Germany | 0.8 | 0.8 | 0.5 | 0.3 | |
| Gewandhaus, Leipzig, Germany | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1 | |
| Herkulesaal, Munich, Germany | 0.5 | 0.5 | 0.3 | 0.8 | |
| Gasteig Philharmonie Hall, Munich, Germany | 1 | 1 | 0.8 | 0.5 | 0.8 |
| Liederhalle, Beethovensaal, Stuttgart, Germany | 0.3 | 0.5 | 0.5 | 0.3 | 0.5 |
| Frederic R. Mann Auditorium, Tel Aviv, Israel | 0.5 | 0.3 | | | 0.5 |
| Concertgebouw, Amsterdam, Netherlands | 1 | 1 | 0.3 | 1 | 1 |
| Concert Hall De Doelen, Rotterdam, Netherlands | 1 | 0.8 | 0.5 | 1 | 1 |
| Music Center, Utrecht, Netherlands | 0.8 | 0.8 | 0.5 | 0.3 | |
| Berwald Hall, Stockholm, Sweden | 0.8 | 0.8 | 0.3 | 0.5 | |
| Stadt-Casino, Basel, Switzerland | 0.8 | 1 | 0.3 | 0.8 | 0.8 |
| Grosser Tonhallsaal, Zurich, Switzerland | 0.8 | 1 | 0.5 | 0.8 | 1 |
| Colston Hall, Bristol, UK | 0.3 | 0.3 | 0.5 | 0.3 | 0.3 |
| St. David's Hall, Cardiff, UK | 0.8 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| Usher Hall, Edinburgh, UK | 0.8 | 0.8 | 0.3 | 0.5 | |
| Philharmonic Hall, Liverpool, UK | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.3 | 0.5 |
| Royal Festival Hall, London, UK | 0.8 | 0.5 | 0.5 | 0.3 | 0.5 |
| Barbican Concert Hall, London, UK | 0.8 | 0.5 | 0.5 | 0.3 | 0.3 |
| Derngate Centre, Northampton, UK | 0.8 | 0.8 | 0.3 | 0.5 | |
| Royal Concert Hall, Nottingham, UK | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | |
| Free Trade Hall, Manchester, UK | 0.5 | 0.5 | 0.3 | 0.5 | |
| Lyric Theatre, Baltimore, USA | 0.5 | 0.5 | 0.3 | 0.8 | |
| Boston Symphony Hall, Boston, USA | 1 | 1 | 0.3 | 1 | 1 |
| Orchestra Hall, Chicago, USA | 0.5 | 0.5 | 0.3 | 0.5 | |
| Severance Hall, Cleveland, USA | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.8 | 0.8 |
| Boettcher Concert Hall, Denver, CO, USA | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.3 | |
| Avery Fisher Hall, New York, USA | 1 | 0.8 | 0.3 | 0.3 | 0.8 |
| Carnegie Hall, New York, USA | 0.8 | 0.8 | 0.5 | 0.8 | |
| Academy of Music, Philadelphia, USA | 0.8 | 1 | 0.5 | 0.5 | |
| Eastman Theatre, Rochester, New York, USA | 0.8 | 0.8 | 0.3 | 0.5 | |
| L. M. Davies Symphony Hall, San Francisco, USA | 1 | 1 | 0.5 | 0.8 | 0.8 |
| War Memorial Opera House, San Francisco, USA | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | |
| The Grand Hall, Worcester, MA, USA | 1 | 1 | 0.3 | 0.8 | 0.8 |
| Roy Thomson Hall, Toronto, Canada | 0.8 | 1 | 0.5 | 0.3 | |
| Concert Hall, Sydney Opera House, Australia | 1 | 1 | 0.5 | 0.5 | |
| The Melbourne Concert Hall, Melbourne, Aust. | 0.5 | 0.5 | 0.5 | | |

^a FF, Fricke's assessments; SC, Clarke's assessments; YH, the five-category, modified Han assessments; CH, Haan's assessments; LB, the five-category, modified Beranek assessments.

Figura 7: Cinco avaliações de índices de difusão de superfícies em 44 salas de concerto (Fonte: F.R. Fricke [2]).

8. CARACTERIZAÇÃO DE SUPERFÍCIES QUANTO AO SOM REFLETIDO

Dois coeficientes são empregados para caracterização do som refletido por superfícies: o coeficiente de difusão, d , e o coeficiente de espalhamento, s . Conforme ilustra a Figura 8, o coeficiente de difusão é uma medida da uniformidade do som refletido pela superfície; e conforme

ilustra a Figura 9, o coeficiente de espalhamento fornece a razão entre a energia refletida não especularmente, e a energia total refletida.

O coeficiente de difusão poderá ser obtido através de um ensaio normalizado pela Audio Engineering Society por meio da norma AES-4id-2001 [3].

A função de autocorrelação é utilizada para medir a similaridade da energia espalhada no espaço. Uma superfície que espalha energia uniformemente, produzirá um alto valor da função de autocorrelação espacial; enquanto que uma superfície que concentra a energia refletida em uma dada direção gerará um baixo valor. A fim de obter-se um número único característico da superfície, calcula-se, para uma dada posição da fonte, o coeficiente de autocorrelação de difusão, d_ψ , por meio de

$$d_\psi = \frac{\left(\sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \right)^2 - \sum_{i=1}^n (10^{L_i/10})^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n (10^{L_i/10})^2}$$

onde L_i é o i -ésimo nível de pressão sonora, n é o número de receptores na resposta polar, e ψ é o ângulo de incidência.

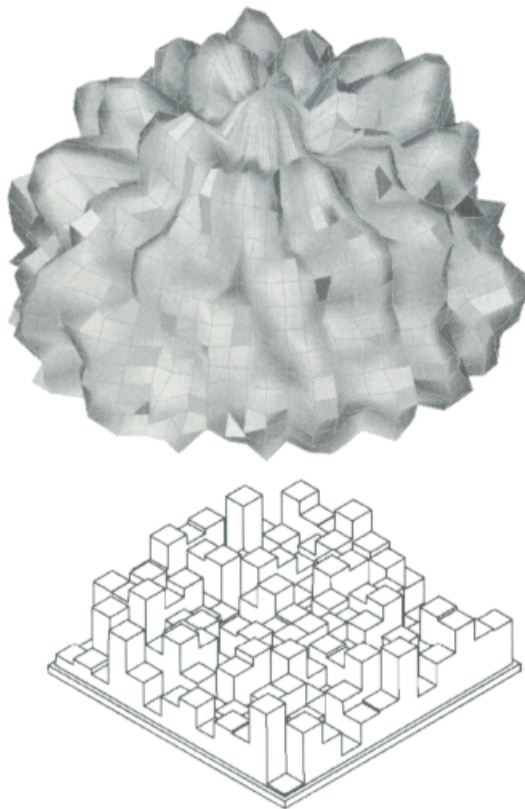


Figura 8: O coeficiente de difusão, d , caracteriza a uniformidade do som refletido pela superfície (Fonte: T.J. Cox e P. D'Antonio [4]).

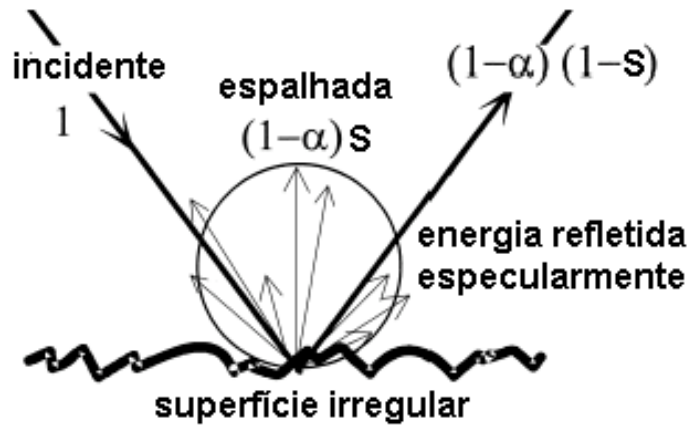
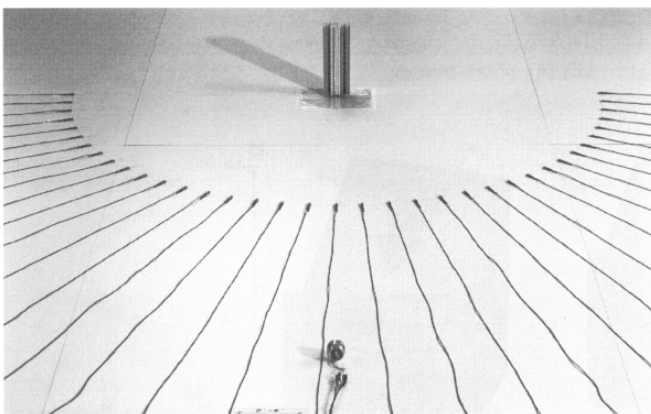
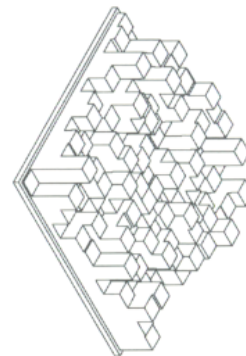


Figura 9: O coeficiente de espalhamento, s , caracteriza a capacidade da superfície em remover energia da região especular (Fonte: E. Mommertz e M. Vorlander [5]).

Conforme ilustra a Figura 10, as medições da resposta polar poderão ser feitas por meio de um goniômetro em 2D, em um semicírculo, ou em uma hemisfera, por meio de um goniômetro em 3D, em câmara anecóica. A escolha do goniômetro 2D/3D, depende do tipo de difusor. Quando a superfície produz espalhamento em um plano, a obtenção da resposta polar em um único plano é suficiente. Quando a superfície gera espalhamento em planos múltiplos, então uma avaliação hemisférica é necessária.



Medição em 2 D.



Medição em 3 D.

Figura 10: Determinação experimental do coeficiente de difusão em 2D e 3D (Fonte: AES-4id-2001 [3]).

A Figura 11 apresenta coeficientes de difusão em função da frequência de quatro superfícies. Observa-se nesta figura que, a exceção da superfície convexa, há uma marcante variação do coeficiente de difusão com a frequência para as outras três superfícies. Observa-se também que superfície plana nas baixas frequências, apresenta coeficiente de difusão próximo de 0,8; ou seja, a primeira vista, a superfície plana poderia ser considerada um bom difusor em baixas frequências. No

entanto, será mais adiante demonstrado que a resposta polar não é suficiente para caracterizar a capacidade de difusão de uma superfície. A superfície convexa apresenta coeficiente de difusão próximo de 1 em ampla faixa de frequências; ocorre que não se pode normalmente cobrir uma grande superfície com um único semicilindro.

A Figura 12 apresenta o setup para determinação experimental do coeficiente de espalhamento em câmara reverberante segundo o procedimento normalizado pela ISO 17497-1 [6]. De acordo com esta norma, o coeficiente de espalhamento poderá ser obtido em escala real ou em um modelo em escala reduzida. A superfície sob teste é colocada sobre uma mesa giratória em uma câmara reverberante. Quando a superfície a ser testada é muito grande, existe problemas logísticos em fabricar-se uma mesa giratória compatível com as dimensões da amostra. Por exemplo, as portas da câmara reverberante serão provavelmente de dimensões que não permitem a colocação da mesa e da amostra na câmara. Por esta e outras razões, é preferível realizar os testes em modelos e câmaras em escala reduzida.

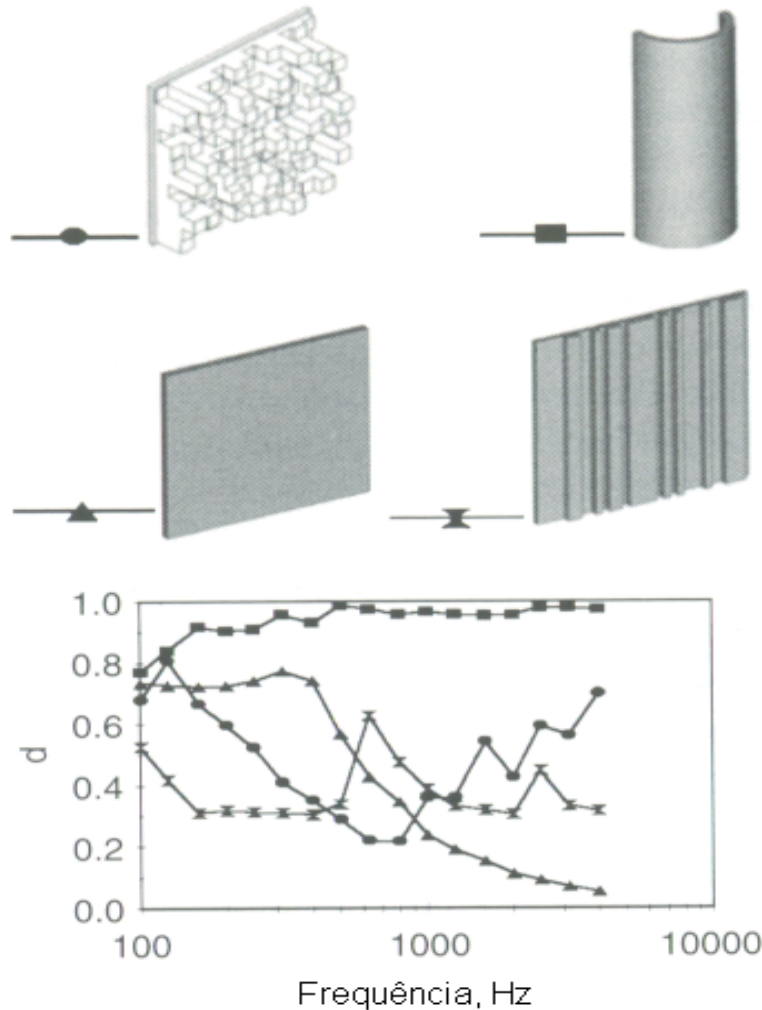


Figura 11: Variação do coeficiente de difusão com a frequência de algumas superfícies (Fonte: T.J. Hargreaves *et al.* [7]).

