



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA



Ricardo Jorge Patraquim Godinho Parreira

**DIFUSORES ACÚSTICOS 3D COM FORMA
ORGÂNICA – ESTUDO NUMÉRICO E
OPTIMIZAÇÃO**

Tese no âmbito do Doutoramento em Engenharia Civil na área científica de Construções orientada pelos Professores Doutores Luís Manuel Cortesão Godinho e Paulo Jorge Rodrigues Amado Mendes e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Outubro de 2018

Faculdade de Ciências de Ciências e Tecnologia
da Universidade de Coimbra

Difusores acústicos 3D com forma orgânica – estudo numérico e optimização

Ricardo Jorge Patraquim Godinho Parreira

Tese de Doutoramento em Engenharia Civil na área científica de Construções orientada pelos Professores Doutores Luís Manuel Cortesão Godinho e Paulo Jorge Rodrigues Amado Mendes e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Outubro de 2018



UNIVERSIDADE D
COIMBRA



Este trabalho foi financiado por fundos nacionais do Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior e pelo Fundo Social Europeu através do POHC – Programa Operacional Capital Humano através da atribuição ao autor de uma Bolsa de Doutoramento em Empresa (BDE): **SFRH/BDE/96260/2013**

Cofinanciado por:



UNIÃO EUROPEIA
Fundo Social Europeu

A empresa co-financiadora da referida BDE foi a Castelhana e Ferreira SA.

Cofinanciado por:



Este trabalho foi igualmente financiado pelos fundos do FEDER através do Programa Operacional dos Factores de Competitividade - COMPETE e pelos fundos nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia no âmbito do projeto POCI-01-0145-FEDER-007633 e através do Programa Operacional Regional CENTRO2020 no âmbito do projeto CENTRO-01-0145-FEDER-000006 (SUSpENsE).

Cofinanciado por:



UNIÃO EUROPEIA
Fundo Europeu
De Desenvolvimento Regional

Ao J.H.

RESUMO

Os difusores acústicos são correntemente utilizados no condicionamento acústico de espaços com maiores exigências acústicas (estúdios, salas de espectáculos, etc.), servindo, sobretudo, para garantir uma acústica adequada, sem absorções excessivas e espalhando o som mais uniformemente pela sala, eliminando ao mesmo tempo defeitos acústicos como ecos ou zonas sombra. Apesar da optimização de difusores ser um tema de pesquisa intensa nos últimos anos, grande parte dos difusores existentes no mercado ainda correspondem a soluções do tipo Schröder, QRD ou MLS, ou derivadas dessas, com geometrias angulosas, baseados em sub-elementos paralelepípedicos e associados numa dada sequência numérica mas cujo aspecto muitas vezes não é do agrado dos arquitectos.

Deste modo, o principal objectivo deste trabalho é apresentar uma metodologia de desenvolvimento de superfícies mais orgânicas (i.e., curvilíneas), que potencialmente sejam esteticamente mais apreciadas e melhor aceites e que estejam optimizadas para dispersar uniformemente o som nelas incidente. Assim, neste documento demonstra-se a possibilidade de desenvolver soluções inovadoras de difusores acústicos com desempenho acústico maximizado, cuja forma é gerada pelo uso de funções de base radial (RBF) e que são baseadas nas mais modernas técnicas de modelação numérica, alicerçadas no método dos elementos de fronteira (BEM) e de optimização (Algoritmos Genéticos).

Embora já existam algumas metodologias de desenvolvimento, modelação e optimização de difusores, julga-se que a metodologia proposta, bem como as ferramentas desenvolvidas baseadas no método dos elementos de fronteira, complementadas por algoritmos genéticos para a optimização, possam contribuir para o surgimento de novos produtos no mercado.

Palavras-Chave: Difusores acústicos; Formas orgânicas; Optimização do desempenho acústico; RBF; BEM; Algoritmos genéticos.

ABSTRACT

Acoustic diffusers are commonly used in acoustic conditioning of spaces with higher acoustic requirements (studio control rooms, concert halls, theaters, etc.), acting mainly to ensure proper acoustics without excessive absorption, by scattering the sound evenly around the room and eliminating acoustic defects, such as echoes or shadow zones. Most of the existing diffuser solutions presently available in the market correspond to Schröder QRD, PRD or MLS diffusers, with sharp geometries and based on rectangular wells or sub-elements determined by a given numeric sequence and whose appearance is often not appreciated by architects.

Therefore, the main objective of this work is to present a methodology for the development of more organic surfaces (i.e., curvilinear), which are potentially more aesthetically pleasing and better accepted and which are optimized to uniformly disperse the sound impinging them. Thus, this work demonstrates the possibility of developing innovative solutions of acoustic diffusers with maximized acoustic performance, whose shape is generated by the use of radial-based functions (RBF) and which are based on the most modern numerical modeling techniques such as the Boundary Element Method (BEM) and Genetic Algorithms for optimization.

Although there are some already developed methodologies, modeling and optimization of diffusers, it is believed that the proposed methodology and the tools to be implemented (including the Boundary Elements Method, associated with recent techniques, complemented by genetic algorithms for optimization) can contribute to the emergence of new products on the market.

Keywords: Acoustic diffusers; Organic shapes; Optimization of acoustic performance; RBF; BEM; Genetic algorithms.

AGRADECIMENTOS

Antes de mais, quero agradecer a confiança que a FCT depositou em mim e no trabalho que agora venho apresentar ao atribuir-me uma bolsa BDE, indispensável para que tudo isto acontecesse.

Agradeço ainda à Castelhana e Ferreira que patrocinou o trabalho e permitiu que este tenha sido realizado no seu seio e em sintonia com os seus interesses. Agradeço sobretudo ao Sr. Costa Ferreira por acreditar absolutamente que o conhecimento científico não só é imprescindível como é fundamental para o crescimento e retorno dos investimentos da C&F e por considerar que a inovação e desenvolvimento tecnológico de novos produtos é, e sempre foi, um patamar estratégico para reforçar a liderança e o contributo da C&F no sector onde se insere e ser factor de diferenciação. O meu muito obrigado pela visão inspiradora, incentivo, e liderança, que foram indispensáveis para concretizar este projecto. Também não posso esquecer de agradecer ao Dr. Ricardo Ferreira e ao Dr. Pedro Ferreira, pela supervisão iluminada e apoio constante em todas as etapas, desde a preparação à execução deste trabalho. Alargo ainda estes agradecimentos aos meus colegas da C&F, em particular aos mais próximos, ao Marco Fernandes, ao Pedro Soares e ao Eduardo Luís pelo verdadeiro apoio, sugestões e amizade sincera.

À Universidade Coimbra em abstrato e ao Serviço de Gestão Académica da U. C. em particular, tenho de expressar o meu agradecimento “especial” por ter permitido que frequentasse o ciclo de estudos conducente ao grau de doutor em Engenharia Civil. É certo que nem sempre foi um percurso fácil e descomplicado mas espero convictamente que o meu caso de candidatura e frequência condicionada pela atribuição de bolsa FCT sirva os interesses dos futuros bolseiros FCT e que a tradição se torne mais ágil e aliada do progresso.

Ao DEC/FCTUC agradeço a disponibilização das suas instalações e equipamentos para realizar as simulações numéricas e os ensaios acústicos, nada me faltou, tudo o que havia me foi disponibilizado. Não posso esquecer a ajuda preciosa do Ricardo Oliveira, não só permitiu que eu trabalhasse até tarde no DEC como ainda foi fundamental na conversão gráfica desta Tese. Agradeço ainda o fantástico apoio, verdadeiramente de mangas arregaçadas, dos meus colegas Filipe Ribeiro, Pedro Gil, Matheus Pereira e Enrique Ramis. Por fim, não menos importante, agradeço as sugestões e comentários sempre sagazes e pertinentes dos Professores Diogo Mateus e Andreia Pereira. Fui muito bem recebido e fui muito feliz neste grupo de investigação!

Dizem que “de Espanha, nem bons ventos nem bons casamentos!”. Na acústica não é assim... Tenho que agradecer aos “nuestros hermanos”, os Professores Jaime Ramis, Pedro Poveda, Jesus Carbajo, Víctor Espinosa e Javier Redondo, todo o apoio, sugestões, discussões, ensinamentos, amizade e gargalhadas (muitas).

Bem, agora os agradecimentos tradicionais (da praxe) aos orientadores... Pois bem, que se lixe o protocolo e a tradição (este espaço é meu!)... Os meus orientadores são os melhores do mundo! PIM!

Antes de serem orientadores já eram meus amigos, dentro e fora da escola. Pegaram numa ideia que tive e lançaram me um desafio: fazer este trabalho! Como bons amigos, e melhores orientadores, tudo fizeram para que lá chegasse: ensinaram, criticaram, sugeriram, discutiam, apoiavam, corrigiam, insistiam, etc... Dei-lhes muito trabalho, dentro e fora da escola, e eles nunca desistiram de mim nem me deixaram desistir. Ao contrário do futebol, se perder, a derrota é minha, se ganhar, a vitória é deles! Obrigado Luís e Paulo, eu e a minha família agradecemos tudo!

E já que falo em família, chegou a hora dela. Estes últimos 4 anos foram muito difíceis... Sem o apoio dos meus pais e dos meus sogros isto tinha sido impossível. Principalmente quando as “regras do jogo” mudam ao intervalo e é preciso pôr pão na mesa! Obrigado aos 4 por todo apoio, carinho e paciência! Sem vocês não tinha sido possível escrever estas linhas. Obrigado ao pai Manel, ao tio Toy e ao tio Joaquim por me fazerem sentir especial, mas especiais são vocês!

Obrigado também às minhas filhas Margarida e Inês por pacientemente aceitarem a minha ausência devido a este desafio pessoal e pelo amor sincero que me têm. Embora esta minha vontade de aprender mais nada lhes trará, que seja pelo exemplo de trabalho, dedicação e esforço, que eu também tive do meu pai – na nossa família, os “burros velhos aprendem línguas”! Que isto também sirva de motivação para o meu sobrinho Tomás!

À Helena, todas as palavras de agradecimento e reconhecimento serão poucas – este trabalho é também dela – se o Luís e o Paulo vestiram a camisola, a Helena jogou à baliza! Defendeu tudo, saiu de entre os postes quando era necessário e arrojava-se no chão, aos pés dos adversários, sem medo. A sua visão de jogo, a sua orientação e lucidez, o incentivo constante e a motivação foram determinantes para chegarmos aqui. Carregou a equipa às costas! E chegámos aqui juntos, mais fortes e mais unidos. Obrigado Helena, por todos estes sacrifícios, dificuldades e privações. A tua paciência é infinita, só o nosso amor é maior!

Tenho (temos) ainda de agradecer à “Mister” Dr^a. Natália Colaço que treinou e orientou a equipa, distribuiu os jogadores em campo e gizou estratégias de modo a ultrapassarmos cada jogo, cada obstáculo, cada adversário. Graças a ela podemos chegar às últimas jornadas e ganhar o campeonato!

Tenho ainda de agradecer aos meus “psiquiatras” e orientadores religiosos, Sensei Diogo Henriques, Carlos Lebres, João Simões e João Bruno, e aos seus laboratórios de psicotrópicos Box 1RM, crossfit Mondego e cross Arena pelas doses elevadas de anti-depressivos e alucinogénios.

Da bancada também não faltou apoio constante: o Fernando, a Gina, a Cristina, o Perdigão, a Maria, a Silvia, o Luís, a Paula, a Mariana, a Laura, sem esquecer o líder da claque, o João Cachão, incansável, sempre pronto a acompanhar a equipa a todos estádios, faça chuva, faça sol!

À Amélie... à Amélie... Deixa lá, nós sabemos “o que dizem os nossos olhos”! É uma coisa só nossa!

Agradeço ainda aos nossos vinicultores por engarrafarem o sol e a terra! Brindemos! Tchin-tchin!

