



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

Estudo numérico de painéis difusores acústicos

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

Autor

Marcos Alberto Carvalho Afonso

Orientadores

Prof. Luís Manuel Cortesão Godinho

Prof. Diogo Manuel Rosa Mateus

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

Coimbra, Janeiro, 2014

AGRADECIMENTOS

O meu primeiro agradecimento é dirigido aos Professores Luís Godinho e Diogo Mateus pela disponibilidade, partilha de conhecimentos e pela orientação dada no decorrer deste trabalho. Quero também agradecer a disponibilidade do Hélder Gonçalves no apoio à resolução de problemas que foram surgindo bem como a partilha de informação indispensável ao desenvolvimento do tema.

Em segundo lugar um agradecimento muito querido aos meus pais, irmão e demais família. A sua dedicação, apoio e preocupação fizeram com que fosse possível atingir este nível de formação.

Aos amigos de sempre e para sempre, da Sociedade Filarmónica Avelarense, da JAVE – Associação de Jovens de Avelar e do grupo Faixa-Branca e a todos aqueles que acabam por ser parte importante da minha vida vai um agradecimento especial por muito terem contribuído para aquilo que faz de mim o que sou hoje.

Aos colegas que ao longo destes anos seguiram, por mais ou menos tempo, o meu percurso académico um obrigado pelo companheirismo e pelos bons momentos vividos. Para vocês deixo estas últimas palavras: “I can see clearly now...”.

RESUMO

O uso de painéis difusores acústicos no projeto de espaços com maiores exigências acústicas, como estúdios ou salas de espetáculos, é cada vez maior e como tal o seu estudo tem ganho importância. Estes difusores acústicos servem sobretudo para manter uma acústica das salas adequada, sem absorções excessivas e espalhando o som mais uniformemente mas, ao mesmo tempo, eliminando defeitos acústicos como ecos ou zonas sombra. A definição de configurações adequadas para estes painéis é um tema atual e que tem merecido a atenção de muitos investigadores a nível internacional.

Esta dissertação tem como objetivo a aplicação de ferramentas numéricas para avaliar as características acústicas deste tipo de sistemas nomeadamente pelo cálculo do coeficiente de difusão, que é um dos principais indicadores para definir a capacidade difusora de um determinado painel e ainda pela obtenção de gráficos de resposta espacial para diferentes geometrias.

Este trabalho enquadrou-se no âmbito do projeto FCOMP-01-0202-FEDER-023123 (FunctionalStone), financiado pelo QREN através do Programa Operacional Factores de Competitividade.

ABSTRACT

The use of acoustic diffusers panels in the design of spaces with larger acoustic requirements such as studios or concert halls, is increasing and therefore its study has become increasingly important. These acoustic diffusers mainly serve to maintain the proper acoustic in the room without excessive sound absorption and evenly scattering but at the same time eliminating defects such as echo or acoustic shadow areas. The definition of appropriate settings for these panels is a current theme which has attracted the attention of many researchers internationally.

This thesis aims to apply numerical tools to evaluate the acoustic characteristics of this type of systems as the calculation of the diffusion coefficient, which is a main indicator to define the diffusive capacity of a given panel and also by obtaining spatial reply graphs for different geometries.

This study is framed as part of the FCOMP-01-0202-FEDER-023123 (FunctionalStone) project, funded by QREN through the “Programa Operacional Factores de Competitividade”.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE QUADROS	viii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura da Dissertação	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Contextualização Histórica	4
2.2 Difusão Sonora.....	6
2.2.1 Princípio de Huygen	6
2.2.2 Dispersão Temporal e Espacial	10
2.2.3 Medição da Resposta Polar.....	12
2.3 Difusores de Schroeder	15
2.3.1 Periodicidade	18
2.3.2 Outras Sequências	21
2.3.3 Difusores Multidimensionais.....	22
2.4 Modelos de Previsão.....	25
3 ESTUDO DE PAINÉIS DIFUSORES ACÚSTICOS.....	26
3.1 Enquadramento	26
3.2 Método dos Elementos Fronteira (BEM).....	26
3.3 Determinação do Coeficiente de Difusão Normalizado	28
3.4 Adaptação do Modelo de Elementos Fronteira.....	29
3.4.1 Comparação com A1-LF	29
4 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO	34
4.1 Enquadramento	34
4.2 Estudo de A1-LF.....	34
4.2.1 Variação da Posição de Recetores	35
4.2.2 Variação da Posição de Fonte.....	35
4.2.3 Variação do Ângulo de Incidência	36

4.3	Estudo de PD	37
4.4	Estudo de QRD com N=7	40
4.5	Estudo de QRD com N=11	43
4.6	Síntese dos Resultados.....	46
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
	ANEXO A – Estudo da Geometria A1-LF.....	A-1
	ANEXO B – Estudo da Geometria PD.....	B-1
	ANEXO C – Estudo da Geometria QRD7	C-1
	ANEXO D – Estudo da Geometria QRD11	D-1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Princípio de Huygen aplicado a uma superfície plana com incidência de uma onda sonora normal a esta.....	7
Figura 2.2 – Princípio de Huygen para uma onda plana refletida de um difusor de Schroeder simplificado.....	8
Figura 2.3 – Princípio de Huygen aplicado a uma superfície híbrida.....	8
Figura 2.4 – Onda plana refletida de uma superfície cilíndrica.....	9
Figura 2.5 – Medição da resposta temporal e espacial da dispersão gerada por reflexão.....	9
Figura 2.6 – Tempo e frequência de resposta de dispersão a partir de um semicilindro.....	10
Figura 2.7 – Medição das respostas temporal e de frequência para uma superfície plana (cima) e para um difusor (baixo)	11
Figura 2.8 – Dispersão a partir de um difusor unidimensional (esquerda) e um difusor bidimensional (direita)	12
Figura 2.9 – Sistemas de medição de dispersão.....	13
Figura 2.10 – Resposta polar 3D a partir de um difusor 2D.....	13
Figura 2.11 – Secção transversal de um QRD com $N=7$	14
Figura 2.12 – Dispersão a partir de um difusor de Schroeder (esquerda) e uma superfície plana (direita)	15
Figura 2.13 – Dois períodos de um difusor QRD com $N=17$	17
Figura 2.14 – Dispersão de um QRD com $N=7$ a 3000Hz para um, seis e 50 períodos.....	18
Figura 2.15 – Dispersão a 1000Hz de dois QRD com poços de 9cm (esquerda) e 3cm (direita) de largura.....	19
Figura 2.16 – Espectro do coeficiente de difusão.....	19
Figura 2.17 – Secção transversal de um MLS com $N=7$	20
Figura 2.18 – Dispersão a partir de um $PRD N=7$ (esquerda), uma superfície plana (centro) e um $PRD N=37$ (direita)	21
Figura 2.19 – Difusores de Schroeder 1D (esquerda) e 2D (direita)	22
Figura 2.20 – Matriz 2x2 para um difusor QRD com $N=7$	23
Figura 2.21 – Dispersão hemisférica de um QRD com $N=7$ (esquerda) e de uma superfície plana (direita)	23
Figura 3.1 – Geometria de um difusor A1-LF.....	29
Figura 3.2 – Comparação entre coeficientes de difusão para um A1-LF.....	31
Figura 3.3 – Comparação entre coeficientes de difusão para cinco A1-LF.....	31
Figura 3.4 – Dispersão polar para 5 A1-LF aos 1000Hz.....	32

Figura 3.5 – Dispersão polar para 5 A1-LF aos 1000Hz.....	32
Figura 4.1 – Geometria de um difusor A1-LF.....	33
Figura 4.2 – Resposta espacial com recetores a 1m (esquerda) e 50m (direita).....	35
Figura 4.3 – Resposta espacial com fonte a 60m (esquerda) e 1000m (direita).....	36
Figura 4.4 – Resposta espacial para 5 A1-LF com incidência a 30° (esquerda) e 60° (direita).....	36
Figura 4.5 – Geometria de um difusor PD.....	37
Figura 4.6 – Geometria de um difusor PD M1.....	38
Figura 4.7 – Coeficiente de difusão para cinco difusores PD M1 em comparação com PD e uma superfície plana.....	39
Figura 4.8 – Geometria de um difusor QRD com N=7.....	40
Figura 4.9 – Geometria de um difusor QRD7 M11.....	41
Figura 4.10 – Coeficiente de difusão para cinco difusores QRD7 M11 em comparação com QRD7 e uma superfície plana.....	42
Figura 4.11 – Geometria de um difusor QRD com N=11.....	43
Figura 4.12 – Geometria de um difusor QRD11 M13.....	44
Figura 4.13 – Coeficiente de difusão para cinco difusores QRD11 M13 em comparação com QRD11 e uma superfície plana.....	45
Figura 4.14 – Coeficiente de difusão normalizado para as geometrias analisadas.....	46

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Sequências de resíduos quadráticos.....	16
Quadro 2.2 – Modelos para previsão de dispersão em superfícies dispostos por ordem de exatidão.....	24
Quadro 3.1 – Coeficientes de difusão para um A1-LF.....	29
Quadro 3.2 – Coeficientes de difusão para cinco A1-LF.....	30
Quadro 4.1 – Coeficientes de difusão para a geometria PD.....	37
Quadro 4.2 – Coeficientes de difusão para a geometria PD M1 em comparação com PD.....	38
Quadro 4.3 – Coeficientes de difusão para a geometria QRD7.....	40
Quadro 4.4 – Coeficientes de difusão para a geometria QRD7 M11.....	41
Quadro 4.5 – Coeficientes de difusão para a geometria QRD11.....	43
Quadro 4.6 – Coeficientes de difusão para a geometria QRD11 M13.....	44
Quadro 4.7 – Coeficientes de difusão normalizados médios para as geometrias analisadas...	46
Quadro A.1 – Resposta espacial para um difusor A1-LF com posição de fonte a 100 metros e recetores a 1 e 2 metros.....	A-1
Quadro A.2 – Resposta espacial para um difusor A1-LF com posição de fonte a 100 metros e recetores a 5 e 10 metros.....	A-2
Quadro A.3 – Resposta espacial para um difusor A1-LF com posição de fonte a 100 metros e recetores a 25 e 50 metros.....	A-3
Quadro A.4 – Resposta espacial para um difusor A1-LF com posição de recetores a 50 metros e fonte a 60 e 100 metros.....	A-4
Quadro A.5 – Resposta espacial para um difusor A1-LF com posição de recetores a 50 metros e fonte a 150 e 300 metros.....	A-5
Quadro A.6 – Resposta espacial para um difusor A1-LF com posição de recetores a 100 metros e fonte a 1000 metros.....	A-6
Quadro A.7 – Resposta espacial para um difusor A1-LF com ângulos de incidência de 30° e 45°.....	A-7
Quadro A.8 – Resposta espacial para um difusor A1-LF com ângulos de incidência de 60° e 90°.....	A-8
Quadro A.9 – Resposta espacial para cinco difusores A1-LF com ângulos de incidência de 30° e 45°.....	A-9
Quadro A.10 – Resposta espacial para cinco difusores A1-LF com ângulos de incidência de 60° e 90°.....	A-10
Quadro B.1 – Resposta espacial para um e cinco difusores PD.....	B-1

Quadro B.2 – Resposta espacial para um e cinco difusores PD M1.....	B-2
Quadro C.1 – Resposta espacial para um e cinco difusores QRD7.....	C-1
Quadro C.2 – Secções transversais das geometrias QRD7 M.....	C-2
Quadro C.3 – Coeficientes de difusão para as diferentes geometrias QRD7 M.....	C-3
Quadro C.4 – Resposta espacial para um e cinco difusores QRD7 M11.....	C-4
Quadro D.1 – Resposta espacial para um e cinco difusores QRD11.....	D-1
Quadro D.2 – Secções transversais das geometrias QRD11 M.....	D-2
Quadro D.3 – Coeficientes de difusão para as diferentes geometrias QRD11 M.....	D-3
Quadro D.4 – Resposta espacial para um e cinco difusores QRD11 M13.....	D-4

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

O estudo dos fenómenos de difusão sonora tem vindo a ser cada vez mais considerado e tem vindo a ganhar um interesse crescente, principalmente pela sua importância no projeto de espaços com necessidades acústicas específicas, tais como salas de espetáculo, salas de música ou estúdios de gravação e produção musical.

A forma como os espaços acústicos são concebidos tem vindo a mudar significativamente acompanhando as tendências arquitetónicas. Se antes do século XX, nos grandes palácios e salas de concerto, a estatuária, relevos e elevada ornamentação costumavam ser comuns e forneciam grandes superfícies de dispersão e, presumivelmente, um campo sonoro mais difuso, a utilização, no século XX, de superfícies mais lisas e com menos ornamentação, com o intuito de proporcionar uma arquitetura mais simplista, reduziu a capacidade difusora dos espaços e acentuou as reflexões diretas (Cox, 2004).

Atualmente, e com a descoberta e exploração dos fenómenos de difusão, a introdução de superfícies difusoras em salas de espetáculo é uma obrigatoriedade. Os conhecimentos obtidos nesta área permitem pois uma aplicação e distribuição adequada destes elementos. Um catalisador para este interesse foi o trabalho pioneiro de Schroeder sobre difusores, que criou algoritmos de modulação capazes de conceber painéis difusores de propriedades acústicas e desempenho conhecidos. Este conhecimento trouxe aos especialistas em acústica grandes avanços ao nível do dimensionamento e aperfeiçoamento de difusores, tais como o Quadratic Residue Diffuser (QRD), bem como na medição e quantificação de forma mais precisa do comportamento das superfícies difusoras.

Ao projetar uma sala com grande qualidade acústica um dos principais objetivos é obter um campo sonoro reverberante difuso. Assim, as salas de espetáculo constituem um dos espaços em que a necessidade de recorrer à aplicação de painéis difusores se torna mais evidente. Isto deve-se principalmente ao facto de nestes espaços decorrerem atividades em que a perceção do som, seja a palavra ou instrumentos musicais, é fundamental. Numa sala onde esteja a atuar uma orquestra é essencial garantir que todos os instrumentos musicais possam ser ouvidos de forma clara pelos espectadores, com o cuidado de garantir um tempo de reverberação não demasiado curto, para que estes não sejam ouvidos com excessiva clareza.

A garantia de uma boa dispersão do som, que assegure uma envolvimento sonora homogênea por toda a sala, pode então ser obtida recorrendo a difusores, que para além de garantirem a dispersão mencionada, não retiram energia ao campo sonoro. Torna-se pois evidente que para estes espaços a utilização de difusores é claramente mais vantajosa que o uso de material absorvente, uma vez que este último poderá “roubar” frequências específicas de alguns instrumentos, que dessa forma deixariam de ser perceptíveis pelo público. Para salas mais pequenas, como salas de teatro, em que a inteligibilidade da palavra é fundamental, deve-se procurar atingir um equilíbrio entre a colocação de material absorvente e difusor; o primeiro para controlar o tempo de reverberação e o segundo para evitar que as reflexões iniciais provoquem distorção.

Apesar dos avanços, continuam a existir questões sobre o verdadeiro valor e eficácia dos painéis difusores acústicos num espaço particular. Estas confusões podem, no entanto, ter surgido porque certos objetos que se parecem com difusores não têm, na verdade, as características de um difusor de som.

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo a aplicação de ferramentas numéricas com o intuito de avaliar as características acústicas de painéis difusores e definir configurações otimizadas que maximizem o seu desempenho. Para isso recorreu-se a uma programação em Matlab de modo a simular as condições de ensaio propostas para o estudo deste tipo de soluções.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação é composta por cinco capítulos que reúnem e analisam a informação relativa ao estudo de painéis difusores acústicos.

Neste primeiro capítulo, denominado “Introdução”, é descrito o tema abordado, identificados os objetivos do trabalho e exposta a estrutura do mesmo.

No segundo capítulo, “Revisão Bibliográfica” é apresentada uma pesquisa bibliográfica com uma contextualização histórica do tema em estudo (difusão sonora) e direcionada ao estudo de painéis difusores acústicos.

O terceiro capítulo, “Estudo de Painéis Difusores Acústicos”, descreve sucintamente os modelos mais comumente utilizados para a análise a painéis difusores acústicos e a metodologia de estudo adotada no trabalho.

No quarto capítulo, denominado “Avaliação e Análise”, são apresentados os resultados do trabalho desenvolvido.

O quinto e último capítulo, “Considerações Finais”, apresenta uma síntese da reflexão sobre os objetivos propostos e também um resumo das principais conclusões, bem como propostas a desenvolver em trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Contextualização Histórica

Em termos históricos a acústica pode ser considerada uma das ciências clássicas mais jovens. Apesar disso, existe uma primeira referência escrita que combina critérios acústicos e arquitetônicos pertencente ao romano Vitruvius no livro “De Architectura” no século I a.C., onde ele identifica algumas, porventura as primeiras, regras e técnicas de construção, com o objetivo de obter um som adequado em anfiteatros ao ar livre. No seu ponto de vista, a geometria dos teatros gregos (em leque) e dos romanos (a clássica arena) estava baseada numa definição prévia da acústica mais adequada a cada caso (Isbert, 1998). Vitruvius acrescentou ainda que os teatros deviam ter grandes ânforas ou vasos sonantes, colocados com a boca para baixo, em intervalos regulares ao redor do espaço para melhorar a acústica. Estes deveriam ser centrados em pequenas cavidades, com uma cunha de 150mm a elevar a abertura, de modo que a boca aberta do vaso estivesse exposta para o palco (Long, 2006).

No entanto, até ao séc. XIX, a acústica foi considerada uma ciência inexata e só neste período é que se inicia o estudo da acústica como ciência e a sua disseminação na literatura técnica publicada.

Assim, durante um longo período de tempo, foram sendo construídas salas com melhor ou pior acústica e, na maioria dos casos, apenas as consideradas excelentes resistiram ao longo dos anos. Em qualquer caso deve-se notar que o sucesso no projeto, a partir de um ponto de vista acústico, era o resultado de uma combinação de intuição e experiência com sorte na escolha de formas e materiais de construção.

Apesar da ignorância prevalecente é verdade que já os primeiros compositores escreviam a sua música a pensar no local onde iria ser interpretada e, inclusive, adaptando-a para que o resultado final fosse ótimo. Teoriza-se que a música e dança Africanas evoluíram um carácter rítmico altamente complexo e não a linha melódica da música europeia devido, em parte, ao facto de serem executadas ao ar livre.

No final do séc. XIX, mais especificamente em 1877, o físico inglês Lord Rayleigh publicou um tratado intitulado Theory of Sound contendo os fundamentos teóricos desta ciência e que ainda hoje serve como referência. No entanto, as explicações lançadas sobre a acústica de

salas estavam limitadas a generalidades do tipo: “Em relação à acústica de edifícios públicos, existem vários pontos que permanecem obscuros. (...) Para evitar reverberação, muitas vezes é necessário colocar tapetes ou cortinas para absorver o som. Em alguns casos a presença do público é já suficiente para alcançar o efeito desejado.”

Não deixa de ser irónico que numa época caracterizada por descobertas revolucionárias o progresso da acústica, que tenta explicar um fenómeno tão comum como é o comportamento do som num recinto, tenha sido tão lento. Certamente a principal razão para esta situação paradoxal terá a ver com a falta de equipamentos eletrónicos que possibilitassem realizar medições objetivas. De facto, o único sistema que estava disponível era o ouvido humano mas a sua rápida adaptação a qualquer tipo de local, independentemente do seu comportamento acústico, impede a sua utilização como uma ferramenta.

Wallace Clement Sabine começou, em 1895, o seu trabalho pioneiro no sentido da implementação da acústica na arquitetura enquanto professor associado do departamento de física da Universidade de Harvard, atendendo a um pedido do reitor para encontrar uma solução para a terrível acústica do recém-construído Museu de Arte de Fogg. Sabine tomou uma visão bastante ampla do âmbito deste pedido e iniciou uma série de experiências em três auditórios de Harvard, com o objetivo de descobrir as razões por trás das dificuldades na compreensão da fala. No momento em que terminou o seu trabalho ele desenvolveu a primeira teoria sobre absorção sonora de materiais, a sua relação com a decadência do som em salas, e uma fórmula para o tempo de reverberação. A sua descoberta chave foi que o produto da absorção total com o tempo de reverberação é uma constante. Nasceu a famosa equação de reverberação de Sabine utilizada universalmente até hoje como parâmetro fundamental para a caracterização acústica de uma sala.

No séc. XX a acústica consolidou-se como uma nova ciência a partir dos anos 30 principalmente devido ao desenvolvimento de dispositivos eletroacústicos como microfones, amplificadores, altifalantes e outros equipamentos de processamento eletrónico e à sua utilização como uma ferramenta padrão no trabalho de campo. Atualmente, a existência de programas de simulação mais potentes e sofisticados e sistemas de criação de som virtual mais avançados representam progressos significativos na modelação acústica de recintos, tanto na fase de projeto como na fase de análise. Na fase de projeto constituem uma ferramenta extremamente útil ao facilitar a tomada de decisões sobre as formas ideais e revestimentos do espaço. Na fase de análise permitem prever com um elevado grau de precisão qual o comportamento acústico de uma sala a partir do conhecimento das formas e materiais propostos como acabamentos interiores do mesmo.

2.2 Difusão Sonora

É consensual que em locais como as paredes traseiras de grandes auditórios que os difusores são um bom tratamento para evitar ecos e melhores do que as tradicionais abordagens de absorção. Ecos são causados por reflexões que chegam tarde com um nível significativamente superior ao da reverberação geral, consequência de auditórios mal concebidos, com o eco a ser uma reflexão a partir da parede traseira, de uma varanda ou de muitos outros múltiplos caminhos de reflexão. (Cox e D'Antonio, 2004)

A difusão consiste na dispersão ou redistribuição aleatória de uma onda sonora quando esta encontra uma superfície com rugosidade ou saliência comparáveis ao comprimento da onda incidente. A difusão não absorve o som, apenas muda a direção da onda sonora incidente, não provocando a perda de energia sonora. Quando uma sala tem uma boa difusão sonora, os ouvintes terão a sensação que o som chega a partir de todas as direções. A difusão provocada por uma superfície pode ser classificada através de dois coeficientes que importa, antes de mais, distinguir:

Coeficiente de difusão (d) – é uma medida da uniformidade do som refletido. A finalidade deste coeficiente é permitir a conceção de difusores, bem como permitir a técnicos de acústica comparar o desempenho e as especificações das superfícies a utilizar.

Coeficiente de dispersão (s) – é uma relação entre a energia do som dispersa de uma forma não especular e o total de energia sonora refletida. A finalidade deste coeficiente é caracterizar a dispersão superficial normalmente para a utilização em programas de modelação baseados em acústica geométrica.

2.2.1 Princípio de Huygen

A energia sonora que reflete a partir de uma superfície pode ser classificada como especular ou difusa. Na reflexão especular, como a luz que reflete de um espelho, a energia é refletida com o mesmo ângulo de incidência e é transmitida numa direção focalizada e num curto espaço de tempo. Quando a energia refletida se dispersar uniformemente em diversas direções, e for igualmente dispersa do ponto de vista temporal (distribuída num período de tempo mais longo do que numa reflexão especular), está-se na presença de uma reflexão difusa.

Três mecanismos de reflexão difusa podem ser descritos. O primeiro está associado à rugosidade superficial, que provoca dispersão sonora em todas as direções. O segundo mecanismo corresponde à difração nos bordos. Para explicar este fenómeno é útil recorrer a um exemplo prático. Imagine-se um muro de pedra, em que de um lado se encontra a fonte sonora e do outro o recetor. Apesar de não ver a fonte, o recetor é capaz de ouvi-la sempre

que esta está ativa. Isso acontece precisamente devido à difração nos bordos, no caso do topo superior do muro. No limite entre o topo do muro e o ar por cima deste, formam-se fontes sonoras secundárias que passam a emitir ondas hemisféricas para o espaço envolvente. Esta emissão secundária permite criar um percurso direto entre a fonte sonora e o recetor, sendo essa a razão pela qual este, apesar de não a ver, a consegue ouvir. Na acústica arquitetónica a difração nos bordos acontece sempre que uma onda sonora encontra uma alteração na superfície refletora. O terceiro mecanismo consiste num tratamento dado a uma determinada superfície que permita a criação de um difusor numérico. O mecanismo subjacente a um difusor numérico não apresenta relação com qualquer um dos anteriores. Um difusor numérico trata-se de uma estrutura formada por reentrâncias de largura igual mas profundidades diferentes, o que se traduz na dispersão em diversas direções das ondas sonoras incidentes – difusão. (Rathsam e Wang, 2006)

Uma construção padrão para compreender os efeitos de difusão na física foi concebida por Huygen (Cox e D'Antonio, 2004).

Huygen propõe que a superfície de dispersão seja subdividida num conjunto de pontos/fontes sonoras, igualmente espaçados, que irradiam ondas sonoras hemisféricas. Estas fontes secundárias emitem ondas concêntricas que se intercetam. É possível desenhar linhas pelos pontos sobre a onda refletida que estão em fase uns com os outros. Estas linhas são as frentes de onda que demonstram a direção e propagação do som refletido. No caso de uma onda incidente num plano perpendicular a uma superfície plana a onda é refletida com o mesmo ângulo de incidência, neste caso 90° (Figura 2.1).

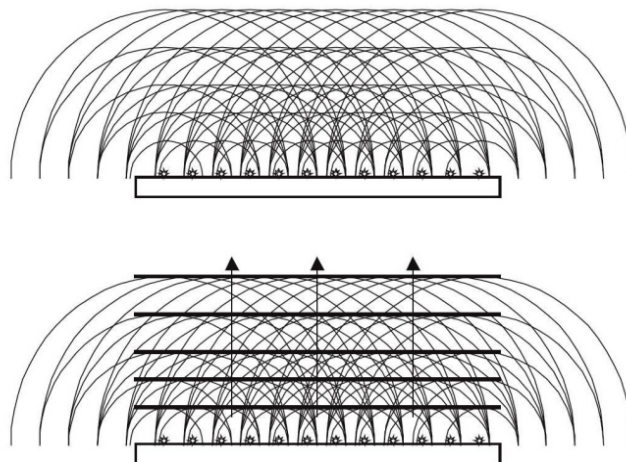


Figura 2.1 – Princípio de Huygen aplicado a uma superfície plana com incidência de uma onda sonora normal a esta (Cox e D'Antonio, 2004)

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

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

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

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

Na Figura 2.2 pode ser visualizada uma superfície difusora com reentrâncias de diferentes profundidades separadas fisicamente por divisórias. Como se pode constatar existem dois grupos de reentrâncias que apresentam as mesmas características, pelo que as ondas aí refletidas encontram-se em fase umas com as outras. No entanto quando as ondas hemisféricas dos dois conjuntos se intercetam, ocorrem interferências que provocam desvios na frente de onda, que toma direções de progressão diferentes. Ocorre então o fenómeno de difusão, que poderá ser claramente mais difuso se forem utilizadas outras configurações mais complexas de reentrâncias.