Já o coeficiente de espalhamento é obtido medindo-se o coeficiente de absorção para incidência aleatória, α , e o coeficiente de absorção especular, α_s , e empregando-se a seguinte fórmula

$$s = \frac{\alpha_s - \alpha}{1 - \alpha}$$

Estes coeficientes de absorção são obtidos por meio das seguintes expressões, e medindo-se tempos de reverberação conforme Quadro 1.

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

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

| Tempo de Reverberação | Amostra | MESA GIRATÓRIA |
|-----------------------|----------|----------------|
| T_1 | Ausente | Parada |
| T_2 | Presente | Parada |
| T_3 | Ausente | Girando |
| T_4 | Presente | Girando |

Quadro 1: Condições da mesa e amostra durante as medições dos tempos de reverberação para determinação dos coeficientes de absorção e de espalhamento.

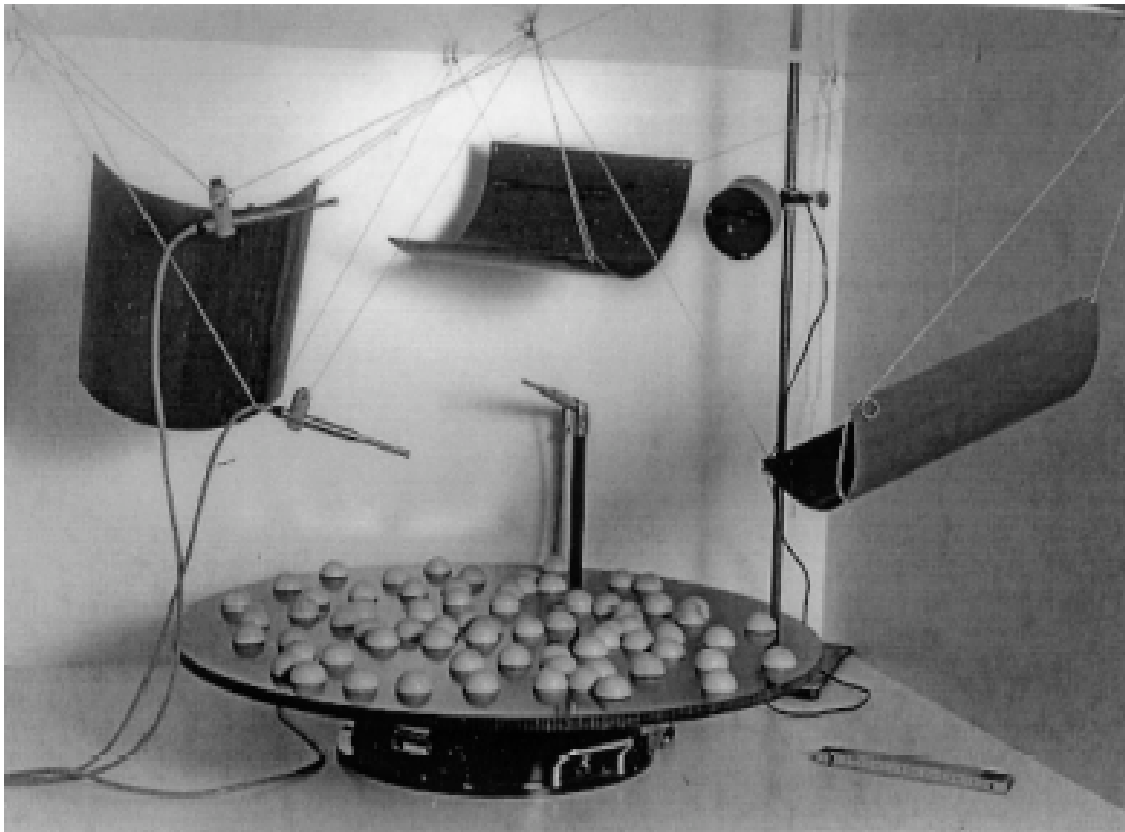
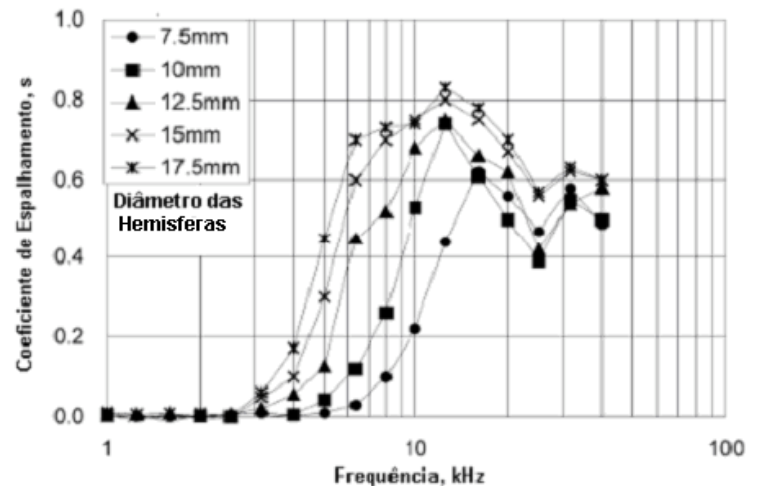


Figura 12: Setup para determinação experimental do coeficiente de espalhamento em câmara reverberante (Fonte: E. Mommertz e M. Vorlander [5]).

A Figura 13 apresenta a variação do coeficiente de espalhamento de uma superfície coberta com hemisferas de diferentes diâmetros, obtidos em uma câmara reverberante na escala de 1:10.



(a)



(b)

Figura 13: a) Câmara reverberante na escala de 1:10 utilizada na determinação dos coeficientes de espalhamento de uma superfície coberta com hemisferas de diferentes diâmetros. b) Coeficientes de espalhamento em função da frequência (Fonte: J.Y. Jeon *et al.* [8]).

9. CONTRASTANDO COEFICIENTE DE DIFUSÃO E COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO

O coeficiente de espalhamento fornece resultados ambíguos quando a superfície é anisotrópica. A Figura 14 apresenta coeficientes de espalhamento em função da frequência de dois difusores: um difusor extrudado, conhecido como difusor de único plano, ou difusor 1D, por produzir espalhamento em um único plano, e um difusor que produz espalhamento em múltiplos planos, conhecido como difusor hemisférico.

Observa-se na Figura 14 que apesar de serem difusores bem diferentes, o comportamento do coeficiente de espalhamento em função da frequência é praticamente o mesmo para ambos difusores. O difusor 1D gera um coeficiente de espalhamento tão elevado quanto o difusor hemisférico a partir de 500 Hz, mesmo sendo tão somente um plano extrudado em uma única direção. Isto ocorre pois a topologia muda dramaticamente quando a superfície é girada durante o ensaio, e portanto esta superfície é vista como um bom difusor pelo coeficiente de espalhamento.

Enquanto que o coeficiente de difusão contém informações da capacidade que a superfície tem em espalhar som para todas as direções, o coeficiente de espalhamento não inclui nenhuma informação quanto à direção do som refletido. A Figura 15, apresenta o espalhamento gerado por uma superfície plana, e por uma superfície plana que foi girada de 20°, no sentido de redirecionar a reflexão especular para uma outra direção. Observa-se que o coeficiente de difusão mede a capacidade de espalhamento de ambas as superfícies como sendo a mesma. Entretanto, o coeficiente de espalhamento “enxerga” o redirecionamento de energia como espalhamento, fornecendo portanto um alto coeficiente de espalhamento da superfície plana, a qual no entanto foi simplesmente girada, sem contudo ter-se conseguido dispersão — somente redirecionamento.

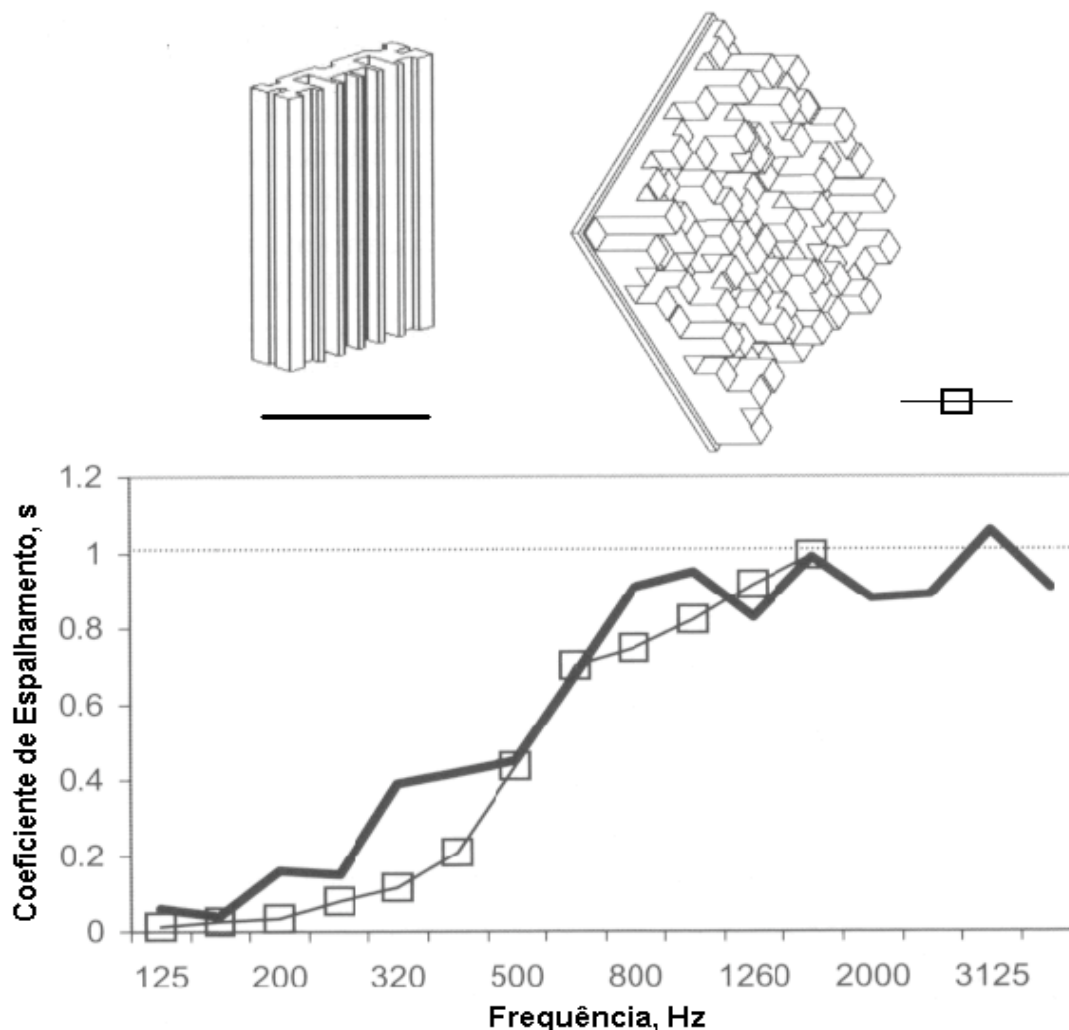


Figura 14: Coeficientes de espalhamento para dois difusores de diferentes geometrias. O difusor da esquerda é um difusor de único plano, o da direita é um difusor hemisférico (Fonte: T.J. Cox e P. D'Antonio [4]).

No projeto de difusores o objetivo maior é medir-se a capacidade que a superfície tem em espalhar som em todas as direções, e não de simplesmente medir-se a capacidade da superfície em remover energia da região especular. Desta forma, é importante para os projetistas de difusores, que o coeficiente que mede as características do som refletido, tenha condições de diferenciar redirecionamento de dispersão.

A base do coeficiente de espalhamento é a de separar o som refletido especularmente, do som espalhado em outras direções. Este coeficiente é de utilidade em programas de simulação acústica de salas que se baseiam nos princípios da acústica geométrica (traçado de raios, de cones, método das imagens especulares, etc.). Estes programas geralmente possuem algoritmos separados, um para lidar com as componentes especulares, e outro para lidar com as componentes espalhadas, no sentido de tornar a simulação mais condizente com a física do problema, e na tentativa de reduzir as incertezas das predições.

O coeficiente de espalhamento preocupa-se tão somente com a quantidade de energia que é removida da direção especular — este coeficiente não mede a qualidade da dispersão. Por esta razão, quando o objetivo é avaliar a qualidade do espalhamento, o coeficiente de difusão é o mais adequado. No entanto, este coeficiente não deve ser utilizado indiscriminadamente nos programas de simulação baseados nos princípios da acústica geométrica, uma vez que o coeficiente de difusão é incompatível com os modelos de espalhamento de superfícies usado nos algoritmos destes programas.

A existência de dois coeficientes para medir as características do som refletido dá margem a muita confusão. Por isto, é importante que os interessados no assunto sejam educados quanto às diferenças, uma vez que o uso inadequado destes coeficientes poderá resultar em predições errôneas ou num mau projeto.