Nota final: os erros tipográficos são da responsabilidade da Mel que insistia em deitar-se no teclado.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento e motivação	1
1.2. Objectivos.....	2
1.3. Organização.....	3
2. DIFUSÃO E DIFUSORES ACÚSTICOS	5
2.1. Introdução.....	5
2.2. Contextualização histórica	5
2.3. Forma das salas e relevo das suas superfícies	7
2.4. Conceitos fundamentais	11
2.4.1. Classificação das reflexões.....	11
2.4.2. Dispersão temporal.....	12
2.4.3. Mecanismos de dispersão do som por uma superfície	14
2.4.4. Interpretação geométrica da reflexão - construção de Huygens.....	16
2.4.5. Aplicações dos difusores acústicos	19
2.4.6. Posicionamento dos difusores e receptores	21
2.5. Tipos de difusores acústicos.....	23
2.5.1. Forma da distribuição espacial	23
2.5.2. Difusores geométricos	24
2.5.2.1. Superfícies planas	24
2.5.2.2. Superfícies triangulares e piramidais.....	25
2.5.2.3. Superfícies côncavas	27
2.5.2.4. Superfícies convexas	28
2.5.3. Difusores de amplitude.....	32
2.5.4. Difusores de Schröder – difusores de fase.....	35
2.5.4.1. Difusores QRD	38
2.5.4.2. Difusores MLS	46
2.5.4.3. Difusores PRD.....	47
2.5.5. Outras sequências	48
2.5.6. Difusores bidimensionais, 2D	48
2.5.7. Cristais sónicos e metamateriais.....	50
3. MEDIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE DIFUSORES	55
3.1. Introdução.....	55
3.2. Coeficiente de difusão	57
3.3. Coeficiente de dispersão.....	63

4. IMPLEMENTAÇÃO DAS TÉCNICAS EXPERIMENTAIS E AVALIAÇÃO DE COMPORTAMENTO ACÚSTICO DE DIFUSORES.....	71
4.1. Introdução.....	71
4.2. Câmara semi-anecóica do DEC/FCTUC.....	81
4.3. Avaliação de superfícies híbridas.....	74
4.4. Avaliação da influência dos materiais constituintes de difusores tipo QRD	83
5. MODELAÇÃO NUMÉRICA	91
5.1. Introdução.....	91
5.2. Equações gerais	93
5.3. Métodos numéricos	95
5.3.1. Método dos elementos de fronteira	95
5.3.2. Aproximação de Kirchoff.....	96
5.4. Problemas tridimensionais	98
5.5. Definição computacional de difusores otimizados com formas orgânicas	98
5.6. Avaliação inicial do algoritmo de otimização.....	79
5.6.1. Introdução	103
5.6.2. Parâmetros de entrada	104
5.6.3. Parâmetros de controlo do algoritmo genético.....	105
5.6.4. Convergência	107
5.6.5. Influência do número de indivíduos, $npop$	110
5.6.6. Influência da altura dos pontos de controlo, $refv$	112
5.6.7. Influência do número de pontos de controlo das RBF, $controlpoint$	118
5.6.8. Influência do número de frequências discretas utilizadas para o cálculo do coeficiente de difusão, $nfreqbands$	121
5.6.9. Coeficiente de difusão	123
5.6.10. Aproximação de Kirchoff versus BEM	124
5.7. Influência do número de elementos de fronteira utilizados no cálculo do coeficiente de difusão	128
5.8. Conclusões da análise preliminar do algoritmo proposto	130
6. OPTIMIZAÇÃO DE DIFUSORES: ESTUDOS DE CASO	133
6.1. Introdução.....	133
6.2. Constraçimentos geométricos	133
6.3. Codificação da altura dos pontos de controlo em patamares: 3 bit	142
6.4. Influência da altura máxima dos pontos de controlo, $refv$	154
6.5. Otimização de N módulos	163
6.6. Otimização para N bandas de frequência	177
6.7. Otimização para 5 ângulos de incidência, coeficiente de difusão para incidência aleatória, $d_{r,n}$	195
6.8. Otimização para 5 ângulos de incidência e para 9 bandas de frequências de 1/3 de oitava, $\bar{d}_{r,n}$	208

6.9. Influência da espessura e posição do difusor	226
6.10. Conclusões relativas aos estudos de caso	233
7. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL EM PROVETES TRIDIMENSIONAIS	237
7.1. Introdução.....	237
7.2. Escolha dos provetes a testar.....	237
7.3. Provetes construídos.....	241
7.4. Ensaios laboratoriais.....	243
8. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	251
8.1. Conclusões.....	251
8.2. Trabalhos a desenvolver no futuro	254
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	257

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO

Num espaço fechado (e.g., sala), o som percebido por um receptor é a combinação do som directo, proveniente directamente da(s) fonte(s) sonora(s), com as reflexões indirectas nas superfícies envolventes e nos objectos existentes no interior desse espaço. Desta forma, um dos aspectos fulcrais da acústica arquitectónica é controlar estas reflexões que afectam a propagação do som no interior de salas e a forma como este é percebido pelo(s) receptor(es).

No caso de espaços cujo principal requisito acústico é a inteligibilidade da palavra (e.g., salas de aulas, auditórios, salas de conferências, etc.) a distribuição cuidada de absorção sonora de forma a controlar a reverberação, o controlo do volume geométrico e a correcta orientação das superfícies reflectoras de modo a incrementar a relação “sinal/ruído” são, normalmente, suficientes para garantir a adequação do espaço à sua principal utilização (oratória). Contudo, esta abordagem é insuficiente para certos espaços, nomeadamente locais de produção e reprodução de estímulos musicais, pois pode conduzir a espaços mais “secos” e sem brilho e dominados por reflexões (especulares) muito intensas e com a consequente distorção harmónica do som. Deste modo, é necessário garantir que sejam criadas condições para que se possa estabelecer no interior dos espaços campos sonoros difusos, quer tomando medidas ao nível arquitectural, como a definição correcta do volume interior, das dimensões geométricas relativas, das orientações relativas das diferentes superfícies e respectivos acabamentos, quer através da utilização de elementos decorativos e/ou elementos desenvolvidos com o objectivo de espalharem, de forma o mais uniforme possível, a energia sonora neles incidente: difusores acústicos.

Os difusores acústicos são correntemente utilizados no condicionamento acústico de espaços com maiores exigências acústicas (estúdios, salas de espectáculos, etc.), servindo, sobretudo, para garantir uma acústica adequada, sem absorções excessivas e espalhando o som mais

uniformemente pela sala, eliminando ao mesmo tempo defeitos acústicos como ecos, primeiras reflexões (especulares) intensas e zonas sombra [1,2].

Grande parte dos difusores existentes no mercado correspondem a soluções do tipo Schröder [3]. Estes compreendem uma sequência de cavidades cujas profundidades são determinadas por uma sequência pseudo-aleatória de números e, portanto, introduzindo mudanças de fase no campo sonoro reflectido [4]. As suas dimensões geométricas influenciam o desempenho nas baixas frequências e nas altas frequências [5]. Contudo, o seu aspecto é bastante desvalorizado pelos arquitectos [1].

Assim, o principal problema em análise no âmbito desta tese é a definição de difusores acústicos discretos, inovadores e eficientes com desempenho acústico optimizado. Estes elementos devem ter um design e aparência distintos para que possam ser facilmente integrados na arquitectura das salas, sem que aparentem ser elementos adicionados "a posteriori" para corrigir problemas acústicos. Para tal, pretendeu-se implementar ferramentas numéricas avançadas, de modo a desenvolver soluções inovadoras de difusores acústicos, que podem apresentar forma mais orgânica (as soluções preferenciais corresponderão a formas orgânicas arredondadas ou onduladas, sem arestas cortantes). Pretendeu-se, ainda, aplicar algoritmos de optimização (baseados em meta-heurísticas) que permitam obter soluções de muito bom desempenho acústico do ponto de vista da difusão/dispersão do som. Será dedicada especial atenção à integração de conceitos de design, princípios matemáticos e critérios de optimização, de modo a permitir a criação de difusores acústicos visualmente apelativos e que possam ser efectivamente produzidos, obedecendo a critérios industriais para produção em massa.

Para implementar um processo de optimização são necessários [1]:

- um modelo numérico para previsão da dispersão de uma dada superfície;
- uma figura de mérito que defina a qualidade da dispersão;
- um algoritmo de optimização que permita mudar a forma geométrica da superfície.

O método de cálculo mais utilizado é o método dos Elementos de Fronteira (BEM) [6], mas existem outras opções, incluindo modelos de Fraunhofer, modelos de Fourier, modelos de diferenças finitas no domínio do tempo e análises de elementos finitos [1,3,7,8]. O desenvolvimento recente de novas ferramentas numéricas baseadas em métodos sem malha também tem revelado que estes métodos apresentam um bom desempenho computacional e um elevado rigor. Contudo, no âmbito desta tese de Doutoramento propõe-se utilizar um modelo baseado no Método dos Elementos de Fronteira.

1.2. OBJECTIVOS

A temática do trabalho proposto relaciona-se com o comportamento de painéis difusores acústicos e com o desenvolvimento de novos conceitos nessa área. Dado tratar-se de uma tese de Doutoramento desenvolvida no âmbito de uma Bolsa de Doutoramento em Empresas (BDE),

numa empresa de produção de soluções em madeira e derivados, pretende-se contribuir para o desenvolvimento de produtos de grande inovação e de alto desempenho na área da acústica, designadamente estudando a viabilidade de utilizar painéis com forma orgânica como difusores acústicos. Os resultados de carácter teórico/numérico obtido no âmbito deste trabalho servirão como base à futura produção de soluções inovadoras e que se julga poderem ser competitivas por parte da empresa.

Do ponto de vista científico, pretende-se neste trabalho atingir os seguintes objectivos principais:

- desenvolver modelos numéricos para a análise de problemas de dispersão acústica bi-dimensionais baseados no método dos elementos de fronteira;
- avaliar a aplicabilidade e a eficiência dos modelos desenvolvidos na análise do comportamento de difusores acústicos;
- partindo dos modelos definidos e de algoritmos de optimização baseados em algoritmos genéticos definir geometrias optimizadas do ponto de vista da difusão/dispersão acústica de difusores com formas curvilíneas e orgânicas, representáveis com funções de base radial (RBFs);
- validar experimentalmente, usando protótipos, as previsões numéricas obtidas pelos modelos desenvolvidos, confirmando a sua eficiência como difusores.

Estes objectivos configuram, de forma clara, um trabalho de cariz teórico/numérico desenvolvido com o objectivo final de chegar a configurações geométricas passíveis de gerar uma mais-valia tecnológica na empresa e de permitir a esta a realização de produtos de grande inovação, únicos no mercado.

1.3. ORGANIZAÇÃO

O presente documento encontra-se dividido em 8 capítulos, apresentando-se de seguida, de forma resumida, o conteúdo de cada um deles:

- no Capítulo 1, introduz-se o tema do presente trabalho, descrevendo-se o seu âmbito, os objectivos e a organização do mesmo;
- no Capítulo 2, apresenta-se uma revisão do estado da arte relativa a difusores, com especial ênfase nos difusores QRD, enumerando-se as principais características destes sistemas, definem-se os seus materiais constituintes e expõem-se algumas aplicações práticas;

- no Capítulo 3, apresentam-se os parâmetros caracterizadores (coeficiente de difusão e coeficiente de dispersão) e os métodos experimentais de avaliação de desempenho;
- no Capítulo 4, apresentam-se os trabalhos realizados no DEC-FCTUC relativamente às metodologias experimentais implementadas, estudos paramétricos prévios de comparação de comportamento/desempenho e metodologias numéricas implementadas e que conduziram à apresentação de comunicações em congressos internacionais de acústica;
- o Capítulo 5 é dedicado à apresentação sucinta dos métodos numéricos a implementar para a modelação do comportamento acústico dos difusores, assim como o algoritmo de optimização (algoritmo genético) utilizado;
- no Capítulo 6, apresentam-se os trabalhos desenvolvidos baseados nos modelos apresentados no Capítulo 5. Dele constam diversos estudos paramétricos e aplicações práticas conducentes a diferentes difusores optimizados, tendo em atenção diferentes objectivos;
- no Capítulo 7, apresentam-se ensaios em laboratório realizados com alguns protótipos desenvolvidos no Capítulo 6 e comparam-se com os respectivos resultados numéricos;
- no Capítulo 8, apresentam-se as conclusões finais que sintetizam os aspectos mais relevantes do trabalho desenvolvido. Como consequência dessas mesmas conclusões, apresentam-se ainda algumas reflexões sobre eventuais caminhos a seguir em trabalhos futuros na sequência desta tese.

2. DIFUSÃO E DIFUSORES ACÚSTICOS

2.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, abordam-se os fenómenos das reflexões difusas, a sua interferência na acústica de salas e como podem ser controladas. Pretende-se, com este capítulo, responder às seguintes perguntas:

- O que é a difusão sonora?
- Como pode ser o som dispersado?
- O que é um difusor acústico?
- Como afectam os difusores a percepção sonora?
- Que tipos de difusores existem?
- Como desenvolver um difusor acústico?
- Quais as aplicações dos difusores acústicos?

2.2. CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA

As grandes salas de concerto construídas até ao início do século XX eram decoradas com esculturas, as suas superfícies envolventes eram alvo de trabalhos de alto-relevo e outros ornamentos costumavam ser comuns, proporcionando condições para uma ampla dispersão das ondas sonoras e, presumivelmente, a criação de um campo sonoro mais difuso – Figura 2.1. Outro aspecto comum à maioria destas salas é a forma rectangular (comummente denominada de “shoe-box”). Como iremos ver à frente, é uma forma que proporciona a propagação temporal (e espacial) de um maior número ondas sonora (de frentes de onda).

Ao longo dos anos, as tendências arquitectónicas mudaram e este estilo foi substituído, no século XX, por salas mais simples, levando a uma mudança no design e no visual do interior das salas, que resultou numa alteração do comportamento acústico das salas.

Muitos auditórios e salas do século XX contêm agora grandes superfícies planas sem qualquer ornamentação, que por sua vez levam a reflexões mais especulares e, conseqüentemente, a campos sonoros menos difusos.

Já passou praticamente um século desde a publicação original do trabalho seminal de W.C. Sabine [9] que, de certa forma, fundou as bases da moderna acústica arquitectónica. Sabine relacionou o volume e a absorção sonora como forma de controlar o tempo de reverberação. Durante o século passado, muita atenção foi dada à previsão, medição e padronização do coeficiente de absorção (de incidência aleatória) dos diversos materiais e objectos, estando já bem estabelecidos os pressupostos do condicionamento acústico de salas que têm por base a quantidade e distribuição dos diversos materiais (em função das suas características relativas à absorção sonora). Por outro lado, os efeitos das reflexões difusas na acústica arquitectónica, a sua previsão, medição e caracterização ainda são um tema relativamente inexplorado. Só se começou a ter um conhecimento científico apreciável sobre as reflexões difusas há uns 40 anos, após os primeiros trabalhos de Manfred Schröder [10, 4], que serviram de catalizador para uma pesquisa significativa de métodos para dimensionamento, previsão, medição e quantificação de superfícies difusoras.