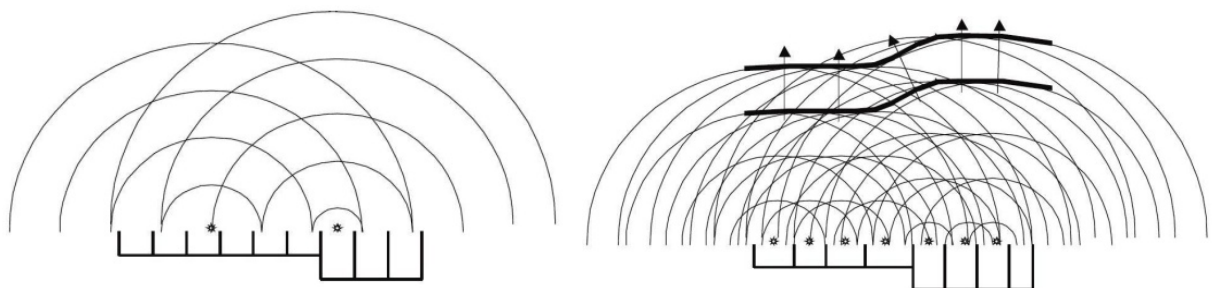


Figura 2.2 – Princípio de Huygen para uma onda plana refletida de um difusor de Schroeder simplificado (Cox e D’Antonio, 2004)

A colocação de material absorvente, combinado com as características refletoras da superfície, permite também provocar difusão, através da alteração da amplitude das ondas sonoras. O som ao incidir numa área absorvente vai perder energia e por isso ver a sua amplitude reduzida (Figura 2.3). Tomando como referência o princípio de Huygens podemos considerar que na zona absorvente não existem fontes sonoras pontuais, pelo que dessa zona não são emitidas ondas sonoras. Isso implica que próximo dessas zonas, as frentes de onda sejam menos avançadas, formando-se uma dispersão de som não homogénea.

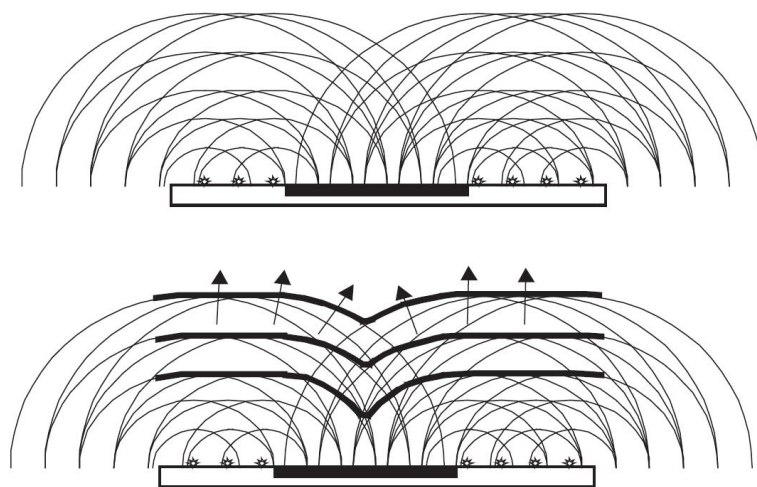


Figura 2.3 – Princípio de Huygen aplicado a uma superfície híbrida (Cox e D’Antonio, 2004)

O uso de superfícies curvas – otimização de formas – é outra forma de ter difusão sonora sem recorrer à introdução de reentrâncias. O formato curvo da superfície é suficiente para dispersar homogeneamente a energia pelo espaço, vindo ela de qualquer direção (Figura 2.4).

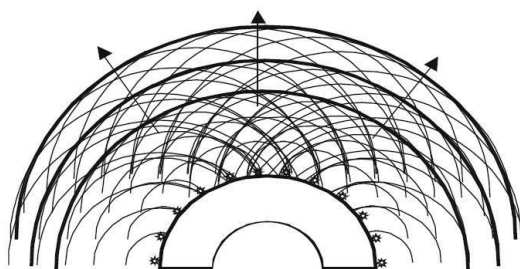


Figura 2.4 – Onda plana refletida de uma superfície cilíndrica (Cox e D’Antonio, 2004)

Um difusor acústico ideal pode então ser definido como uma superfície que faz com que uma onda sonora incidente a partir de qualquer direção seja uniformemente espalhada em todas as

direções. Estes deverão também apresentar uma assinatura temporal diferente da do som incidente, o que é conseguido à custa da criação de dispersão temporal.

2.2.2 Dispersão Temporal e Espacial

A 'reflexão difusa' é uma dispersão tanto no espaço (dispersão espacial) como no tempo (dispersão temporal) (Figura 2.5). Os difusores são frequentemente concebidos para ter dispersão espacial uniforme, assumindo que a dispersão temporal também ocorrerá. A variação temporal é menos conveniente como um parâmetro de dimensionamento, porque ela não garante dispersão espacial uniforme e muitas vezes introduz “coloração” (ênfaseção de determinadas frequências em detrimento de outras) ao espectro de frequências. (Perry, 2011)

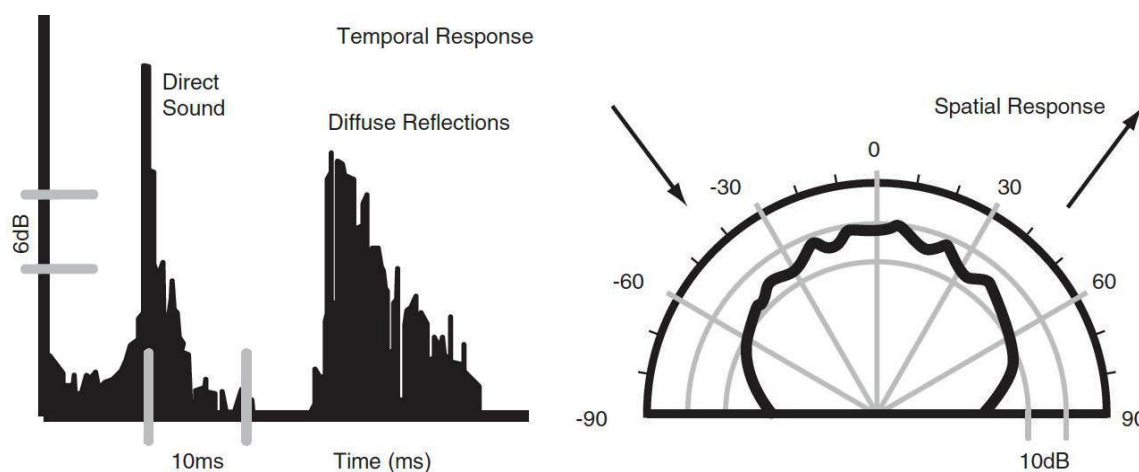


Figura 2.5 – Medição da resposta temporal e espacial da dispersão gerada por reflexão (Cox e D'Antonio, 2004)

No seu trabalho original, Schroeder (1979) analisou a dispersão espacial do som gerado pelos difusores através da análise de respostas polares para perceber como o som era distribuído em frequências específicas. Desde então, os métodos evoluíram para olhar para a dispersão espacial em todas as direções, em bandas de um terço de oitava.

A dispersão espacial é um conceito útil quando se examina, por exemplo, o teto sobre as áreas de público e de palco, mas, muitas vezes, os difusores são usados para lidar com os defeitos em certas posições numa sala, especialmente ecos e “coloração”. Isto é especialmente verdadeiro em pequenos espaços, tais como salas de estúdio, em que os difusores são utilizados para suprimir fortes reflexões de primeira ordem. Se um difusor está a ser usado para tratar com “coloração” então existe a necessidade tanto para dispersão temporal e espacial serem consideradas.

Por exemplo, um semicilindro produz excelente dispersão espacial mas não existe nenhuma dispersão temporal (Figura 2.6). Conseqüentemente, a resposta de frequência da combinação do som incidente e refletido mostra uma resposta em filtro pente devido à semelhança entre os dois sons.

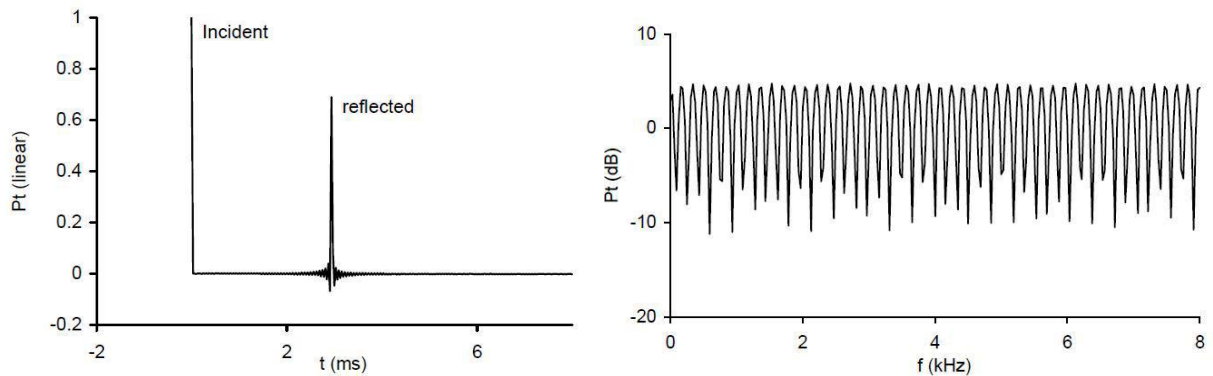


Figura 2.6 – Tempo e frequência de resposta de dispersão a partir de um semicilindro (Cox, 2004)

Como tal, um bom difusor precisa gerar dispersão espacial e temporal. Enquanto um difusor de Schroeder pode ser projetado exclusivamente para as suas propriedades de dispersão espacial, ele naturalmente gerará dispersão temporal devido à sua geometria complexa. No caso de semicilindros, dispô-los numa matriz contínua, pode não ser suficiente para dispersar a resposta temporal e alguma forma de disposição aleatória será provavelmente necessária.

Pela comparação das medições das respostas temporal e de frequência para uma superfície plana e para um difusor de Schroeder facilmente se percebe a sua eficiência (Figura 2.7).

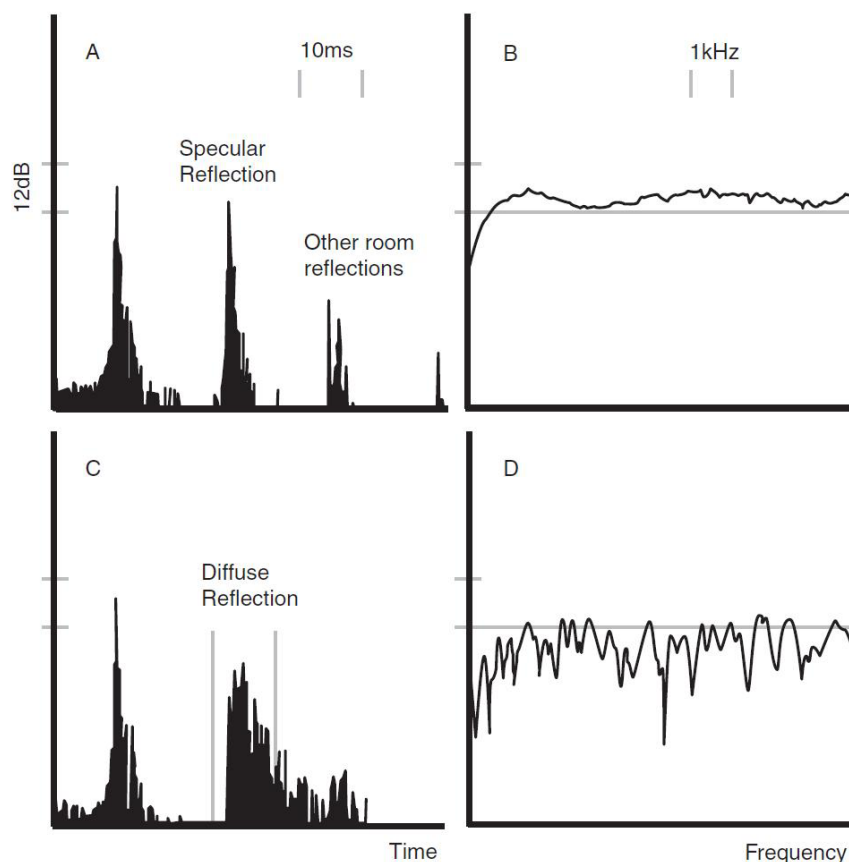


Figura 2.7 – Medição das respostas temporal e de frequência para uma superfície plana (cima) e para um difusor (baixo) (Cox e D’Antonio, 2004)

2.2.3 Medição da Resposta Polar

A resposta polar de uma fonte, tal como um altifalante, pode ser determinada pela medição da distribuição de energia sonora num arco polar ou hemisfério em torno da origem. Este conceito pode ser transposto de medições de altifalantes para ser usado para dispersão a partir de superfícies. Embora as respostas polares digam aos projetistas muito sobre como uma superfície reflete som, elas contêm uma quantidade considerável de dados e um gráfico de resposta polar diferente é necessário para cada banda de frequência e ângulo de incidência. Esta é uma das razões pelas quais o foco dos últimos anos tem sido o desenvolvimento de parâmetros de valor único, que condensam os dados polares e permitem a caracterização em termos de coeficientes de difusão.

Assim, para se caracterizar o desempenho de um difusor é necessário medir e/ou prever como o difusor dispersa som, analisando a forma como a energia dispersa é espacialmente distribuída. Esta distribuição espacial é convencionalmente descrita por respostas polares em bandas de um terço de oitava para um determinado ângulo de incidência. Um difusor ideal

deverá produzir uma resposta polar que seja invariável ao ângulo de incidência, ao ângulo de observação e à frequência (dentro da largura de banda operacional).

Dependendo da estrutura do difusor, caso se trate de um difusor com um plano de reflexão, ou seja, em que a variação de fase ou amplitude ocorre apenas numa direção, ou no caso de termos um difusor com múltiplos planos de reflexão, assim também variará a forma como a dispersão de energia é avaliada. Num difusor unidimensional (1D) o som é espalhado através de um semicírculo na direção de variação de fase ou amplitude sendo refletido com o mesmo ângulo de incidência enquanto num difusor bidimensional (2D) a energia é dispersa uniformemente em forma de hemisfério, independentemente do ângulo de incidência (Figura 2.8).

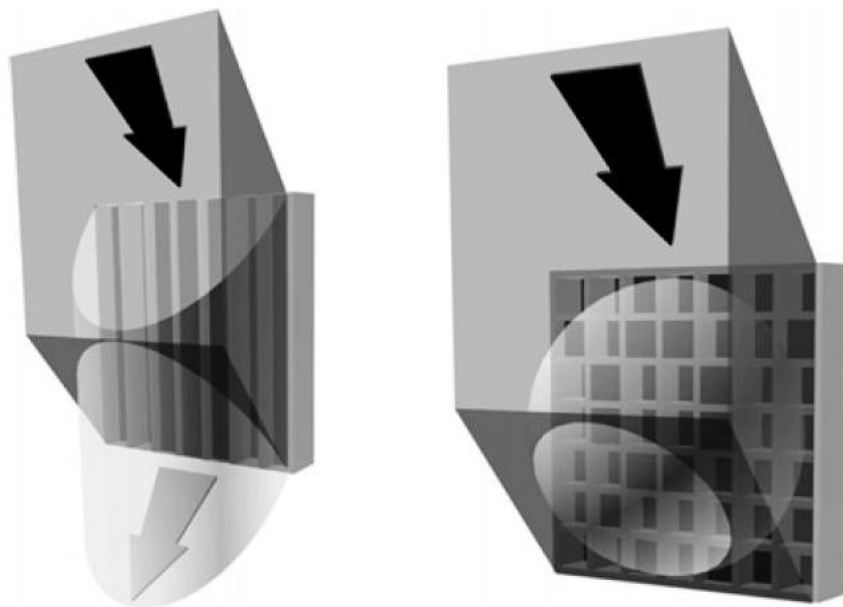


Figura 2.8 – Dispersão a partir de um difusor unidimensional (esquerda) e um difusor bidimensional (direita) (Cox e D’Antonio, 2004)

Para difusores 1D as medições da resposta polar poderão ser feitas utilizando um sistema de goniómetro 2D dispondo vários microfones num semicírculo em torno do difusor (Figura 2.9-esquerda). No caso de um difusor com múltiplos planos de reflexão o ideal será fazer uso de um goniómetro de medição hemisférica em que um único microfone percorre toda a extensão de uma estrutura traçando então um hemisfério. É também possível usar um braço mecânico capaz de rodar em torno do difusor (Figura 2.9 - direita).

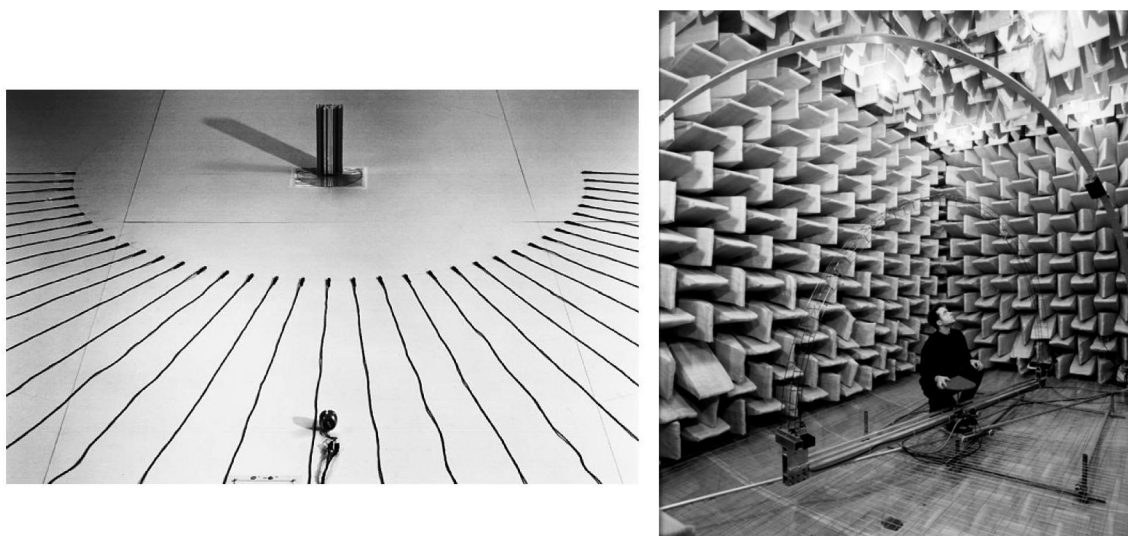


Figura 2.9 – Sistemas de medição de dispersão (Cox e D'Antonio, 2004)

A Figura 2.10 mostra uma resposta polar medida para uma incidência normal a 2kHz a partir de um difusor.

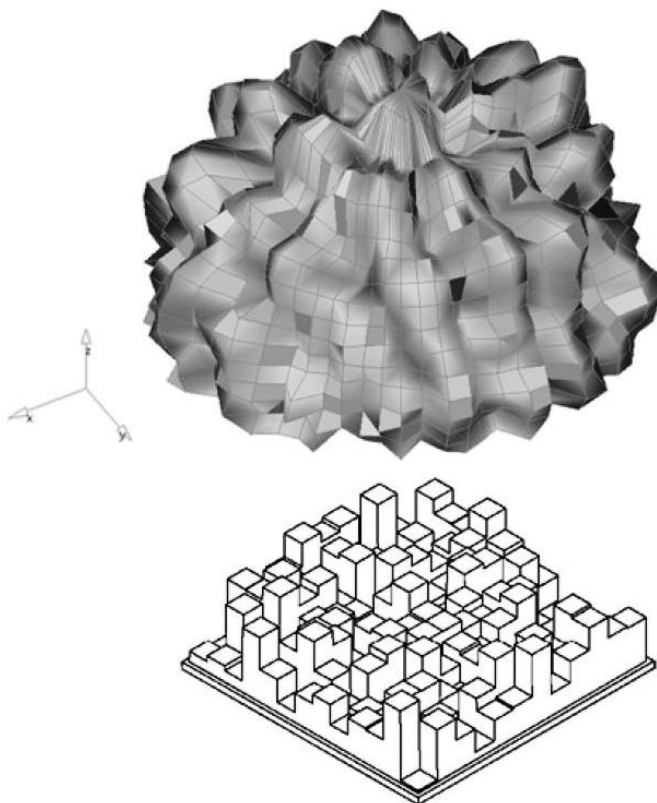


Figura 2.10 – Resposta polar 3D a partir de um difusor (Cox e D'Antonio, 2004)

2.3 Difusores de Schroeder

Um dos acontecimentos mais significativos no desenvolvimento de difusores foi, sem dúvida, a invenção de superfícies difusoras com alteração de fase das ondas sonoras (*phase grating diffuser*) por Manfred Schroeder.

O difusor de Schroeder veio oferecer aos engenheiros acústicos a possibilidade de produzir ótimos difusores necessitando apenas de um pequeno número de simples formulações matemáticas. A aposta na alteração de fase das ondas sonoras para provocar difusão sonora é conseguida à custa de reentrâncias/poços, de largura idêntica mas profundidades diferentes, determinadas por uma sequência numérica, como por exemplo uma sequência de resíduos quadráticos (*QRD - quadratic residue sequence*). Diferentes combinações geométricas destes poços conduzem a comportamentos difusores distintos.

A análise de difusores unidimensionais (1D) é feita no plano de dispersão máxima, o qual corta o difusor na sua secção transversal (Figura 2.11), já que na direção ortogonal este difusor se comporta essencialmente como uma superfície plana.

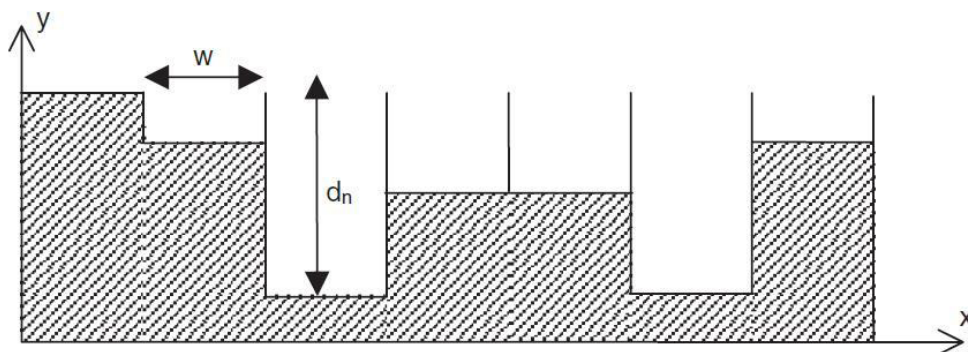


Figura 2.11 – Secção transversal de um QRD com $N=7$ (Cox e D'Antonio, 2004)

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 2.11. A onda plana é refletida no fundo dos poços, sendo que cada poço reflete uma onda na direção e sentido do eixo y , assumindo-se que não há perdas de energia neste processo. A pressão num 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 ao fundo do poço que a gerou e voltar.

A partir da comparação entre a dispersão energética de um difusor de Schroeder e uma superfície plana do mesmo tamanho pode-se constatar que a difusão sonora do painel com

alteração de fase é muito superior ao da superfície plana (Figura 2.12). No primeiro a dispersão energética é conseguida para todas as direções de forma homogênea, tal como se pode ver pelos lóbulos que se formam e que demonstram que o comportamento difusor do painel segue uma tendência de repetição associada à sequência de poços usada. Já para o painel plano a reflexão especular é a mais evidente, já que a dispersão energética se dá segundo uma direção marcadamente focalizada, ou seja, associada ao ângulo de reflexão especular, no caso, incidência perpendicular ao painel, já que a reflexão se dá aproximadamente a 0° de inclinação. (Bistafa, 2004)

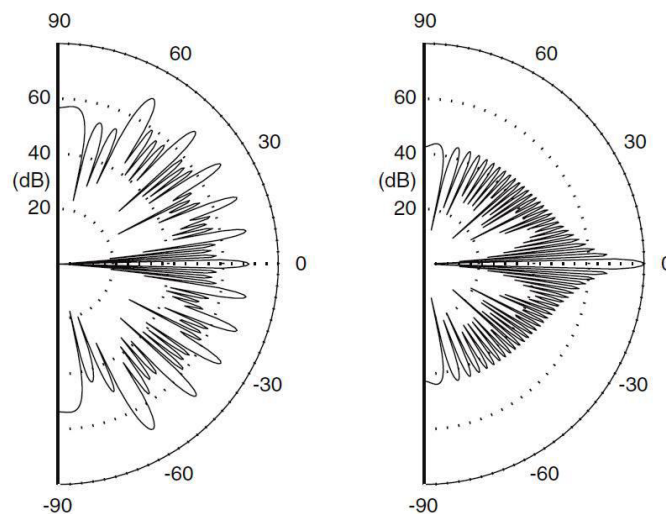


Figura 2.12 – Dispersão a partir de um difusor de Schroeder (esquerda) e uma superfície plana (direita) (Cox e D’Antonio, 2004)

O dimensionamento dos painéis difusores de Schroeder segue, como já foi referido, equações bastante simples requerendo no entanto que ondas planas se propaguem nos poços. A dimensão dos poços, w , para a frequência máxima, f_{max} , é dada por:

$$w = \frac{\lambda_{min}}{2}, \text{ onde } \lambda_{min} = \frac{c}{f_{max}} \quad (1)$$

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

O modelo de ondas planas explica a necessidade de aletas a separar os diferentes poços, devendo estas ser o mais finas possível, mas não em demasia para não entrarem em vibração facilmente o que poderia provocar 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 através de:

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

Onde *modulo* indica o resto não negativo, *N* é o número primo que serve de base para gerar a 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 $s_5 = 5^2 \text{ modulo } 7 = 25 \text{ modulo } 7$. O *modulo 7* significa que 7 é subtraído de 25 até que se obtenha resto não negativo. Por outras palavras, 7 é subtraído de 25 três vezes com resto 4. A profundidade do sexto poço seria então proporcional ao número 4. A seqüência gerada com $N = 7$ seria $s_n = \{0, 1, 4, 2, 2, 4, 1\}$. No Quadro 2.1 são apresentadas seqüências de resíduos quadráticos para os números primos de 5 a 23.

Quadro 2.1 – Seqüências de resíduos quadráticos (Bistafa, 2004)

n	N						
	5	7	11	13	17	19	23
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1
2	4	4	4	4	4	4	4
3	4	2	9	9	9	9	9
4	1	2	5	3	16	16	16
5	0	4	3	12	8	6	2
6		1	3	10	2	17	13
7		0	5	10	15	11	3
8			9	12	13	7	18
9			4	3	13	5	12
10			1	9	15	5	8
11			0	4	2	7	6
12				1	8	11	6
13				0	16	17	8
14					9	6	12
15					4	16	18
16					1	9	3
17					0	4	13
18						1	2
19						0	16
20							9
21							4
22							1
23							0

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

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

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

2.3.1 Periodicidade

Com os dados estabelecidos anteriormente é possível projetar um difusor para uma largura de banda desejada existindo no entanto alguns detalhes no design que devem ser atendidos para alcançar a melhor difusão possível. A periodicidade é um dos aspetos de maior importância no comportamento de difusores de Schroeder.

Uma sequência completa determina um período do difusor. A Figura 2.13 ilustra dois períodos (e como dois períodos adjacentes se combinam) de um QRD com base no número primo 17.

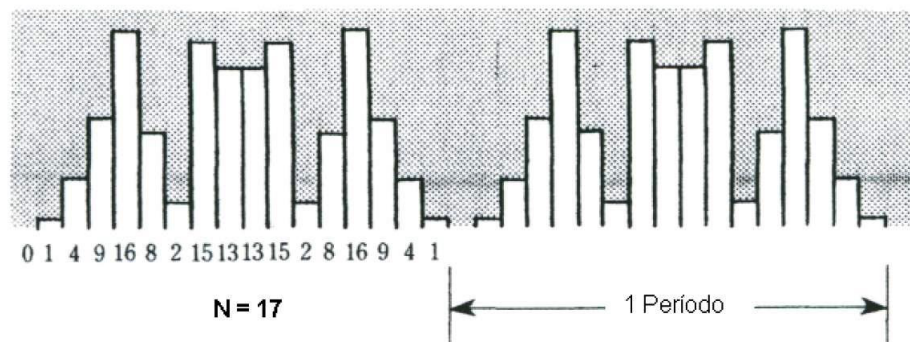


Figura 2.13 – Dois períodos de um difusor QRD com N=17 (Bistafa, 2004)

Os lóbulos são gerados pela periodicidade da superfície. Sem periodicidade tudo o que as equações de design retratam é o facto de que em determinadas direções a dispersão terá um nível semelhante. A Figura 2.14 ilustra as respostas polares de três difusores (N=7) com periodicidade diferente. A imagem da esquerda considera um único período. A resposta polar apresenta uma difusão homogénea em todas as direções, no entanto levanta problemas de

formulação matemática que põe em causa a própria definição de Schroeder. Se por outro lado mais períodos forem utilizados, os lóbulos da resposta polar tornam-se mais próximos, o que leva a uma dispersão das reflexões mais heterogénea pois existem ângulos de reflexão predominantes e zonas de anulação entre eles.