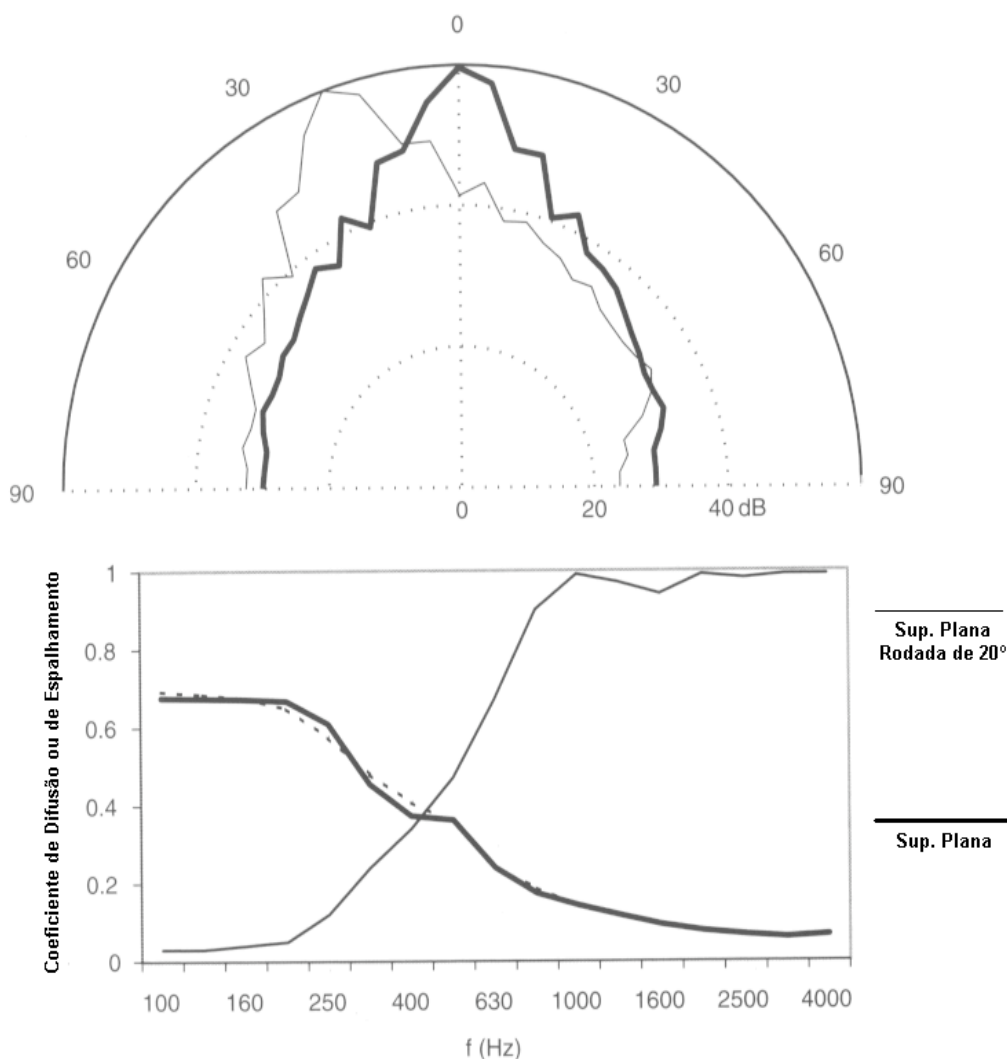


Figura 15: Em cima, resposta polar de uma superfície plana, e de uma superfície plana rodada de 20°. Embaixo, coeficientes de difusão e de espalhamento em função da frequência (Fonte: T.J. Cox e P. D'Antonio [9]).

10. RESPOSTA TEMPORAL E RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE DIFUSORES

A Figura 16 apresenta construções aproximadas de Huygen da reflexão de uma onda plana numa superfície plana, numa superfície cilíndrica e numa superfície dispersora de fases (difusor de Schroeder). No caso da superfície plana, a frente de onda refletida permanece inalterada após a reflexão. Conseqüentemente, o som proveniente da fonte sonora é refletido integralmente de volta, sem dispersão, o que poderá gerar eco, particularmente se a fonte for um instrumento direcional como um trompete. No caso da superfície cilíndrica, a frente de onda refletida é agora semicircular, e que parece ter sido originada de uma fonte pontual no centro do semicilindro. Conseqüentemente, o semicilindro gera dispersão espacial. Ocorre que as frentes de onda são ainda muito ordenadas; assim, embora o semicilindro seja uma boa geometria para gerar dispersão espacial, não se trata do melhor difusor pois não produz *dispersão temporal*. Já o difusor de Schroeder altera a fase das frentes de ondas refletidas, e que além de gerar dispersão espacial, gera também dispersão temporal.

A Figura 17 ilustra a aplicação de difusores cilíndricos nas paredes laterais do Hummingbird Centre em Toronto. A reforma desta sala incluía a instalação de um sistema de reverberação artificial, que gerava reflexões por meio de alto-falantes montados nas paredes laterais. Ocorre que tais reflexões eram muitas vezes percebidas como ecos pela platéia. Como não fazia sentido eliminar os ecos com absorção, já que a absorção remove energia da sala, reduzindo a reverberação, a solução adotada foi a de promover dispersão do som lateral por meio de difusores cilíndricos.

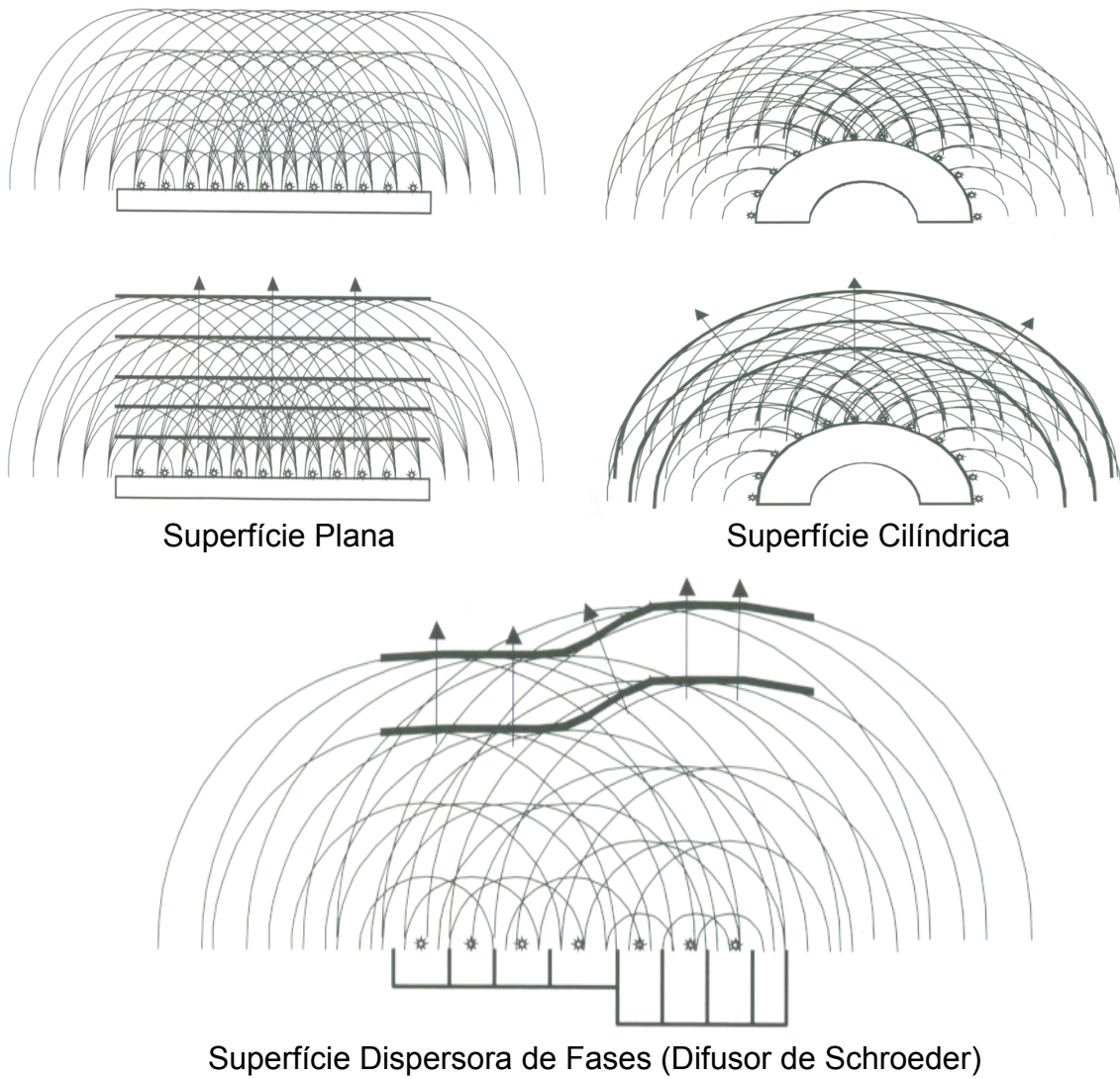


Figura 16: Construções aproximadas de Huygen da reflexão de uma onda plana numa superfície plana, numa superfície cilíndrica e numa superfície dispersora de fases (difusor de Schroeder) (Fonte: T.J. Cox e P. D'Antonio [10]).

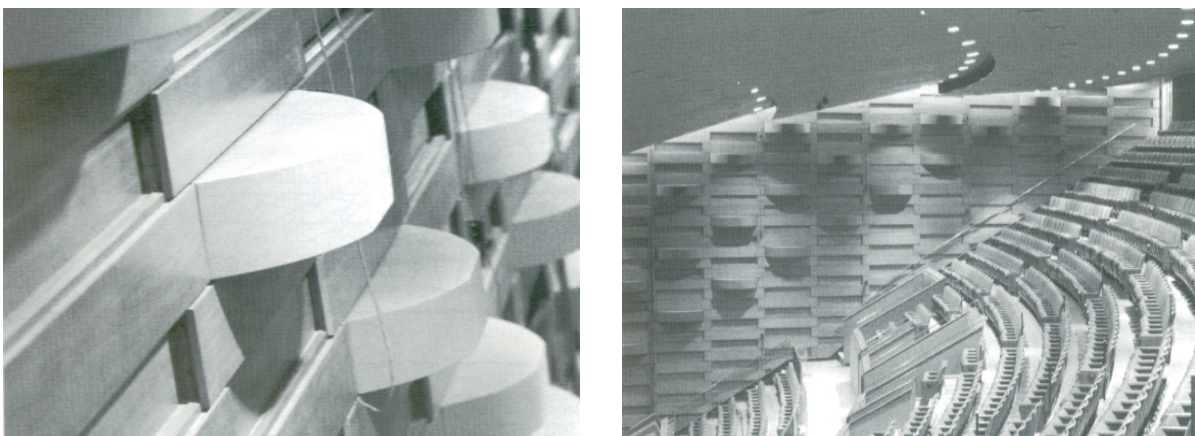


Figura 17: Tratamento das superfícies laterais do Hummingbird Centre, Toronto, com difusores cilíndricos (Fonte: P. D'Antonio e T.J. Cox [11]).

A Figura 18 ilustra a resposta temporal de um difusor dispersor de fases, a qual é apresentada juntamente com a resposta espacial. A resposta temporal do difusor é caracterizada por uma série de reflexões ao longo. A resposta temporal é também conhecida como resposta impulsiva.

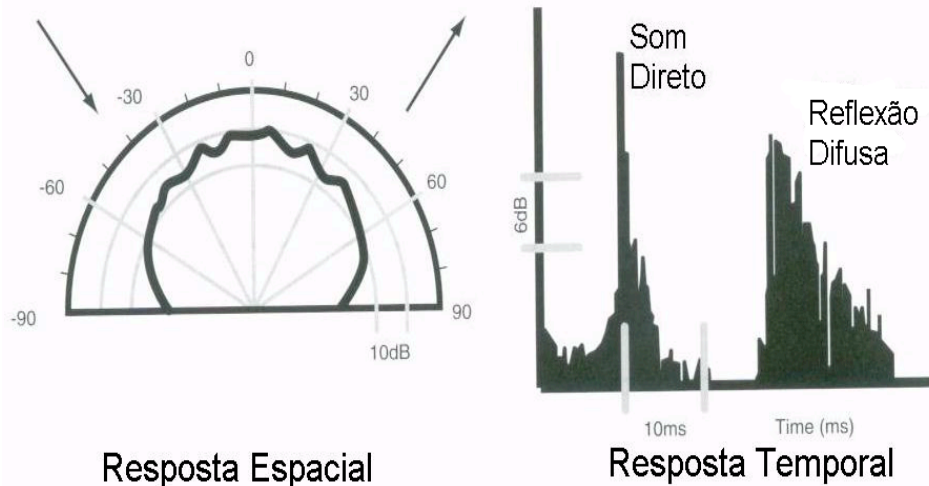


Figura 18: Resposta espacial e temporal de um difusor dispersor de fases (Fonte: T.J. Cox e P. D'Antonio [4]).

O difusor pode também ser caracterizado pela *resposta em frequência*, obtida aplicando-se a transformada de Fourier na resposta impulsiva. A Figura 19, apresenta a resposta temporal e a resposta em frequência do campo sonoro total, som direto mais reflexão especular no primeiro caso, e som direto mais reflexão difusa no segundo caso.