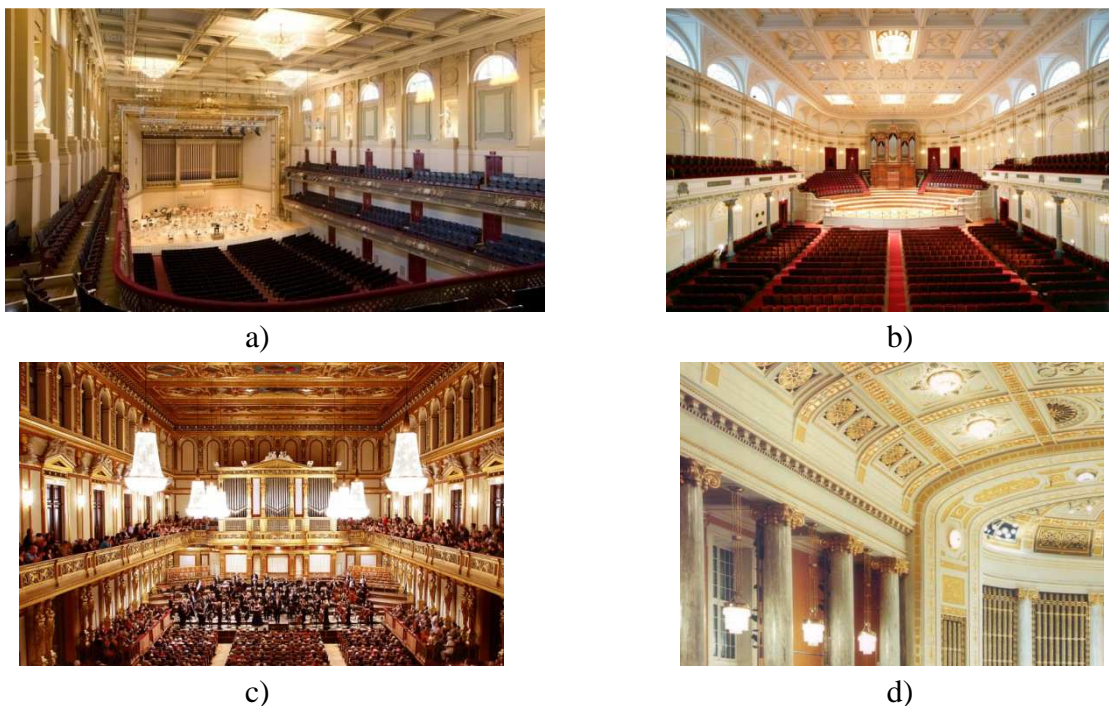


Figura 2.1 – Salas de concerto dos finais do século XIX - a) Symphony Hall, Boston (1900, 2631 lugares); b) Concertgebouw, Amsterdam (1888, 2206 lugares); c) Grosser Musikvereinssaal, Vienna (1870, 1680 lugares); d) Pormenor do Wiener Konzerthaus Grossersaal, Vienna (1913, 1840 lugares).

No início da década de 1980, surgiram os primeiros difusores fruto do trabalho desenvolvido por Schröder ao nível dos *phase grating diffusers*. Estas foram as primeiras superfícies difusoras, dimensionadas com base na previsão de desempenho, dispersando a energia sonora uniformemente em determinadas bandas de frequência. Estas superfícies periódicas consistiam numa série de reentrâncias ou saliências, cujas profundidades eram definidas por sequências

matemáticas, tendo permitido aos especialistas em acústica a possibilidade de projectar difusores com desempenho acústico conhecido.

A popularidade destes “dispositivos” foi apoiada pela sua aplicação bem sucedida por Marshall e Hyde em salas de concertos [11, 12] e pelos trabalhos de D'Antonio e Konnert [13,14] e David e Davis [15] que os utilizaram para desenvolver os conceitos como o *Live End Dead End* (LEDE) e *Reflection Free Zone* (RFZ) em salas críticas pequenas (salas de controlo em estúdios de gravação). O êxito da aplicação dos difusores e deste tipo de estúdios foi rapidamente popularizado em outras salas críticas, tais como estúdios “caseiros”, *home-listening*, *home-theatre* e salas de ensino e prática musical.

Ao longo das últimas 4 décadas estas superfícies foram sendo optimizadas, surgindo assim novas superfícies difusoras de forma a garantir um desempenho de dispersão adequado ao uso necessário.

2.3. FORMA DAS SALAS E RELEVO DAS SUAS SUPERFÍCIES

Quando um arquitecto (ou outro projectista) define a forma de uma sala está a definir as características modais da mesma, bem como os padrões de reflexão (reflectograma ou resposta impulsiva) e, portanto, a escolha da forma básica é fundamental não somente do ponto de vista arquitectónico, como também do ponto de vista acústico.

Existem formas que, tipicamente, contribuem mais para que o campo sonoro que se estabelece no seu interior seja mais difuso.

Na Figura 2.1 vimos algumas salas que partilham a mesma tipologia, a forma geométrica rectangular. Porém, também são usuais as formas em leque e (aproximadamente) elípticas. O estilo *shoe-box* é uma sala longa, alta e estreita. As três medidas, comprimento, altura e largura, são muito importantes, tal como também a relação entre elas, ou seja, essas medidas não devem ser múltiplas entre si nem deve haver factores comuns entre elas.

Yokota et al. em [16] apresentaram resultados obtidos da simulação numérica (método das diferenças finitas no domínio do tempo, FDTD) da propagação sonora bidimensional em diferentes instantes em “salas” de formato rectangular, em leque e elíptico (todas elas com e sem tratamento de difusão nas “paredes” laterais – usando elementos protuberantes triangulares) e com a mesma área em planta de aproximadamente 518 m².

Na Figura 2.2, os círculos pretos indicam a posição da fonte sonora e os brancos a posição do receptor. Uma análise comparativa da figura revela que a propagação das frentes de onda é bastante distinta em cada uma das salas. Observa-se claramente, na sala rectangular, que o número de frentes de onda aumenta à medida que o tempo avança, enquanto que, nas salas em leque e elíptica, há uma tendência para a concentração e para o desenvolvimento de frentes de ondas com formas irregulares.

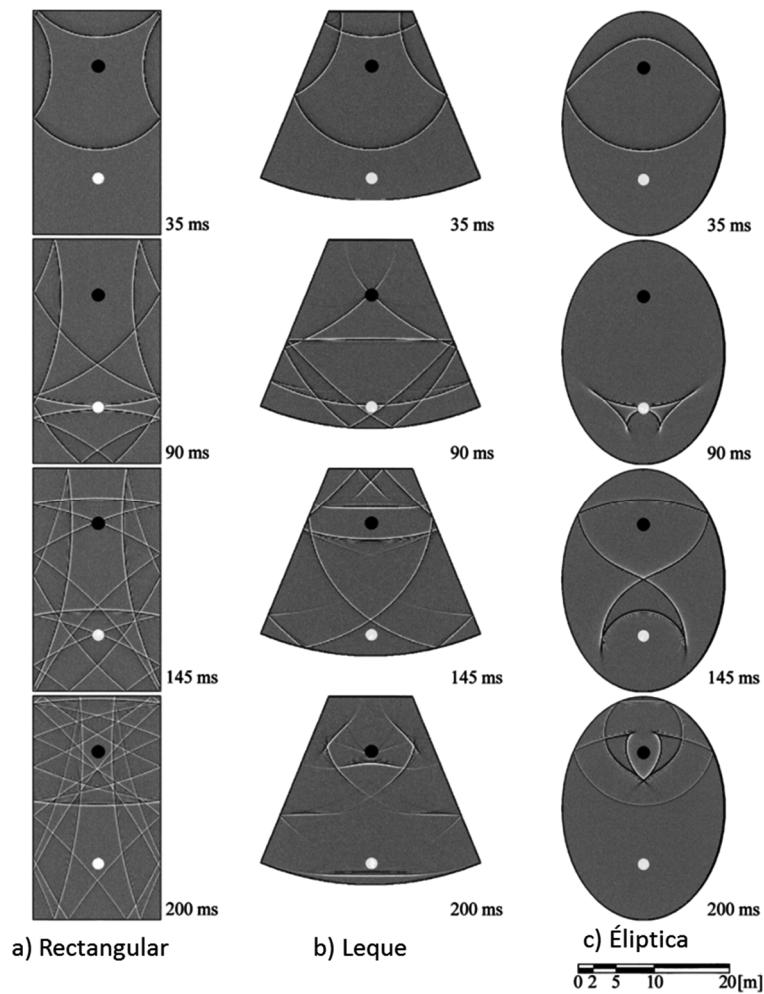


Figura 2.2 – Propagação de frentes de onda em salas com diferentes formas sem qualquer tratamento nas paredes laterais [16].

A Figura 2.3 apresenta as respostas impulsivas no receptor, em cada uma das salas sem tratamento de difusão sonora. Estes resultados revelam que as reflexões são densas e que o decaimento é mais suave no caso da sala rectangular, enquanto que as reflexões são esparsas e irregulares nas salas em leque e elíptica.

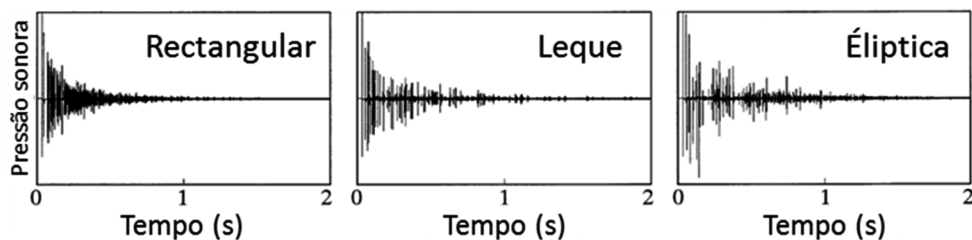


Figura 2.3 – Respostas impulsivas calculadas nos receptores das salas da Figura 2.2, sem qualquer tratamento nas paredes laterais [16].

Para simular a utilização de elementos difusores nas paredes, o cálculo FDTD foi novamente realizado, para os três tipos de salas, considerando as paredes revestidas com elementos triangulares do tipo 2 da Figura 2.4.

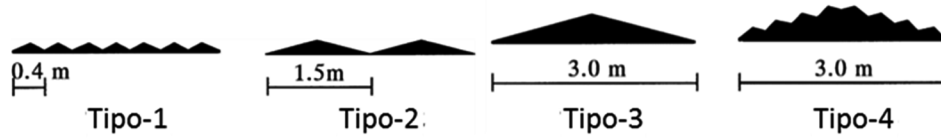


Figura 2.4 – Tipo de protuberâncias triangulares utilizadas na sala rectangular [16].

Ao comparar os resultados obtidos com os elementos triangulares (Figura 2.5) com os resultados com as paredes lisas (Figura 2.2), verifica-se claramente que as frentes de onda foram diminuídas e espalhadas mais homogêneas nas 3 salas. Isso pode ser observado nas respostas impulsivas apresentadas na Figura 2.6. É visível que o revestimento das paredes com os elementos triangulares tornou mais densas as respostas impulsivas e suavizou o decaimento.

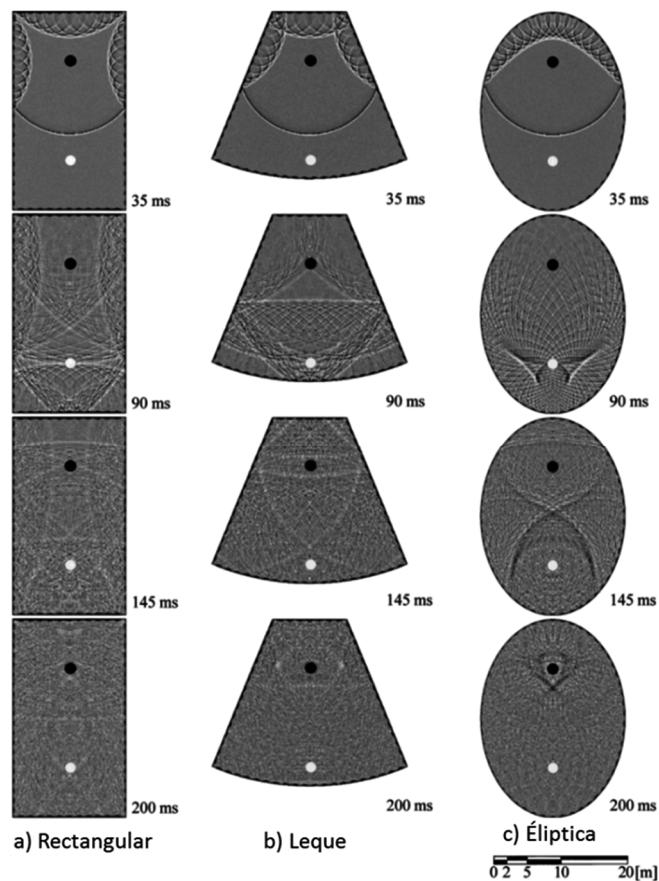


Figura 2.5 – Propagação de frentes de onda em salas com diferentes formas com elementos triangulares nas paredes [16].