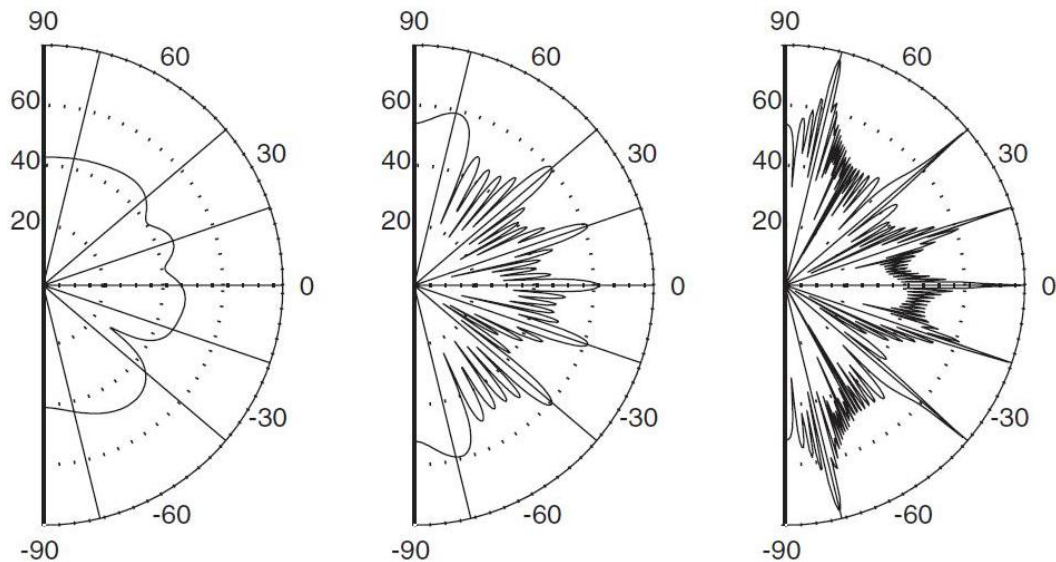


Figura 2.14 – Dispersão de um QRD com $N=7$ a 3000Hz para um, seis e 50 períodos (Cox e D’Antonio, 2004)

O comprimento do período, Nw , é frequentemente determinante do desempenho do difusor. Quando muito estreito, então nas primeiras frequências de projeto, haverá somente um grande lóbulo na resposta polar (Figura 2.15 - direita). A Figura 2.15 apresenta a dispersão gerada por difusores com períodos de diferentes comprimentos. Ambos são QRDs com $N=7$, e frequência de projeto de 500Hz. A largura w dos poços é de 3 e 9cm, o que fornece períodos com comprimento de 21 e 63cm, respetivamente. Para uma comparação correta, foi de 3 o número de períodos do difusor com menor largura de poços, 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 na figura, o limite inferior de dispersão 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 (Bistafa, 2004).

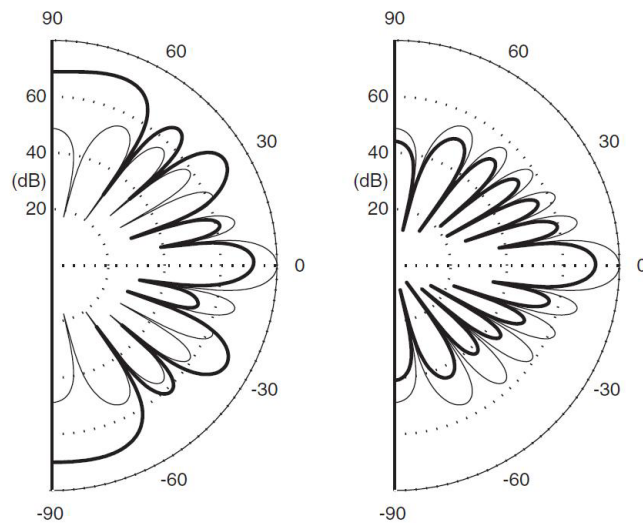


Figura 2.15 – Dispersão a 1000Hz de dois QRD com poços de 9cm (esquerda) e 3cm (direita) de largura (Cox e D’Antonio, 2004)

A Figura 2.16 apresenta a variação do coeficiente de difusão destes QRDs em função da frequência comparativamente com uma superfície plana das 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 uma dispersão mais significativa em direções oblíquas começa a ocorrer. Já para o QRD com poços mais largos, o primeiro lóbulo lateral na resposta polar aparece abaixo da frequência de projeto e portanto dispersão significativa começa a ocorrer a partir da frequência de projeto de 500 Hz.

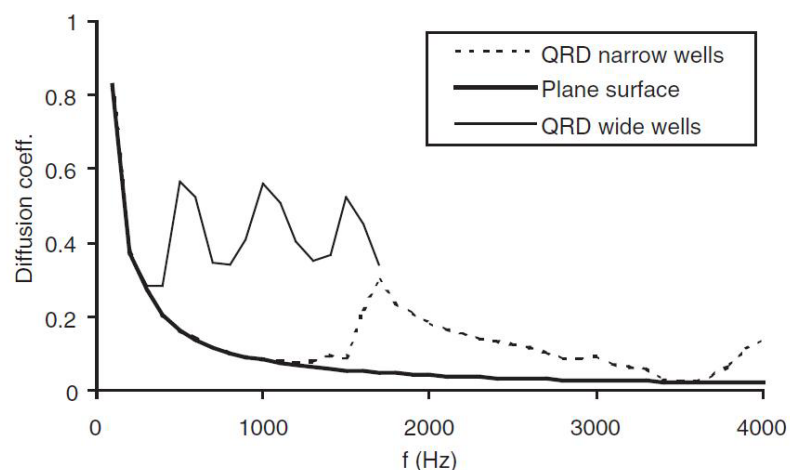


Figura 2.16 – Espectro do coeficiente de difusão (Cox e D’Antonio, 2004)

Podemos concluir que é importante haver uma ponderação do número de períodos a utilizar de forma a garantir a maior eficácia ao nível da difusão sonora. Nesse sentido o melhor design será aquele com um reduzido número de períodos, por exemplo cinco, de tal forma que estes garantam periodicidade suficiente mas com os lóbulos de difração não muito estreitos. O período deve ser suficientemente largo de forma a garantir um número suficiente de lóbulos. Tornar a largura dos poços ampla não funciona, pois pode causar problemas com reflexões especulares, principalmente reflexões em altas frequências.

2.3.2 Outras Sequências

MLS – maximum length sequence diffusers – Em 1975, Schroeder propôs a construção de difusores com base em sequências de comprimento máximo (MLS). Um sinal MLS é um sinal aparentemente aleatório, obtido de certas sequências binárias compostas de 0 e 1. O sinal MLS é utilizado na criação de ruído pseudoaleatório e apresenta espectro de potência plano para todas as frequências. Esta característica é que torna a MLS atraente na geração de perfis de difusores.

Difusores MLS unidimensionais consistem em tiras de material com duas profundidades diferentes. Por exemplo, um período de uma superfície MLS de $N = 7$ pode ser baseado na sequência de $[0, 0, 1, 0, 1, 1, 1]$. A forma do difusor é representada por uma caixa com admissão variável na superfície frontal (Figura 2.17).

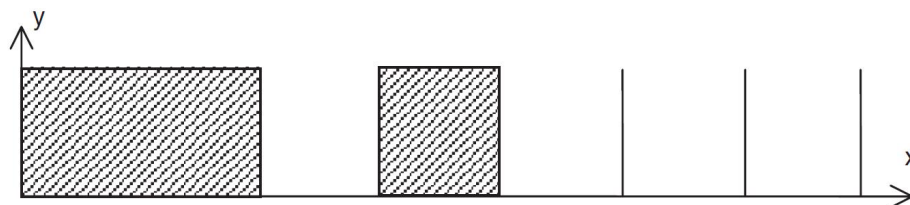


Figura 2.17 – Secção transversal de um MLS com $N=7$ (Cox e D'Antonio, 2004)

Uma oitava acima da frequência de projeto, os difusores MLS apresentam reflexão especular. Nesta frequência crítica a grelha falha porque a profundidade do poço é metade de um comprimento de onda, provocando reflexo de ondas da mesma fase, comportando-se o difusor como uma superfície plana. Consequentemente o difusor MLS só é útil numa banda de oitava, sendo isto uma limitação do design.

PRD – primitive root diffusers – O difusor perfilado com base numa sequência de raízes primitivas (PRD), tem como característica a redução da energia refletida na direção especular, além é claro, de gerar lóbulos de mesma energia noutras 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 $20\log(N-1)$ em relação à superfície plana. Deve-se observar, no entanto, que qualquer superfície com poços reduz a energia refletida na direção especular, com a condição de que a profundidade dos poços seja da ordem de grandeza do comprimento de onda na frequência de interesse. Quando uma sequência de profundidades é introduzida na superfície, ocorre interferência destrutiva entre as ondas irradiadas pelos poços. A reflexão especular de um PRD reduz-se à medida que N aumenta (figura 2.18).

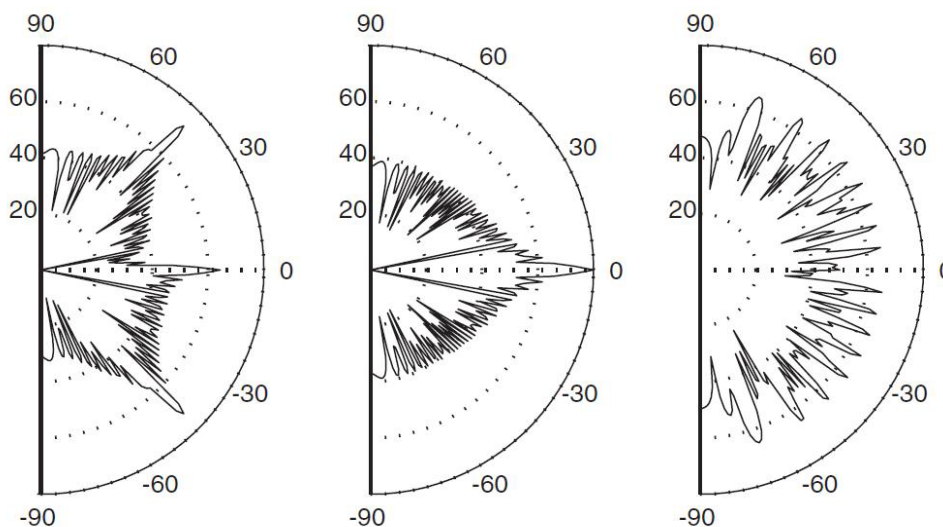


Figura 2.18 – Dispersão a partir de um PRD $N=7$ (esquerda), uma superfície plana (centro) e um PRD $N=37$ (direita) (Cox e D'Antonio, 2004)

2.3.3 Difusores Multidimensionais

Até agora somente foram abordados dispositivos unidimensionais. Estes difusores geram dispersão num semicilindro, enquanto difusores bidimensionais dispersam o som incidente num padrão hemisférico. Difusores 2D de Schroeder são construídos usando dois planos, cada um projetado para dispersão ideal. Um plano espalha na direção x , o outro na direção z , resultando em lóbulos de dispersão hemisféricos. Este tipo de difusores assume normalmente a forma de uma grelha (Figura 2.19 – direita).



Figura 2.19 – Difusores de Schroeder 1D (esquerda) e 2D (direita) (Cox e D'Antonio, 2004)

Um difusor 2D de dimensões $N_w \times N_w$ tem o quadrado do número de lóbulos do difusor 1D de comprimento N_w , no entanto, ocorre uma redução de energia nos lóbulos do difusor 2D de $10 \log(m)$, onde m é o número de lóbulos na dispersão do difusor 1D.

A sequência para formação de um QRD 2D é dada por:

$$s_{n,m} = (n^2 + m^2) \text{ modulo } N \quad (4)$$

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

Similarmente, um PRD 2D poderá ser formado pela sequência:

$$s_{n,m} = (r^n + r^m) \text{ modulo } N \quad (5)$$

É ainda possível adotar uma sequência de resíduos quadráticos numa direção e uma sequência de raízes primitivas na direção ortogonal desde que ambas sejam geradas pelo mesmo número primo N , embora ainda não existam vantagens claras para este procedimento.

A versão de um QRD com (2×2) períodos, baseado em $N=7$, é apresentada na Figura 2.20. Neste caso os índices n e m iniciaram-se em 4 com o objetivo de colocar o 0 no centro de cada período. Como a sequência é periódica é possível iniciar os índices n e m a partir de qualquer número da sequência. Difusores 2D apresentam, normalmente, menor eficiência em baixas frequências, quando comparados com difusores 1D, pois a razão s_{max}/N tende para 1 nos dispositivos 2D. Além disso, difusores 2D construídos como uma grelha têm uma absorção mais elevada por unidade de área do que os seus homólogos 1D.

O difusor da figura também ilustra o facto que diferentes arranjos poderem ser utilizados com os números da sequência. A seguinte sequência aparece na diagonal do período (1,1) do difusor {4,1,2,0,1,1,4}, enquanto a sequência original é {0,1,4,2,2,4,1}. Observa-se que foram utilizados nesta diagonal cada quarto elemento da sequência original. Esta nova sequência tem as mesmas propriedades de Fourier da sequência original, devido à propriedade de deslocamento (“*shift property*”) das sequências de resíduo quadrático. Isto implica boa difusão não só 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	1	5	4	5	1	6
4	6	3	2	3	6	4	4	6	3	2	3	6	4
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	1	5	4	5	1	6

Figura 2.20 – Matriz 2x2 para um difusor QRD com N=7 (Cox e D’Antonio, 2004)

A Figura 2.21 apresenta a dispersão hemisférica, na frequência igual a quatro vezes a frequência de projeto, de um QRD em 2D com N=7, comparativamente com uma superfície plana. A dispersão hemisférica da superfície plana é conhecida como “banana polar”.

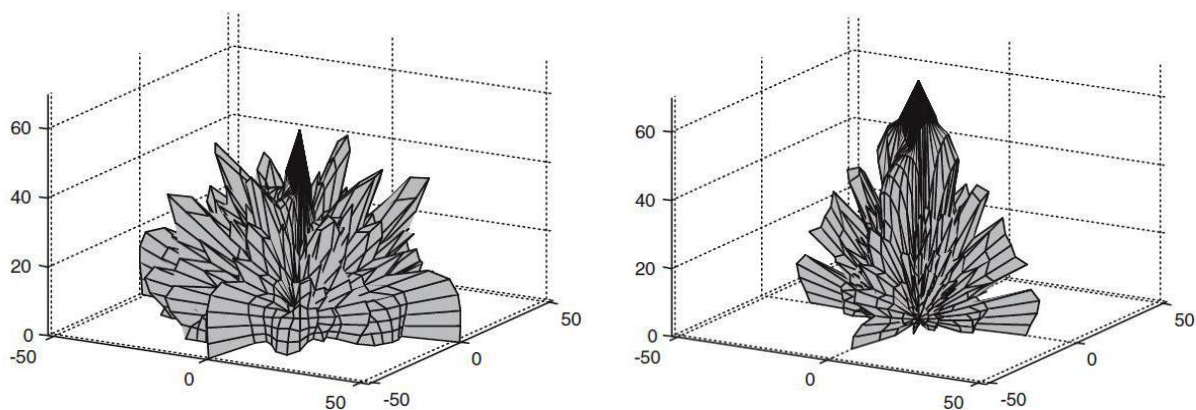


Figura 2.21 – Dispersão hemisférica de um QRD com N=7 (esquerda) e de uma superfície plana (direita) (Cox e D’Antonio, 2004)

2.4 Modelos de Previsão

Em vez de depender de uma sequência de número ideal com um espectro de potência plana, o design dos difusores de Schroeder pode ser melhorado diretamente através da otimização para dispersão uniforme. Esta abordagem combina técnicas de otimização multidimensional com previsões de elementos de fronteira para projetar difusores de fase otimizados.

O primeiro passo para otimização do design de Schroeder é a remoção das aletas entre os poços, originando um desenho mais simples: o difusor em degraus. Esta modificação simples melhora o desempenho de dispersão e fornece benefícios adicionais:

- Geometria simplificada reduz os custos de fabricação;
- A remoção dos poços ressonantes resulta em menor absorção.

O processo de otimização começa pela escolha aleatória de uma sequência da profundidade dos poços, em seguida, a previsão da dispersão e avaliação da sua qualidade. O objetivo é o de minimizar o erro entre a dispersão prevista e a dispersão desejada. Isto é feito através de ajustes incrementais para a sequência de profundidades dos poços até uma figura que satisfaça com efeito, minimizando o erro (Perry, 2011).

Um modelo de elementos de fronteira (BEM) é geralmente a primeira escolha para previsão de dispersão no projeto acústico, mas existem outras opções (Quadro 3.1).

Quadro 2.2 – Modelos para previsão de dispersão em superfícies dispostos por ordem de exatidão (Cox e D’Antonio, 2004)

Modelo	Exatidão	Tempo Computacional	Observações
BEM	o melhor	o mais lento	Preciso desde que as superfícies sejam de reação localizada e as perdas viscosas sejam pequenas. Lento particularmente para superfícies grandes em altas frequências.
BEM para painéis finos			Método eficiente para superfícies de pequena espessura, permitindo reduzir sensivelmente para metade os elementos de um BEM padrão.
Kirchhoff			Utiliza as condições de fronteira de Kirchhoff para aproximar pressões nas superfícies e, portanto, é muito mais rápido. Menor precisão para fontes ou receptores oblíquos, para baixas frequências, e em superfícies com variações bruscas de impedância e de geometria.
Fresnel			Substitui a integração numérica do modelo de Kirchhoff por integrais de Fresnel (de mais rápida computação). Requer dispersão ortogonal em duas direções sobre a superfície. Permite algumas simplificações para superfícies planas e curvas.
Fraunhofer ou Fourier	o pior	o mais rápido	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 perceber os fenómenos físicos e os designs, porém de pouca precisão.

3 ESTUDO DE PAINÉIS DIFUSORES ACÚSTICOS

3.1 Enquadramento

Tendo em conta os procedimentos expostos no documento técnico da Audio Engineering Society, AES-4id-2001 (2001), as previsões dos valores do coeficiente de difusão devem ser feitas fazendo uso de um Modelo de Elementos Fronteira (BEM). No presente trabalho este modelo foi utilizado através de uma programação em Matlab e é deste programa que seguem todos os resultados obtidos para coeficientes de difusão e gráficos de resposta espacial.

Ainda com base no exposto no referido documento técnico, apesar de a aplicação de difusores ser feita em situações em que as fontes e os recetores se encontram próximos, as medições para determinação do coeficiente de difusão devem ser feitas em situações de campo afastado. Assim, neste trabalho são adotadas como posição primária de fonte e recetores 100 e 50 metros respetivamente. Sempre que se verifiquem alterações nestas posições isso será devidamente referido.

3.2 Método dos Elementos Fronteira (BEM)

No estudo de propagação de ondas o Método dos Elementos Fronteira poderá ser indicado como o que possui maiores potencialidades, sendo a melhor opção se o que se pretende é o estudo de um sistema infinito ou semi-infinito. O BEM possui a vantagem de apenas requerer a discretização das fronteiras e de eventuais descontinuidades que possam existir no meio de propagação, evitando a discretização do meio de propagação que por norma os restantes métodos exigem. Assim a utilização do BEM pode possuir um acréscimo de rigor, uma vez que, ao basear-se em soluções fundamentais que se mantêm validas no infinito, não vai implicar a introdução de erros adicionais devido ao truncamento da discretização no meio.

Quando as soluções sobre as fronteiras discretizadas são conhecidas pode-se calcular a resposta do sistema em qualquer ponto partindo das soluções da fronteira, o conhecimento das soluções no interior do sistema pode ser feita sem qualquer perda de rigor tendo por base a solução conhecida na fronteira, não requerendo a uma nova resolução do problema.

As vantagens do BEM acima referidas têm alguma importância, no entanto pode-se verificar que este método numérico também apresenta algumas desvantagens. Apesar de recorrer

apenas à discretização da fronteira, o número de elementos necessários para proceder a sua simulação é bastante mais reduzido, no entanto a matriz de sistema que serve de base à determinação das diferentes grandezas sobre a fronteira discretizada não é uma matriz em banda nem uma matriz simétrica inviabilizando a aplicação de algumas técnicas mais eficientes para a resolução do sistema de equações inerentes ao método, tendo assim que recorrer a mais recursos computacionais necessários ao seu armazenamento. Existe ainda outra dificuldade inerente a este método, prendendo-se esta à formulação matemática que requer. O método tem por base o uso de soluções analíticas calculadas para cada situação em que no meio em análise não existam descontinuidades. Estas funções são denominadas de funções de Green, podendo revelar-se de obtenção bastante difícil, principalmente quando o caso em estudo se trata de um sistema não linear ou heterogéneo. Além do que já foi referido, este método requer ainda a avaliação de um conjunto de integrais ao longo da fronteira discretizada, sendo que o rigor dos resultados obtidos depende do modo como são efetuadas estas integrações. Uma das maiores dificuldades do BEM é a avaliação rigorosa destes integrais.

No caso da propagação de ondas sonoras num meio fluido, infinito e homogéneo, que contém no seu interior uma inclusão, o BEM pode, sucintamente, descrever-se a partir da equação integral de fronteira definida ao longo da fronteira S da inclusão,

$$\int_S g(\underline{x}) p^*(\underline{x}_p, \underline{x}) dS = \int_S g^*(\underline{x}_p, \underline{x}) p(\underline{x}) dS + Cp(\underline{x}_p) \quad (6)$$

onde $p(\underline{x})$ e $g(\underline{x})$ representam a pressão e o seu gradiente na direção normal à fronteira da inclusão no ponto \underline{x} , e $p(\underline{x}_p)$ representa a pressão no ponto de aplicação do carregamento virtual.

De forma a poder ser aplicado o BEM à resolução desta equação, torna-se necessário o conhecimento prévio das soluções fundamentais, que definem o campo de pressões gerado por cargas unitárias localizadas em meios fluidos. Para o caso de cargas lineares bidimensionais, oscilando com uma frequência ω , essa solução é dada por:

$$p^*(\underline{x}_p, \underline{x}) = -\frac{i}{4} H_0^{(2)}(k_{\alpha f} r) \quad (7)$$

onde $k_{\alpha f} = \omega/\alpha_f$, e r é a distância do ponto \underline{x}_p de aplicação da carga ao ponto \underline{x} . Da mesma forma, definindo \vec{n} como a normal à fronteira no ponto a integrar, a sua derivada pode definir-se como

$$g^*(\underline{x}_p, \underline{x}) = \frac{\partial p}{\partial \vec{n}} = \frac{ik_{\alpha f}}{4} H_1^{(2)}(k_{\alpha f} r) \frac{\partial r}{\partial \vec{n}} \quad (8)$$

Em lugar da utilização do gradiente de pressões, $g = \frac{\partial p}{\partial \vec{n}}$, é usual recorrer-se à representação da equação integral em função de pressões e velocidades das partículas segundo a direção normal à fronteira ($v_{\vec{n}}$), sendo que $v_{\vec{n}} = -\frac{1}{i\rho\omega} \frac{\partial p}{\partial \vec{n}}$, onde ρ é a massa volúmica do meio fluido.

Considerando a discretização da fronteira em elementos de fronteira retilíneos, e considerando ainda que as pressões e deslocamentos num elemento de fronteira são representados pelos valores registados num ponto interior ao elemento (nó), e que o seu valor é constante dentro de cada elemento, pode escrever-se a equação:

$$-i\rho\omega \sum_{n=1}^N v_{\vec{n}}^n \int_{S_n} p^*(\underline{x}_p, \underline{x}_n) dS_n = \sum_{n=1}^N p^n \int_{S_n} g^*(\underline{x}_p, \underline{x}_n) dS_n + Cp(\underline{x}_p) \quad (9)$$

onde p^n e $v_{\vec{n}}^n$ representam as pressões e os deslocamentos normais no nó do elemento de fronteira n . A aplicação sucessiva desta equação ao longo da fronteira permite o estabelecimento de um sistema de equações que leva à obtenção dos valores nodais da pressão e da velocidade.

3.3 Determinação do Coeficiente de Difusão Normalizado

Para a determinação do coeficiente de difusão é usada uma função de autocorrelação. Para uma fonte sonora e na condição de que cada posição de recetor recebe impulsos da mesma área de medição, para frequências em bandas de um terço de oitava, tem-se que o coeficiente de difusão direcional é determinado pela autocorrelação seguinte:

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

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

Note-se que o valor do coeficiente de difusão obtido a partir da expressão anterior é um valor “bruto” na medida em que apresenta algumas incongruências e dificuldades na interpretação dos resultados. Por isso existe a necessidade de normalizar este coeficiente (através da relação

dos resultados com os obtidos para um refletor plano). O coeficiente de difusão normalizado pode então ser obtido através da seguinte expressão:

$$d_{\theta,n} = \frac{d_{\theta} - d_{\theta,r}}{1 - d_{\theta,r}} \quad (11)$$

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

O valor final do coeficiente de difusão deverá corresponder à média dos valores obtidos para os coeficientes de difusão direcionais normalizados, para cada banda de terço de oitava.

3.4 Adaptação do Modelo de Elementos Fronteira

A necessidade de perceber se do modelo programado resultavam dados coerentes e semelhantes aos conhecidos de outros trabalhos de outros autores levou a que se usasse como modelo de comparação o trabalho realizado por Perry (2011), por ser uma estrutura simples e da qual são conhecidos bastantes resultados, disponibilizados pelo autor (arqen.com).

No seu trabalho, Perry estudou algumas geometrias de painéis difusores acústicos, cujos resultados apresenta, e às quais atribui os nomes de A1-LF, A2-LF, B1-LF e B2-LF. Para este estudo recorreu a um software comercial (AFMG Reflex) de simulação acústica bidimensional para modelar reflexão, difusão e dispersão de uma onda sonora incidente numa geometria pré-definida. O método de simulação neste programa é também baseado no Modelo de Elementos Fronteira.

3.4.1 Comparação com A1-LF

Esta análise comparativa serviu, como já foi referido, para perceber o rigor do modelo de elementos fronteira programado. Na Figura 3.1 é representada a geometria do difusor A1-LF que foi analisada em Matlab e de onde são retirados os valores de coeficiente de difusão que são posteriormente comparados com os valores de referência provenientes do programa AFMG Reflex.