No observador, ocorre uma combinação do som que provém diretamente da fonte, chamado de som direto, e do som refletido pela superfície. Quando o som direto combina-se com uma reflexão especular gerada por uma superfície plana, há formação do chamado filtro pente (“comb filter”), conforme ilustra a Figura 19. O espaçamento entre as frequências está relacionado com o atraso, e a profundidade das cavas está relacionada com a amplitude relativa, do som direto e da reflexão especular. Este tipo de campo sonoro ocorre próximo a grandes paredes e refletores, quando não tratados com absorção ou difusão, e que dá origem ao chamado som “colorido” — ênfase de determinadas frequências em detrimento de outras.

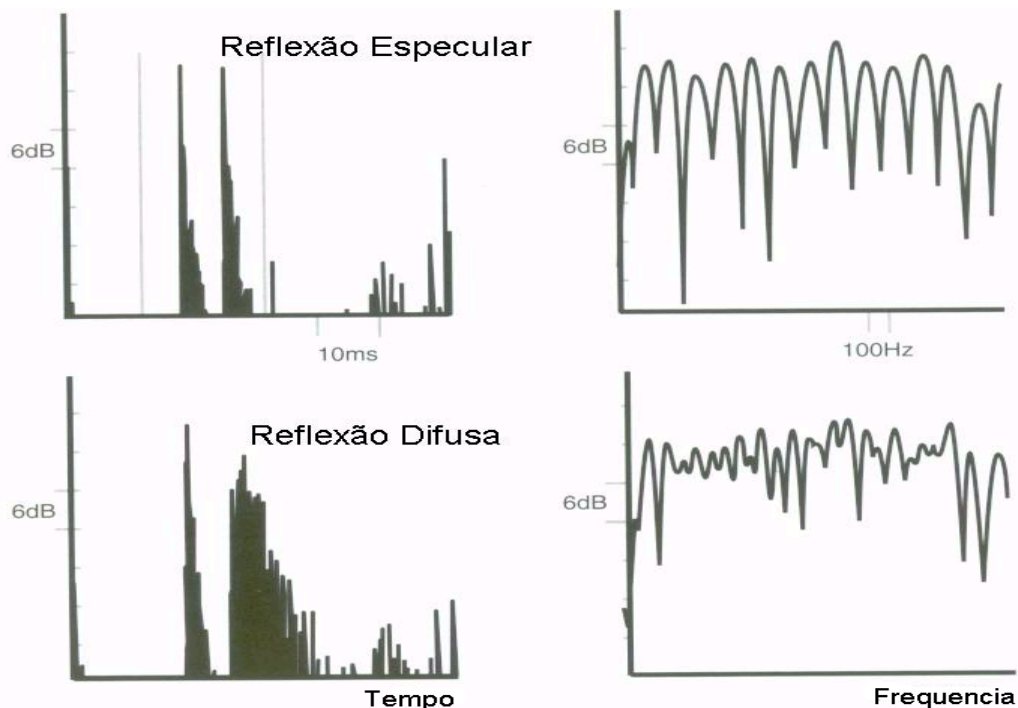


Figura 19: Resposta temporal e resposta em frequência do som direto combinado com reflexão especular e do som direto combinado com reflexão difusa (Fonte: P. D'Antonio e T.J. Cox [11]).

Quando o som direto combina-se com uma reflexão difusa, a regularidade do filtro pente é minimizada, com redução dos níveis da resposta em frequência, conforme ilustra a Figura 19. O conteúdo espectral do som direto poderá ser mais bem percebido, e como originalmente produzido.

Além de promover dispersão espacial, a redução do filtro pente é a principal razão do emprego de difusores em muitas aplicações.

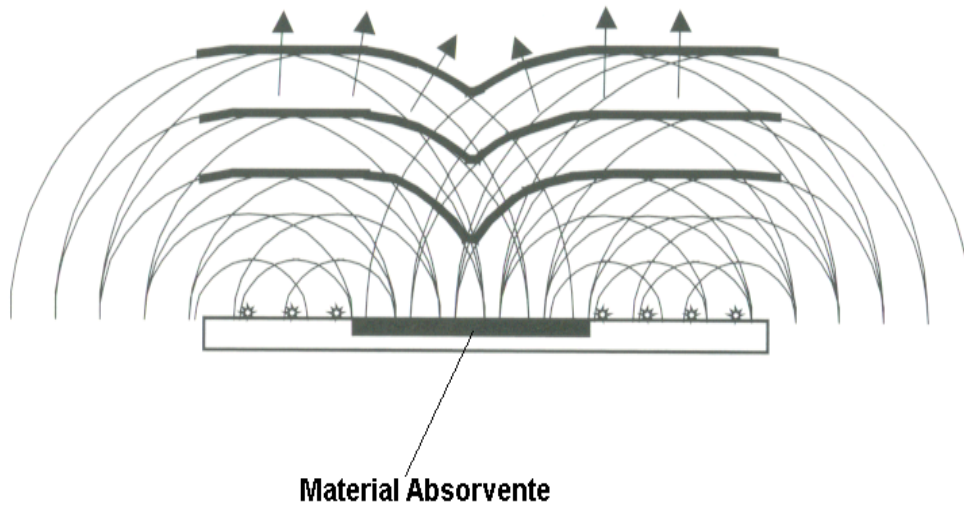


Figura 20: Construção aproximada de Huygen da reflexão de uma onda plana sobre uma superfície híbrida (Fonte: T.J. Cox e P. D'Antonio [4]).

Uma outra forma de gerar um difusor é através da combinação de reflexão com absorção. Adicionando-se placas de material absorvente em uma parede reflexiva, as fontes secundárias na construção de Huygen estarão ausentes na região da parede coberta com material absorvente, gerando dispersão, conforme ilustra a Figura 20. Esta superfície, chamada de híbrida, produz dispersão modesta abaixo da frequência na qual a dimensão do painel é menor que a metade do comprimento de onda nesta frequência. Por outro lado, para obter-se reflexões em altas frequências, as dimensões dos painéis devem ser muito pequenas, sendo que a distribuição dos painéis torna-se importante. Superfícies híbridas são parcialmente absorventes, portanto só devem ser utilizadas em situações onde se necessita simultaneamente de controle da reverberação e de dispersão.

11. CAMPO PRÓXIMO E CAMPO AFASTADO DO DIFUSOR

Os resultados de medições da resposta polar dependem das distâncias da fonte e do receptor até a superfície, a menos que ambos, fonte e receptor, estejam no campo afastado. (O campo afastado ocorre quando o som refletido cai de 6 dB para cada duplicação da distância para geometrias em 3D, e de 3 dB para cada duplicação da distância para geometrias em 2D.) Ocorre que, na maioria das salas, é comum que fontes e receptores estejam no campo próximo e não no afastado, a menos que a superfície seja muito pequena. A Figura 21 apresenta a resposta polar de uma superfície plana, para várias distâncias da superfície até o receptor. Observa-se nesta figura, que na resposta polar, uma superfície plana aparenta ser um bom difusor quando as medições são feitas próximas à superfície. Este comportamento parece contradizer a idéia que se tem de que uma superfície plana é um mau difusor. Ocorre que, conforme discutido anteriormente, a superfície plana não gera dispersão temporal, sendo esta a razão pela qual trata-se de um mau difusor. A resposta polar não revela a fase das frentes de onda.

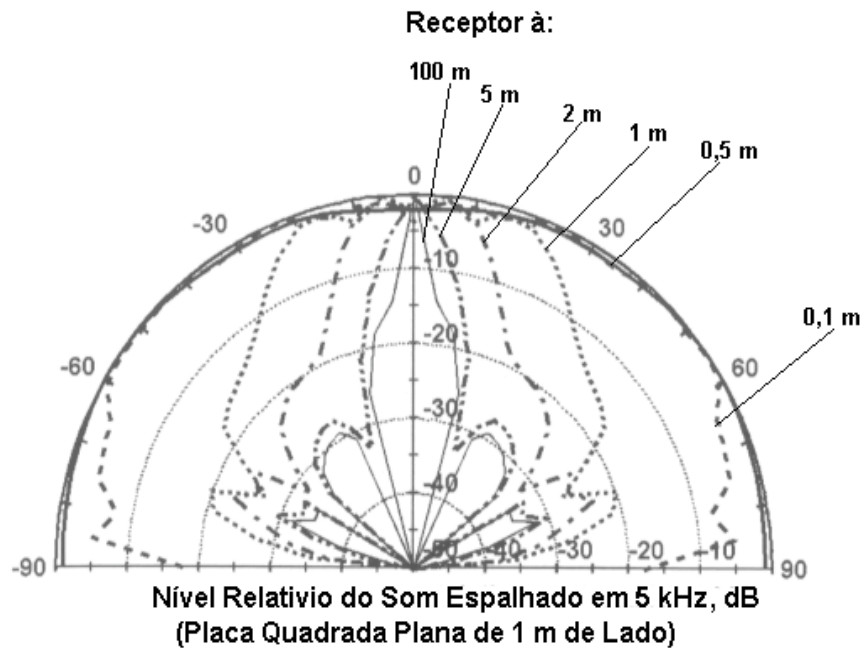


Figura 21: Efeito da distância do receptor na resposta polar de um painel quadrado de 1 m de lado. A fonte dista 100 m do painel (Fonte: T.J. Hargreaves *et al.* [7]).

Como no campo próximo a resposta polar varia com a distância, a solução normalmente adotada é a de medir-se a resposta polar de difusores no campo afastado, mesmo que esta distância seja maior que aquela onde os ouvintes estarão situados. A distância de campo afastado é normalmente adotada como aquela a partir da qual as diferenças de trajetórias entre pontos da superfície e o receptor, sejam pequenas quando comparadas com o comprimento de onda na frequência de interesse. Como em certos casos esta distância poderá ser muito grande, o que tornaria impraticável medições da resposta polar em câmara anecóica, a norma AES-4id-2001 [3] recomenda que a distância adotada nas medições poderá ser mais curta, porém garantindo que pelo menos 80 por cento dos ouvintes esteja fora da zona especular do difusor.

12. MODELOS MATEMÁTICOS PARA PREDIÇÃO DE ESPALHAMENTO

No projeto e na caracterização de superfícies difusoras, torna-se necessário prever o campo sonoro refletido pela superfície. Atualmente isto é feito apenas considerando o espalhamento da superfície isoladamente, já que a predição na situação real de aplicação do difusor em uma sala, onde todas as suas superfícies são simultaneamente modeladas, requer tempo computacional excessivamente longo e capacidade de armazenamento muito grande.

Existem diversos modelos para predição do espalhamento de superfícies, desde os numericamente exatos porém computacionalmente intensos e lentos, até os rápidos porém que fornecem resultados com maior incerteza. O Quadro 2 apresenta modelos utilizados para predição do espalhamento de superfícies, juntamente com suas principais características.

O modelo de Fraunhofer, por ser o mais simples, é utilizado quando se deseja ter uma idéia do desempenho do difusor, sendo somente aplicável no campo afastado, quando ambos, fonte e receptor, estão longe da superfície.

O modelo de Fraunhofer é bem conhecido no campo da ótica e de processamento de sinais, e permite estimar rapidamente o espalhamento de uma superfície rígida e plana no campo afastado. No entanto este modelo será mais útil se for possível modificá-lo para possibilitar a análise de superfícies que não possuem coeficiente de reflexão unitário. Um exemplo, seria o de aplicá-lo na análise do difusor de Schroeder, o qual poderá ser modelado como uma superfície plana de impedância com fase variável. Quando este modelo é introduzido na solução de Fraunhofer, a expressão que permite obter a pressão sonora espalhada é dada por

$$p_s(\mathbf{r}) = -\frac{jk}{8\pi^2} e^{-jk(r+r_0)} \sin c\left(\frac{kb}{r}\right) [\cos(\theta) + 1] \int_{-a}^a R(r_s) e^{jkx_s \sin(\theta)} dx_s,$$

sendo que a Figura 22 ilustra um difusor de Schroeder com a geometria associada a esta equação.

| Modelo | Exatidão | Tempo Computacional | Observações |
|-----------------------------|----------|---------------------|---|
| Elementos de Contorno (BEM) | o melhor | o mais lento | <i>Preciso contanto que as superfícies sejam de reação localizada e as perdas viscosas sejam pequenas. Lento, particularmente para superfícies grandes em altas frequências.</i> |
| BEM p/ Paineis Fino | ↑ | ↑ | <i>Método eficiente para superfícies de pequena espessura, permitindo reduzir pela metade os elementos de um BEM padrão.</i> |
| Kirchhoff | ↓ | ↓ | <i>Utiliza as condições de contorno de Kirchhoff para aproximar pressões nas superfícies e portanto é muito mais rápido. Menor precisão em baixas frequências, e em superfícies com variações bruscas de impedância e de geometria.</i> |
| Fresnel | | | <i>Substitui a integração numérica do modelo de Kirchhoff por meio das integrais de Fresnel. Requer espalhamento ortogonal em duas direções sobre a superfície. Permite algumas simplificações para superfícies planas e curvas.</i> |
| Fraunhofer ou Fourier | o pior | o mais rápido | <i>Simplifica a integração numérica do modelo de Kirchhoff, sendo somente aplicável no campo afastado. Permite a aplicação dos modelos mais simples de Fourier. Bom para o entendimento dos fenômenos físicos, porém de pouca precisão.</i> |

Quadro 2: Modelos para predição do espalhamento de superfícies.