Para avaliar a influência do tipo de protuberâncias, Yokota et al. em [16] simularam ainda, para a sala rectangular, 4 tipos de revestimentos triangulares (cujas razões entre a altura do vértice e a largura de um triângulo foi de 0.15), ilustrado na Figura 2.7.

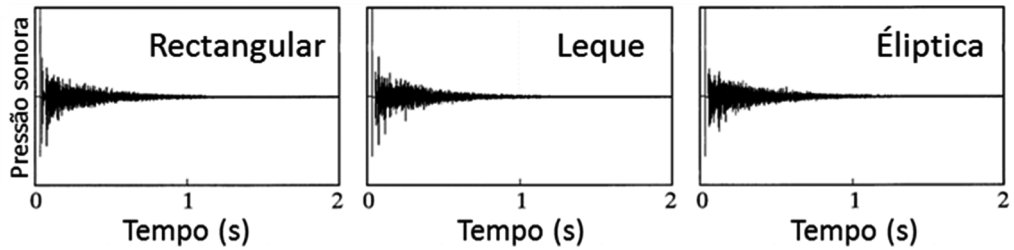


Figura 2.6 – Respostas impulsivas calculadas nos receptores das salas da Figura 2.5, com tratamento difusivo nas paredes laterais (protuberâncias triangulares do tipo 2) [16].

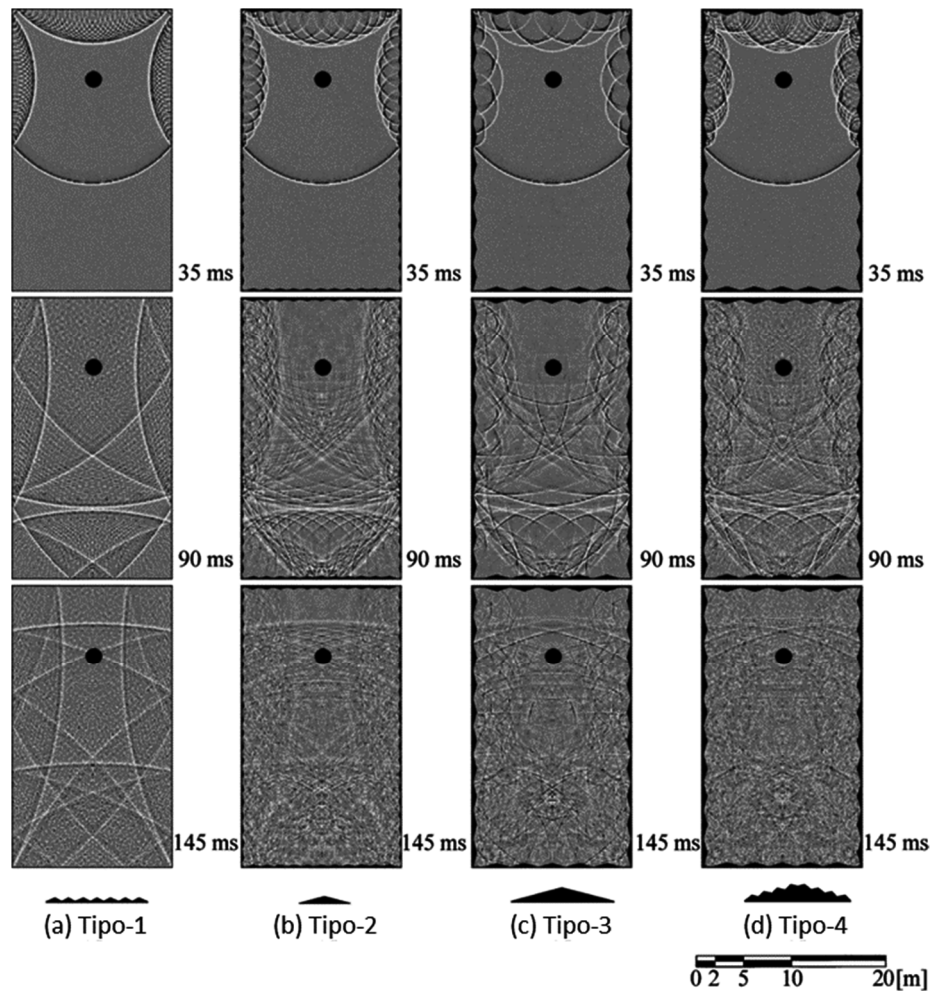


Figura 2.7 – Propagação de frentes de onda na sala rectangular com diferentes elementos triangulares nas paredes [16].

Da observação da Figura 2.7, conclui-se que a dispersão das frentes de onda depende da dimensão das protuberâncias. Verifica-se que, para as protuberâncias do tipo 1, as frentes de onda ainda são relativamente intensas e contínuas. Para as protuberâncias do tipo 2 e 3 há uma suavização progressiva com o tempo. Observa-se claramente a maior eficácia da protuberância do tipo 4 (que é uma combinação do tipo 3 com o tipo 1) em amenizar as frentes de onda.

2.4. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Vimos já que a forma das salas é extremamente importante no comportamento acústico das mesmas e verificámos que a utilização de protuberâncias nas superfícies envolventes espalha mais uniformemente (e mais rapidamente) o som no interior das mesmas. Nesta secção descreve-se como se podem classificar as reflexões e os mecanismos físicos que provocam uma dispersão das ondas sonoras incidentes.

2.4.1. CLASSIFICAÇÃO DAS REFLEXÕES

Pode-se classificar as superfícies em três tipos, com características acústicas diferentes (ver Figura 2.8):

- superfície absorvente;
- superfície reflectora;
- superfície difusora.

Infelizmente, na prática comum na área da construção civil, o termo revestimento acústico quase se tornou sinónimo de uma superfície absorvente.

Quando um som incide sobre uma superfície, uma parte da energia é removida, através de absorção ou transmissão e outra parte é reflectida. Quando o som é reflectido apenas numa direcção, onde o ângulo de incidência iguala o ângulo de reflexão, a energia reflectida é denominada como reflexão especular. Quando a energia é dispersada uniformemente em muitas direcções e dispersa no tempo, a energia assim reflectida é denominada por reflexão difusa. Para que tal aconteça, as irregularidades desta superfície têm que ter dimensão comparável ao comprimento da onda incidente. Note-se ainda que, nas reflexões difusas, não ocorre absorção do som, apenas uma redistribuição da energia sonora incidente por várias orientações, não provocando perda significativa de energia sonora. Numa reflexão especular, a maior parte da energia é concentrada num curto período de tempo, enquanto a energia numa reflexão difusa é distribuída durante um maior período de tempo. É este fenómeno da dispersão temporal que diferencia um difusor de uma superfície com protuberâncias.

2.4.2. DISPERSÃO TEMPORAL

A capacidade de um difusor para dispersar a energia sonora incidente no tempo é que os torna extremamente úteis para suprimir fortes reflexões de primeira ordem e para lidar com ecos e “coloração” (*i.e.* a ênfase de determinadas frequências em detrimento de outras).

Na Figura 2.9, é representada a resposta do campo sonoro total (som incidente + som reflectido) em função do tempo e da frequência, considerando os efeitos quando o receptor está a aproximadamente 1 m da superfície reflectora (A e B) e da superfície difusora (C e D). Quando o som dispersado provém de uma superfície lisa reflectora, o nível de pressão sonora do som reflectido e do som directo são relativamente comparáveis (Figura 2.9 A) e o resultado é uma resposta em frequência consistindo numa série de altos e baixos numa sequência homogénea (Figura 2.9 B), traduzindo a interferência que ocorre entre o som directo e as reflexões especulares primárias.

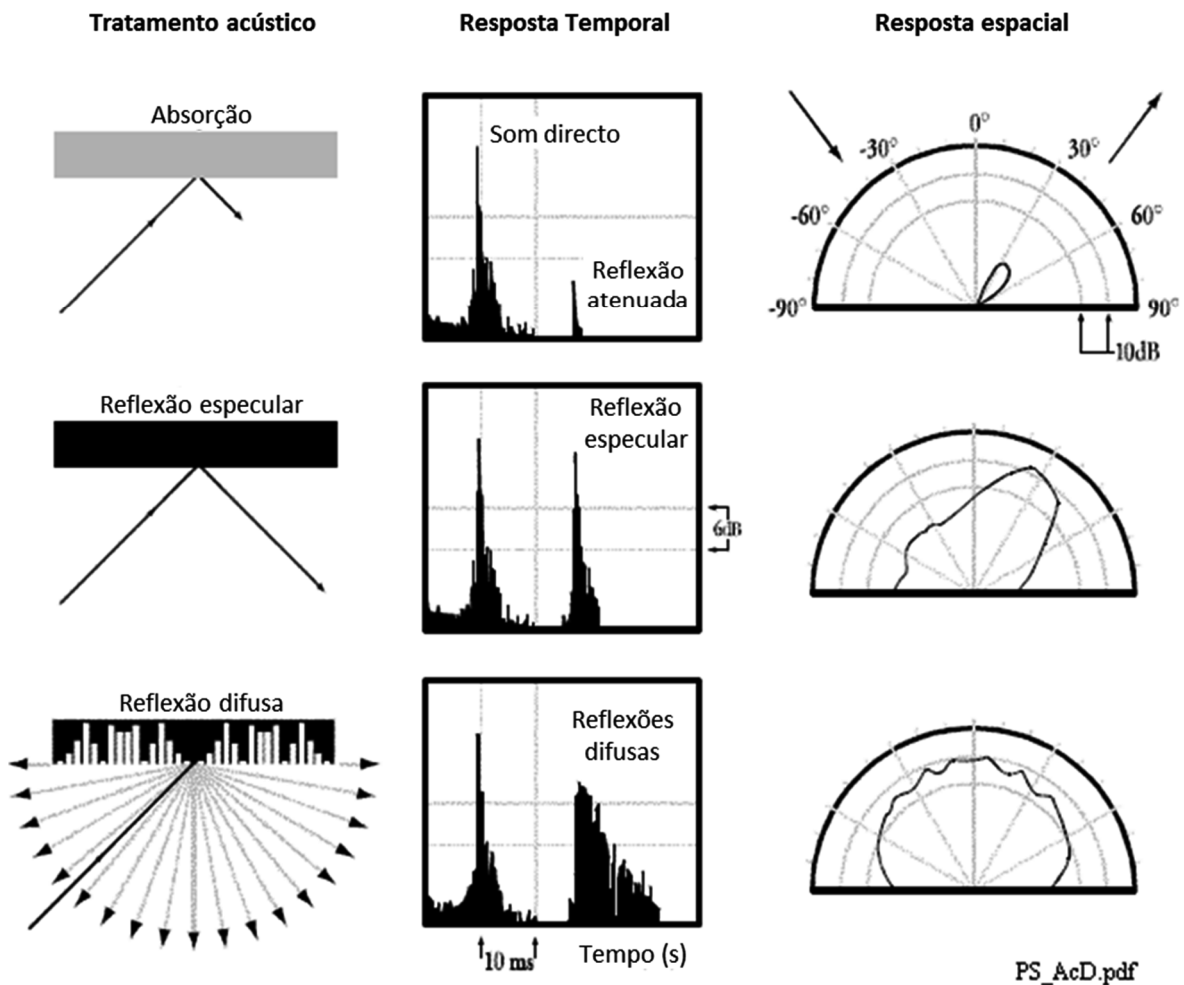


Figura 2.8 – Classificação das reflexões numa superfície [1].

Quando se trata de um difusor cuja resposta temporal é mais prolongada no tempo (Figura 2.9 C), a resposta em frequência caracteriza-se por uma sequência irregular de picos e quedas (Figura 2.9 D), tal como se verifica para um campo difuso. A resposta em frequência do campo total aproxima-se mais da resposta para o som directo, uma vez que as interferências são minimizadas pela difusão. Desta forma, o receptor não está tão exposto à regularidade de pontos nulos e máximos de pressão sonora que são observáveis no caso de uma superfície lisa e as mudanças no espectro sonoro são menos perceptíveis [17].

Considere-se um (único) semicilindro, cuja dispersão espacial é excelente mas, como se pode observar na Figura 2.10, não promove nenhuma dispersão temporal. O som reflectido é atenuado devido a dispersão espacial, mas a resposta temporal ainda é muito semelhante à reflexão da superfície plana (Figura 2.11). Consequentemente, a resposta em frequência do campo sonoro total (som incidente + som reflectido) mostra uma resposta em “pente” (*comb filter response*) devido à semelhança entre os sons incidente e reflectido (a diferença entre os máximos e mínimos no caso do semicilindro é ligeiramente menor do que no caso da superfície plana devido à dispersão espacial).