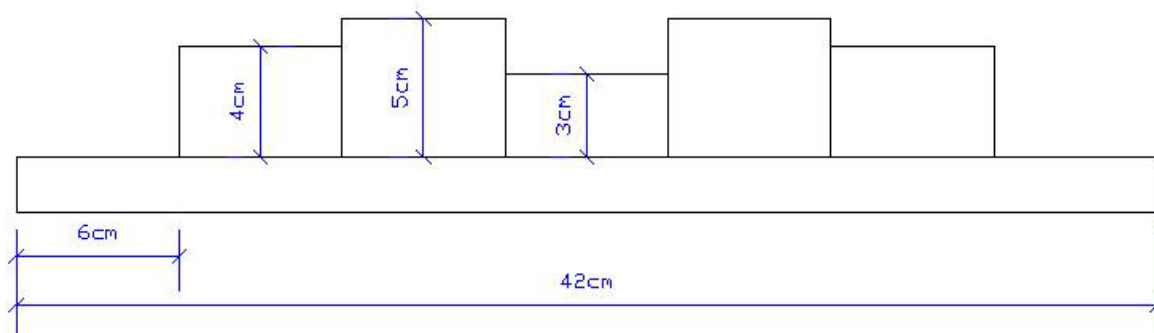


Figura 3.1 – Geometria de um difusor A1-LF

Além de um difusor simples foi também analisado um conjunto periódico de cinco difusores cujos dados recolhidos são apresentados nos Quadros 3.2 e 3.3 em comparação com os valores de referência disponíveis para esta geometria.

Quadro 3.1 – Coeficientes de difusão para um A1-LF

Frequência (Hz)	d	d Plana	d_n	d Ref	d_n Ref	Plana Ref
100	0,718	0,660	0,171	0,660	0,012	0,656
125	0,714	0,657	0,166	0,659	0,019	0,652
160	0,708	0,651	0,163	0,657	0,029	0,647
200	0,701	0,643	0,162	0,655	0,044	0,639
250	0,692	0,630	0,168	0,651	0,066	0,626
315	0,685	0,610	0,192	0,644	0,097	0,606
400	0,683	0,576	0,252	0,634	0,141	0,574
500	0,684	0,530	0,328	0,624	0,207	0,526
630	0,632	0,463	0,315	0,623	0,303	0,459
800	0,479	0,382	0,157	0,613	0,376	0,380
1000	0,497	0,311	0,270	0,538	0,333	0,307
1250	0,614	0,257	0,480	0,499	0,330	0,252
1600	0,743	0,209	0,675	0,744	0,677	0,207
2000	0,779	0,171	0,733	0,746	0,695	0,167
2500	0,865	0,139	0,843	0,867	0,846	0,136
3150	0,756	0,112	0,725	0,749	0,719	0,107
4000	0,392	0,090	0,332	0,398	0,341	0,086
MÉDIA	0,667		0,361	0,645	0,308	

Quadro 3.2 – Coeficientes de difusão para cinco A1-LF

Frequência (Hz)	d	d Plana	d _n	d Ref	d _n Ref	Plana Ref
100	0,572	0,530	0,089			
125	0,527	0,466	0,114	0,468	0,011	0,462
160	0,455	0,382	0,118	0,392	0,013	0,384
200	0,355	0,311	0,064	0,318	0,012	0,310
250	0,278	0,258	0,027	0,259	0,007	0,254
315	0,232	0,212	0,025	0,215	0,008	0,209
400	0,182	0,171	0,013	0,174	0,007	0,168
500	0,146	0,140	0,007	0,142	0,008	0,135
630	0,121	0,113	0,009	0,119	0,012	0,108
800	0,289	0,090	0,219	0,296	0,230	0,086
1000	0,177	0,073	0,112	0,171	0,110	0,069
1250	0,201	0,059	0,151	0,197	0,152	0,053
1600	0,259	0,047	0,222	0,195	0,160	0,042
2000	0,203	0,038	0,172	0,217	0,190	0,033
2500	0,275	0,032	0,251	0,261	0,243	0,024
3150	0,192	0,026	0,170	0,167	0,151	0,019
4000	0,118	0,022	0,098	0,094	0,082	0,013
MÉDIA	0,270		0,110	0,230	0,087	

A visualização dos valores dos coeficientes de difusão torna-se mais simples se for feita graficamente. Assim, a partir dos valores dos quadros foram construídos os gráficos apresentados na Figura 3.2 para a comparação dos valores obtidos pelo BEM para um difusor A1-LF simples e na Figura 3.3 para os valores obtidos para um conjunto de cinco difusores.

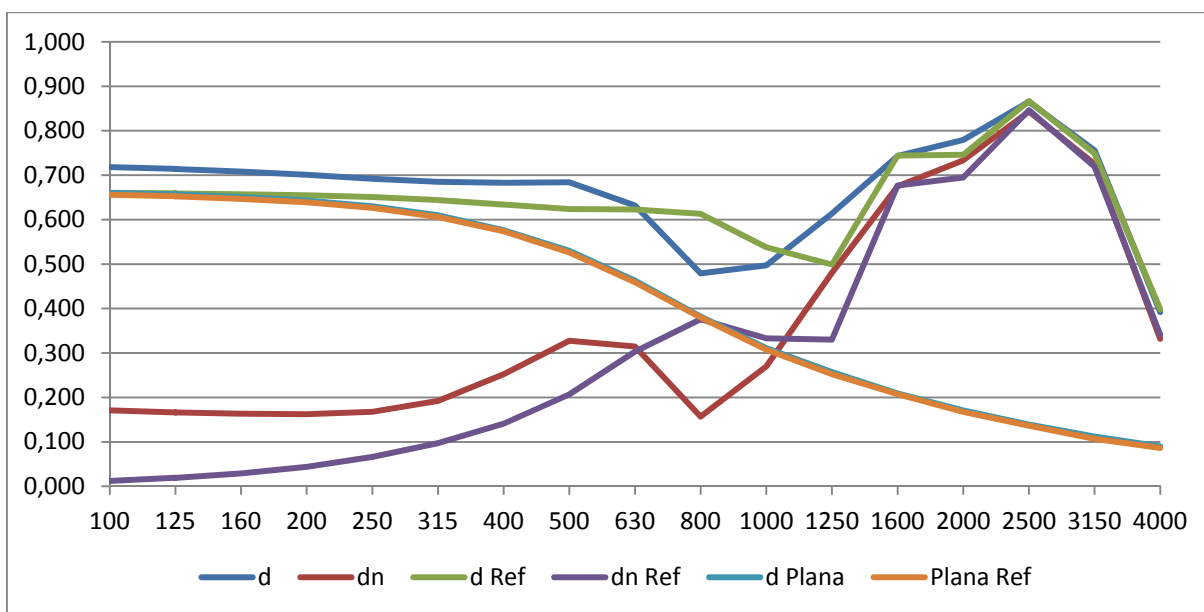


Figura 3.2 – Comparação entre coeficientes de difusão para um A1-LF

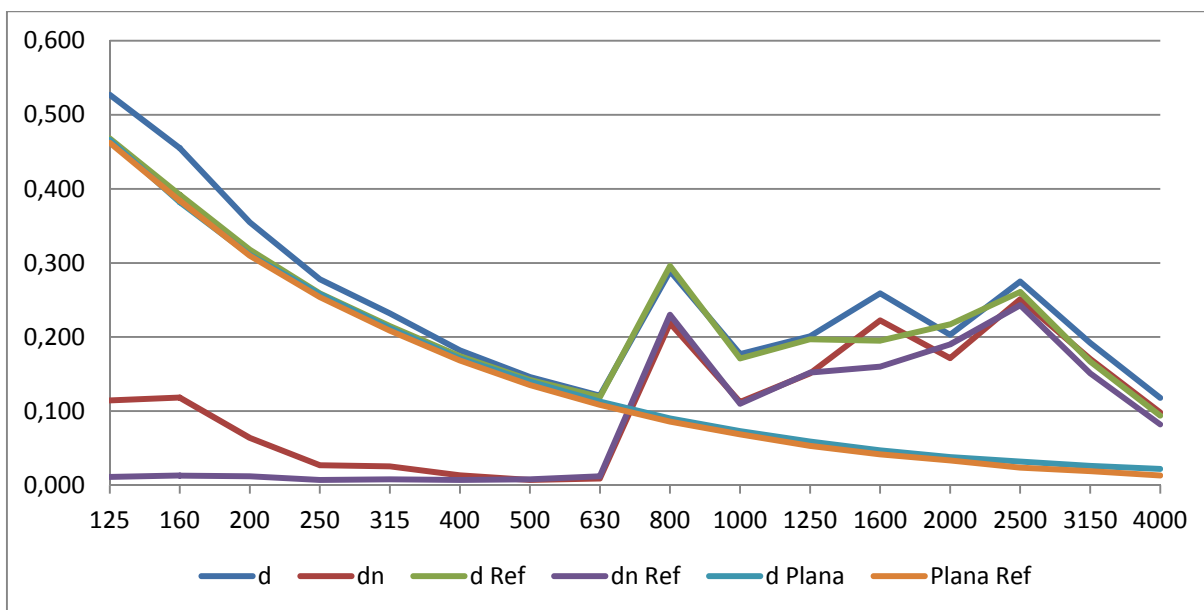


Figura 3.3 – Comparação entre coeficientes de difusão para cinco A1-LF

Ainda para termos de comparação é apresentada na Figura 3.4 o gráfico de resposta espacial obtido pelo BEM para a frequência de 1000Hz para um conjunto de cinco difusores A1-LF e na Figura 3.5 o gráfico resultante do trabalho de Perry (2011) para as mesmas condições.

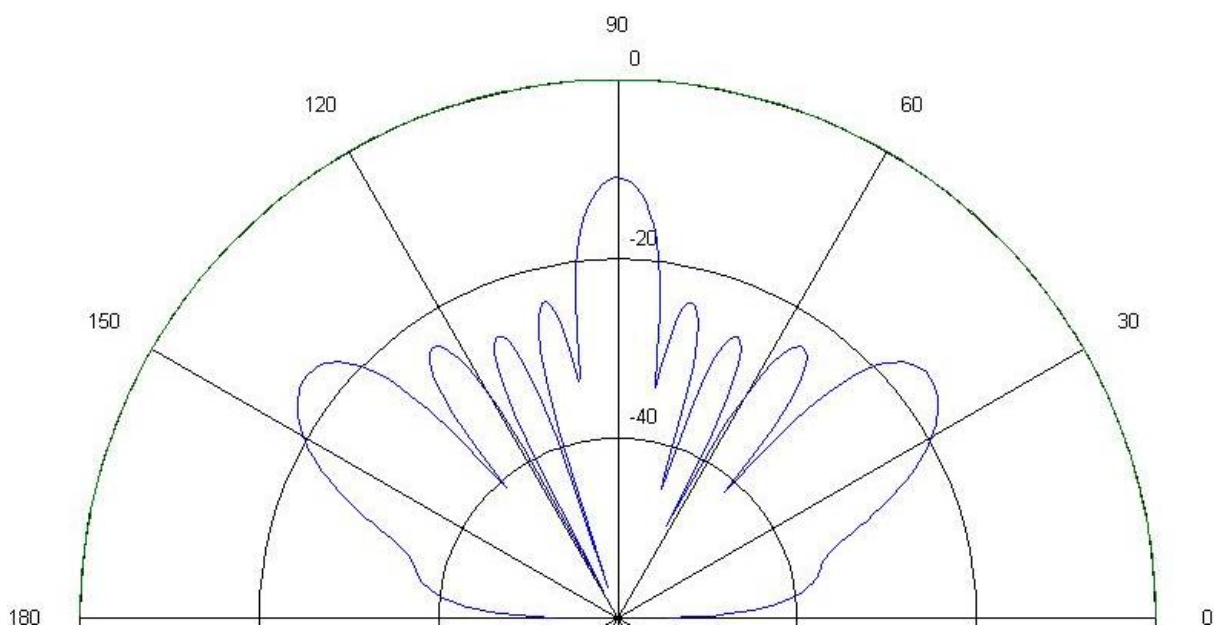


Figura 3.4 – Dispersão polar para 5 A1-LF aos 1000Hz

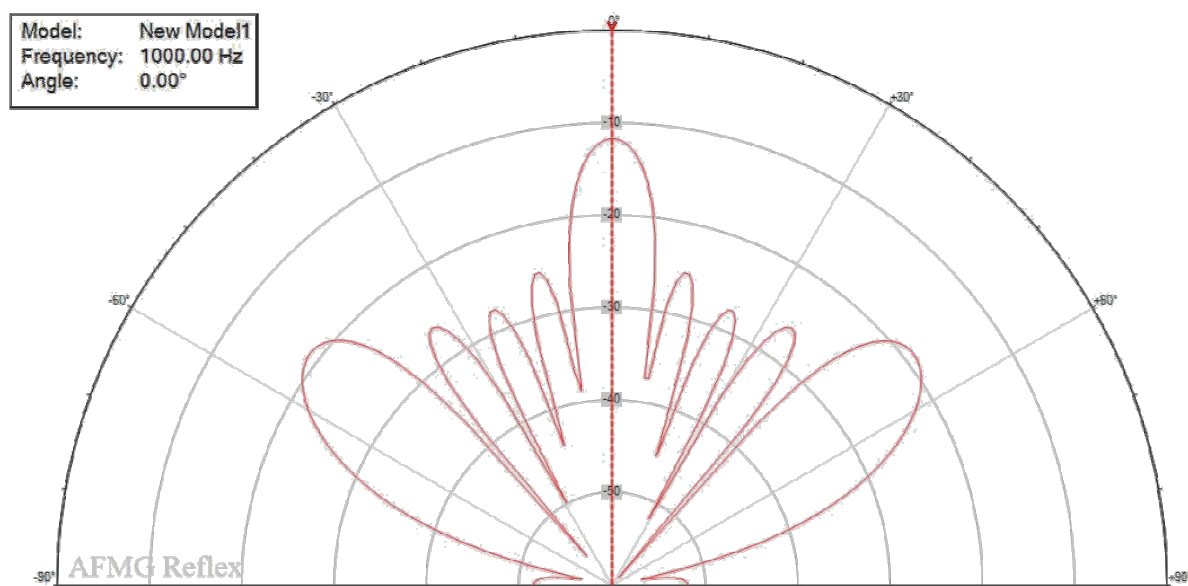


Figura 3.5 – Dispersão polar para 5 A1-LF aos 1000Hz (Perry, 2011)

Avaliando os gráficos comparativos das figuras 3.2 e 3.3 e os gráficos de resposta espacial das figuras 3.4 e 3.5 pode-se concluir que o modelo BEM programado em Matlab devolve resultados credíveis, semelhantes aos obtidos por Perry (2011) pelo software comercial AFMG Reflex, apesar de pequenas diferenças em algumas frequências que podem, no entanto, ser desprezadas.

4 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

4.1 Enquadramento

Na realização deste trabalho foram estudadas quatro superfícies diferentes às quais são dados os nomes de A1-LF, PD, QRD7 e QRD11. Para as três últimas foram ainda estudadas algumas alterações de modo a perceber o comportamento de difusão comparativamente à estrutura base.

4.2 Estudo de A1-LF

A geometria deste difusor foi já apresentada no capítulo anterior e é aqui repetida na Figura 4.1. É um difusor constituído por uma geometria bastante simples, desenvolvida e otimizada por Perry (2011), e constituiu a primeira base de estudo para este trabalho.

Para esta superfície foi efetuado um estudo paramétrico. Em primeiro lugar foi avaliada a influência da posição dos recetores fixando a fonte nos 100 metros e fazendo variar a posição dos recetores para 1, 2, 5, 10, 25 e 50 metros. Em seguida é estudada a influência de diferentes posições da fonte com a posição dos recetores fixa nos 50 metros. Assim, obtiveram-se os gráficos de resposta espacial para a fonte posicionada em 60, 100, 150, 300 e 1000 metros. Por último com a fonte nos 100 metros e os recetores nos 50 metros (posição base) foi estudada a influência da variação do ângulo de incidência tendo sido calculada a resposta espacial para os ângulos de 30°, 45°, 60° e 90°.

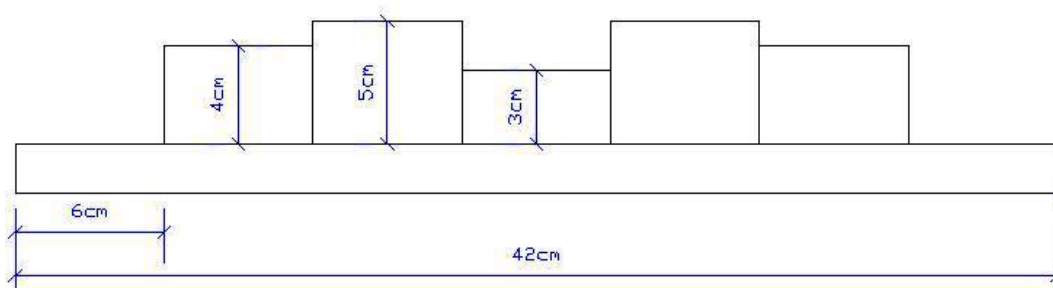


Figura 4.1 – Geometria de um difusor A1-LF

4.2.1 Variação da Posição de Recetores

Fixando a posição da fonte emissora nos 100 metros foram feitas simulações para as posições dos recetores em 1, 2, 5, 10, 25 e 50 metros. Os resultados em forma de gráfico de dispersão espacial são apresentados nos Quadros A.1, A.2 e A.3 em anexo.

Ao posicionar os recetores muito próximos da geometria de ensaio obtém-se uma resposta espacial maior mas menos definida. Isto é mais perceptível na frequência de 2000Hz onde se percebe a definição de três lóbulos principais de dispersão. Na Figura 4.2 apresentam-se os gráficos de resposta espacial com a posição de fonte nos 100 metros e recetores a 1 metro (esquerda) e a 50 metros (direita) para a frequência de 2000Hz.

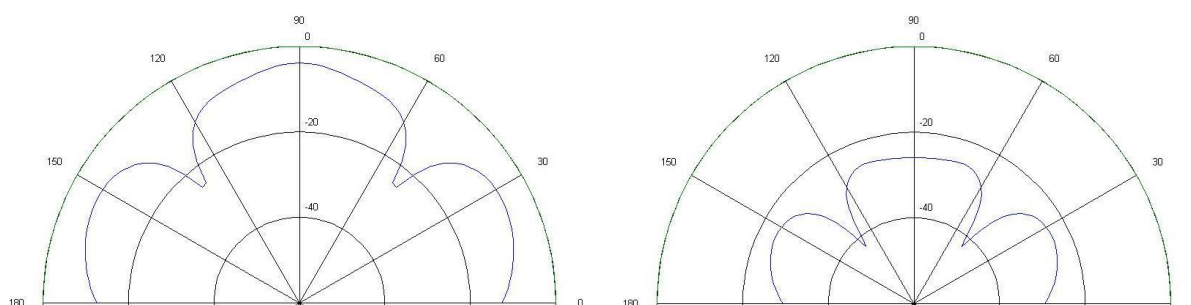


Figura 4.2 – Resposta espacial com recetores a 1m (esquerda) e 50m (direita)

Ainda para 2000Hz foi calculado o coeficiente de difusão, para as diferentes posições, tendo sido obtidos os valores de 0,700, 0,752, 0,771, 0,776, 0,778 e 0,779 respetivamente para as posições de recetores de 1, 2, 5, 10, 25 e 50 metros.

4.2.2 Variação da Posição de Fonte

Uma análise semelhante foi feita fixando a posição de recetores nos 50 metros e fazendo variar a posição da fonte para 60, 100, 150, 300 e 1000 metros. Os resultados da resposta espacial estão disponíveis nos Quadros A.4, A.5 e A.6 em anexo.

Neste caso é possível observar que à medida que se afasta a fonte emissora praticamente não há alterações na resposta espacial do difusor ensaiado e, no cálculo do coeficiente de difusão, foi necessário recorrer a mais uma casa decimal para se perceber a diferença. O gráfico de resposta espacial em que se percebe alguma diferença é para a posição de fonte a 60 metros (Figura 4.3 esquerda). Para as restantes posições de fonte há uma resposta espacial semelhante à da posição base. Percebe-se que o facto de afastar a fonte emissora não influencia a resposta espacial do difusor, pois os recetores, que recebem o som refletido, encontram-se na mesma posição.

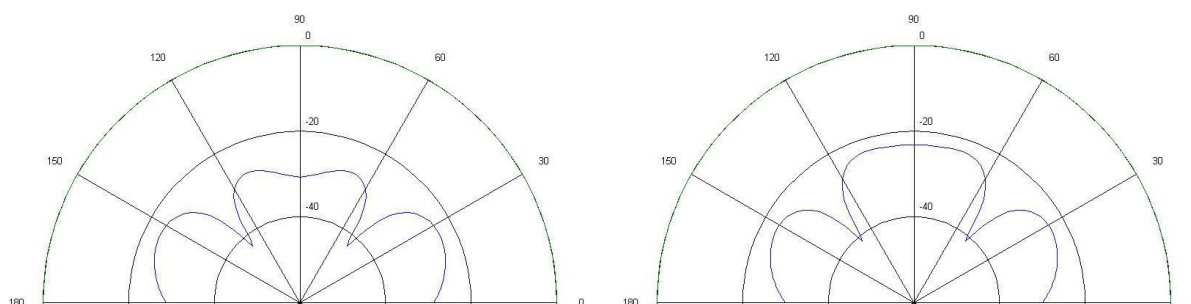


Figura 4.3 – Resposta espacial com fonte a 60m (esquerda) e 1000m (direita)

Para a frequência de 2000Hz, e para a posição da fonte em 60, 100, 150, 300 e 1000, foram obtidos os valores de 0,7786, 0,7789, 0,7790, 0,7791 e 0,7792 para o coeficiente de difusão.

4.2.3 Variação do Ângulo de Incidência

O estudo relativo à variação do ângulo do som incidente e o modo como a sua dispersão é definida é de extrema importância pois as ondas sonoras em situações reais não irão incidir sempre na posição ortogonal ao painel difusor.

Assim, dada a importância para este resultado, foi efetuado o estudo para um painel e para um conjunto de cinco difusores em linha. Pela visualização dos gráficos disponíveis nos Quadros A.7, A.8, A.9 e A.10, em anexo, é perceptível a definição de lóbulos de dispersão na direção especular à incidente. Como exemplo são apresentadas as imagens (Figura 4.4) referentes à resposta espacial para cinco difusores e com o som incidente a 30° (gráfico da esquerda) e 60° (gráfico da direita).

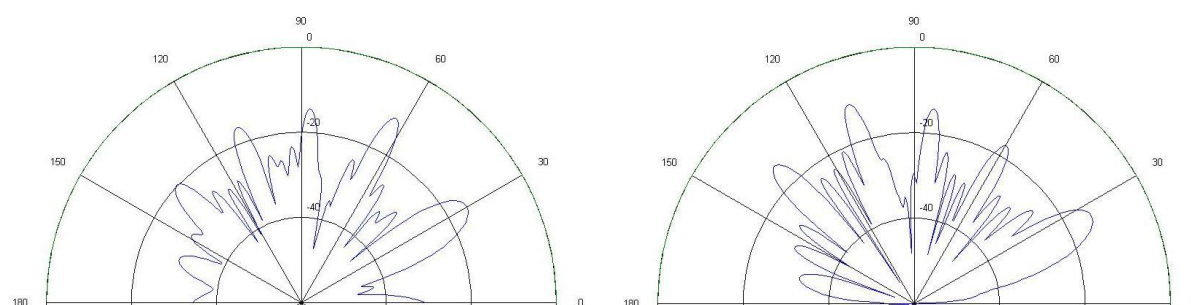


Figura 4.4 – Resposta espacial para 5 A1-LF com incidência a 30° (esquerda) e 60° (direita)

4.3 Estudo de PD

A geometria PD é bastante mais complexa quando comparada com a A1-LF estudada anteriormente. É um difusor constituído por 12 régua de 25mm com 4 secções diferentes e com poços de larguras variáveis entre elas (Figura 4.5).

As dimensões das secções são:

- A – 25x60mm²;
- B – 25x(45/60)mm²;
- C – 25x(40/50)mm²;
- D – 25x(30/40)mm².

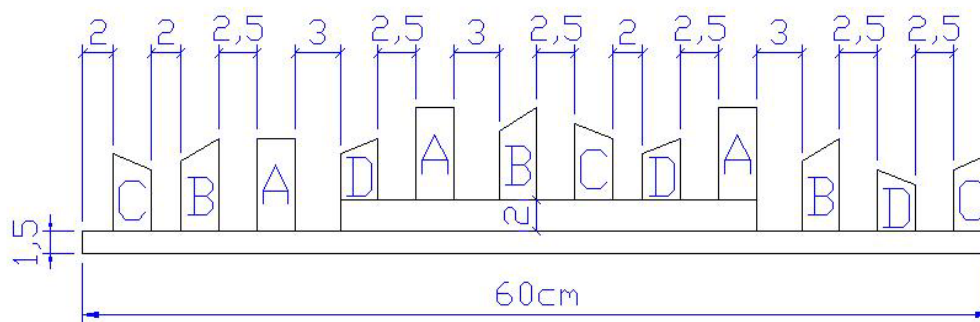


Figura 4.5 – Geometria de um difusor PD

Para esta geometria foram calculados os coeficientes de difusão para um difusor simples e para um conjunto de cinco difusores (Quadro 4.1), bem como a sua resposta espacial apresentada graficamente no Quadro B.1 em anexo.

Quadro 4.1 – Coeficientes de difusão para a geometria PD

Freq. (Hz)	1 Difusor (60cm)			5 Difusores (300cm)		
	d PD	d Plana	dn PD	d PD	d Plana	dn PD
100	0,680	0,654	0,075	0,495	0,422	0,126
125	0,673	0,647	0,074	0,422	0,346	0,116
160	0,662	0,636	0,071	0,300	0,278	0,030
200	0,647	0,620	0,071	0,253	0,231	0,029
250	0,625	0,594	0,076	0,205	0,190	0,019
315	0,594	0,554	0,090	0,164	0,155	0,011
400	0,546	0,494	0,103	0,128	0,124	0,005
500	0,462	0,421	0,071	0,107	0,101	0,007
630	0,328	0,343	-0,023	0,092	0,082	0,011
800	0,359	0,277	0,113	0,079	0,066	0,014

1000	0,258	0,231	0,035	0,066	0,054	0,013
1250	0,513	0,189	0,400	0,118	0,045	0,076
1600	0,327	0,151	0,207	0,085	0,037	0,050
2000	0,329	0,123	0,235	0,091	0,032	0,061
2500	0,313	0,100	0,237	0,107	0,029	0,080
3150	0,308	0,080	0,248	0,139	0,027	0,115
4000	0,207	0,063	0,154	0,134	0,028	0,109
5000	0,369	0,051	0,335	0,247	0,029	0,225
MÉDIA	0,456	0,350	0,143	0,180	0,126	0,061

Ainda com base na estrutura PD procedeu-se à avaliação de uma nova secção à qual foi dado no nome de PD M1 (Figura 4.6). O difusor PD M1 é semelhante ao PD mas com os poços fechados, originando um difusor em degraus, como indicado na secção 2.4 deste trabalho. Além do fecho dos poços a construção tem todas as réguas longitudinais da mesma largura.

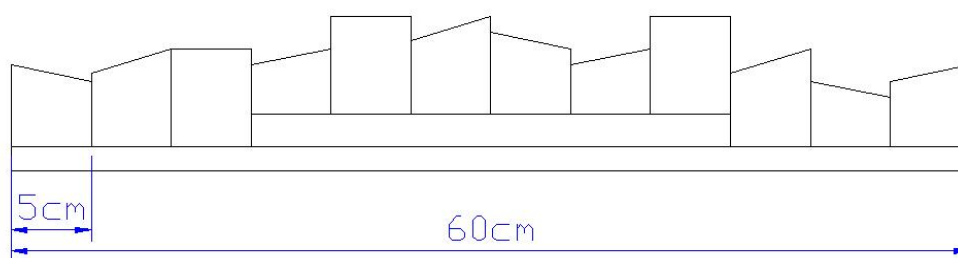


Figura 4.6 – Geometria de um difusor PD M1

Para este difusor foram calculados os coeficientes de difusão para um difusor simples e para um conjunto de cinco difusores (Quadro 4.2) de modo a poder comparar com os valores obtidos para a geometria PD. Também se obteve a resposta espacial em bandas de oitava, apresentada graficamente no Quadro B.2 em anexo.