Esta equação é essencialmente aquela usada por Schroeder no projeto de difusores dispersores de fase. Costuma-se omitir o termo $[\cos\theta + 1]$, sendo que esta simplificação transforma a equação essencialmente numa transformada de Fourier, e é por este motivo que o modelo de Fraunhofer é também chamado de Fourier.

Por conveniência e por manter a compatibilidade com Schroeder, a solução de Fraunhofer/Fourier poderá ser re-escrita na forma

$$|p(\theta, \psi)| \approx \left| A \int_s R(x) e^{jkx[\text{sen}(\theta) + \text{sen}(\psi)]} dx \right|$$

onde $R(x)$ é o coeficiente de reflexão, θ é o ângulo de reflexão, ψ é o ângulo de incidência, k é o número de onda, e A uma constante.

Nesta equação, a transformação não se dá nas variáveis mais familiares tempo-frequência da transformada de Fourier, e sim na variável kx , e que transforma-a na variável $[\text{sen}(\theta) + \text{sen}(\psi)]$. Quando se escolhe coeficientes de reflexão $R(x)$ com espectro de potência plano com relação a kx , então a amplitude será constante com relação a variável transformada $[\text{sen}(\theta) + \text{sen}(\psi)]$. Isto não significa porém, que o espalhamento será constante em todas as direções, pois a transformada não é simplesmente função de θ e ψ , e sim que o espalhamento se dará em lóbulos de mesma energia conforme será visto a seguir.

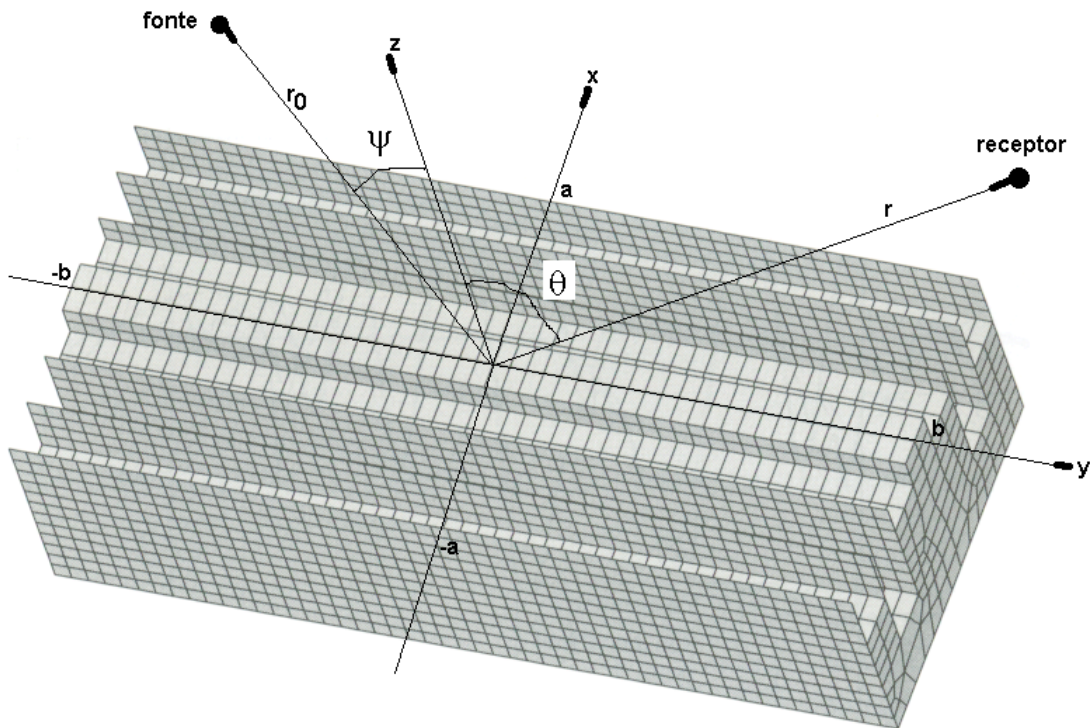


Figura 22: Difusor de Schroeder usado na solução de Fraunhofer/Fourier.

11. DIFUSORES DE SCHROEDER

A Figura 23 apresenta um difusor de Schroeder de único plano ou difusor 1D. Este difusor consiste de uma série de poços de mesma largura e com diferentes profundidades. Os poços são separados por aletas. A profundidade dos poços é determinada por uma seqüência numérica, tal como uma *seqüência de resíduos quadráticos* (“quadratic residue sequence”). Difusores 1D apresentam um plano de dispersão máxima; já na direção ortogonal a este plano, a sua natureza extrudada faz com que este difusor se comporte essencialmente como uma superfície plana.

A análise do difusor 1D é normalmente feita no plano de máxima dispersão, o qual corta o difusor na sua seção transversal. A Figura 24 ilustra a seção transversal de um difusor perfilado com uma seqüência de resíduos quadráticos, e que é conhecido como QRD (“quadratic residue diffusor”).

A análise dos difusores de Schroeder é feita considerando-se uma onda plana incidente na direção y , no sentido contrário ao da orientação deste eixo na Figura 24. A onda plana é refletida no fundo dos poços, sendo que cada poço reflete uma onda na direção e sentido do eixo y . Assume-se que não há perdas de energia neste processo. A pressão em um ponto externo ao difusor será dada pela interferência das ondas que são irradiadas por cada poço. Todas estas 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. Conseqüentemente, a distribuição polar do espalhamento é determinada pela escolha da profundidade dos poços.

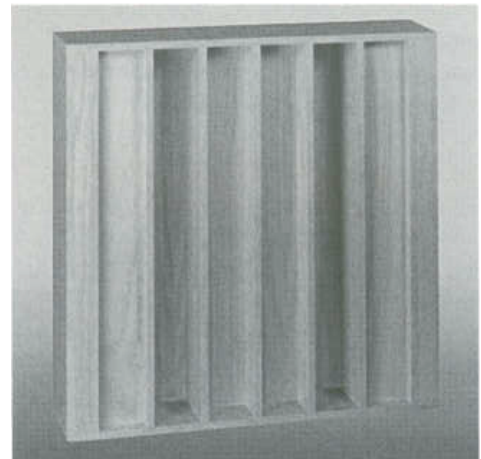


Figura 23: Difusor de Schroeder em 1D.

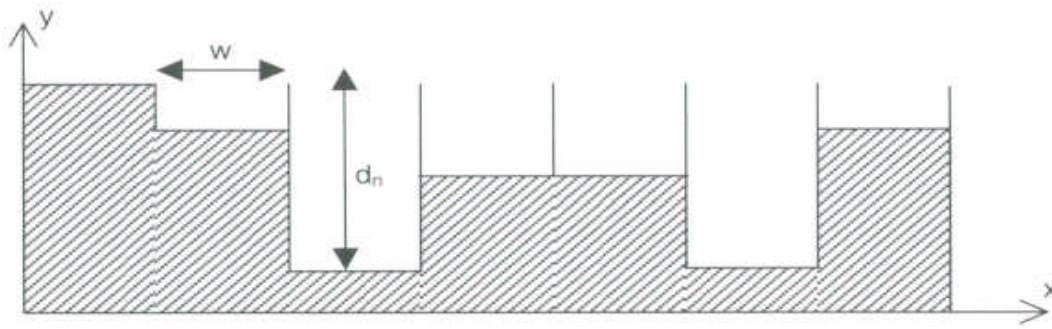


Figura 24: Seção transversal de um QRD.

Schroeder mostrou que a escolha de uma seqüência de resíduos quadráticos, gera uma distribuição polar em lóbulos de mesma energia difratada. A Figura 25 apresenta o espalhamento gerado por um difusor de Schroeder, comparativamente com uma superfície plana de mesmas dimensões. O espalhamento foi obtido com o modelo de Fraunhofer/Fourier, onde se observa a geração de 11 lóbulos de mesma energia.

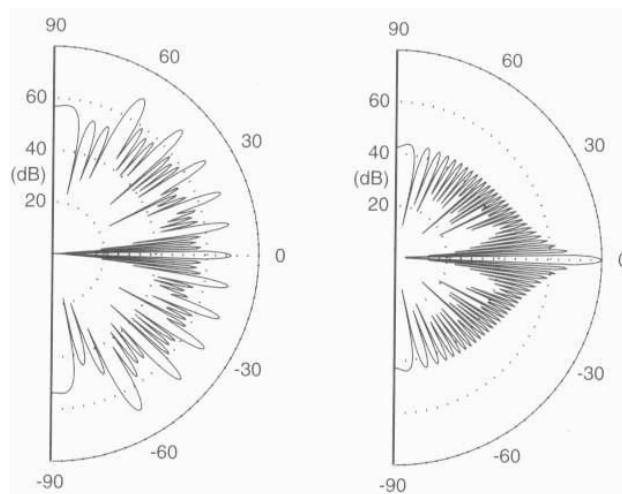


Figura 25: Espalhamento gerado por um difusor de Schroeder (à esquerda) e por uma superfície plana (à direita) de mesmas dimensões (Fonte: T.J. Cox e P. D'Antonio [4]).

A aplicação do modelo de Fraunhofer/Fourier requer que ondas planas se propaguem nos poços. Conseqüentemente, o limite superior de freqüência, f_{\max} , para que o espalhamento siga as predições do modelo requer que a largura w dos poços seja dada por

$$w = \frac{\lambda_{\min}}{2}, \quad \text{onde} \quad \lambda_{\min} = \frac{c}{f_{\max}}.$$

Acima de f_{\max} o espalhamento continuará a ocorrer pois se trata de uma estrutura com geometria complexa. Portanto, f_{\max} é apenas um limite de aplicabilidade da teoria, e não para ocorrência de espalhamento.

O modelo de ondas planas explica a necessidade de aletas separando os diferentes poços. O espalhamento não seguirá os resultados do modelo simplificado na ausência das aletas. Estas, por sua vez, devem ter a menor espessura possível, garantindo porém que não vibrem, o que poderá ocasionar perdas de energia.

Uma seqüência de resíduos quadráticos é a seqüência numérica mais comumente utilizada na determinação da profundidade dos poços dos difusores de Schroeder. Esta seqüência é obtida por meio de

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

onde *modulo* indica o resto não negativo, N é o número primo gerador da seqüência, e que dá também o número de poços, e $n = 0, 1, \dots, N-1$, é o número de ordem do poço.

Por exemplo, para o número primo $N = 7$, e para $n = 5$, a profundidade do sexto poço será dada por $s_5 = 5^2 \bmod 7 = 25 \bmod 7$. O *modulo7* significa que 7 é subtraído de 25 até que se obtenha resto não negativo. Em palavras, 7 é subtraído de 25 três vezes com resto 4. A profundidade do sexto poço seria então proporcional ao numeral 4. A seqüência gerada com $N = 7$ seria então $S_7 = \{0, 1, 4, 2, 2, 4, 1\}$. A Figura 26 apresenta um quadro com seqüências de resíduos quadráticos para os números primos de 5 a 23. A Figura 26 apresenta um quadro com seqüências de resíduos quadráticos para os números primos de 5 a 23.

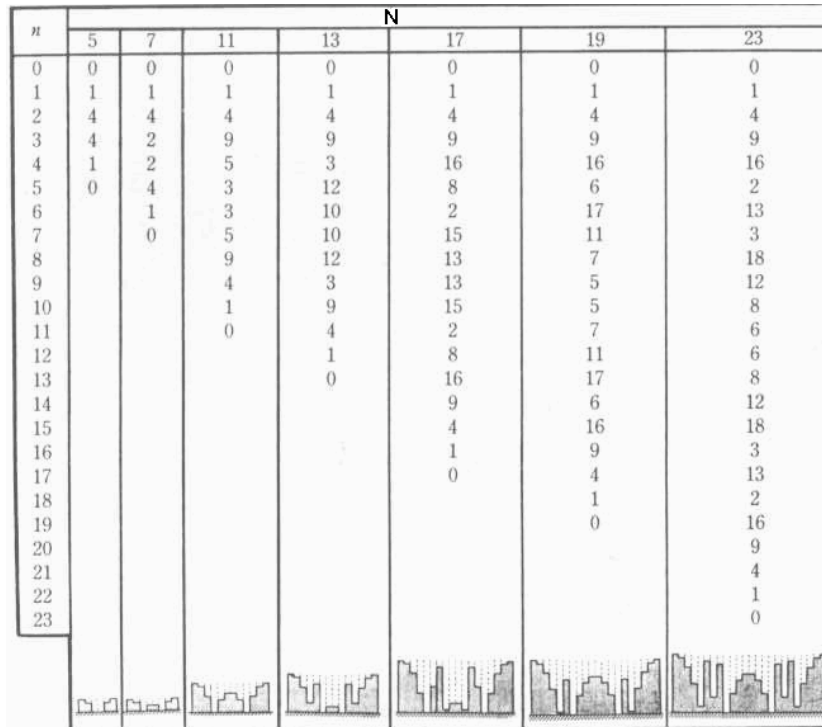


Figura 26: Seqüência de resíduos quadráticos para os números primos de 5 a 23. O perfil do difusor encontra-se ilustrado no rodapé de cada coluna, onde a profundidade de cada poço é proporcional à seqüência de números da respectiva coluna (Fonte: F.A. Everest [12]).