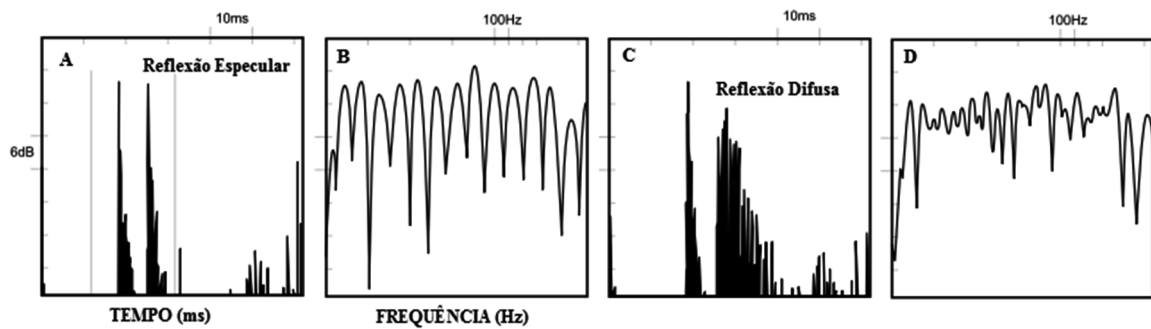


Figura 2.9 – Respostas temporal e em frequência resultantes de uma reflexão especular (A e B) e de uma reflexão difusa (C e D) [17].

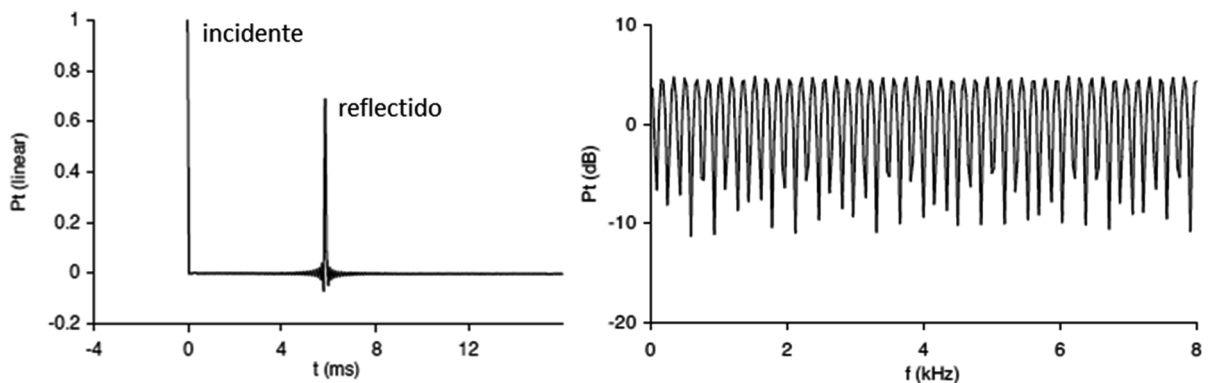


Figura 2.10 – Respostas temporal e em frequência resultantes da reflexão num semicilindro [1].

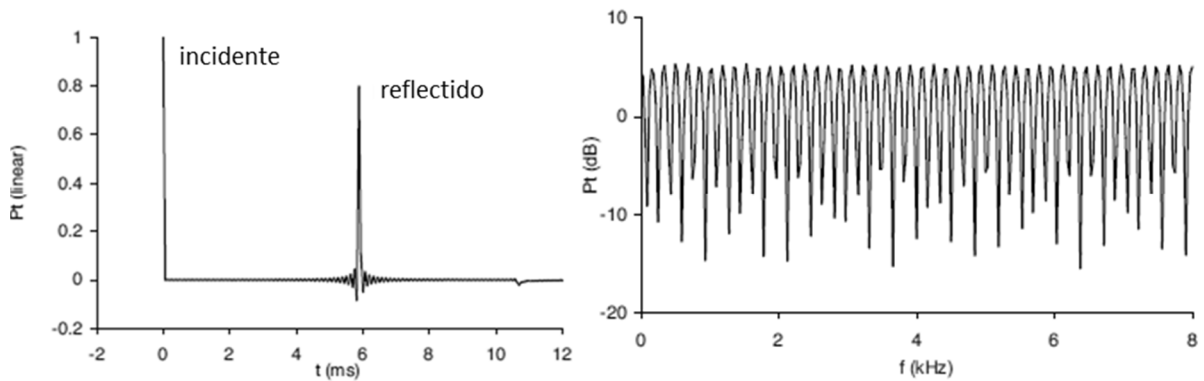


Figura 2.11 – Respostas temporal e em frequência da reflexão numa superfície plana [1].

Outras superfícies geométricas, tais como pirâmides, padecem da mesma insuficiência na dispersão temporal das reflexões. Deste modo, a utilização repetitiva do mesmo elemento, numa matriz contínua, não conduz a bons resultados, sendo de todo conveniente utilizar uma modelação e/ou disposição aleatória relativamente às dimensões de cada elemento (como se ilustra na Figura 2.12).



Figura 2.12 – Modelação de superfícies geométricas.

2.4.3. MECANISMOS DE DISPERSÃO DO SOM POR UMA SUPERFÍCIE

Quando as ondas sonoras se propagam num meio fluido e atingem obstáculos (meios com outra impedância acústica), parte da sua energia é reflectida e outra parte é transmitida ou dissipada. Vimos em 2.4.1 que a energia sonora que é reflectida por uma superfície pode ser classificada como especular ou difusa. Rathsam e Wang [18] consideram que as reflexões difusas resultam da conjugação de três mecanismos diferentes:

- O da rugosidade superficial: este mecanismo corresponde ao efeito da irregularidade da superfície reflectora e permite que a difusão de energia sonora se dê em todas as direcções. A dispersão só acontece para frequências cujo comprimento de onda seja da ordem de grandeza da rugosidade.

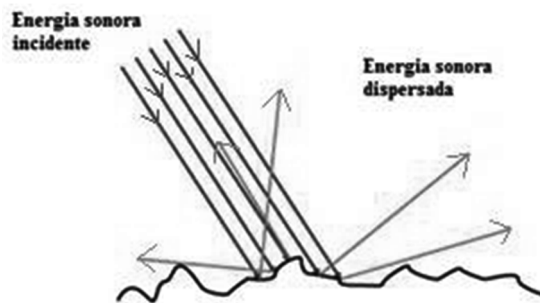


Figura 2.13 – Primeiro mecanismo de dispersão de ondas sonoras: rugosidade superficial.

- O da difracção nos bordos: Quando a frente de onda atinge os bordos de um obstáculo finito, cada ponto extremo da superfície do obstáculo irá funcionar como uma nova fonte sonora, emitindo energia segundo todas as direcções. A difracção é um fenómeno físico associado à propagação de ondas e que permite que as mesmas mudem de direcção (é o que explica que um receptor possa ouvir um emissor do outro lado de uma barreira, mesmo que não exista uma linha de vista directa). Obviamente que as ondas difractadas dependem da relação entre o comprimento de onda do som incidente e a dimensão geométrica do obstáculo. Na Figura 2.14 pode-se ver que nas baixas frequências (que correspondem a comprimentos de onda maiores) as ondas sonoras (mais correctamente, as suas frentes de onda) tendem mudar de direcção devido à difracção, enquanto que as altas frequências são reflectidas especularmente pela superfície do obstáculo.

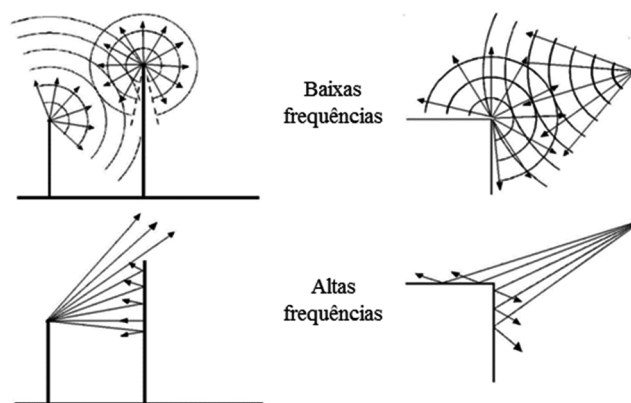


Figura 2.14 – Influência da frequência (comprimento de onda) na difracção do som por obstáculos.

- Um mecanismo de mudança de fase da onda reflectida, denominado “difusor numérico”, ocorre em superfícies constituídas por reentrâncias de igual largura com profundidade variável (de acordo como uma série numérica, como se irá ver mais à frente). As ondas sonoras incidentes propagam-se no interior das reentrâncias e reemergem de cada reentrância com uma fase diferente entre elas. As aberturas das reentrâncias tornam-se assim fontes sonoras individuais que, em interacção umas com

as outras (interferência), produzem reflexões nas direcções não especulares, Figura 2.15.

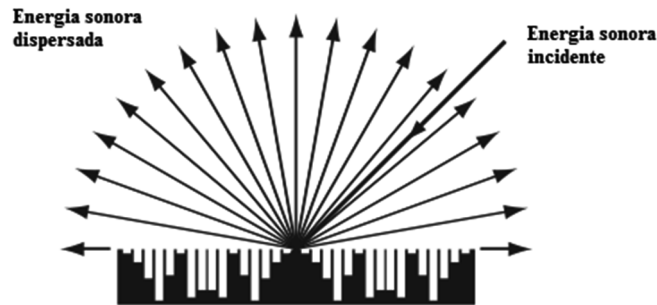


Figura 2.15 – Terceiro mecanismo de produção de reflexões difusas: difusor numérico [1].

2.4.4. INTERPRETAÇÃO GEOMÉTRICA DA REFLEXÃO - CONSTRUÇÃO DE HUYGENS

Uma maneira de explicar como uma superfície reflecte as ondas sonoras incidentes (e uma superfície difusora dispersa a energia) é através da construção de Huygens usada na óptica, embora seja apenas aproximada em muitos casos de acústica [1]. Considerando uma superfície plana, a situação representada na Figura 2.16, quando a superfície é iluminada por uma fonte sonora, um conjunto de fontes secundárias são geradas na superfície, sendo que depois cada uma destas fontes secundárias irradia ondas semicirculares. Ligando os pontos destas ondas que se encontram em fase, é possível visualizar a direcção e propagação ondas reflectidas pela superfície, ou seja, estas linhas são as frentes de onda.

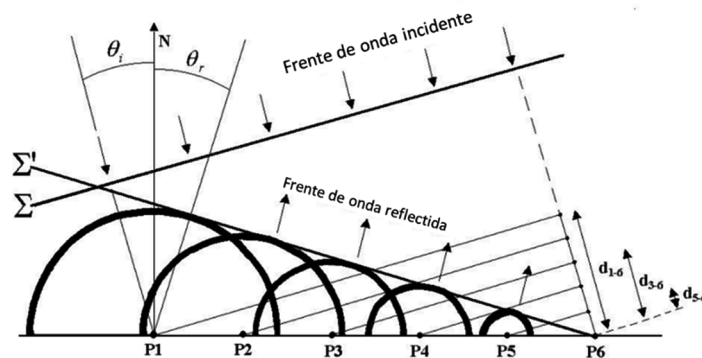


Figura 2.16 – Construção de Huygens aplicada a uma superfície plana para incidência oblíqua.

Nesta situação, é reflectida uma onda plana na direcção da reflexão especular, onde o ângulo de reflexão θ_r , iguala o ângulo de incidência θ_i . Assim, a frente de onda reflectida é espacialmente inalterada.

Pode-se aplicar a mesma construção gráfica a uma superfície semicilíndrica (Figura 2.17). Nesta situação, a frente de onda foi alterada pela superfície, adquirindo uma forma semicircular. Daqui se depreende que, acrescentando rugosidade à superfície, é provocada a reflexão e uma dispersão espacial (desde que o comprimento de onda seja da ordem de grandeza da rugosidade). No entanto, as ondas geradas (reflectidas) permanecem bem ordenadas. Por isso, embora os semicilindros apresentem uma boa dispersão espacial, não são os melhores difusores, pois a dispersão temporal não é atingida (conforme se referiu em 2.4.2.).

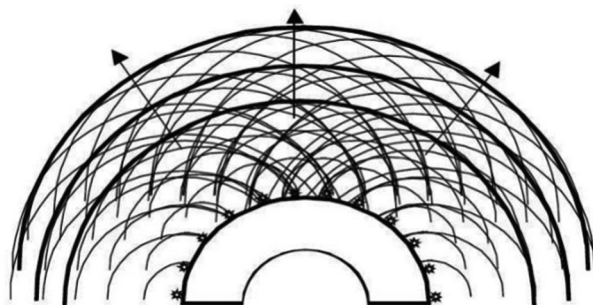


Figura 2.17 – Construção de Huygens aplicada a uma superfície semicilíndrica [1].

A construção de Huygens permite demonstrar o processo para a obtenção de uma dispersão temporal alterando a fase das frentes de onda reflectidas e/ou a amplitude. Esta é conseguida actuando na “rugosidade” da superfície, ou seja, criando um conjunto de saliências e/ou reentrâncias com diferentes alturas e/ou profundidades. Nestas condições, a superfície passará a ser denominada de grelha difusora em fase (*reflection phase grating*). A Figura 2.18 mostra o efeito do uso de um difusor de Schröder simplificado, onde se pode constatar dois grupos de reentrâncias (ou poços) que apresentam profundidade diferentes. As ondas hemisféricas radiadas pelas fontes secundárias (pontos pretos à entrada de cada poço) quando se intersectam, ocorrem interferências que provocam desvios na frente de onda, que toma direcções de propagação diferentes. De facto, as ondas hemisféricas radiadas das fontes secundárias têm diferentes atrasos (fases diferentes) devido às diferentes profundidades das reentrâncias e isso altera a onda reflectida. Entende-se daqui que é possível obter uma reflexão difusa que poderá ser mais intensa com o uso de configurações mais complexas de reentrâncias com profundidades diferentes, o que é observável na Figura 2.19.