Quadro 4.2 – Coeficientes de difusão para a geometria PD M1 em comparação com PD

Freq. (Hz)	1 Difusor (60 cm)				5 Difusores (300 cm)			
	d PD M1	d PD	d plana	dn PD M1	d PD M1	d PD	d plana	dn PD M1
100	0,691	0,680	0,654	0,107	0,492	0,495	0,422	0,121
125	0,684	0,673	0,647	0,105	0,415	0,422	0,346	0,106
160	0,672	0,662	0,636	0,099	0,299	0,300	0,278	0,029
200	0,658	0,647	0,620	0,100	0,253	0,253	0,231	0,029
250	0,639	0,625	0,594	0,111	0,202	0,205	0,190	0,015
315	0,614	0,594	0,554	0,135	0,164	0,164	0,155	0,011

400	0,569	0,546	0,494	0,148	0,129	0,128	0,124	0,006
500	0,473	0,462	0,421	0,090	0,107	0,107	0,101	0,007
630	0,334	0,328	0,343	-0,014	0,109	0,092	0,082	0,029
800	0,348	0,359	0,277	0,098	0,084	0,079	0,066	0,019
1000	0,331	0,258	0,231	0,130	0,077	0,066	0,054	0,024
1250	0,287	0,513	0,189	0,121	0,074	0,118	0,045	0,030
1600	0,458	0,327	0,151	0,362	0,094	0,085	0,037	0,059
2000	0,540	0,329	0,123	0,475	0,125	0,091	0,032	0,096
2500	0,587	0,313	0,100	0,541	0,201	0,107	0,029	0,177
3150	0,440	0,308	0,080	0,391	0,165	0,139	0,027	0,142
4000	0,458	0,207	0,063	0,422	0,263	0,134	0,028	0,242
5000	0,371	0,369	0,051	0,337	0,205	0,247	0,029	0,181
MÉDIA	0,509	0,456	0,346	0,209	0,192	0,180	0,126	0,073

De modo a perceber as diferenças entre as geometrias PD e PD M1 foi construído o gráfico com coeficiente de difusão em função da frequência para as duas secções comparando ainda com o coeficiente de difusão para uma secção plana da mesma dimensão (Figura 4.7).

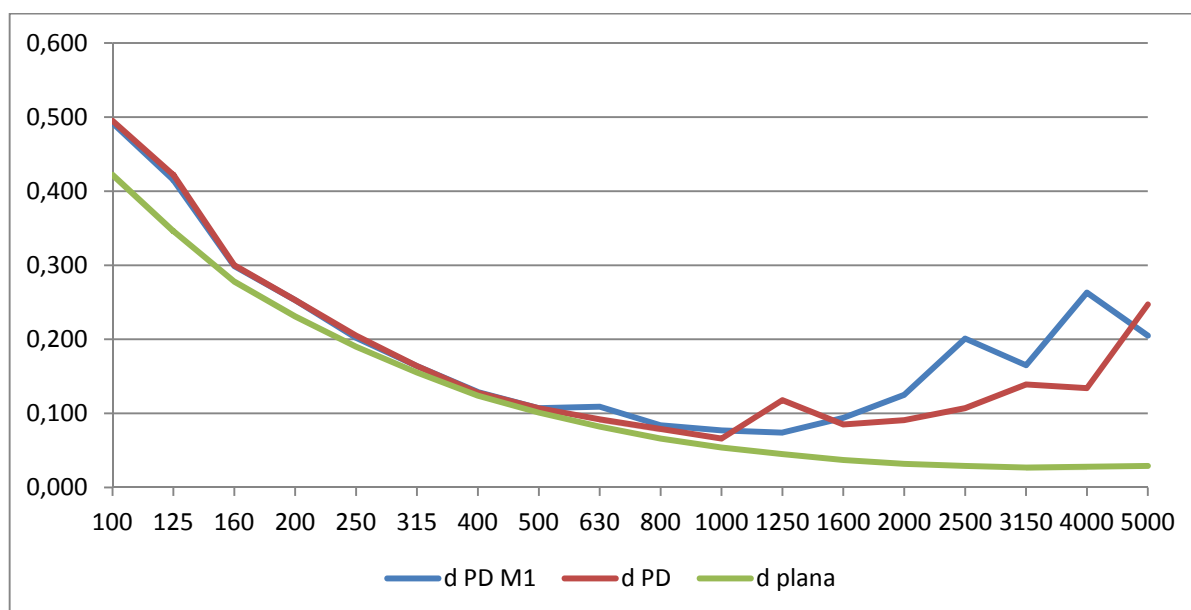


Figura 4.7 – Coeficiente de difusão para cinco difusores PD M1 em comparação com PD e uma superfície plana

4.4 Estudo de QRD com N=7

As secções construídas através de uma sequência de resíduos quadráticos foram das primeiras a ser estudadas por Schroeder, tal como referido em capítulos anteriores. Com base nos dados disponíveis no Quadro 2.1 foi desenhada a geometria de um QRD com N=7 (Figura 4.8).

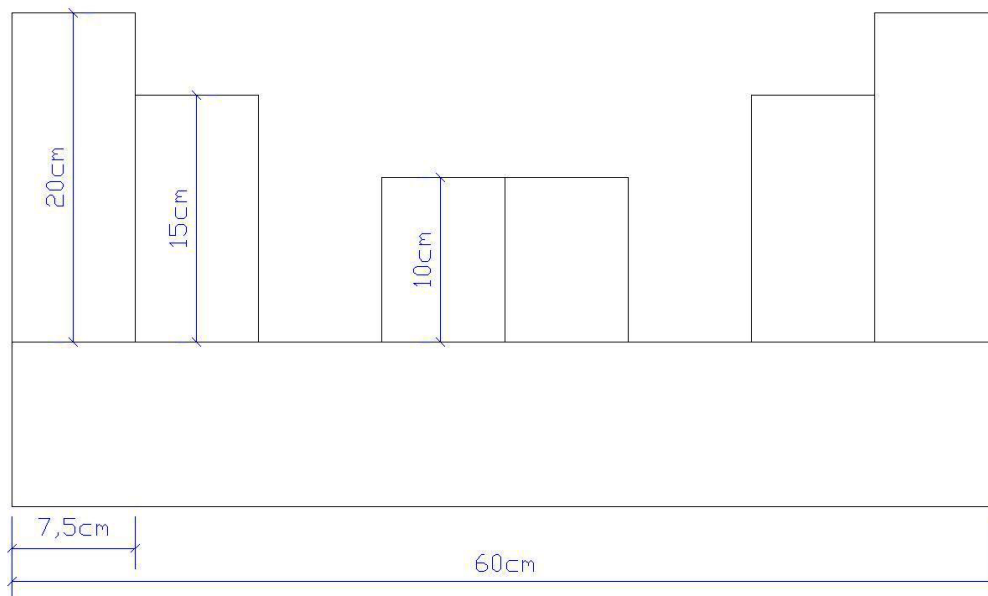


Figura 4.8 – Geometria de um difusor QRD com N=7

Para esta geometria foram calculados os coeficientes de difusão para um difusor simples e para um conjunto de cinco difusores (Quadro 4.3), bem como a sua resposta espacial apresentada graficamente no Quadro C.1 em anexo.

Quadro 4.3 – Coeficientes de difusão para a geometria QRD7

Freq. (Hz)	1 Difusor (60 cm)			5 Difusores (300 cm)		
	d QRD7	d Plana	dn QRD7	d QRD7	d Plana	dn QRD7
100	0,723	0,654	0,199	0,479	0,422	0,099
125	0,717	0,647	0,198	0,377	0,346	0,047
160	0,708	0,636	0,198	0,289	0,278	0,015
200	0,696	0,620	0,200	0,254	0,231	0,030
250	0,673	0,594	0,195	0,196	0,190	0,007
315	0,639	0,554	0,191	0,167	0,155	0,014
400	0,660	0,494	0,328	0,130	0,124	0,007
500	0,725	0,421	0,525	0,108	0,101	0,008
630	0,392	0,343	0,075	0,161	0,082	0,086
800	0,408	0,277	0,181	0,097	0,066	0,033

1000	0,769	0,231	0,700	0,195	0,054	0,149
1250	0,877	0,189	0,848	0,297	0,045	0,264
1600	0,559	0,151	0,481	0,167	0,037	0,135
2000	0,802	0,123	0,774	0,247	0,032	0,222
2500	0,496	0,100	0,440	0,221	0,029	0,198
3150	0,181	0,080	0,110	0,060	0,027	0,034
4000	0,416	0,063	0,377	0,235	0,028	0,213
5000	0,319	0,051	0,282	0,222	0,029	0,199
MÉDIA	0,598	0,346	0,350	0,217	0,126	0,098

Na tentativa de melhorar o comportamento da secção foram estudadas 15 geometrias diferentes baseadas no QRD7 (Quadros C.2 e C.3 em anexo) e aquela para a qual se obtiveram os melhores resultados foi a denominada QRD7 M11 (Figura 4.9).

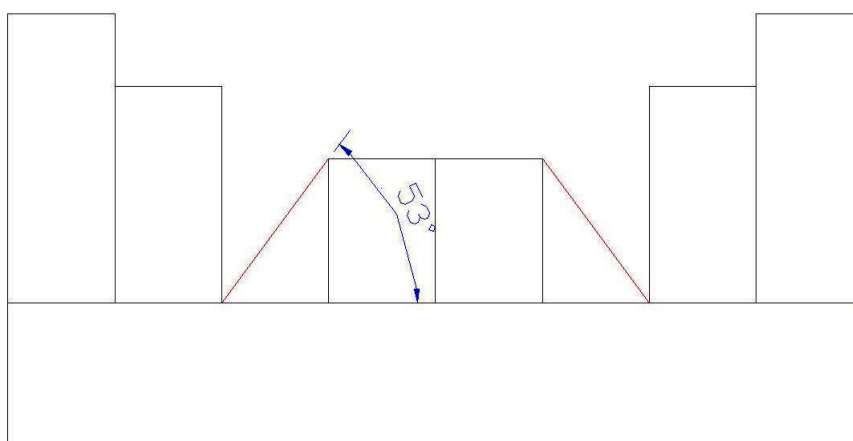


Figura 4.9 – Geometria de um difusor QRD7 M11

Também neste caso foram calculados os coeficientes de difusão para bandas de um terço de oitava para um e cinco difusores (Quadro 4.4) e os gráficos de resposta espacial para bandas de oitava (Quadro C.4 em anexo).

Quadro 4.4 – Coeficientes de difusão para a geometria QRD7 M11

Freq. (Hz)	1 Difusor (60 cm)			5 Difusores (300 cm)		
	d QRD7 M11	d Plana	dn QRD7 M11	d QRD7 M11	d Plana	dn QRD7 M11
100	0,728	0,654	0,214	0,479	0,422	0,099
125	0,722	0,647	0,212	0,376	0,346	0,046
160	0,717	0,636	0,223	0,291	0,278	0,018
200	0,713	0,620	0,245	0,256	0,231	0,033

250	0,710	0,594	0,286	0,195	0,190	0,006
315	0,698	0,554	0,323	0,169	0,155	0,017
400	0,694	0,494	0,395	0,138	0,124	0,016
500	0,759	0,421	0,584	0,176	0,101	0,083
630	0,876	0,343	0,811	0,375	0,082	0,319
800	0,673	0,277	0,548	0,219	0,066	0,164
1000	0,439	0,231	0,270	0,113	0,054	0,062
1250	0,848	0,189	0,813	0,308	0,045	0,275
1600	0,688	0,151	0,633	0,216	0,037	0,186
2000	0,775	0,123	0,743	0,274	0,032	0,250
2500	0,479	0,100	0,421	0,172	0,029	0,147
3150	0,322	0,080	0,263	0,134	0,027	0,110
4000	0,452	0,063	0,415	0,240	0,028	0,218
5000	0,325	0,051	0,289	0,201	0,029	0,177
MÉDIA	0,645	0,346	0,427	0,241	0,126	0,124

Apesar de apresentar um coeficiente de difusão médio substancialmente superior ao da geometria QRD7 original, as diferenças são mais facilmente entendidas pelo gráfico comparando os coeficientes de difusão das duas secções (Figura 4.10).

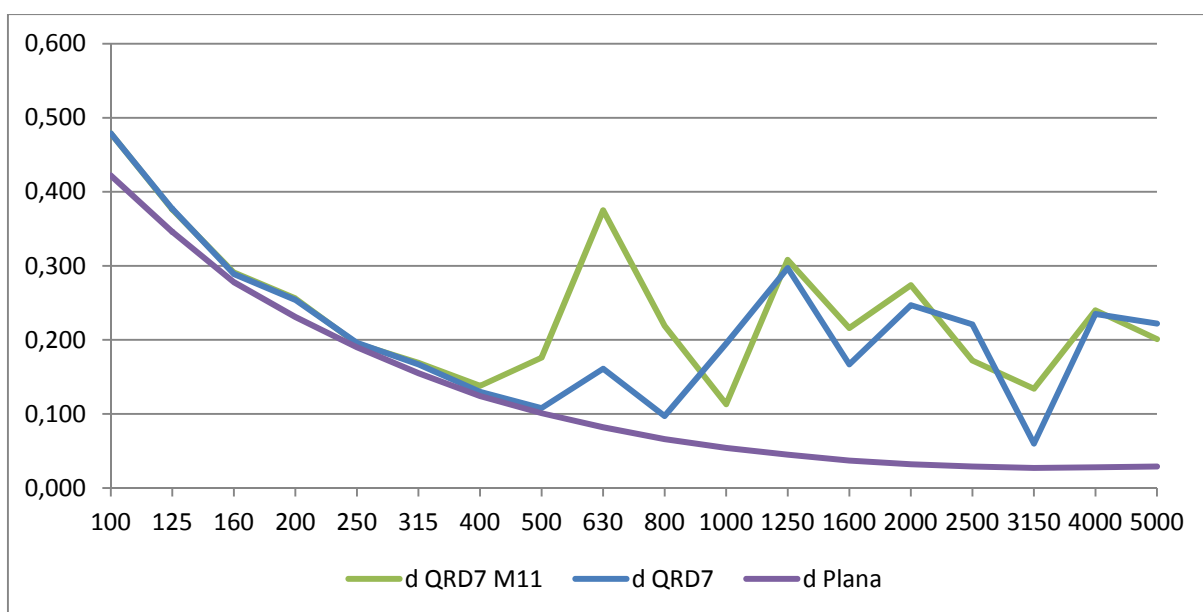


Figura 4.10 – Coeficiente de difusão para cinco difusores QRD7 M11 em comparação com QRD7 e superfície plana

4.5 Estudo de QRD com N=11

À semelhança do QRD7 esta geometria (Figura 4.11) foi construída com base na sequência $s_{11}=\{0, 1, 4, 9, 5, 3, 3, 5, 9, 4, 1, 0\}$, apresentada no Quadro 2.1.

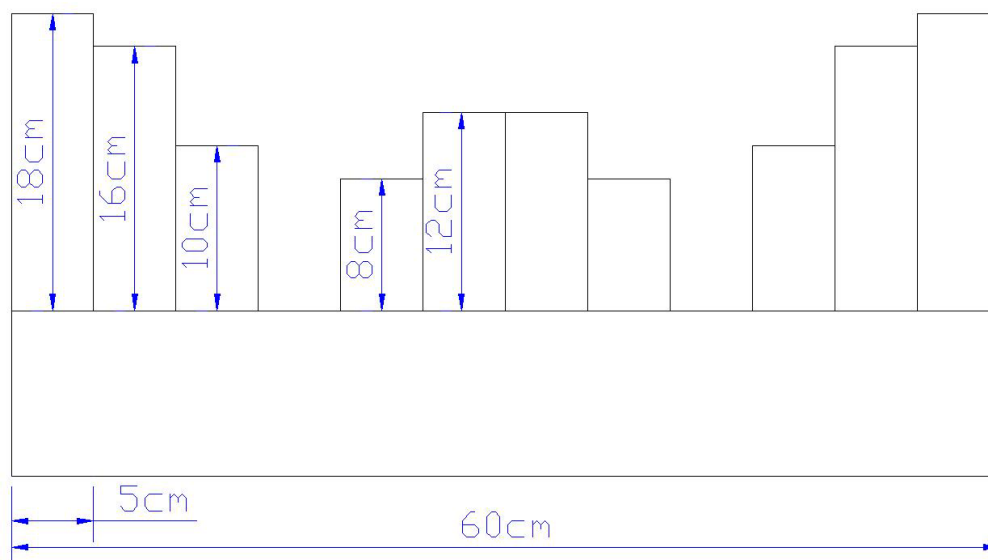


Figura 4.11 – Geometria de um difusor QRD com N=11

Seguindo o trabalho desenvolvido para as outras geometrias estudadas também aqui foram calculados os coeficientes de difusão para um cinco difusores (Quadro 4.5) e a resposta espacial (Quadro D.1 em anexo).

Quadro 4.5 – Coeficientes de difusão para a geometria QRD11

Freq. (Hz)	1 Difusor (60 cm)			5 Difusores (300 cm)		
	d QRD11	d Plana	dn	d QRD11	d Plana	dn
100	0,723	0,654	0,199	0,480	0,422	0,100
125	0,717	0,647	0,198	0,379	0,346	0,050
160	0,709	0,636	0,201	0,290	0,278	0,017
200	0,703	0,620	0,218	0,254	0,231	0,030
250	0,697	0,594	0,254	0,193	0,190	0,004
315	0,682	0,554	0,287	0,167	0,155	0,014
400	0,662	0,494	0,332	0,134	0,124	0,011
500	0,677	0,421	0,442	0,116	0,101	0,017
630	0,628	0,343	0,434	0,414	0,082	0,362
800	0,286	0,277	0,012	0,066	0,066	0,000
1000	0,467	0,231	0,307	0,125	0,054	0,075
1250	0,593	0,189	0,498	0,253	0,045	0,218

1600	0,709	0,151	0,657	0,095	0,037	0,060
2000	0,525	0,123	0,458	0,199	0,032	0,173
2500	0,633	0,100	0,592	0,247	0,029	0,225
3150	0,431	0,080	0,382	0,218	0,027	0,196
4000	0,484	0,063	0,449	0,226	0,028	0,204
5000	0,326	0,051	0,290	0,177	0,029	0,152
MÉDIA	0,592	0,346	0,345	0,224	0,126	0,106

Com base no QRD11 foram também estudadas diversas geometrias com pequenas alterações (Quadro D.2 em anexo) para as quais foram obtidos os coeficientes de difusão (Quadro D.3 em anexo). Aquela que apresenta um coeficiente de difusão médio maior é a designada por QRD11 M13 (Figura 4.12). Acaba por apresentar uma alteração bastante simples em relação à estrutura base QRD11.

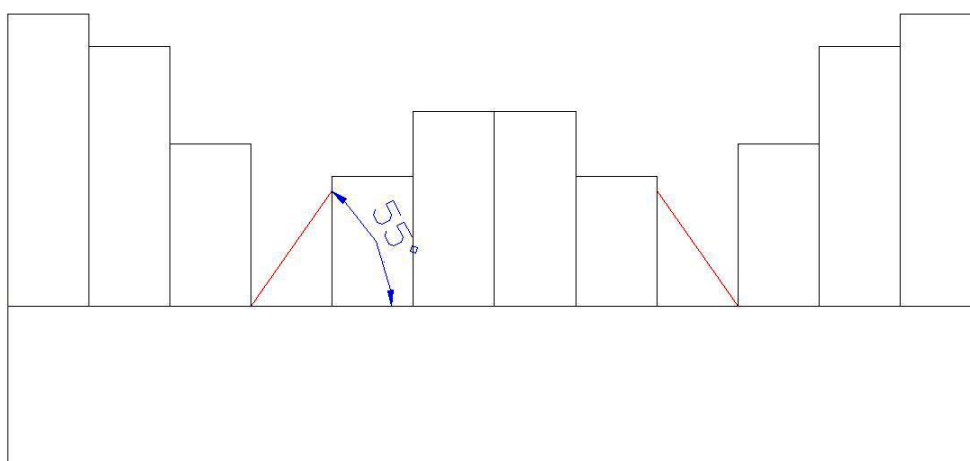


Figura 4.12 – Geometria de um difusor QRD11 M13

Foram calculados os coeficientes de difusão para bandas de um terço de oitava para um e cinco difusores (Quadro 4.6) e os gráficos de resposta espacial para bandas de oitava (Quadro D.4 em anexo).

Quadro 4.6 – Coeficientes de difusão para a geometria QRD11 M13

Freq. (Hz)	1 Difusor (60 cm)			5 Difusores (300 cm)		
	d QRD11 M13	d Plana	dn QRD11 M13	d QRD11 M13	d Plana	dn QRD11 M13
100	0,725	0,654	0,205	0,479	0,422	0,099
125	0,720	0,647	0,207	0,378	0,346	0,049

160	0,713	0,636	0,212	0,290	0,278	0,017
200	0,710	0,620	0,237	0,255	0,231	0,031
250	0,714	0,594	0,296	0,194	0,190	0,005
315	0,710	0,554	0,350	0,169	0,155	0,017
400	0,681	0,494	0,370	0,139	0,124	0,017
500	0,657	0,421	0,408	0,131	0,101	0,033
630	0,709	0,343	0,557	0,418	0,082	0,366
800	0,629	0,277	0,487	0,236	0,066	0,182
1000	0,301	0,231	0,091	0,056	0,054	0,002
1250	0,449	0,189	0,321	0,164	0,045	0,125
1600	0,774	0,151	0,734	0,202	0,037	0,171
2000	0,497	0,123	0,426	0,159	0,032	0,131
2500	0,600	0,100	0,556	0,237	0,029	0,214
3150	0,543	0,080	0,503	0,274	0,027	0,254
4000	0,521	0,063	0,489	0,292	0,028	0,272
5000	0,529	0,051	0,504	0,293	0,029	0,272
MÉDIA	0,621	0,346	0,386	0,243	0,126	0,125

O gráfico de comparação entre os comportamentos do QRD11 M13 e o QRD11 é apresentado na Figura 4.13.

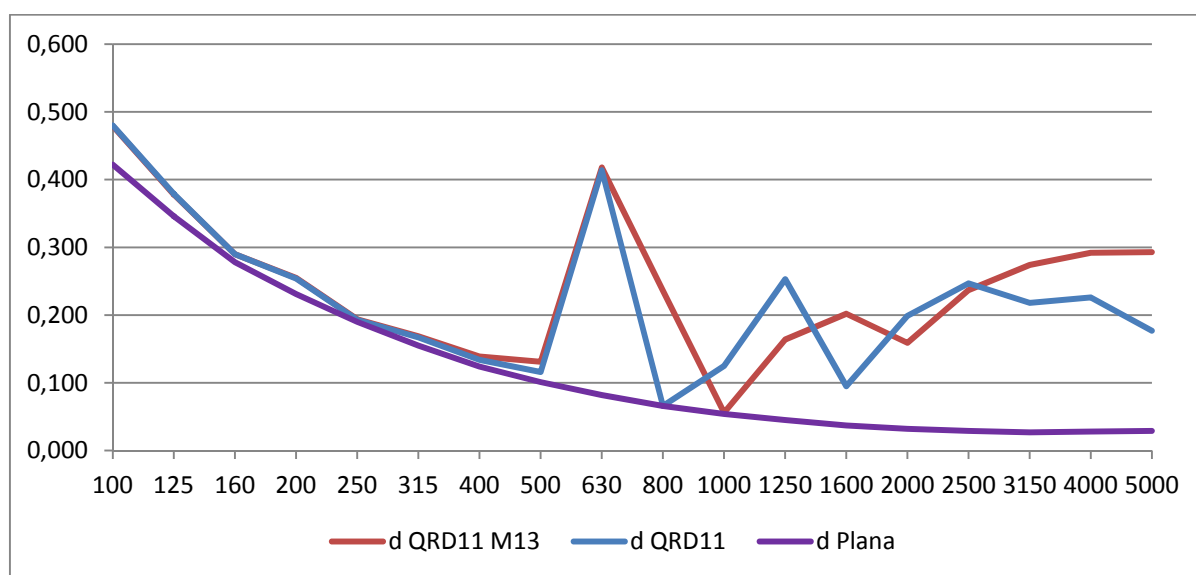


Figura 4.13 – Coeficiente de difusão para cinco difusores QRD11 M13 em comparação com QRD11 e uma superfície plana

4.6 Síntese dos Resultados

Em jeito de conclusão é feita uma comparação final dos resultados obtidos para as geometrias analisadas neste trabalho. Para tal foi construído um gráfico com os valores dos coeficientes de difusão normalizados para as geometrias PD, PD M1, QRD7, QRD7 M11, QRD11 e QRD11 M13, dispostas cada uma numa construção de cinco períodos, em função da frequência em bandas de oitava (Figura 4.14). A geometria A1-LF não está presente neste gráfico comparativo pois a sua secção tem uma largura diferente das restantes estudadas.

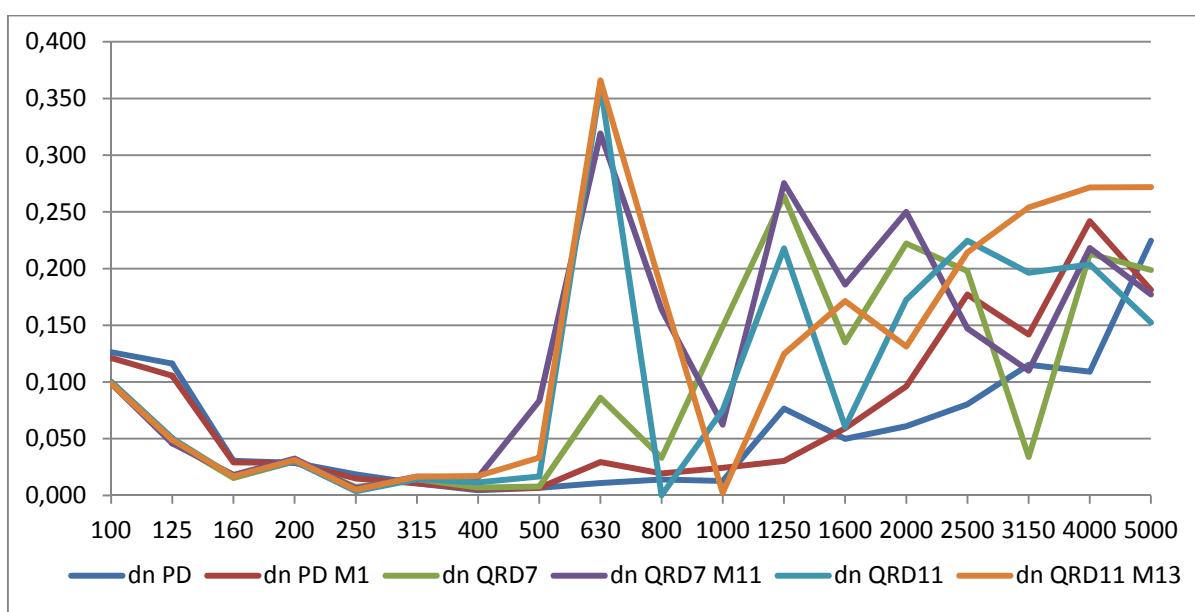


Figura 4.14 – Coeficientes de difusão normalizados para as geometrias analisadas

A leitura do gráfico acaba por não ser muito simples uma vez que há muitos resultados sobrepostos. Como tal, ainda para comparação são apresentados os valores médios dos coeficientes de difusão normalizados para as seis secções (Quadro 4.7).