Os difusores de Schroeder atuam em freqüências múltiplas da *freqüência de projeto*. A freqüência de projeto é normalmente tomada como o limite inferior de atuação do difusor, f_{\min} . A profundidade do n -ésimo poço, d_n , é então determinada a partir da seqüência por meio da seguinte fórmula

$$d_n = \frac{S_n \lambda_{\max}}{2N}, \quad \text{onde} \quad \lambda_{\max} = \frac{c}{f_{\min}}.$$

A freqüência de projeto não é a menor freqüência na qual o difusor gera mais espalhamento do que uma superfície plana, sendo apenas a menor freqüência onde a difração se dá ainda na forma de lóbulos de mesma energia. Difusores de Schroeder espalham diferentemente de superfícies planas uma ou duas oitavas abaixo da freqüência de projeto.

Os lóbulos de mesma energia aparecem no campo afastado em posições angulares θ dadas por

$$\text{sen}(\theta) = \frac{m\lambda}{Nw} - \text{sen}(\psi), \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

onde m é o número de ordem do lóbulo.

Quando este resultado é substituído na solução de Fraunhofer/Fourier, resulta, na freqüência de projeto, a seguinte expressão para a pressão sonora espalhada no m -ésimo lóbulo

$$|p_m| \approx \left| A \int_S R(x) e^{j2\pi x m / Nw} dx \right| = \left| A \sum_{n=1}^N R_n e^{j2\pi x m / N} \right|$$

Para uma seqüência de resíduos quadráticos, a amplitude da pressão nos lóbulos será a mesma e dada por

$$|p_m| \propto \sqrt{N}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

12. PERIODICIDADE

Uma seqüência completa determina um *período* do difusor. A Figura 27 ilustra 2 períodos (e como dois períodos adjacentes se combinam) de um difusor de resíduos quadráticos baseado no número primo 17.

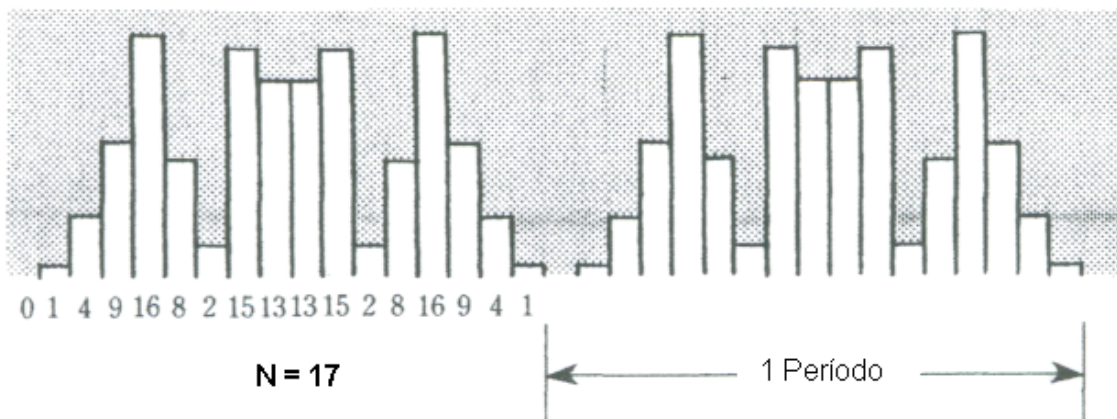


Figura 27 Dois períodos de um difusor de resíduos quadráticos gerado com o número primo 17 (Fonte: F.A. Everest [12]).

O comprimento do período, Nw , é freqüentemente determinante do desempenho do difusor. Quando muito estreito, então, na freqüência de projeto, haverá somente um grande lóbulo na resposta polar. Uma outra conseqüência do período estreito, é que nas primeiras freqüências múltiplas da freqüência de projeto, o difusor se comporta como uma superfície plana. Este comportamento é ilustrado na Figura 28, a qual apresenta o espalhamento gerado por difusores com períodos de diferentes comprimentos. Ambos são QRDs com $N = 7$, e freqüência de projeto de 500 Hz. A largura w dos poços é de 3 e 9 cm, o que fornece períodos com comprimento de 21 e 63 cm, respectivamente. Para uma comparação honesta, foi de 3 o número de períodos do difusor com menor largura de poço, de tal forma que a largura total dos dois difusores fosse a mesma e igual a 63 cm. Para o difusor com largura de poços mais estreita, à direita da figura, o limite inferior de espalhamento é determinado pelo comprimento do período e não pela maior profundidade de poço, pois, em 1kHz, o desempenho deste difusor é praticamente o mesmo de uma superfície plana de mesmas dimensões.

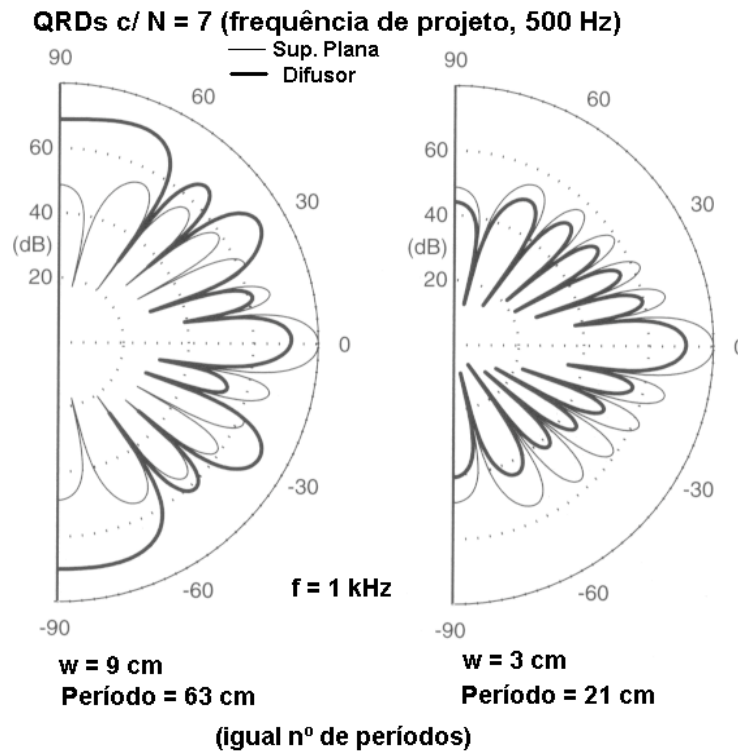


Figura 28: Diagramas polares em 1 kHz de dois QRDs com $N=7$, de mesma largura total e frequência de projeto de 500 Hz, comparativamente com uma superfície plana de mesmas dimensões (Fonte: T.J. Cox e P. D'Antonio [4]).

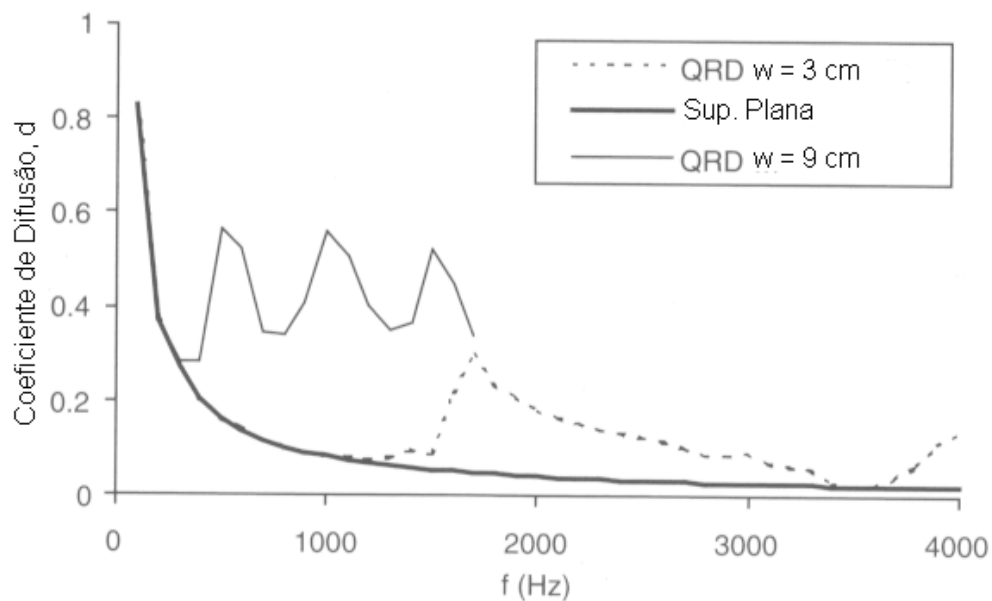


Figura 29: Variação do coeficiente de difusão de dois QRDs em função da frequência, comparativamente com uma superfície plana de mesmas dimensões. A frequência de projeto dos dois difusores é 500 Hz (Fonte: T.J. Cox e P. D'Antonio [4]).

A Figura 29 apresenta a variação do coeficiente de difusão destes QRDs em função da frequência, comparativamente com uma superfície plana de mesmas dimensões. O QRD com largura de poços mais estreita só começa a espalhar mais do que a superfície plana a partir de 1,5 kHz — três vezes a frequência de projeto. Esta é aproximadamente a frequência onde aparece o primeiro lóbulo lateral na resposta polar, e portanto é a frequência a partir da qual um espalhamento mais significativo em direções oblíquas começa a ocorrer. Já para o QRD com maior largura de poços, o primeiro lóbulo lateral na resposta polar aparece abaixo da frequência de projeto e portanto espalhamento significativo já começa a ocorrer a partir da frequência de projeto de 500 Hz.

13. OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DE QRDS

Para que um QRD desempenhe otimamente, deverá haver periodicidade. Os lóbulos são gerados pela periodicidade da superfície. Sem periodicidade, tudo o que as fórmulas de projeto garantem é o mesmo nível de espalhamento em certas direções. Este fato é ilustrado na Figura 30, que compara o espalhamento gerado por um difusor com diferentes períodos, onde se encontram indicadas as direções que apresentam níveis similares de espalhamento. Observa-se nesta figura que os lóbulos laterais se estreitam à medida que o número de períodos aumenta, o que gera espalhamento irregular, pois há um grande número de posições angulares sem espalhamento. Assim, um projeto otimizado é aquele que atenda aos seguintes requisitos básicos:

- Um número relativamente pequeno de períodos, em torno de 5, para garantir a periodicidade necessária, e com lóbulos de difração não muito estreitos.
- Período de grande comprimento para assegurar um grande número de lóbulos laterais, o que implica num valor de N relativamente grande, o que é preferível, pois largura de poços w grande pode produzir reflexões especulares em altas frequências.
- Pode parecer que a largura de poços w deva ser a menor possível para que o difusor cubra uma ampla faixa de frequências. Porém, há outras considerações que limitam a estreiteza dos poços: 1) custo e dificuldade de fabricação e 2) absorção devido a efeitos viscosos. Conseqüentemente a recomendação é adotar a largura dos poços w entre 2,5 e 5 cm.
- Normalmente, por questões de espaço, é de interesse limitar a profundidade dos poços do difusor. Para uma dada profundidade máxima, d_{max} , a frequência mínima de atuação do QRD, f_{min} , (frequência de projeto), é dada por $f_{min} = cS_{max} / 2Nd_{max}$. Então a razão entre o maior número da seqüência, S_{max} , e o número primo gerador da seqüência, N ; ou seja S_{max} / N , determina o limite de baixa frequência de atuação do QRD. Por exemplo: $N = 7$, $S_{max} / N = 4/7$; $N = 13$, $S_{max} / N = 12/13$. Conseqüentemente, um QRD com $N = 7$, fornecerá um limite de baixa frequência aproximadamente uma oitava abaixo do QRD com $N = 13$. No sentido de reduzir este limite mantendo N grande, o que é desejável, é possível manipular a seqüência, introduzido um deslocamento de fase constante, m , na fórmula recursiva; ou seja:

$$s_n = (n^2 + m) \text{ mod } uoN, m \text{ inteiro constante.}$$

Considerando dois QRDs com $N = 13$, obtém-se:

$$m = 0, s_n = \{0,1,4,9,3,12,10,10,12,3,9,4,1\}, S_{max} / N = 12/13,$$

$$m = 4, s_n = \{4,5,8,0,7,3,1,1,3,7,0,8,5\}, S_{max} / N = 8/13.$$

Conseqüentemente, a frequência de projeto foi rebaixada de $1/3$ com a introdução da fase m . No entanto, convém lembrar que esta melhoria de desempenho em baixas frequências poderá não ocorrer caso o comprimento do período seja curto.

- Nas *frequências críticas* dadas por mNf_{min} , com $m = 1, 2, 3$, etc., o QRD se comporta como uma superfície plana pois os poços irradiam em fase nestas frequências. Estas são frequências para as quais os comprimentos de onda são múltiplos inteiros da frequência de projeto. A Figura 30 mostra o espalhamento de um QRD na frequência crítica de 3,5 kHz, quando o QRD se comporta como uma superfície plana. A fim de evitar-se estas frequências críticas, é necessário que a primeira frequência crítica esteja acima da frequência máxima de atuação do QRD, o que requer $N \gg c / 2wf_{min}$.