A alteração da amplitude das ondas reflectidas pode também ser conseguida através da colocação de material absorvente na superfície reflectora. A substituição de partes reflectoras da superfície por partes absorventes permite criar ondas reflectidas 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*).

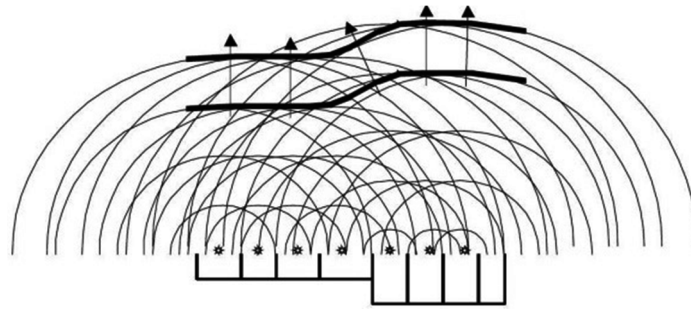


Figura 2.18 – Construção de Huygens para a reflexão de uma onda plana (incidência normal) numa superfície com reentrâncias de diferentes profundidades [1].

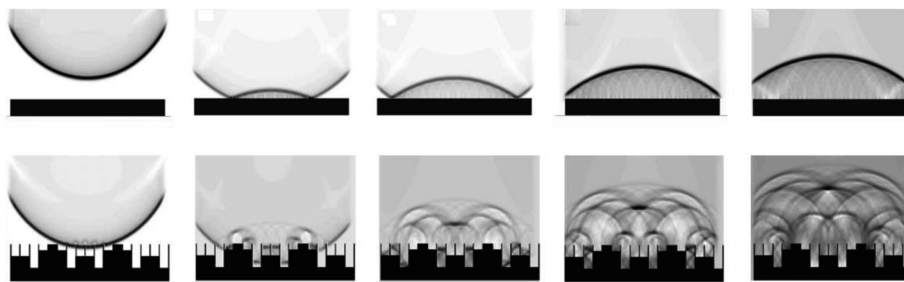


Figura 2.19 – Comparação entre as reflexões de uma onda cilíndrica numa superfície lisa (em cima) e num difusor (em baixo) – simulação numérica FDTD [1].

O som ao incidir numa área absorvente vai perder energia e por isso a sua amplitude irá ser reduzida. Utilizando a construção de Huygens (Figura 2.20), podemos considerar que, na zona absorvente, não existem fontes sonoras pontuais, pelo que dessa zona não são emitidas ondas sonoras reflectidas. Isso implica que, próximo desta zona, as frentes de onda sejam menos avançadas, formando-se uma dispersão de som não homogénea.

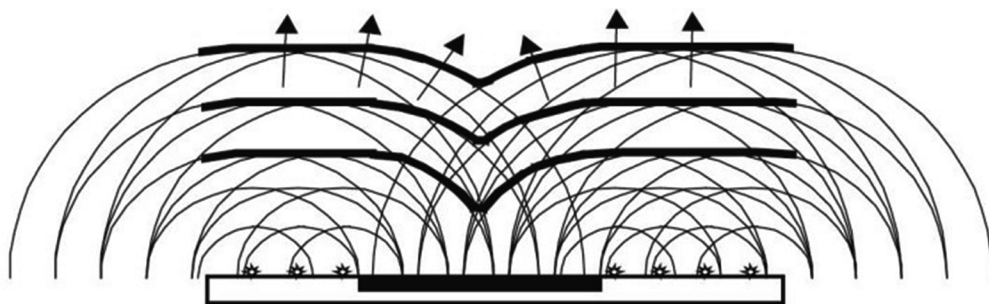


Figura 2.20 – Construção de Huygens para a reflexão de uma onda plana (incidência normal) numa superfície com material absorvente ao centro [1].

A Figura 2.21 ilustra a reflexão de uma onda sonora cilíndrica numa superfície híbrida onde é visível, no segundo *frame* (2ª imagem a contar da esquerda), que as zonas absorventes da superfície não reflectem a onda sonora incidente e que as partes reflectoras geram, por sua vez, ondas cilíndricas que vão interferir entre elas.



Figura 2.21 – Reflexão de uma onda cilíndrica numa superfície híbrida – simulação numérica FDTD [1].

2.4.5. APLICAÇÕES DOS DIFUSORES ACÚSTICOS

Na acústica arquitectónica não existem soluções únicas e válidas para resolver todos os problemas. Contudo, para um bom desempenho acústico de uma sala, esta deverá ter um volume apropriado, uma forma correcta e o tratamento das superfícies deverá ser uma combinação adequada de absorvedores sonoros, reflectores planos e difusores acústicos, colocados estrategicamente de forma a criar o campo sonoro pretendido nos receptores. Em termos de acústica arquitectónica, podemos classificar os espaços interiores, de uma forma simplista, em três tipologias:

- locais de produção sonora;
- locais de reprodução sonora;
- locais de controlo do ruído.

Como exemplo de salas de produção do som são as instalações de artes de palco, tais como salas de concertos (essencialmente para música não electro-amplificada) ou teatros. Também se pode incluir nesta tipologia espaços os locais de culto religioso bem como locais de prática musical (individual ou em grupo), vulgo salas de ensaio. Neste caso, a acústica da sala contribui bastante para a percepção da música ou palavra. O tempo de chegada das primeiras reflexões, direcção, densidade temporal e espacial, decaimento do som e o nível das reflexões directas associado ao balanço da energia directa e indirecta, definem o som que é ouvido. Deste modo, nestes locais o controlo das reflexões indirectas (redireccionamento) e a difusão são as “ferramentas” acústicas primárias.

Por sua vez, o condicionamento acústico de salas de reprodução, como estúdios de gravação, *home-theatres*, cinemas, etc., deve proporcionar uma “acústica” neutra pois os estímulos sonoros são pré-gravados (ou então estão a ser gravados), sendo a sua reprodução efectuada através de transdutores electro-amplificados (altifalantes). Estas salas têm ainda o agravante de (normalmente) serem pequenas (do ponto de vista acústico), sendo dominadas pelo comportamento ondulatório do som (que se traduz pelos modos próprios ou ressonâncias da sala) onde é difícil estabelecer-se um campo difuso em todo o espectro. Neste tipo de salas, a absorção sonora e as reflexões difusas desempenham um papel fundamental (pois são utilizadas essencialmente para controlar a coloração devido às reflexões directas e aos modos próprios das salas nas baixas frequências).

Nas situações em que se pretende fazer o controlo do ruído ambiente, tais como ginásios, piscinas, ambientes industriais, bibliotecas, espaços de restauração, corredores de grande circulação, átrios, salas de embarque das estações de transporte de passageiros, etc., o objectivo é simplesmente reduzir o nível sonoro ambiente absorvendo as reflexões. Aqui, a reflexão especular e as reflexões difusas têm um papel menos importante, focalizando-se mais na distribuição uniforme de absorção.

A Figura 2.22 resume de forma esquemática as três tipologias acima descritas.

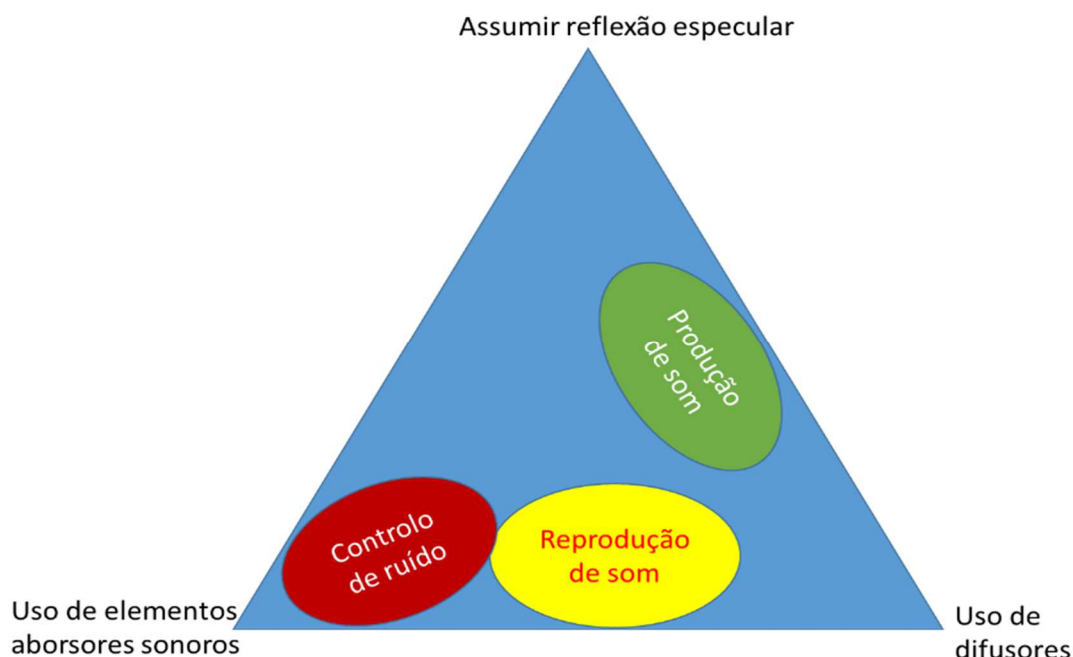


Figura 2.22 – Triângulo ilustrativo da aplicação de diferentes tipos de soluções para controlo do efeito das reflexões no interior de espaços fechados – adaptado de [1].

Os locais que popularizaram inicialmente a utilização de difusores foram os de “reprodução de som”, ilustrados a título de exemplo nas Figuras 2.23a) e 2.23b), principalmente pela sua capacidade em lidar com as primeiras reflexões e diminuir os efeitos da coloração. Contudo, nos nossos dias, são amplamente utilizados em locais de “produção de som”, quer com o objectivo de melhorar as condições de escuta dos próprios músicos (no caso de produção musical), quer dos receptores (público), conforme se exemplifica nas Figuras 2.23c) e 2.23d). A aplicação de difusores em auditórios permite aumentar a percepção da espacialidade e envolvimento da sala e, em salas cuja altura seja baixa (quando comparada com a profundidade), aplicados no tecto, mitigam os efeitos da coloração devido ao facto das reflexões no tecto chegarem demasiado cedo e intensas.

Podem ser ainda utilizados no controlo dos modos próprios em câmaras reverberantes e para melhorar a inteligibilidade da palavra (em locais reverberantes como, por exemplo, estações de

metro). Outra aplicação bastante comum é na zona do palco, tanto nas paredes como em conchas acústicas (canópias).

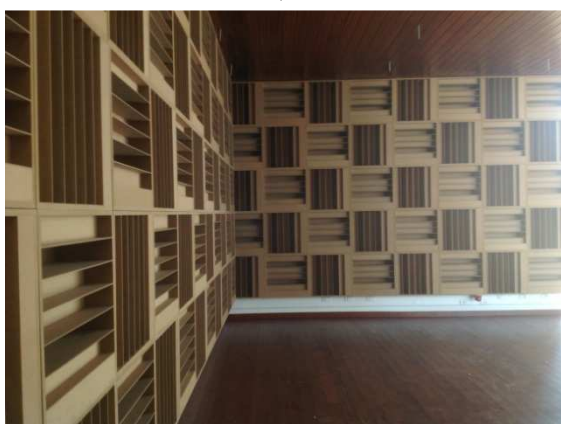
Em [1] é ainda sugerida a sua utilização em barreiras acústicas de modo a dispersar o ruído de tráfego em vez de, eventualmente, o redireccionar para a fachada de outros edifícios. Prieto-Gajardo et al. em [19] demonstrou que a característica mais importante evidenciada pela utilização de barreiras acústicas paralelas revestidas com difusores é a capacidade de estabelecer um campo mais difuso entre as barreiras, diminuindo as amplitudes máximas do campo refletido de maneira notável.



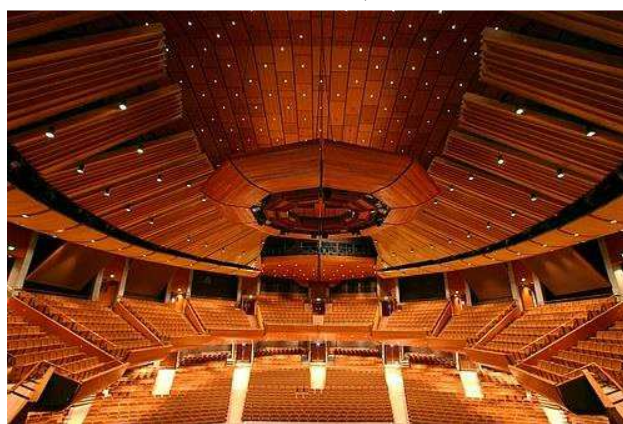
a)



b)



c)



d)

Figura 2.23 – Exemplos de aplicação de difusores: a) em salas para *home-listening*; b) em estúdios de gravação; c) em salas de ensaio; d) em salas de concertos.

2.4.6. POSICIONAMENTO DOS DIFUSORES E RECEPTORES

De uma forma genérica, os difusores, sejam eles de “amplitude” ou de “fase”, são utilizados para “tratar” as primeiras reflexões (especulares), em particular em salas críticas para a audição, tais como as salas de controlo dos estúdios de gravação. Logo, deverão ser posicionados nos pontos das diversas superfícies que proporcionam essas primeiras reflexões – Figura 2.24.