Quadro 4.7 – Coeficientes de difusão normalizados médios para as geometrias analisadas

	PD	PD M1	QRD7	QRD7 M11	QRD 11	QRD 11 M13
d_n	0,061	0,073	0,098	0,124	0,106	0,125

Da análise à tabela anterior é possível concluir que o difusor QRD11 M13 é, dos analisados, o que tem o coeficiente de difusão normalizado maior. No entanto, analisando o gráfico da Figura 4.14 observa-se que esta geometria apresenta à frequência de 1000Hz um valor de coeficiente de difusão muito próximo de 0 e a partir desta frequência um comportamento em crescente. Tendo em conta que um difusor ideal deve apresentar um coeficiente de difusão o mais semelhante possível em todas as frequências pode-se dizer que dos seis difusores

estudados aquele com melhor comportamento será o QRD7 M11. Este tem um coeficiente de difusão normalizado médio praticamente igual ao QRD11 M13 e no entanto não existem picos próximos de zero no gráfico representando assim um melhor comportamento como difusor sonoro.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pode-se dizer que o objetivo delineado no início deste trabalho, de testar a aplicação de uma ferramenta numérica para o estudo de painéis difusores acústicos e de melhor compreender o seu comportamento, foi alcançado.

Da análise geral resultante dos resultados expostos no capítulo anterior percebe-se que todos os difusores estudados apresentam um comportamento semelhante ao de uma superfície plana da mesma dimensão até sensivelmente a frequência de 500Hz a partir da qual se distingue a verdadeira função de difusão. É de evidenciar o comportamento do QRD7 M11 cujo gráfico acompanha o da superfície plana até aos 400Hz (Figura 4.10) e oferece assim um comportamento de difusor a uma frequência mais baixa.

Do estudo paramétrico à secção A1-LF obtém-se resultados interessantes quanto ao posicionamento de painéis difusores acústicos. De destacar o estudo relativo à variação das posições dos recetores e da fonte que exemplifica a sua aplicação, por exemplo, numa sala de espetáculos e a posição relativa do público e a sua proximidade ao difusor.

Das quatro geometrias base estudadas é de evidenciar a PD. Em primeiro lugar por a sua secção ser claramente diferente ao apresentar poços definidos e não ser uma geometria em degraus tal com as restantes analisadas. Em segundo porque é uma geometria com alguma complexidade tanto pelo facto de os poços não terem todos a mesma largura e ainda porque as régua longitudinalis que a constituem também apresentarem diferenças entre si. É ainda de realçar o facto de a secção não ser simétrica o que acaba por originar uma dispersão espacial com lóbulos de dispersão diferenciados em direcções distintas.

Em trabalhos futuros seria de todo o interesse a análise a outro tipo de geometrias, nomeadamente o estudo de difusores 3D, o que requer uma capacidade computacional superior, e ainda secções transversais em que fossem incluídas secções circulares.

Poderia também ser útil poder simularem-se distintos materiais de modo a perceber a influência em termos de capacidade de difusão de um mesmo difusor construído a partir de matérias-primas diferentes.

Para finalizar sugere-se um trabalho aprofundado de otimização de geometrias.

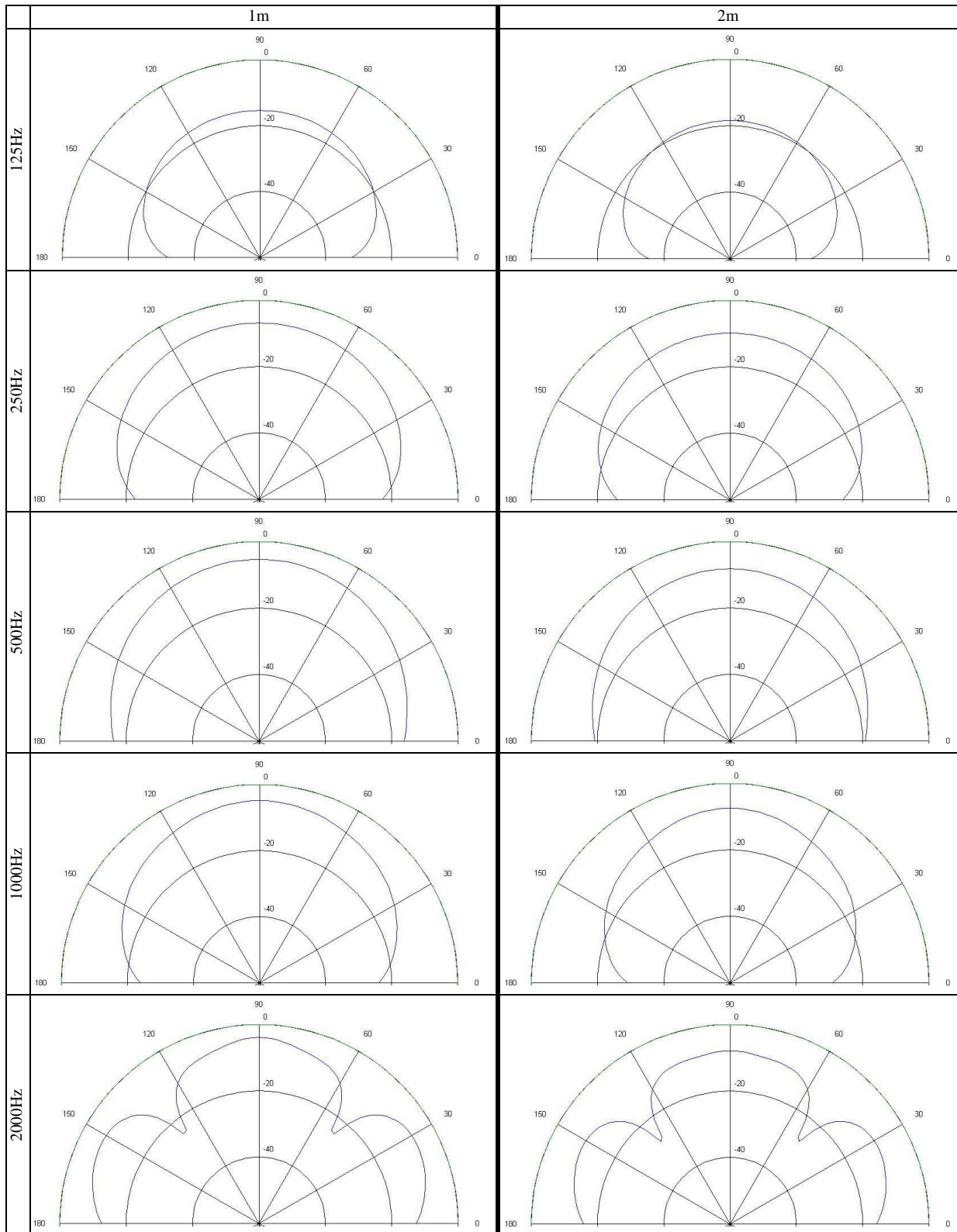
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bastos, L. (2010). “Qualidade Acústica de Auditórios”. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Aveiro
- Beranek, L. (1996). “Acoustics”. Acoustical Society of America, USA.
- Bistafa, S. (2004). “Difusão Sonora em Salas: Paradigmas do Passado e Estado da Arte”. I Seminário Música Ciência Tecnologia: Acústica Musical. Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Cox, T. (2004). “Acoustic Diffusers: The Good, The Bad and The Ugly”. Proceedings of the Institute of Acoustics, Salford University.
- Cox, T. and D’Antonio, P. (2000). “Diffusor application in rooms”. Elsevier, UK.
- Cox, T. and D’Antonio, P. (2004). “Acoustic Absorbers and Diffusers - Theory, design and application”. Spon Press, London.
- Isbert, A. (1998). “Diseño acústico de espacios arquitectónicos”. Edicions UPC, Barcelona.
- Long, M. (2006). “Architectural Acoustics”. Elsevier, USA.
- Meireles, P. (2012). “Estudo do Fenómeno da Difusão Sonora – Soluções à Base de Painéis Difusores”. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Perry, T. (2011). “The Lean Optimization of Acoustic Diffusers: Design by Artificial Evolution, Time Domain Simulation and Fractals”. Honours Thesis. Faculty of Engineering, University of Victoria, Victoria.
- Rathsam, J. and Wang, L. (2006). “A Review of Diffuse Reflections in Architectural Acoustics”. Architectural Engineering – Faculty Publications, University of Nebraska, Lincoln.

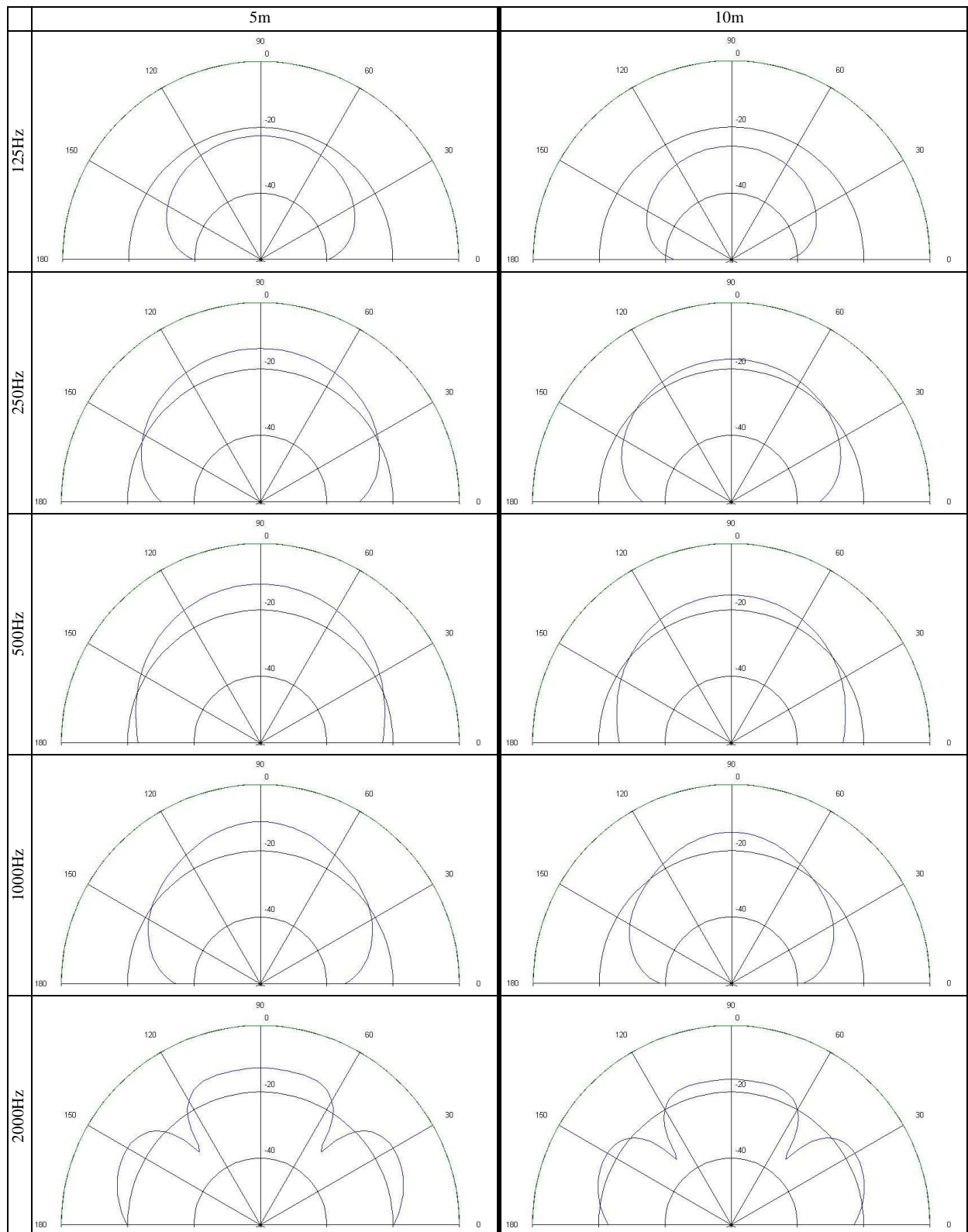
- Rosa, Z. (2009). “Propagação do som em sistemas de AVAC – o caso de atenuadores sonoros”. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Schroeder, M. (1979). “Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls: More lateral sound diffusion”. Drittes Physikalisches Institut, Univesitat Gottingen, Germany.
- Tadeu, A., et al (2010). “Acústica Aplicada”. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Vigran, T. (2008). “Building Acoustics”. Taylor & Francis, London.
- Yokota, T., Sakamoto, S. and Tachibana, H. (2001). “Visualization of sound propagation and scattering in rooms” Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Tokyo.
- AES Standards (2001). “AES Information Document for room acoustics and sound reinforcement systems – Characterisation and measurement of surface scattering uniformity”. AES-4id-2001 (r2007), Audio Engineering Society, New York.
- Arqen@ (2013). <http://arqen.com/acoustics/>. Acoustic Design, Recording Studio Acosutics, Canada.
- Reflex@ (2013). <http://reflex.afmg.eu/>. Ahnert Feistel Media Group, Berlin, Germany.

ANEXO A – ESTUDO DA GEOMETRIA A1-LF

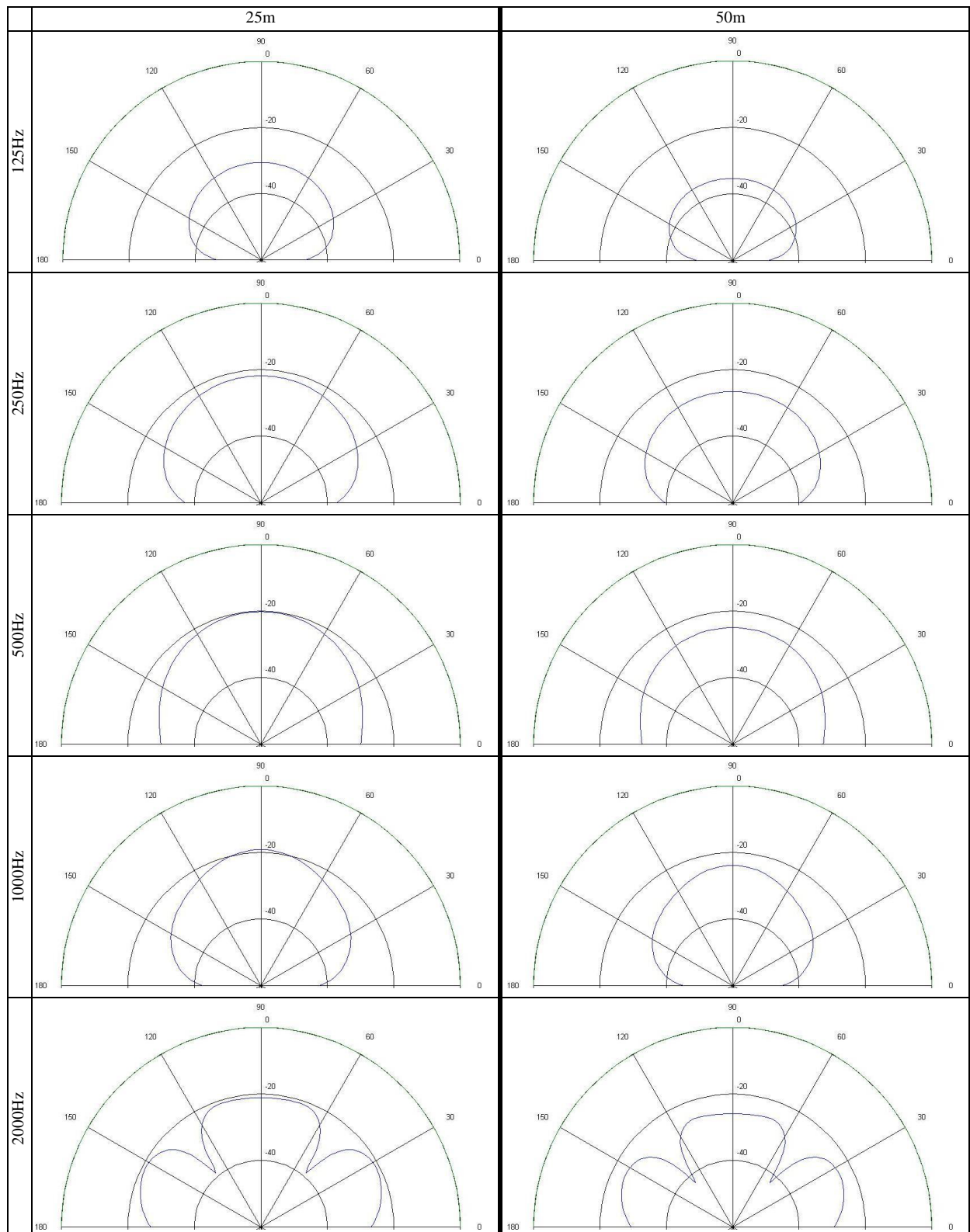
Quadro A.1 – Resposta espacial para um difusor A1-LF com posição de fonte a 100 metros e recetores a 1 e 2 metros



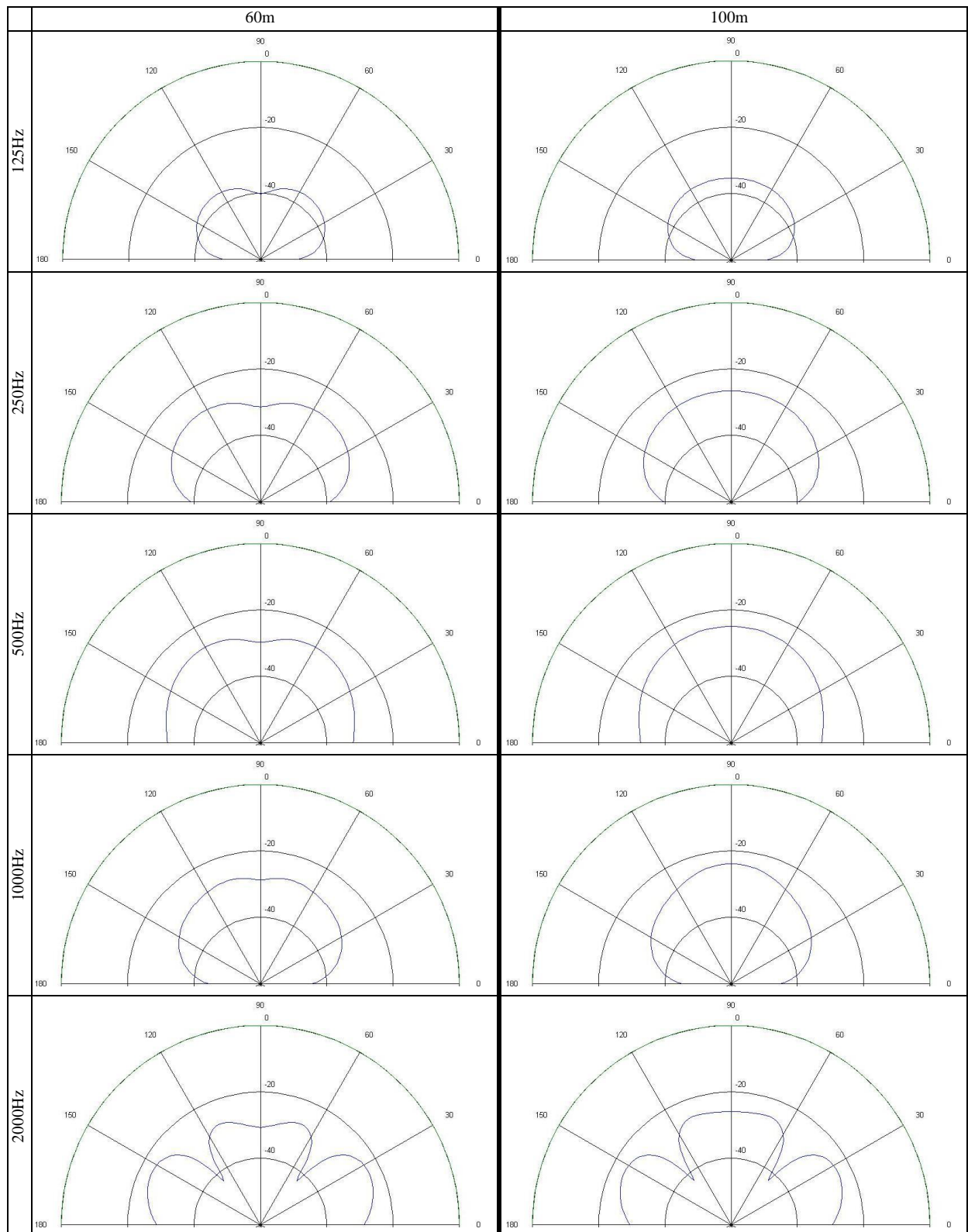
Quadro A.2 – Resposta espacial para um difusor A1-LF com posição de fonte a 100 metros e recetores a 5 e 10 metros



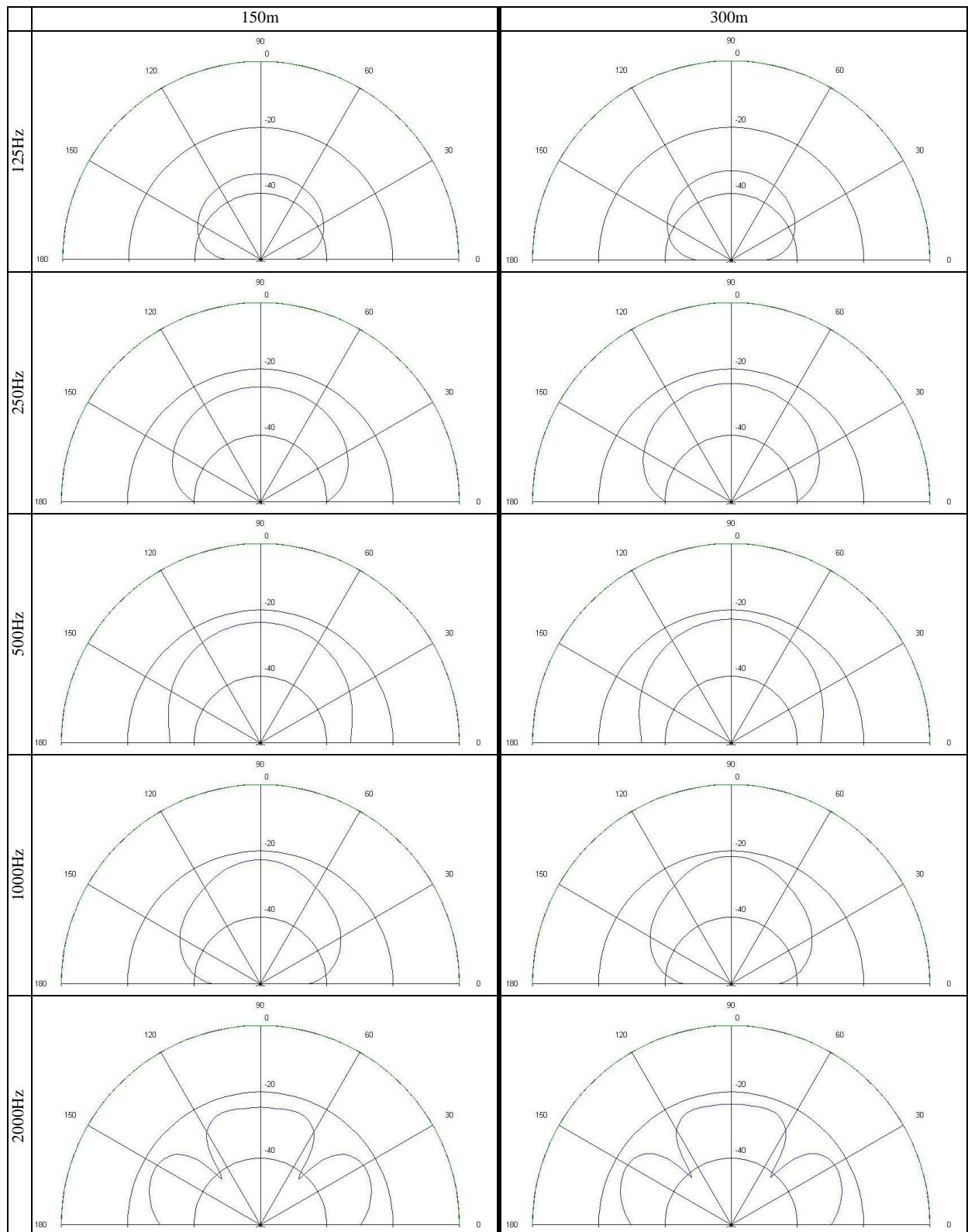
Quadro A.3 – Resposta espacial para um difusor A1-LF com posição de fonte a 100 metros e recetores a 25 e 50 metros



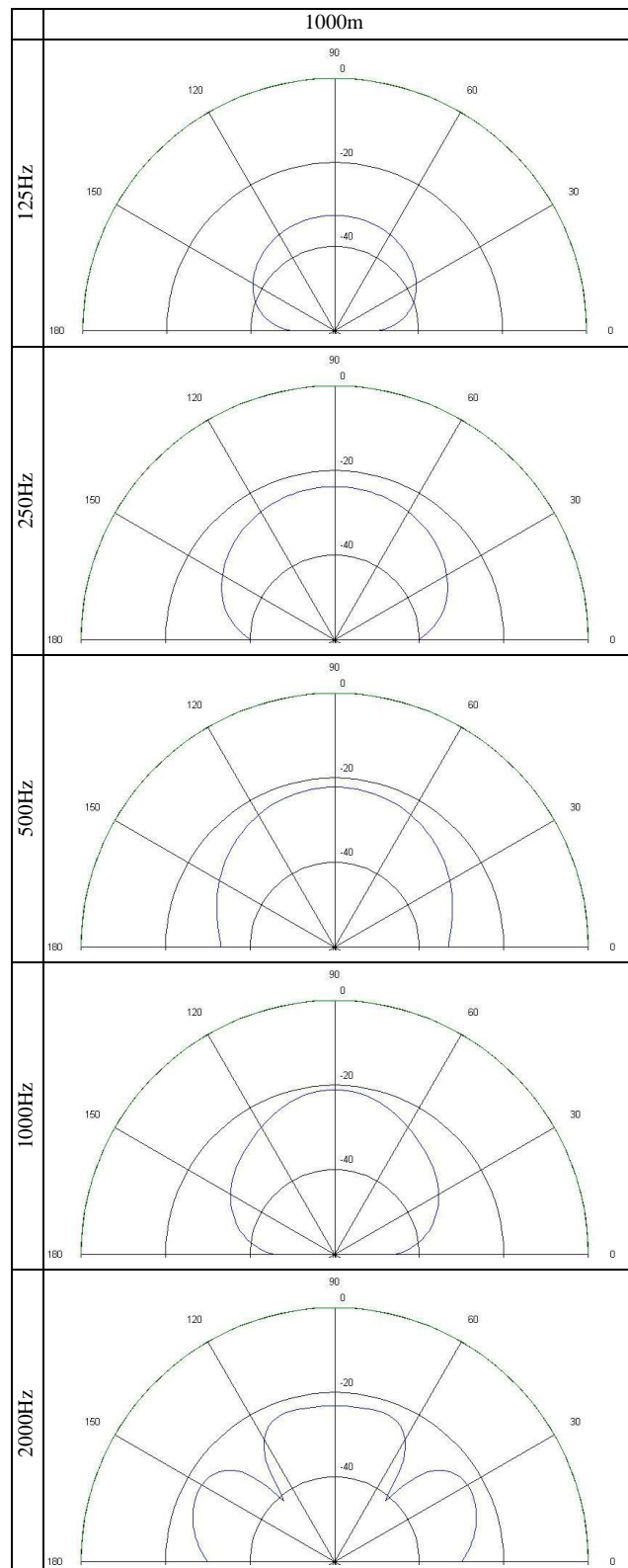
Quadro A.4 – Resposta espacial para um difusor A1-LF com posição de recetores a 50 metros e fonte a 60 e 100 metros