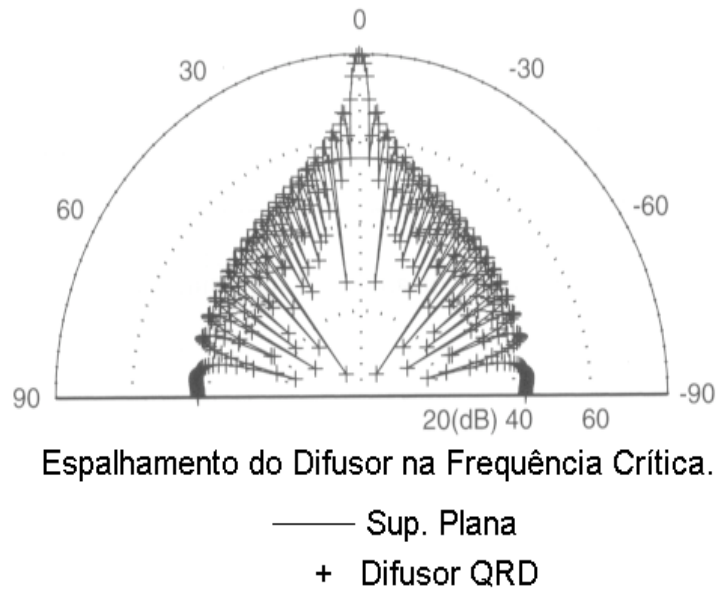


Figura 30: Espalhamento de um QRD na frequência crítica de 3,5 kHz (Fonte: T.J. Cox e P. D'Antonio [4]).

14. OUTRAS SEQUÊNCIAS

14.1. Seqüências de Comprimento Máximo, MLS

Schroeder [13] iniciou seus trabalhos na área de difusores estudando o espalhamento com a seqüência de comprimento máximo MLS ("maximum-length sequence"). Um sinal MLS é um sinal aparentemente aleatório, obtido de certas seqüências binárias compostas de 0 e 1. O sinal MLS é utilizado na criação de ruído pseudo-aleatório e apresenta espectro de potência plano. Esta característica é que torna a MLS atraente na geração de perfis de difusores.

Uma MLS de ordem n é periódica com período N dado por $N = 2^n - 1$. Existem diferentes MLS de mesma ordem. A Figura 31 ilustra a seção transversal de um difusor formado com uma MLS com período $N = 7$, por meio da seqüência $\{1, 1, 0, 1, 0, 0, 0\}$.

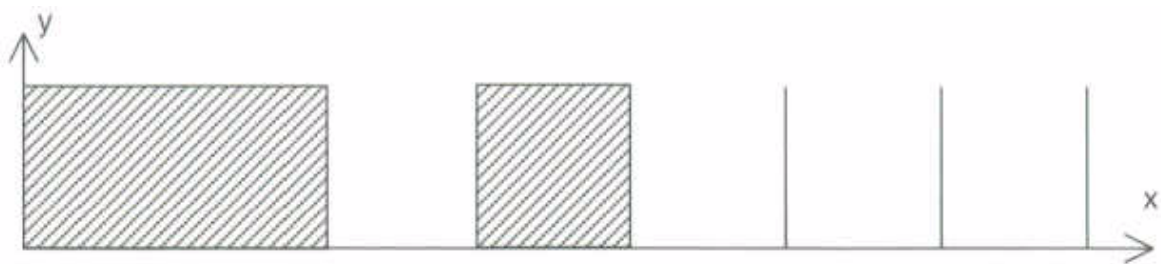


Figura 31: Seção transversal de um difusor formado com seqüência de comprimento máximo, MLS, com período $N = 7$ (Fonte: T.J. Cox e P. D'Antonio [4]).

Quando, na frequência de projeto, a profundidade dos poços é igual a $1/4$ do comprimento de onda, os coeficientes de reflexão R_n serão $\{1, 1, -1, 1, -1, -1, -1\}$. Substituindo estes coeficientes de reflexão na solução de Fraunhofer/Fourier, resulta, para a pressão sonora espalhada no m -ésimo lóbulo

$$|p_m| \approx \left| A \sum_{n=1}^N R_n e^{j2\pi nm/N} \right| = A, \quad m = 0, \pm N, \pm 2N, \dots$$

$$= A\sqrt{N+1}, \quad \text{outros casos.}$$

Ou seja, os lóbulos laterais ($|m| > 0$ & $|m| < N$) têm o mesmo nível, sendo que o lóbulo principal de ordem zero ($m = 0$) está desnivelado de $-10\log(N+1)$. A Figura 32 apresenta o espalhamento, na frequência de projeto (profundidade do poço igual a $1/4$ do comprimento de onda nesta frequência), de um difusor MLS com período $N = 7$ comparativamente com uma superfície plana. Na frequência de projeto, se formam 5 lóbulos, com o lóbulo central desnivelado de $-10\log(8) = -9$ dB. Uma oitava acima da frequência de projeto, quando o comprimento de onda é igual à metade da profundidade do poço, o difusor se comporta como uma superfície plana, com todas as ondas sendo irradiadas com a mesma fase, sendo então esta a frequência crítica do difusor. Conseqüentemente, o difusor MLS só é útil numa banda de oitava. Esta é uma limitação do difusor MLS.

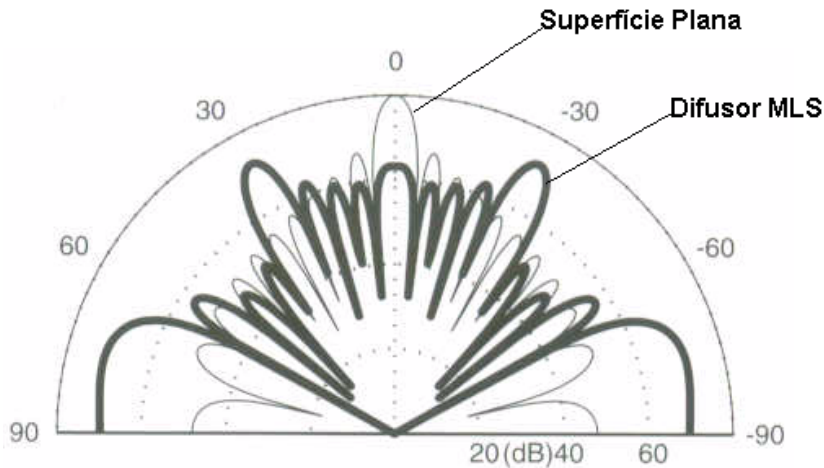


Figura 32: Espalhamento, na frequência de projeto, de um difusor MLS com 5 períodos e com $N = 7$, comparativamente com uma superfície plana (Fonte: T.J. Cox e P. D'Antonio [4]).

14.2. Seqüências de Raízes Primitivas

A seqüência de raiz primitiva ("primitive-root sequence") é obtida por meio de

$$s_n = r^n \text{ modulo } N, \quad n = 1, 2, \dots, N-1$$

onde *modulo* indica o resto não negativo, N é o número primo gerador da seqüência, r é a menor raiz primitiva de N , sendo que o difusor terá $N - 1$ poços.

Uma raiz primitiva é aquela para a qual a seqüência S_N gerada é única. Por exemplo $N = 7$ tem 3 como raiz primitiva, e assim $S_7 = \{3, 2, 6, 4, 5, 1\}$, que é uma seqüência que contém todos os inteiros entre 1 e $N - 1$.

O difusor perfilado com base numa seqüência de raízes primitivas ("primitive-root difusor" PRD), tem como característica a redução da energia refletida na direção especular, além é claro, de gerar lóbulos de mesma energia em outras direções. Assim como ocorre com o QRD, o PRD apresenta estas características em frequências múltiplas da frequência de projeto. Nestas frequências, a amplitude do som refletido na direção especular é reduzida de $20\log(N-1)$ com relação à superfície plana. Deve-se observar no entanto, que qualquer superfície com poços, reduz a energia refletida na direção especular, contanto que a profundidade dos poços seja da ordem de grandeza do comprimento de onda na frequência de interesse. Quando uma seqüência de profundidades é introduzida na superfície, ocorre interferência destrutiva entre as ondas irradiadas pelos poços.

A reflexão especular de um PRD se reduz à medida que N aumenta. Este fato é demonstrado na Figura 33 onde se compara o campo espalhado de dois PRDs com uma superfície plana. Um grande número de poços, entre 20 e 30, é necessário para que uma redução significativa comece a ocorrer na direção da reflexão especular.

A pressão sonora espalhada no m -ésimo lóbulo é aproximadamente dada por

$$|p_m| \approx \left| A \sum_{n=1}^N R_n e^{j2\pi nm/N} \right| = A, \quad m = 0, \pm N, \pm 2N, \dots$$

$$= A\sqrt{N}, \quad \text{outros casos.}$$

14.3. DIFUSORES MULTIDIMENSIONAIS

Os difusores apresentados até aqui foram do tipo de único plano, ou difusores 1D. Estes difusores geram espalhamento em um hemi-disco, se comportando como superfícies planas em direções ortogonais. Embora estes difusores sejam os mais comuns, em certas situações há necessidade de se recorrer a difusores que gerem espalhamento hemisférico. Estes difusores podem ser formados combinando um difusor de Schroeder da direção x, com outro na direção y, e portanto haverá lóbulos de mesma energia em uma hemisfera. A Figura 34 apresenta um exemplo de uma superfície assim formada.

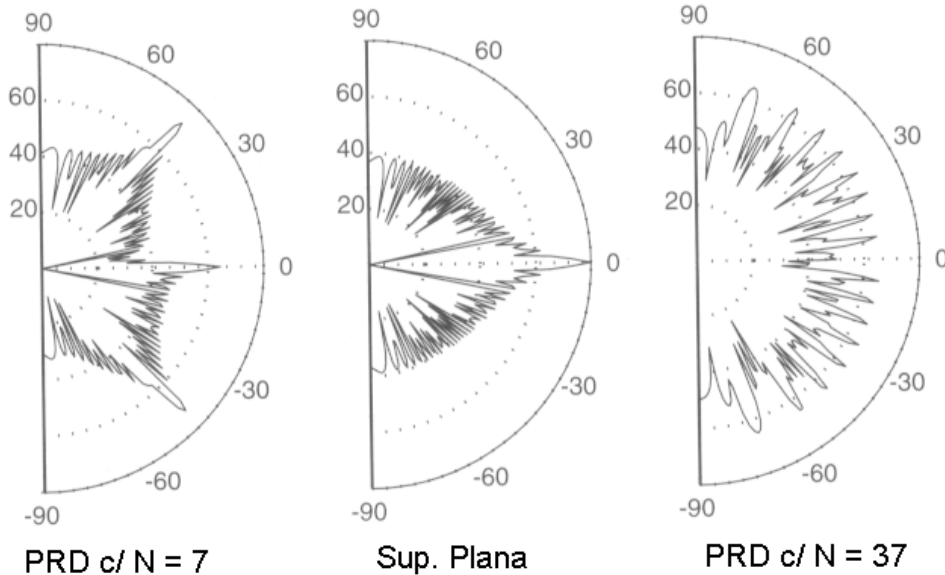


Figura 33: Espalhamento de dois PRDs e de superfície plana (Fonte: T.J. Cox e P. D'Antonio [4]).

O difusor 2D produz espalhamento em diversos planos. Um difusor 2D de dimensões $Nw \times Nw$ tem o quadrado do número de lóbulos do difusor 1D de comprimento Nw . Ocorrerá porém, redução de energia dos lóbulos do difusor 2D de $10 \log(m)$ quando comparado com o difusor 1D com m lóbulos.

A seqüência para formação de um QRD em 2D é dada por

$$s_{n,m} = (n^2 + m^2) \bmod ul0N$$

onde n e m são inteiros, e que fornecem a profundidade do poço de ordem (n, m) .

Similarmente, um PRD em 2D poderá ser formado por meio da seqüência

$$s_{n,m} = (r^n + r^m) \bmod ul0N.$$

É também possível adotar uma seqüência de resíduos quadráticos em uma direção e uma seqüência de raízes primitivas na direção ortogonal, contanto que ambas sejam geradas pelo mesmo número primo N , muito embora não tenham ainda sido reveladas as vantagens deste procedimento.

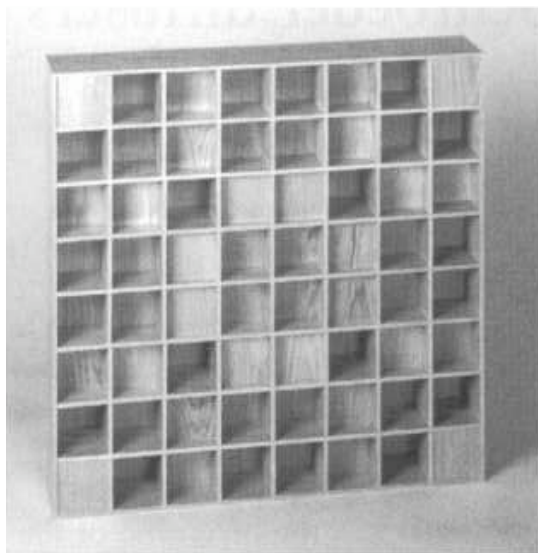


Figura 34: Difusor de Schroeder em 2D.

A versão 2D de um QRD com (2×2) períodos, baseado em $N = 7$, é apresentada na Figura 35. Nesta concepção, os índices n e m iniciaram-se em 4, com objetivo de colocar o 0 no centro de cada período. Como a seqüência é periódica, é possível iniciar os índices n e m a partir de qualquer número da seqüência. Difusores 2D geralmente apresentam menor eficiência em baixas freqüências quando comparados com difusores 1D, pois a razão s_{\max} / N tende a 1 nos dispositivos 2D.