Os receptores devem estar posicionados, relativamente aos difusores, numa zona onde as diversas reflexões provenientes destes elementos já tenham interferido de forma construtiva e com frentes de onda coerentes e homogéneas, zona habitualmente denominada de campo afastado (*far field*). Nesta zona, a resposta espacial (a polar) de um difusor ideal, na sua banda de frequências operacional, é invariante relativamente ao ângulo de incidência, ao ângulo de recepção (ou de observação) e à frequência. Para se estar na zona de campo afastado é necessário cumprir dois critérios [20]:

- a distância de observação deve ser maior que o comprimento de onda da frequência mínima de operação do difusor;
- a diferença entre o comprimento dos caminhos dos pontos extremos do difusor deve ser pequena quando comparada com o comprimento de onda (da frequência mínima de operação) – relativamente à Figura 2.25, $a-b \ll \lambda$.

Infelizmente, a grande maioria das salas críticas são demasiado pequenas para que os receptores consigam estar situados em campo afastado. Consequentemente, os receptores devem estar o mais afastado possível das superfícies difusoras.

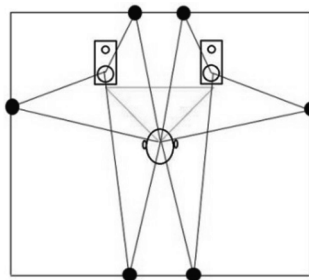


Figura 2.24 – Exemplos do posicionamento dos difusores em salas críticas (pontos a preto).

A prática dos autores de [1] leva a que estes recomendem que os receptores devem estar, pelo menos, a três comprimentos de onda afastados de difusores. Uma vez que os difusores utilizados em aplicações em salas críticas têm uma frequência mínima de operação entre os 300 Hz e os 500 Hz, isso corresponde a uma distância mínima recomendada de 3 m. Mesmo assim, em muitas situações, esta distância mínima não pode ser cumprida, com as consequências da audição de distorções e anomalias de fase (pois a dispersão temporal do difusor não chega a ocorrer nesses pontos – estamos portanto em campo próximo, *i.e. near field*). Nestes casos, é recomendável utilizar-se superfícies híbridas (difusores de amplitude), pois a absorção sonora que introduzem permite um posicionamento dos receptores mais próximo.

Se não for possível utilizar superfícies híbridas (por causa da introdução de absorção sonora na sala), pode-se utilizar difusores 2D que reflectam o som hemisféricamente, retirando assim energia na direcção do receptor e, desta forma, reduzindo os efeitos da coloração (actuando como *comb filter*).

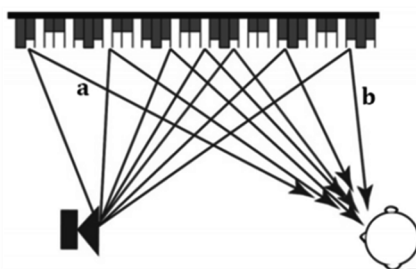


Figura 2.25 – Posicionamento do receptor na zona de campo afastado.

2.5. TIPOS DE DIFUSORES ACÚSTICOS

Neste ponto são apresentados os diferentes tipos de difusores e analisam-se os princípios básicos de funcionamento e o respectivo dimensionamento.

Pode-se classificar os difusores como geométricos (piramidais, semicilíndricos, curvilíneos, otimizados ou não), de fase (*phase grating diffusers*) ou de amplitude. Quaisquer deles podem ainda ser classificados conforme a forma como reflectem o som incidente.

2.5.1. FORMA DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL

Podem-se classificar os difusores pela natureza da distribuição espacial. Quando a variação da fase ou amplitude é provocada apenas numa direcção, designam-se por difusores unidimensionais ou difusores 1D (Figura 2.26 à esquerda). Num difusor 1D o som é dispersado de forma semicilíndrica na direcção de variação da fase ou amplitude e é reflectido com o mesmo ângulo de incidência. Por outro lado, um difusor 2D dispersa uniformemente o som numa forma hemisférica independentemente do ângulo de incidência. Uma vez que o difusor 2D dispersa o som omnidirecionalmente, a energia comparável numa dada direcção para um difusor 2D é metade da que é para um difusor 1D (Figura 2.26 à direita).

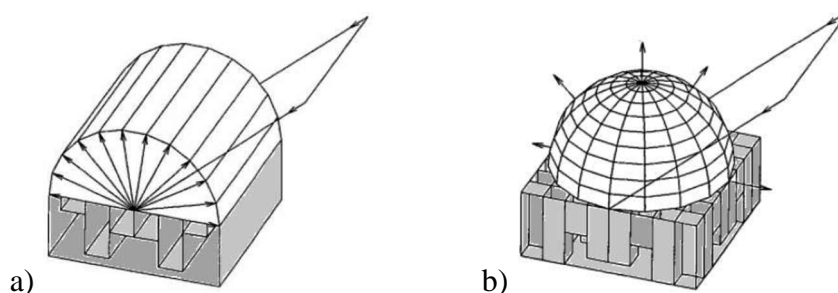


Figura 2.26 – a) Resposta espacial de um difusor 1D; b) Resposta espacial de um difusor 2D [1].

2.5.2. DIFUSORES GEOMÉTRICOS

Apesar da maioria do dimensionamento de difusores se basear na alteração da fase ou da amplitude das frentes de onda sonora (neste último caso são superfícies híbridas), alterando a impedância acústica da superfície (de modo a alterar a fase ou a amplitude das ondas reflectidas), até uma superfície plana, sendo finita, pode causar difracção pelos bordos da superfície ou mesmo a rugosidade da própria superfície pode induzir dispersão sonora. Com um bom dimensionamento das “rugosidades” (de modo a serem da dimensão dos comprimentos de onda que interessa dispersar), existem muitas formas que podem resultar em bons difusores. No entanto, apenas algumas formas serão visualmente aceitáveis. Nesta óptica, surgiram vários tipos de difusores baseados em diferentes formas da superfície, em particular os que derivam de formas geométricas – por exemplo, arcos, triângulos, pirâmides e superfícies curvas.

Dependendo da geometria usada, os prismas triangulares e as pirâmides podem produzir dispersão, reflexão ou reflexão especular. Aplicados correctamente, estes difusores poderão reduzir significativamente a energia em determinadas direcções. Quanto às superfícies curvas, estas são claramente mais difusoras e universalmente usadas. Um “bom” difusor não se faz apenas pela forma da superfície individual de cada um deles, mas também depende da quantidade de elementos próximos uns dos outros. Assim, a dispersão depende da disposição dos elementos, periódica ou aleatória, e não apenas das características de um único elemento. Contudo, como se viu atrás, este tipo de difusores embora possa ser optimizado para ter uma boa dispersão espacial, tem o problema de não se conseguir obter uma dispersão temporal razoável.

2.5.2.1. SUPERFÍCIES PLANAS

Em superfícies planas de dimensões finitas, sem rugosidade, qualquer dispersão gerada será devida à dispersão pelos bordos. Quando se analisa uma placa plana, para frequências muito baixas, *i.e.*, quando o comprimento de onda é bastante maior comparado com o tamanho da placa, a quantidade de energia sonora dispersada pela superfície é ínfima ou nula. Por outro lado, para altas frequências, em que o comprimento de onda é pequeno comparado com o tamanho da placa, constata-se uma forte reflexão especular. De facto, pode assumir-se que, à medida que a frequência aumenta e que o comprimento de onda se torna mais comparável e depois mais pequeno que o tamanho da placa, a dispersão da energia será dominada pela reflexão especular, onde o ângulo de incidência iguala o ângulo de reflexão (Figura 2.27).

A resposta polar de uma placa plana não depende apenas da relação entre as dimensões da placa e do comprimento de onda, também depende da distância a que se situam os receptores, Figura 2.28, isto é, se estão no campo próximo ou no campo afastado – aliás, como também vimos atrás, isso também é verdade para todos os difusores, sejam eles de qualquer tipo.

A Figura 2.28 pode sugerir que, perto do painel, a placa plana é boa para dispersar o som, porque para todos os pontos receptores em arcos próximos da placa plana existe um ponto de reflexão geométrico que contribui para uma forte reflexão especular. Porém, as polares constantes das Figuras 2.27 e 2.28 não mostram que uma placa plana não gera dispersão temporal (cuja resposta temporal é semelhante à apresentada na Figura 2.11).

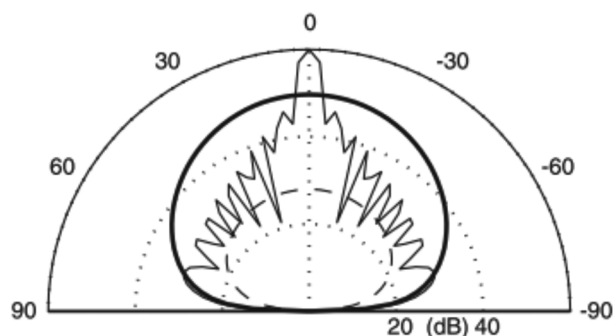


Figura 2.27 - Resposta polar para a pressão dispersada por um painel plano para três frequências diferentes, calculada numericamente (BEM) para incidência normal [1].
(- - - $\lambda=20a$; — $\lambda=2a$; $\lambda=0,2a$, onde “a” é a dimensão do painel).

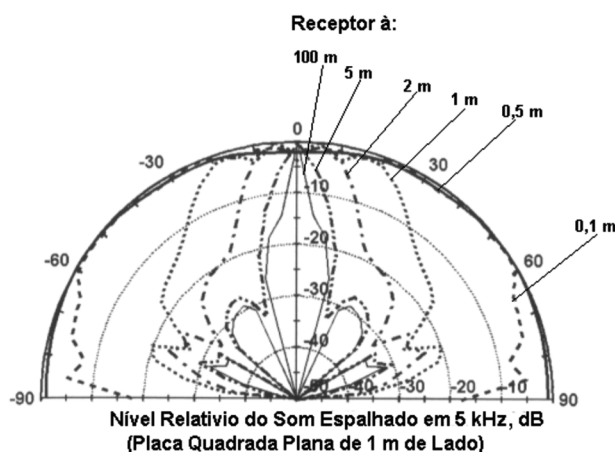


Figura 2.28 - Efeito da distância do receptor na resposta polar de um painel quadrado com 1 m de lado. A fonte dista 100 m do painel [21].

2.5.2.2. SUPERFÍCIES TRIANGULARES E PIRAMIDAIAS

As superfícies piramidais e triangulares (Figuras 2.29 e 2.30) podem gerar reflexões difusas ou reflexões especulares dependendo da sua geometria e disposição. A parte superior da Figura 2.30 mostra a dispersão espacial (resposta polar) de diferentes pares de elementos triangulares. Da análise da referida figura, facilmente se conclui que as relações geométricas dos triângulos (nomeadamente, a altura do vértice e a inclinação lateral dos seus lados) têm uma influência determinante no modo como estes dispersam a energia incidente. De facto, este tipo de difusores

podem produzir dispersão, reflexões especulares e redireccionamento do som, dependendo da geometria usada. Quando aplicados correctamente, podem reduzir a energia reflectida em determinadas direcções.

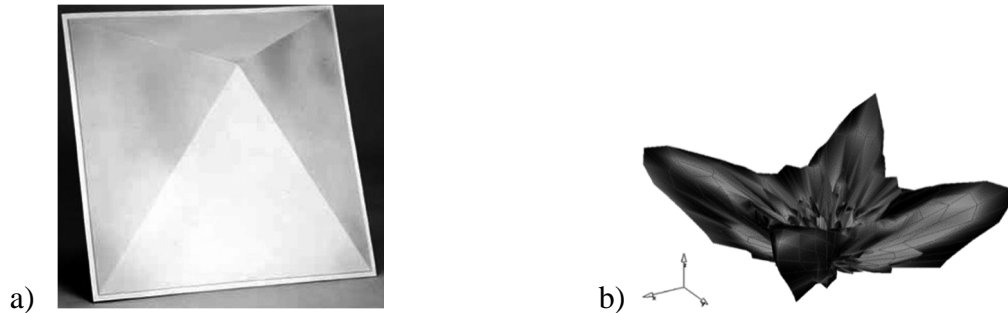


Figura 2.29 - a) Difusor piramidal; b) simulação numérica (com o BEM) da respectiva resposta espacial [1].