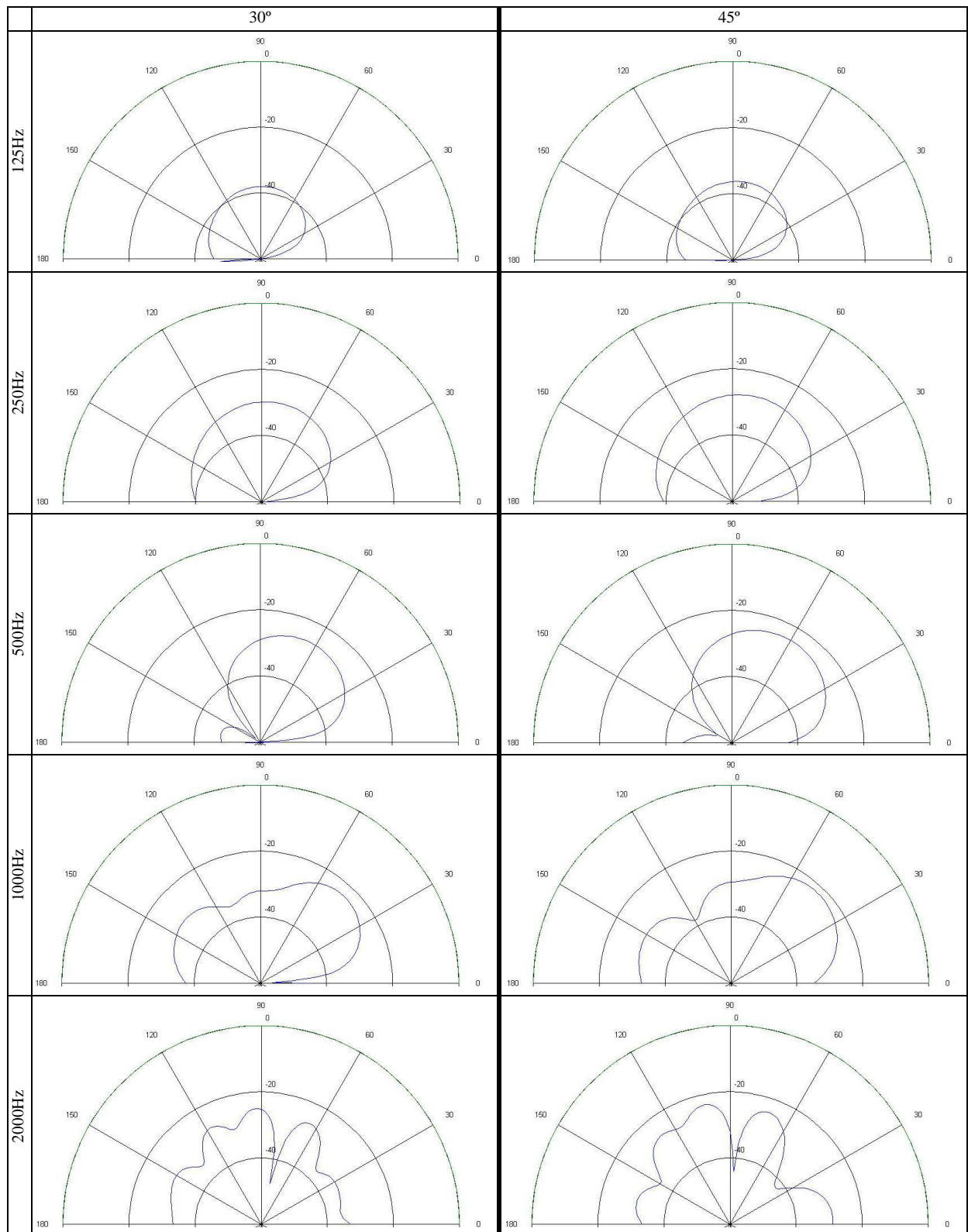
Quadro A.5 – Resposta espacial para um difusor A1-LF com posição de recetores a 50 metros e fonte a 150 e 300 metros



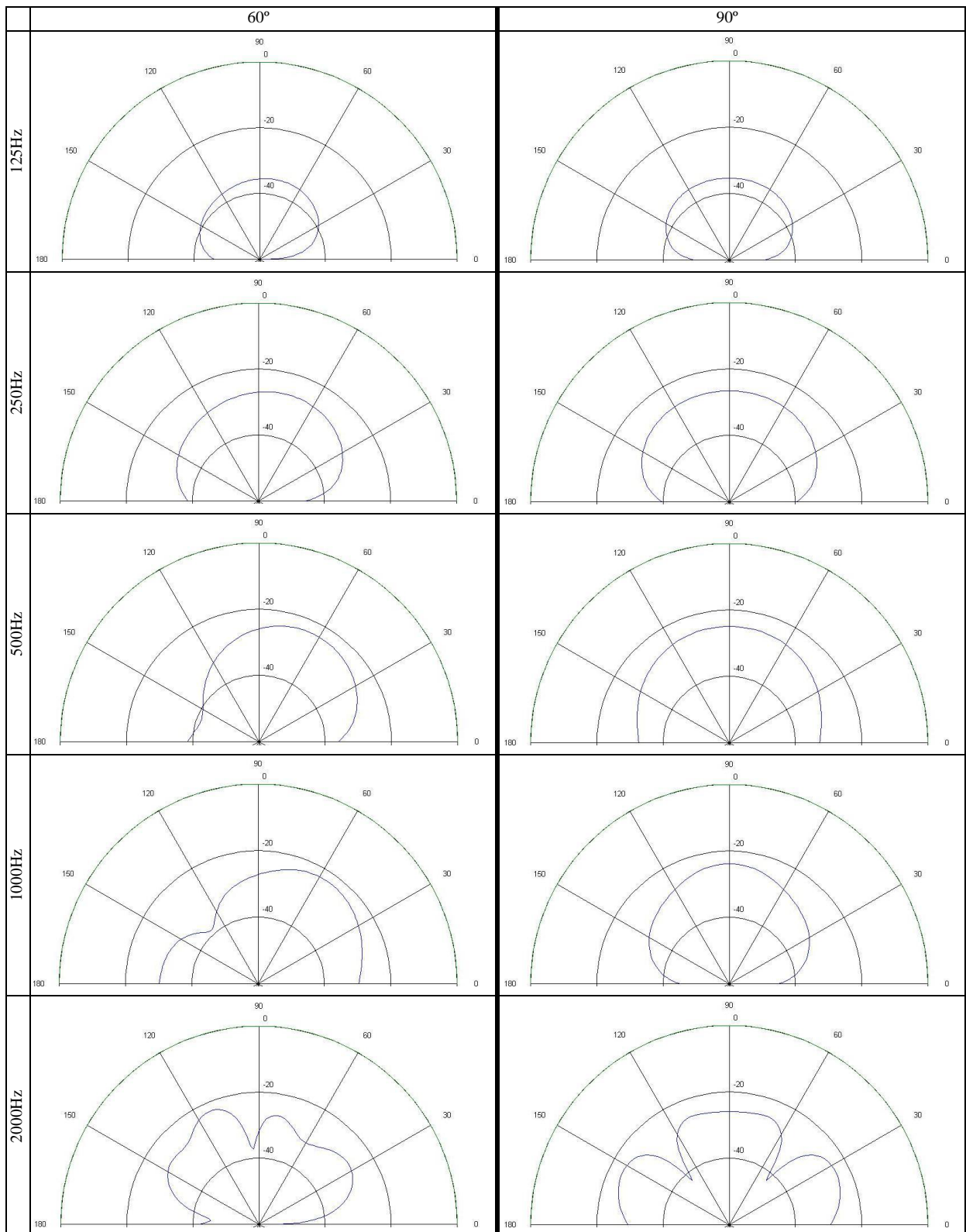
Quadro A.6 – Resposta espacial para um difusor A1-LF com posição de recetores a 100 metros e fonte a 1000 metros



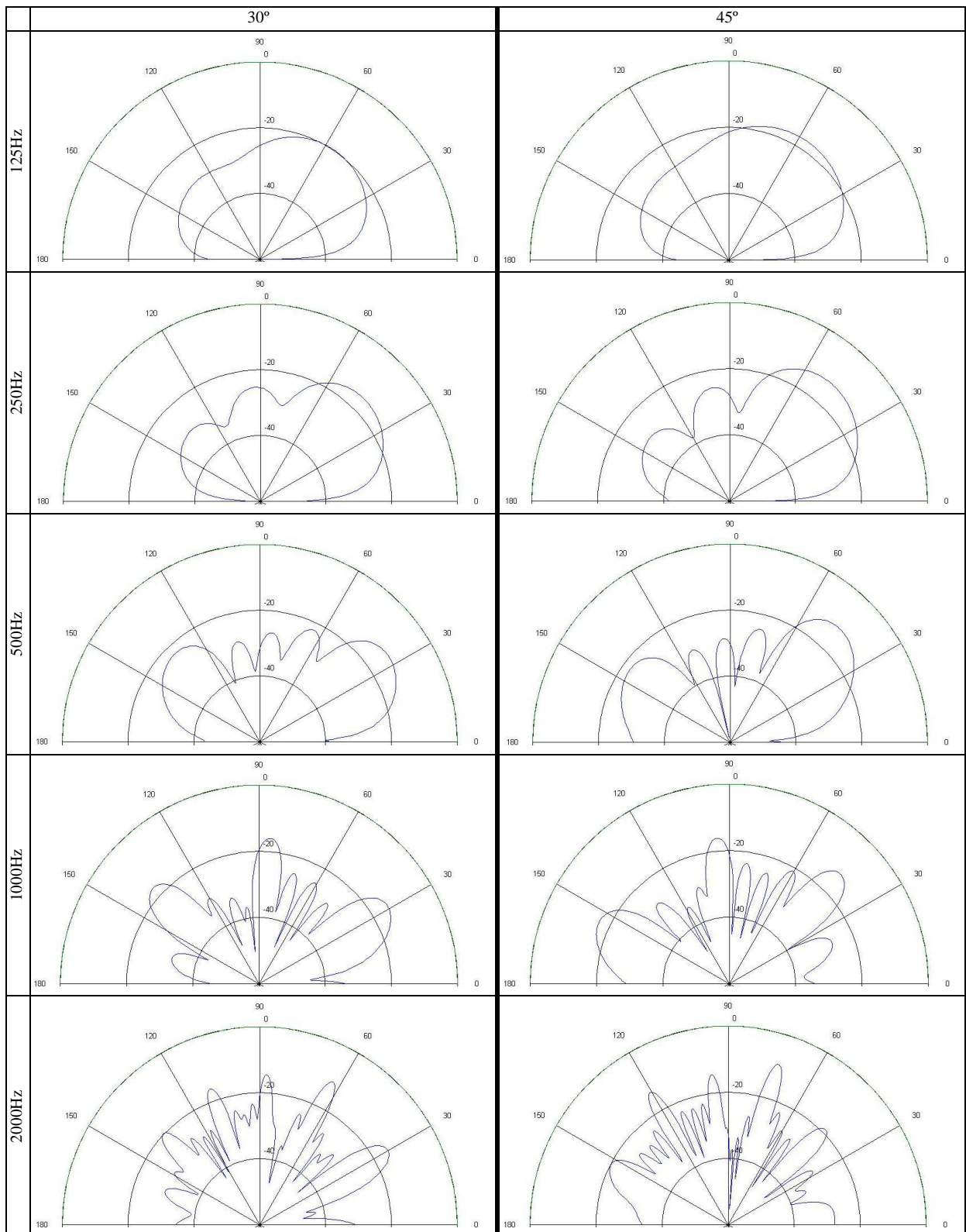
Quadro A.7 – Resposta espacial para um difusor A1-LF com ângulos de incidência de 30° e 45°



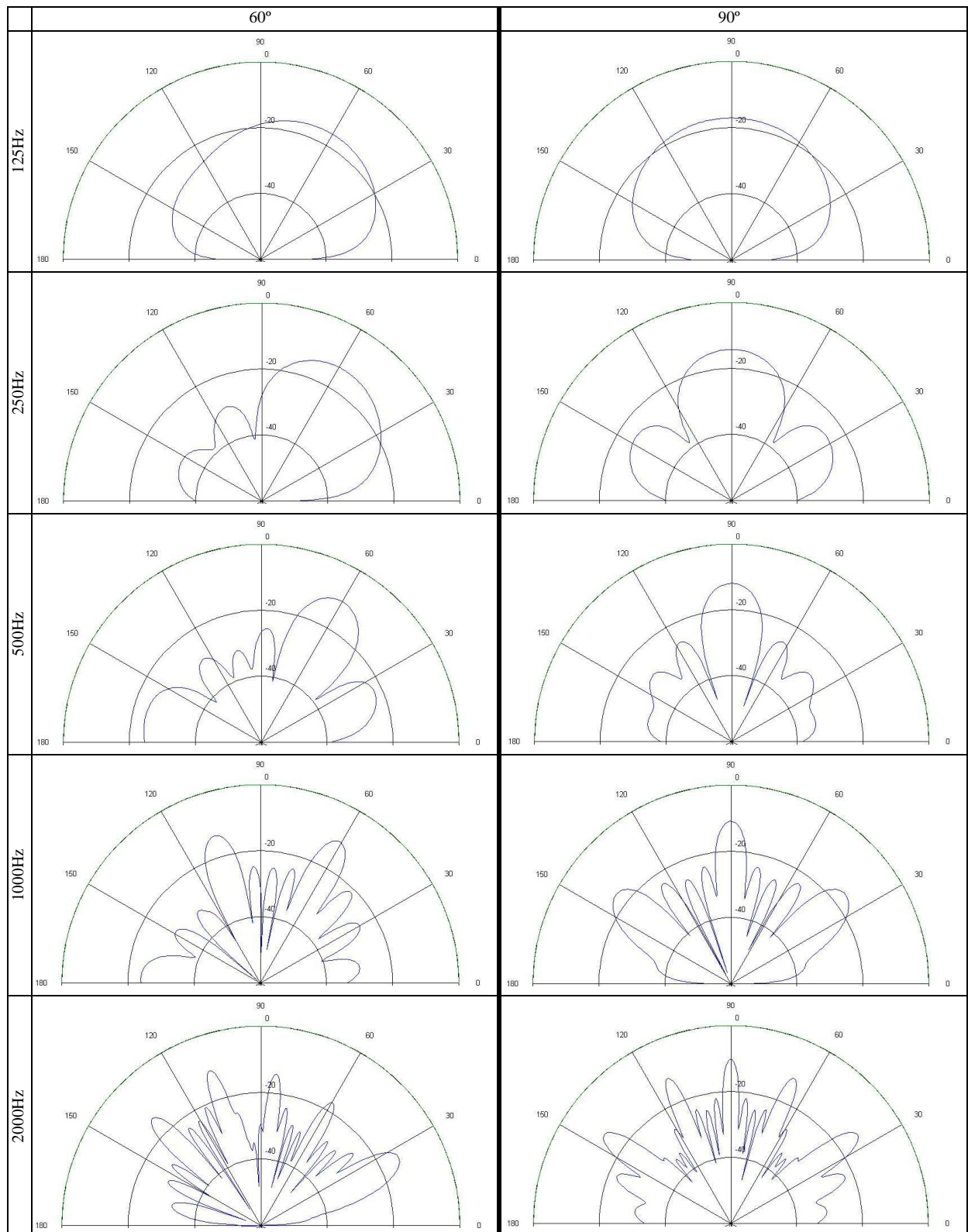
Quadro A.8 – Resposta espacial para um difusor A1-LF com ângulos de incidência de 60° e 90°



Quadro A.9 – Resposta espacial para cinco difusores A1-LF com ângulos de incidência de 30° e 45°

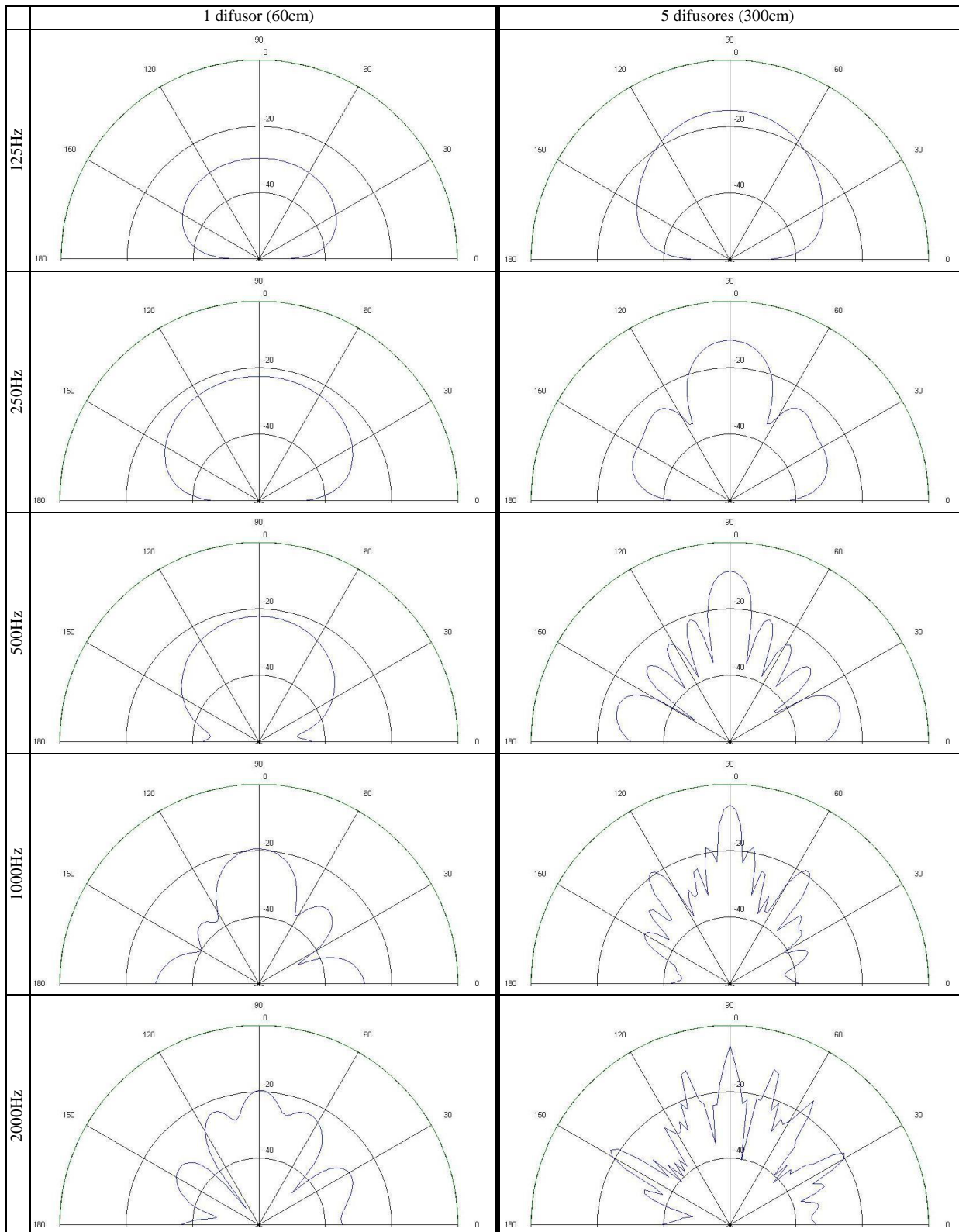


Quadro A.10 – Resposta espacial para cinco difusores A1-LF com ângulos de incidência de 60° e 90°