O difusor da Figura 35 também ilustra o fato que diferentes ordenamentos podem ser utilizados com os números da seqüência. A seguinte seqüência aparece na diagonal do período $(1, 1)$ do difusor $\{4, 1, 2, 0, 1, 1, 4\}$, enquanto que a seqüência original é $\{0, 1, 4, 2, 2, 4, 1\}$. Observa-se que foram utilizados nesta diagonal, cada quarto elemento da seqüência original. Esta nova seqüência tem as mesmas propriedades de Fourier da seqüência original, devido à *propriedade de deslocamento* ("shift property") das seqüências de resíduo quadrático. Isto implica em boa difusão não somente em direções ortogonais, como também nas direções das diagonais do difusor.

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 6 | 3 | 2 | 3 | 6 | 4 | 4 | 6 | 3 | 2 | 3 | 6 | 4 |
| 6 | 1 | 5 | 4 | 5 | 1 | 6 | 6 | 1 | 5 | 4 | 5 | 1 | 6 |
| 3 | 5 | 2 | 1 | 2 | 5 | 3 | 3 | 5 | 2 | 1 | 2 | 5 | 3 |
| 2 | 4 | 1 | 0 | 1 | 4 | 2 | 2 | 4 | 1 | 0 | 1 | 4 | 2 |
| 3 | 5 | 2 | 1 | 2 | 5 | 3 | 3 | 5 | 2 | 1 | 2 | 5 | 3 |
| 6 | 1 | 5 | 4 | 5 | 1 | 6 | 6 | 6 | 1 | 5 | 4 | 5 | 1 |
| 4 | 6 | 3 | 2 | 3 | 6 | 4 | 4 | 4 | 6 | 3 | 2 | 3 | 6 |
| 4 | 6 | 3 | 2 | 3 | 6 | 4 | 4 | 6 | 3 | 2 | 3 | 6 | 4 |
| 6 | 1 | 5 | 4 | 5 | 1 | 6 | 6 | 1 | 5 | 4 | 5 | 1 | 6 |
| 3 | 5 | 2 | 1 | 2 | 5 | 3 | 3 | 5 | 2 | 1 | 2 | 5 | 3 |
| 2 | 4 | 1 | 0 | 1 | 4 | 2 | 2 | 4 | 1 | 0 | 1 | 4 | 2 |
| 3 | 5 | 2 | 1 | 2 | 5 | 3 | 3 | 5 | 2 | 1 | 2 | 5 | 3 |
| 6 | 1 | 5 | 4 | 5 | 1 | 6 | 6 | 6 | 1 | 5 | 4 | 5 | 1 |

Figura 35: QRD em 2D, com $N = 7$ e (2×2) períodos, com destaque de um dos períodos (Fonte: T.J. Cox e P. D'Antonio [4]).

A Figura 36 apresenta o espalhamento hemisférico, na freqüência igual a quatro vezes a freqüência de projeto, de um QRD em 2D com $N = 7$, comparativamente com uma superfície plana. O espalhamento hemisférico da superfície plana é conhecido como "banana polar".

Finalmente cabe tentar elucidar a contradição de projetar-se e avaliar-se as características do espalhamento de difusores no campo afastado, quando os ouvintes estão normalmente no campo próximo do difusor. Esta abordagem não é tão limitadora como aparenta ser, pois há evidências de

que um difusor capaz de criar boa dispersão no campo afastado, também o fará no campo próximo. No campo próximo, as diferenças de trajetórias de diferentes pontos da superfície até o observador controlam o espalhamento, fazendo com que apareçam um grande número de mínimos e máximos na resposta polar. Em realidade, os diagramas polares no campo próximo de diferentes difusores apresentam características estatísticas similares. Alguns estudos compararam difusores com arranjos periódicos e aperiódicos, tanto subjetiva como objetivamente, usando ouvintes em posições realistas no campo próximo. Observou-se então que os arranjos aperiódicos, que geram mais dispersão no campo afastado do que os arranjos periódicos, se mostraram difusores mais eficientes no campo próximo. Conseqüentemente, assume-se que difusores de Schroeder, que criam boa dispersão no campo afastado, serão também eficazes no campo próximo.

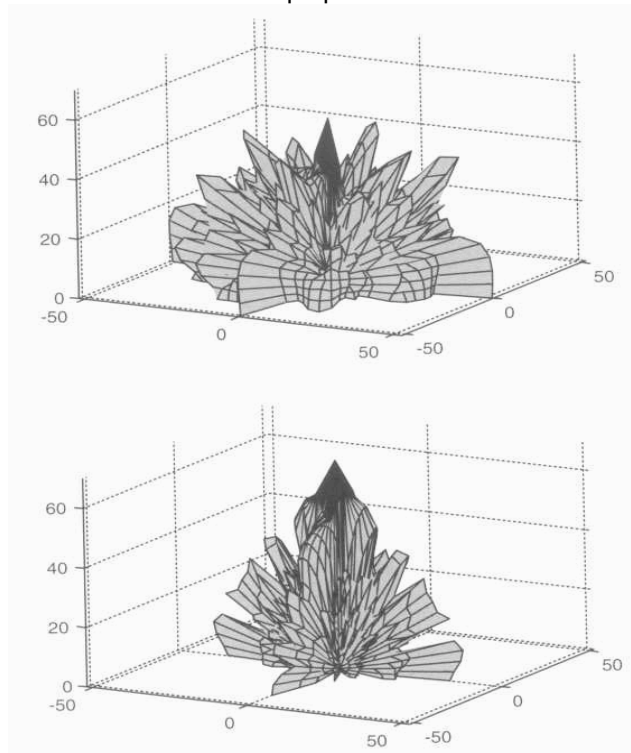


Figura 36: Empalhamento de difusor QRD em 2D com $N = 7$ (em cima), comparativamente com uma superfície plana (embaixo) (Fonte: T.J. Cox e P. D'Antonio [4]).

15. DIFUSÃO NAS SALAS MODERNAS

A Figura 37 apresenta algumas salas modernas, com destaque para o tratamento de difusão sonora.

- **Beethovenhalle**, Bonn, 1959, TR 1,7 s (*arquiteto S. Wolske; consultores acústicos Meyer e Kuttruff*). Tratamento de difusão no teto por meio de uma densa combinação de hemisferas, pirâmides e cilindros truncados, projetando-se em torno de 30 cm. Paredes laterais recobertas com cilindros verticais atrás de telas acusticamente transparentes. Sala com o mais explícito tratamento de difusão, o que gerou absorção indesejada e o um tempo de reverberação de apenas 1,7 s.
- **Phillharmonie**, Berlin, 1963, TR 2,0 s (*arquiteto H. Scharoun; consultor acústico Cremer*). Sala com terraços ("vineyard terraces"), que oferecem muitos planos refletoras. O teto cilíndrico em forma de tenda, e difusores piramidais nas partes mais baixas do teto promovem a necessária difusão. As pirâmides possuem aberturas de tal forma a funcionarem também como ressoadores de Helmholtz, a fim de limitar a reverberação de baixa frequência.
- **Neues Gewandhaus**, Leipzig, 1981, TR 2,0 s. Substituto do aclamado Gewandhaus original, bombardeado num raid aéreo em 1944. O novo Gewandhaus, com terraços, tem teto formado por painéis difusores cilíndricos.
- **Michael Fowler Centre**, Wellington, 1983, TR 2,0 s (*arquitetos Warren e Mahoney; consultores acústicos Marshal e Hyde*). Esta foi a primeira sala a usar difusores de Schroeder (QRDs) nos painéis do teto e parte superior das paredes. Estudos subjetivos indicavam que a difusão se torna

efetiva subjetivamente a partir dos 350 Hz, aproximadamente. Daí então a frequência de projeto de 500 Hz dos difusores utilizados nesta sala.

- **Kyoto Concert Hall**, Kyoto, 1995, TR 2,0 s. (*arquiteto Arata Isozaki Atelier, consultoria acústica Nagata Acoustics*). Projetado como um “shoe-box” típico, com teto e parte inferior das paredes revestidas com elementos difusores testados na escala de 1:10.
- **Walt Disney Concert Hall**, Los Angeles, 2003, TR 2,0 s. (*arquiteto Frank O.Gehry, consultoria acústica Nagata Acoustics*). Com um custo final de US\$ 274 milhões, o prédio que abriga esta sala é todo em aço inoxidável. Sala com tetos formados por grandes superfícies convexas, o que confere alta difusão devido às boas características de espalhamento de grandes superfícies cilíndricas.



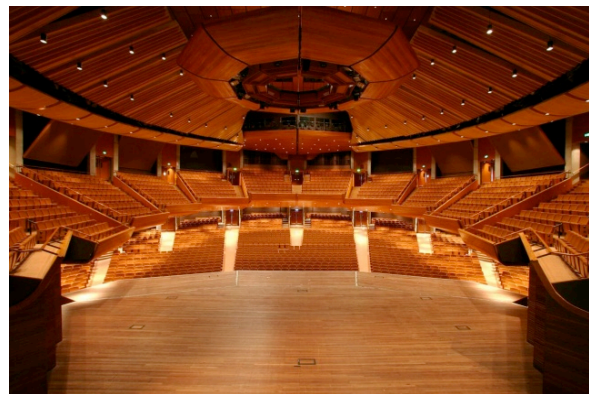
Beethovenhalle, Bonn, 1959, TR 1,7 s.



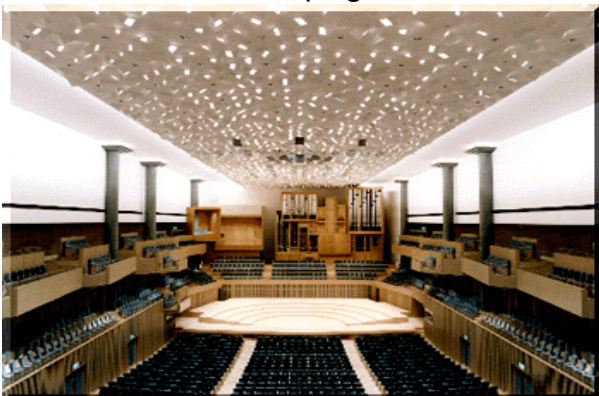
Philharmonie, Berlin, 1963, TR 2,0 s.



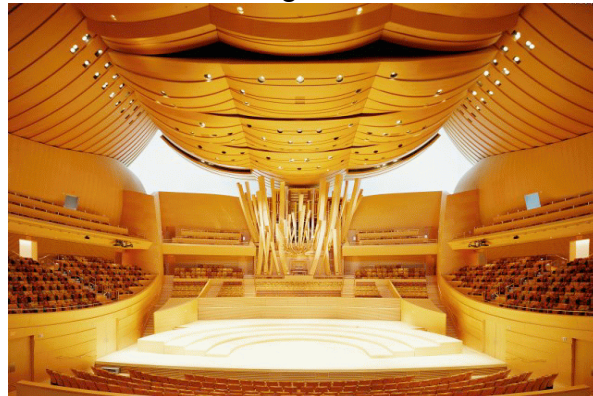
N. Gewandhaus, Leipzig, 1981, TR 2,0 s.



M. Fowler, Wellington, 1983, TR 2,0 s.



Kyoto Concert Hall, 1995, TR 2,0 s.



W. Disney Hall, LA, 2003, TR 2,0 s.

Figura 37: Algumas salas modernas com destaque para o tratamento de difusão sonora.

16. COMENTÁRIO FINAL

O estado da arte de difusores encontra-se atualmente em estágio bastante avançado. No entanto ainda relativamente pouco se sabe sobre os efeitos psicoacústicos da difusão, bem como até que ponto a qualidade acústica da sala dela depende.

17. REFERÊNCIAS

- [1] T. Yokota, S. Sakamoto and H. Tachibana, "Visualization of sound propagation and scattering in rooms", Institute of Industrial Science, University of Tokyo.
- [2] F.R. Fricke, "Visual assessments of the surface diffusion properties of concert halls", *Applied Acoustics*, **60**(2), 253-261, 2000.
- [3] AES-4id-2001, "AES information document for room acoustics and sound reinforcement systems – characterization and measurement of surface scattering uniformity", *J. Audio Eng. Soc.*, **49**(3), 149-165, 2001.
- [4] T.J. Cox and P. D'Antonio, *Acoustic Absorbers and Diffusers. Theory, Design and Application*, Spon Press, London, 2004.
- [5] E. Mommertz and M. Vorlander, "Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients", *Applied Acoustics*, **60**(2), 187-199, 2000.
- [6] ISO 17497-1: Acoustics Measurement of the sound scattering properties of surfaces – Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room.
- [7] T.J. Hargreaves, T.J. Cox, Y.W. Lam and P. D'Antonio, "Surface diffusion coefficients for room acoustics: free field measures", *J. Acoust. Soc. Am.*, **108**(4), 1710-1720, 2000.
- [8] J.Y. Jeon, S.C. Lee and M. Vorlander, "Development of scattering surfaces for concert halls", *Applied Acoustics*, **65**, 341-355, 2004.
- [9] T.J. Cox and P. D'Antonio, "Contrasting surface diffusion and scattering coefficients", *Proc. 17th ICA*, 6B.09.01, Italy, 2001.
- [10] T.J. Cox and P. D'Antonio, "Engineering art: the science of concert hall acoustics", *Interdisciplinary Science Reviews*, **26**(2), 119-129, 2003.
- [11] P. D'Antonio and T.J. Cox, "Diffusor applications in rooms", *Applied Acoustics*, **60**(2), 113-142, 2000.
- [12] F.A. Everest, *The Master Handbook of Acoustics*, TAB Books, Imprint of McGraw-Hill, New York, 1994.
- [13] M.R. Schroeder, "Diffuse sound reflection by maximum-length sequences", *J. Acoust. Soc. Am.*, **57**(1), 149-150, 1975.