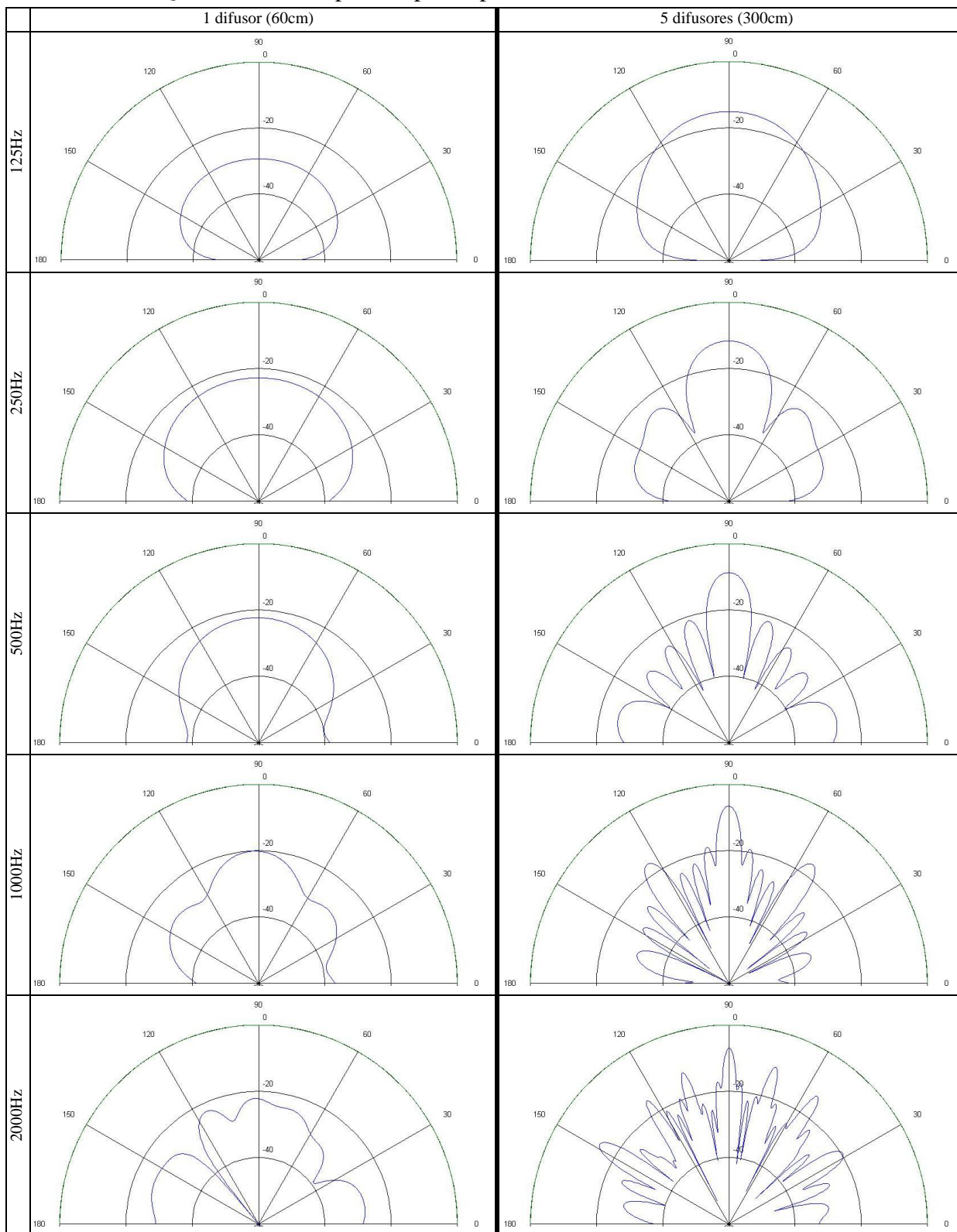


ANEXO B – ESTUDO DA GEOMETRIA PD

Quadro B.1 – Resposta espacial para um e cinco difusores PD

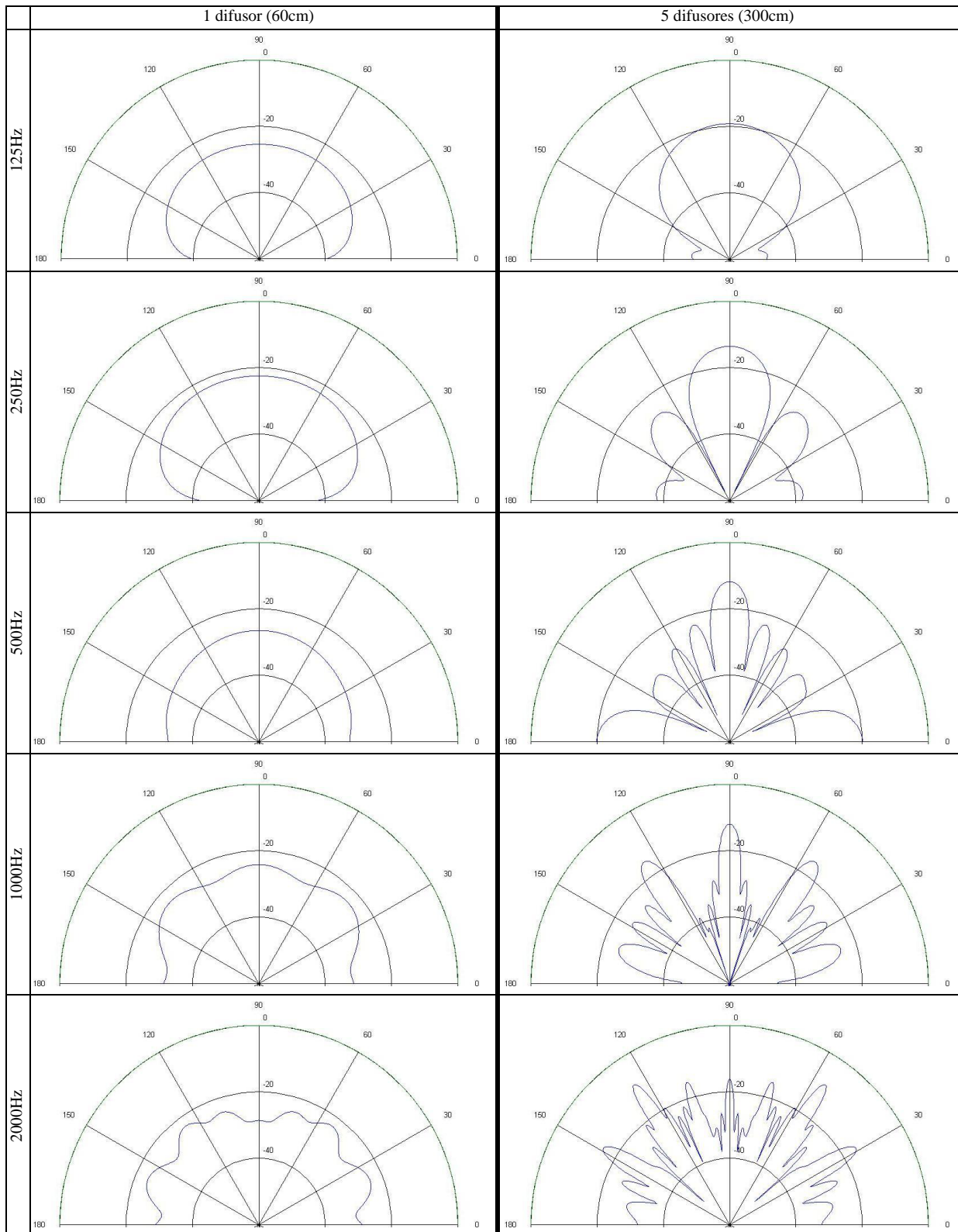


Quadro B.2 – Resposta espacial para um e cinco difusores PD M1

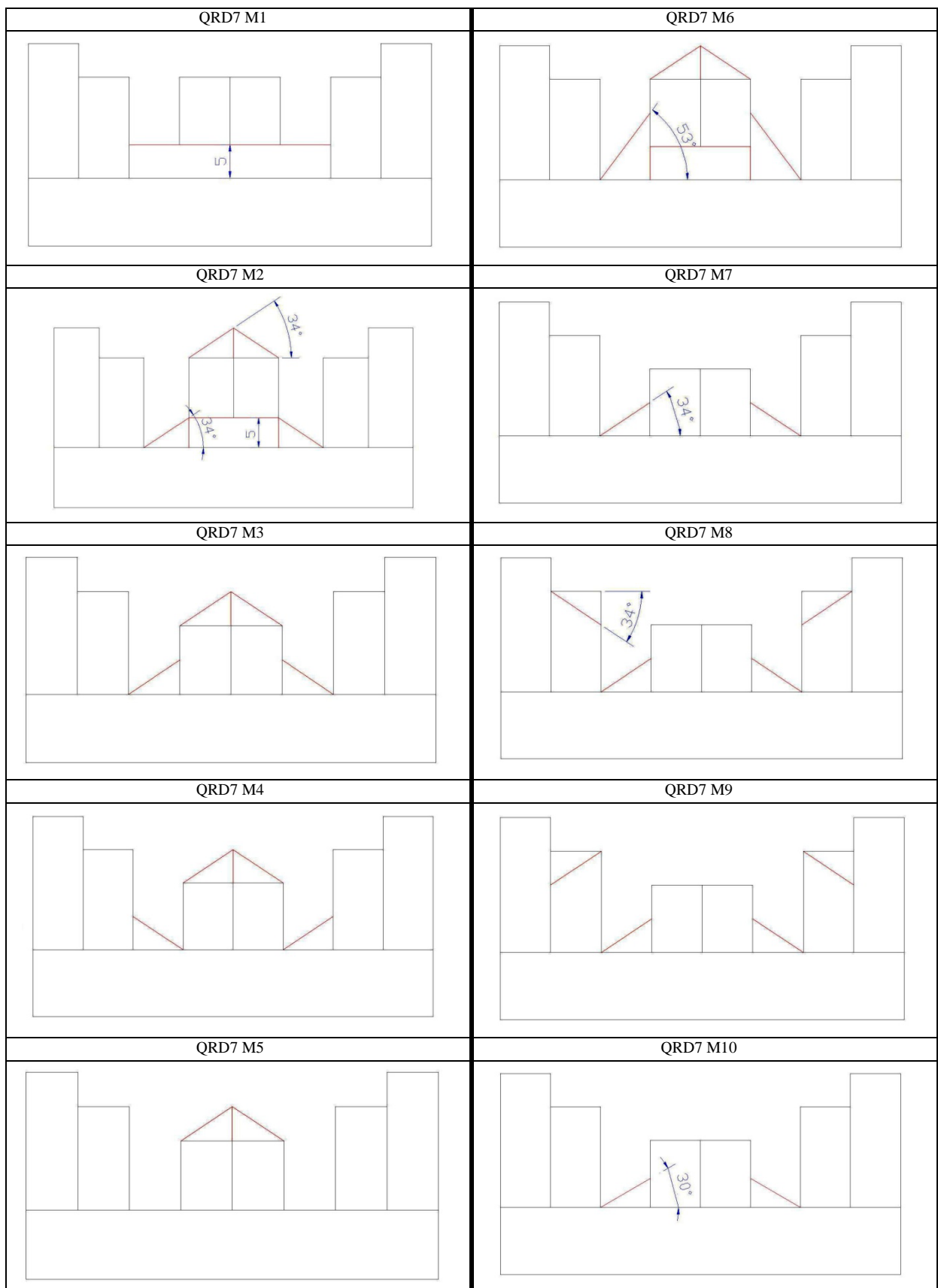


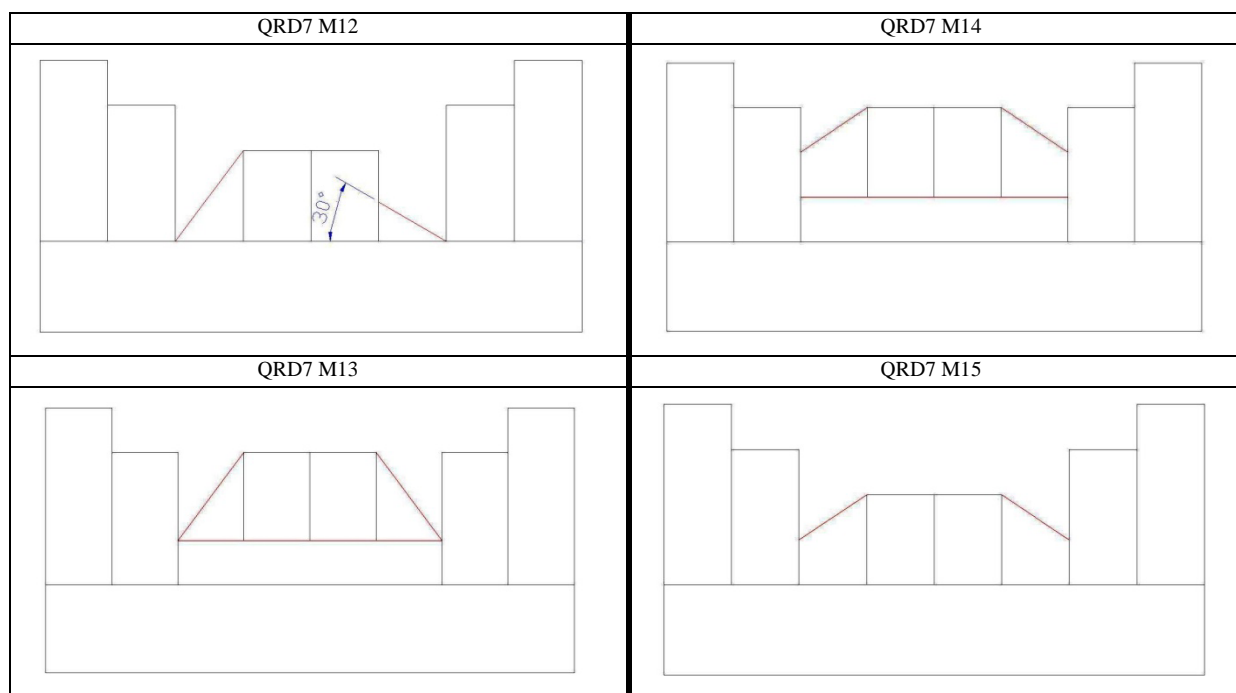
ANEXO C – ESTUDO DA GEOMETRIA QRD7

Quadro C.1 – Resposta espacial para um e cinco difusores QRD7



Quadro C.2 – Secções transversais das geometrias QRD7 M

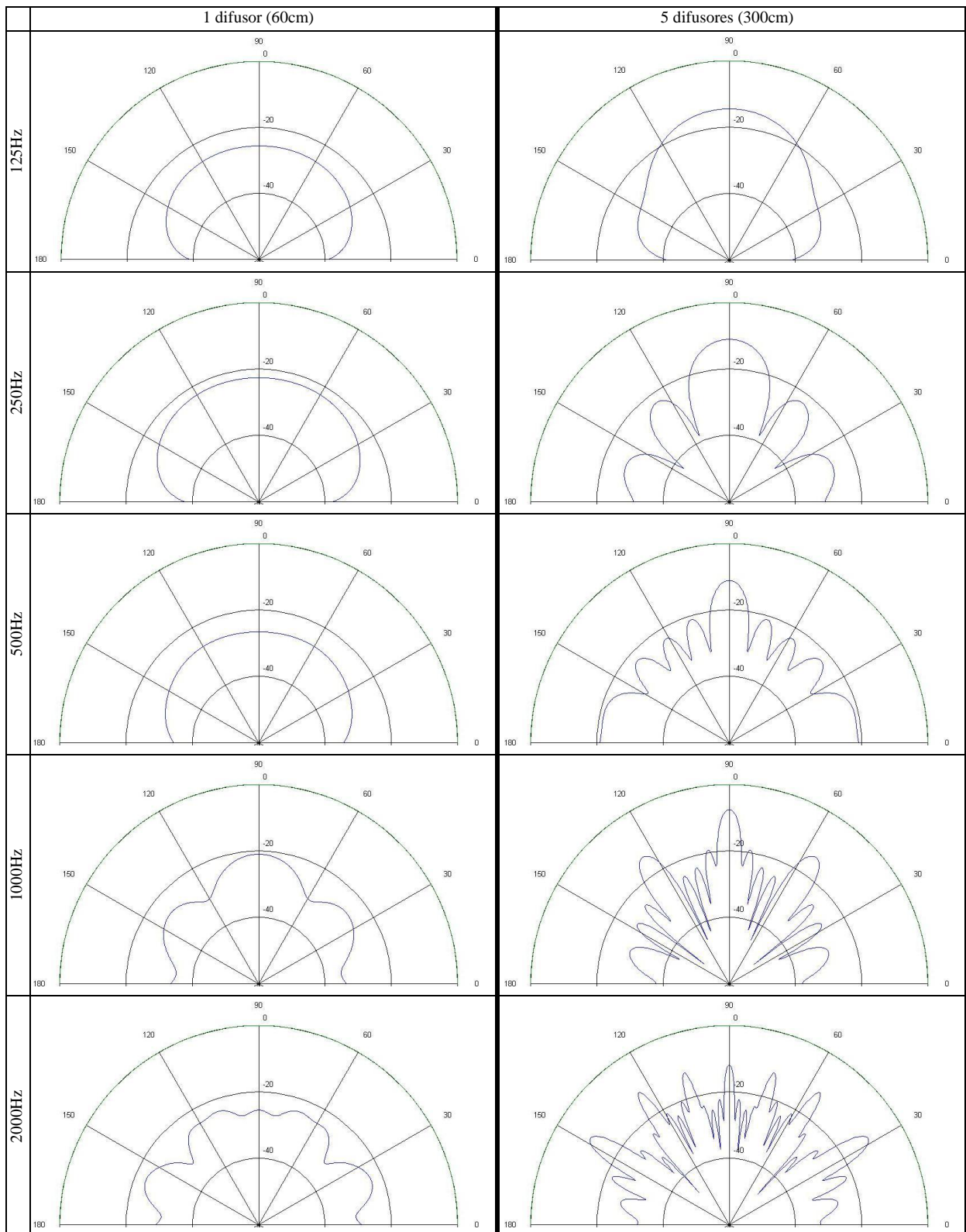




Quadro C.3 – Coeficientes de difusão para as diferentes geometrias QRD7 M

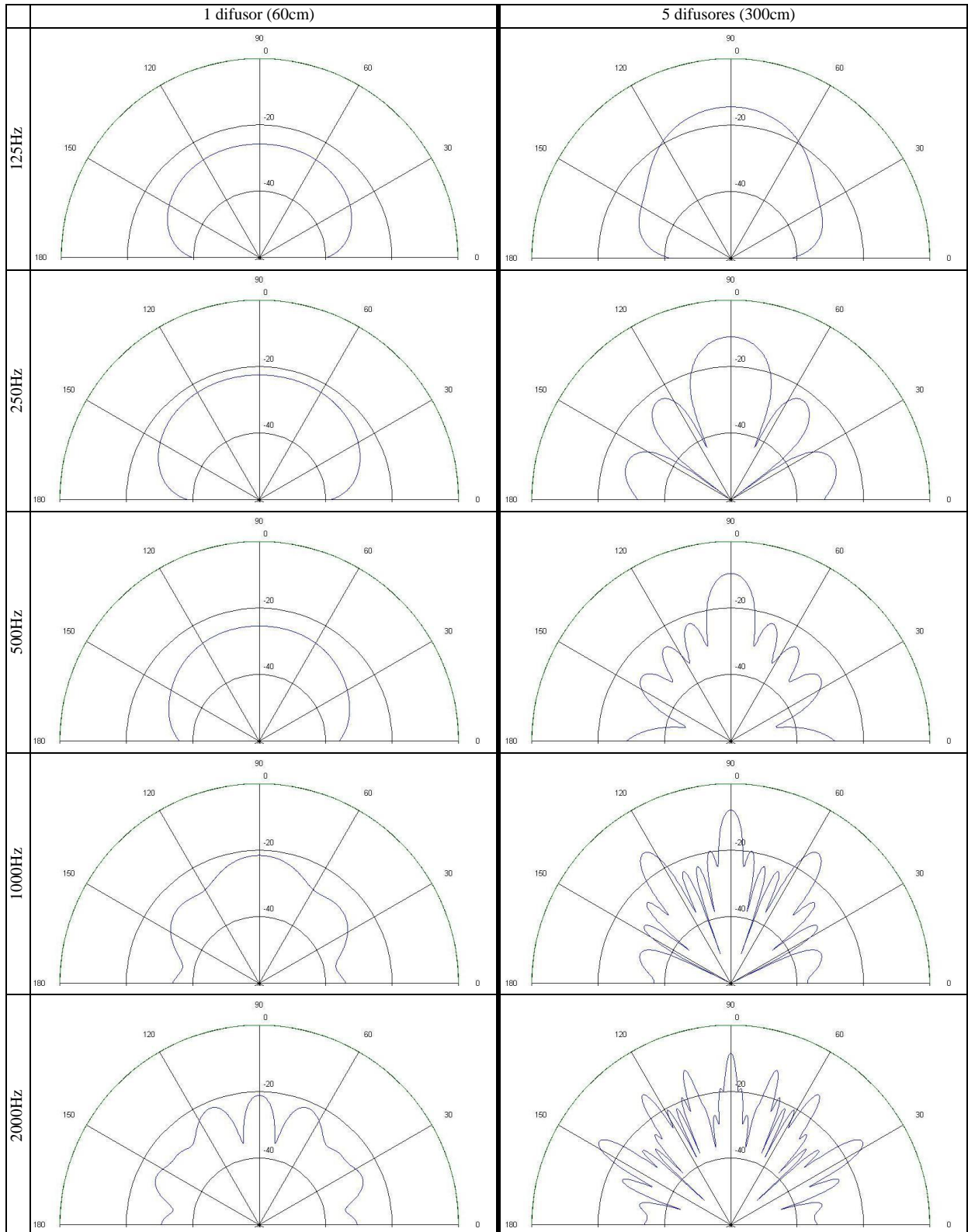
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15
100	0,732	0,732	0,728	0,728	0,725	0,735	0,725	0,723	0,723	0,725	0,728	0,726	0,737	0,741	0,731
125	0,728	0,728	0,722	0,722	0,719	0,731	0,720	0,717	0,717	0,719	0,722	0,721	0,735	0,740	0,727
160	0,726	0,725	0,716	0,716	0,712	0,731	0,712	0,709	0,709	0,712	0,717	0,714	0,737	0,745	0,724
200	0,731	0,728	0,712	0,712	0,703	0,740	0,704	0,700	0,699	0,703	0,713	0,708	0,751	0,767	0,727
250	0,746	0,737	0,707	0,707	0,686	0,763	0,691	0,686	0,683	0,689	0,710	0,699	0,789	0,819	0,740
315	0,746	0,722	0,689	0,689	0,653	0,766	0,668	0,666	0,659	0,664	0,698	0,680	0,809	0,848	0,741
400	0,706	0,676	0,684	0,684	0,661	0,707	0,679	0,669	0,671	0,676	0,694	0,687	0,737	0,752	0,715
500	0,693	0,679	0,757	0,757	0,710	0,670	0,773	0,705	0,759	0,773	0,759	0,681	0,635	0,608	0,719
630	0,686	0,395	0,621	0,625	0,382	0,579	0,669	0,669	0,724	0,619	0,876	0,666	0,645	0,580	0,828
800	0,311	0,291	0,304	0,306	0,320	0,320	0,309	0,348	0,481	0,294	0,673	0,462	0,610	0,481	0,629
1000	0,303	0,361	0,336	0,333	0,434	0,351	0,575	0,533	0,444	0,609	0,439	0,524	0,313	0,361	0,691
1250	0,390	0,894	0,515	0,509	0,610	0,872	0,847	0,552	0,350	0,851	0,848	0,843	0,278	0,670	0,210
1600	0,381	0,557	0,662	0,650	0,671	0,564	0,692	0,327	0,433	0,705	0,688	0,697	0,330	0,679	0,561
2000	0,446	0,653	0,635	0,679	0,727	0,647	0,772	0,513	0,270	0,775	0,775	0,777	0,412	0,491	0,773
2500	0,557	0,573	0,464	0,529	0,546	0,335	0,479	0,501	0,631	0,432	0,479	0,283	0,385	0,238	0,460
3150	0,140	0,384	0,364	0,397	0,429	0,491	0,451	0,365	0,438	0,483	0,322	0,316	0,198	0,433	0,380
4000	0,319	0,535	0,374	0,217	0,506	0,415	0,482	0,641	0,515	0,496	0,452	0,482	0,294	0,227	0,357
5000	0,207	0,496	0,493	0,510	0,410	0,304	0,361	0,526	0,320	0,395	0,325	0,421	0,353	0,436	0,262
MÉD	0,530	0,604	0,582	0,582	0,589	0,596	0,628	0,586	0,568	0,629	0,645	0,616	0,542	0,590	0,610

Quadro C.4 – Resposta espacial para um e cinco difusores QRD7 M11

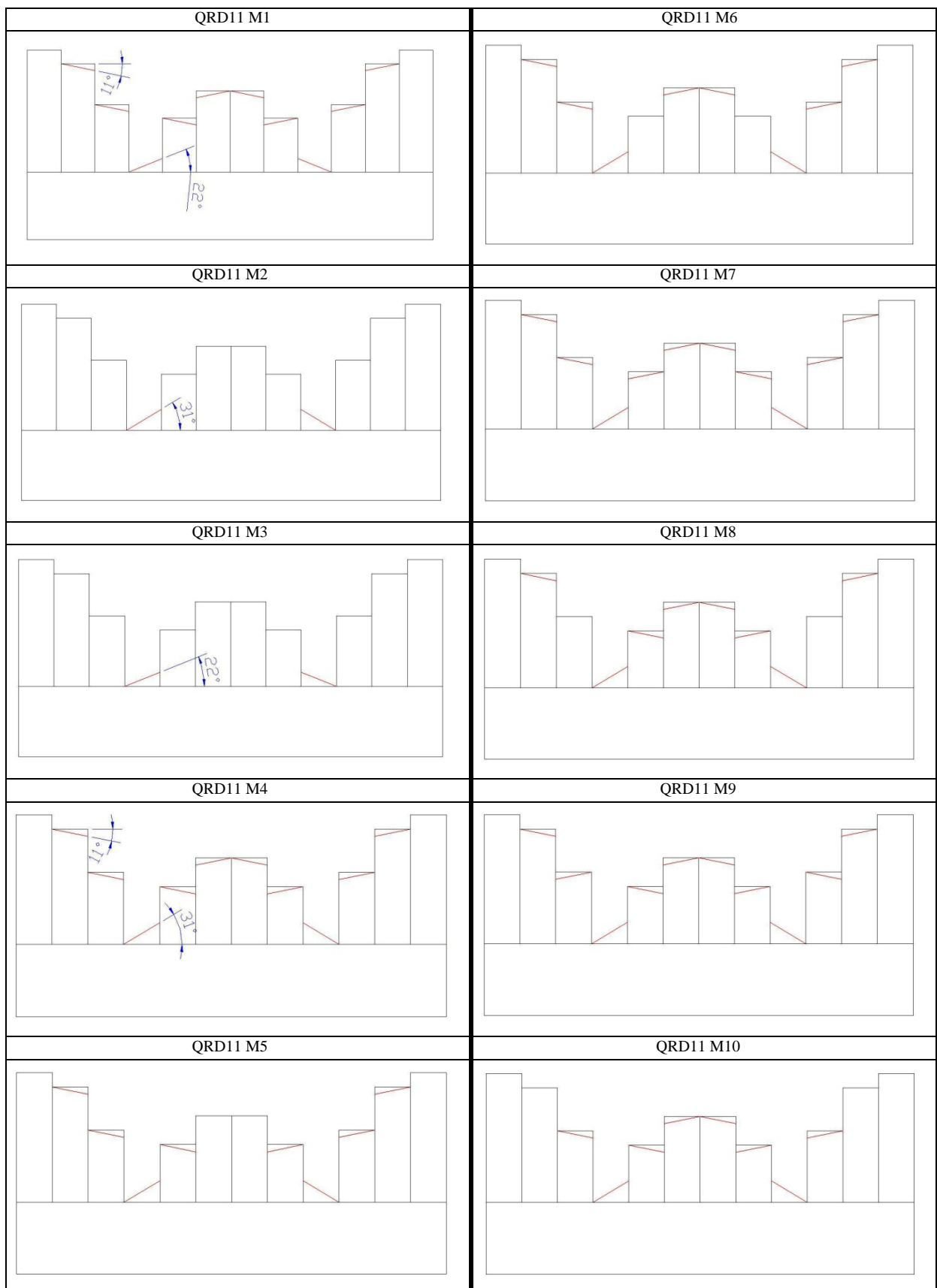


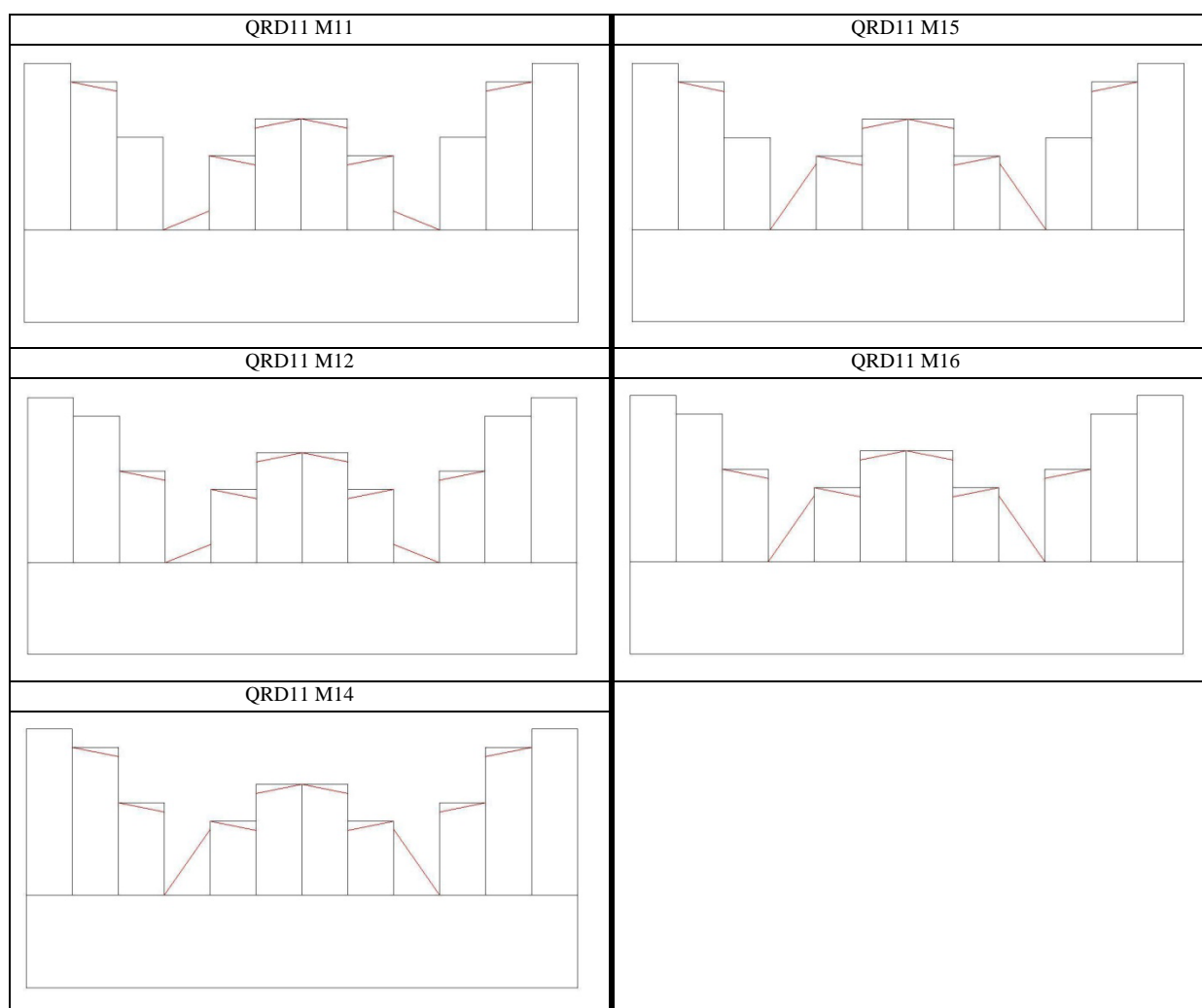
ANEXO D – ESTUDO DA GEOMETRIA QRD11

Quadro D.1 – Resposta espacial para um e cinco difusores QRD11



Quadro D.2 – Secções transversais das geometrias QRD11 M





Quadro D.3 – Coeficientes de difusão para as diferentes geometrias QRD11 M

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16
100	0,723	0,724	0,724	0,723	0,723	0,723	0,723	0,723	0,723	0,723	0,723	0,723	0,725	0,724	0,725	0,724
125	0,716	0,718	0,718	0,717	0,717	0,717	0,717	0,717	0,717	0,717	0,717	0,717	0,720	0,718	0,719	0,719
160	0,709	0,711	0,710	0,709	0,710	0,710	0,709	0,710	0,709	0,709	0,709	0,709	0,713	0,712	0,712	0,712
200	0,702	0,706	0,705	0,703	0,704	0,704	0,703	0,704	0,703	0,703	0,703	0,702	0,710	0,708	0,708	0,708
250	0,697	0,704	0,701	0,699	0,701	0,701	0,699	0,700	0,699	0,698	0,698	0,696	0,714	0,709	0,710	0,708
315	0,685	0,694	0,690	0,689	0,692	0,692	0,689	0,691	0,688	0,687	0,687	0,683	0,710	0,704	0,706	0,702
400	0,663	0,670	0,668	0,666	0,666	0,668	0,666	0,667	0,666	0,667	0,665	0,664	0,681	0,676	0,678	0,677
500	0,658	0,668	0,671	0,656	0,651	0,653	0,657	0,661	0,660	0,671	0,663	0,673	0,657	0,648	0,651	0,661
630	0,670	0,707	0,693	0,680	0,663	0,676	0,687	0,700	0,693	0,708	0,690	0,697	0,709	0,683	0,699	0,713
800	0,354	0,386	0,318	0,436	0,398	0,427	0,505	0,435	0,431	0,435	0,344	0,352	0,629	0,627	0,656	0,639
1000	0,450	0,388	0,419	0,407	0,387	0,409	0,330	0,375	0,360	0,443	0,415	0,494	0,301	0,299	0,282	0,31
1250	0,522	0,554	0,574	0,530	0,514	0,508	0,478	0,513	0,481	0,568	0,515	0,562	0,449	0,481	0,451	0,524
1600	0,743	0,769	0,757	0,759	0,678	0,797	0,797	0,758	0,720	0,728	0,748	0,697	0,774	0,771	0,767	0,773
2000	0,574	0,447	0,500	0,556	0,557	0,533	0,552	0,521	0,481	0,483	0,542	0,499	0,497	0,555	0,525	0,486
2500	0,612	0,619	0,619	0,587	0,606	0,488	0,595	0,593	0,510	0,536	0,617	0,594	0,600	0,583	0,589	0,533

3150	0,549	0,491	0,536	0,508	0,382	0,518	0,457	0,561	0,559	0,491	0,588	0,527	0,543	0,576	0,599	0,533
4000	0,494	0,509	0,524	0,555	0,417	0,465	0,460	0,610	0,604	0,612	0,578	0,523	0,521	0,463	0,506	0,472
5000	0,377	0,428	0,422	0,429	0,509	0,376	0,343	0,339	0,399	0,394	0,396	0,468	0,529	0,395	0,409	0,526
MÉD	0,605	0,605	0,608	0,612	0,593	0,598	0,598	0,610	0,600	0,610	0,611	0,610	0,621	0,613	0,616	0,618

Quadro D.4 – Resposta espacial para um e cinco difusores QRD11 M13