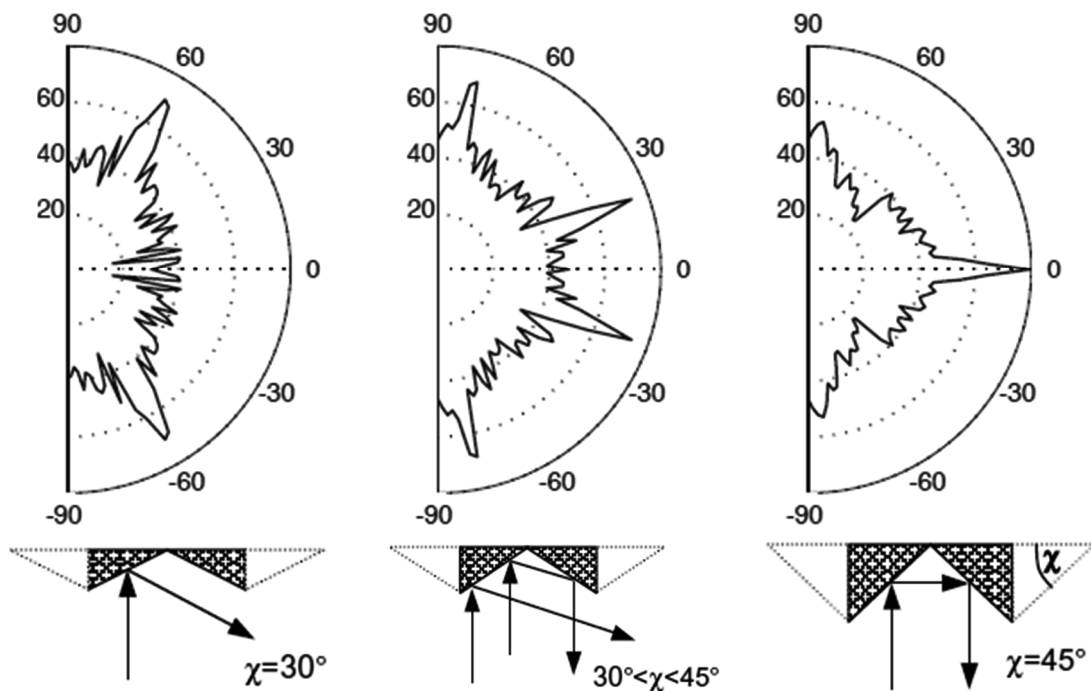


Figura 2.30 - Efeito das características geométricas na resposta espacial para um arranjo de triângulos [1].

A dispersão provocada por um conjunto de pirâmides ou prismas triangulares é dominada pela disposição dos elementos (de forma padronizada ou aleatória) e pela utilização de elementos com características geométricas distintas (Figura 2.31). Para se obter um melhor desempenho deverá ser utilizado o maior número possível de diferentes pirâmides e estas devem ser distribuídas de forma aleatória.

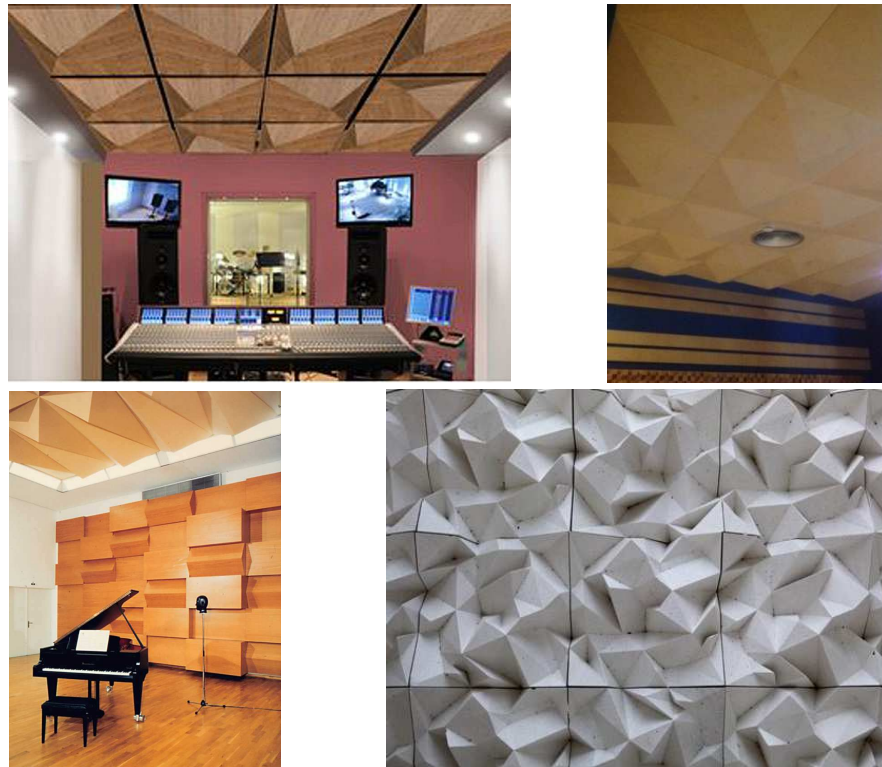


Figura 2.31 – Exemplos de aplicação de elementos piramidais.

2.5.2.3. SUPERFÍCIES CÔNCAVAS

As superfícies côncavas podem ser utilizadas, mas muito cuidado deve ser tomado de modo a evitar a focalização das reflexões em determinados locais – Figura 2.32.

De facto, paradoxalmente, se o foco de uma superfície côncava estiver bem afastado dos receptores pode provocar alguma dispersão, embora não tão eficiente como outras superfícies curvas – Figura 2.33.

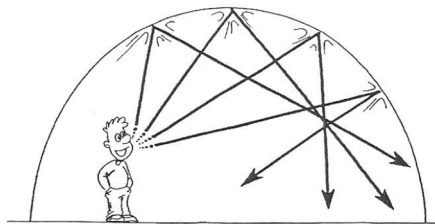


Figura 2.32 – Utilização “incorrecta” de superfícies côncavas [22].

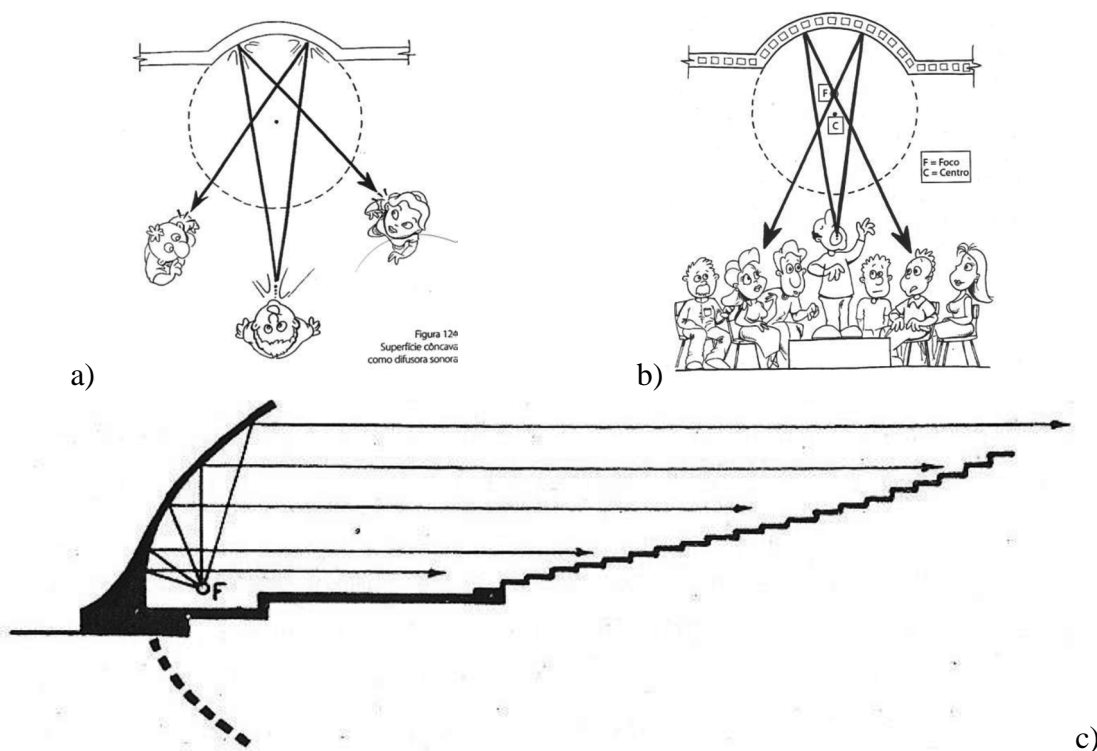


Figura 2.33 – Utilização útil de superfícies côncavas: a) em paredes; b) em abóbadas; c) em conchas acústicas em anfiteatros ao ar livre [22].

Quando não é possível afastar os receptores do foco da superfícies côncava, esta deverá ser revestida por materiais absorventes sonoros e/ou por difusores – Figura 2.34.

2.5.2.4. SUPERFÍCIES CONVEXAS

As formas mais comuns para as superfícies curvas são semicilindros e semiesferas, sendo os cilindros eficazes na dispersão do som num único plano enquanto as esferas geram uma dispersão hemisférica (Figura 2.35). Geralmente, este tipo de superfícies apresenta um melhor desempenho acústico para as baixas frequências, uma vez que o comprimento de onda é maior e por isso as estruturas de tamanho aproximado a esses comprimentos de onda permitem gerar maior difusão.

Apenas os difusores convexos baseados em semicilindros completos (que não resultam do “achatamento” da semicircunferência e que não são parte do arco de uma circunferência), apresentam um bom comportamento à dispersão do som – Figura 2.36.

Vimos atrás, em 2.4.2, que uma superfície cilíndrica parece ser a forma ideal para um difusor, mas que padece de pouca dispersão temporal. E, por outro lado, na prática, muitas vezes não se consegue revestir a superfície necessária com elementos difusores apenas de uma unidade, são

necessárias mais semicilindros. Quando estes são dispostos em sequência, a resposta de um único semicilindro torna-se secundária em relação à resposta do conjunto.



Figura 2.34 – Aplicação de difusores numa parede côncava [1].

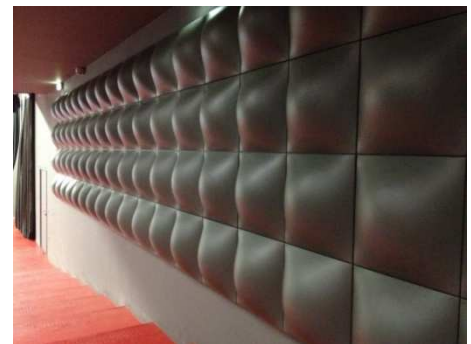


Figura 2.35 – Arranjos aperiódicos de arcos de semicilindro e semiesferas.

Para a disposição sequencial ser efectiva, os semicilindros devem ser espaçados, aleatoriamente quanto possível; caso contrário, serão necessários esquemas de modulação para reduzir a periodicidade. A Figura 2.37 mostra que um arranjo aperiódico reduz a periodicidade e melhora a dispersão espacial relativamente a um arranjo periódico (utilização de vários semicilindros idênticos).

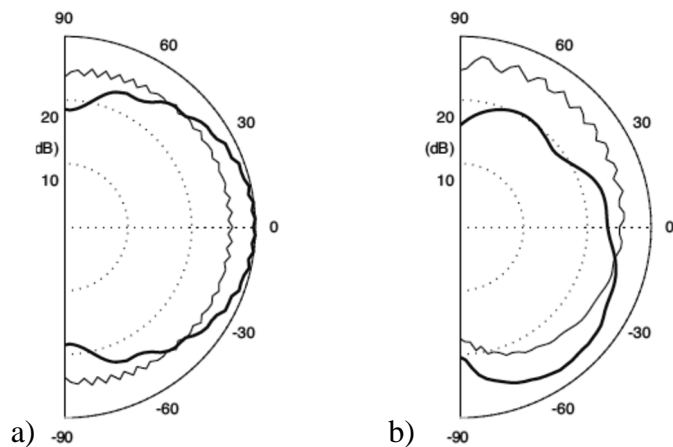


Figura 2.36 – a) Respostas polares para incidência normal; b) Respostas polares para incidência oblíqua, 60° para: — um semicilindro achatado; - - - semicilindro [1].

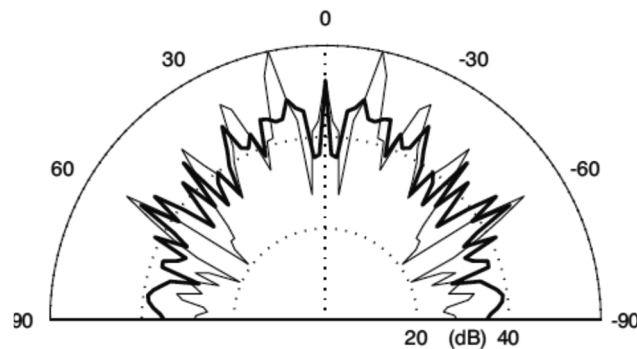


Figura 2.37 – Resposta polar de um arranjo de semicilindros:
— aperiódico; - - - periódico [1].

O arranjo aperiódico com semicilindros de diferentes dimensões (raio) também melhora a dispersão temporal e reduz a hipotética audibilidade da coloração devido ao *comb filtering*, na comparação das Figuras 2.38-40. A Figura 2.38 (repetição da Figura 2.10) mostra a resposta temporal de apenas um semicilindro e respectiva resposta em frequência do campo total (som directo + som reflectido). Na Figura 2.39 apresenta-se a mesma informação mas para um arranjo de 4 semicilindros idênticos. Por fim, na Figura 2.40, ilustra-se as mesmas respostas mas para um arranjo aperiódico de vários semicilindros de dimensões diferentes.

O desempenho deste tipo de difusores nas baixas frequências depende da dimensão do arranjo e do raio dos semicilindros. Resultados empíricos têm mostrado que os semicilindros começam a produzir significativamente mais dispersão (que uma placa plana) quando a profundidade (raio) é maior do que $\approx \lambda / 10$ [1] – ou seja, um semicilindro com 50 cm de raio começa ser eficiente para frequências superiores a 60Hz.

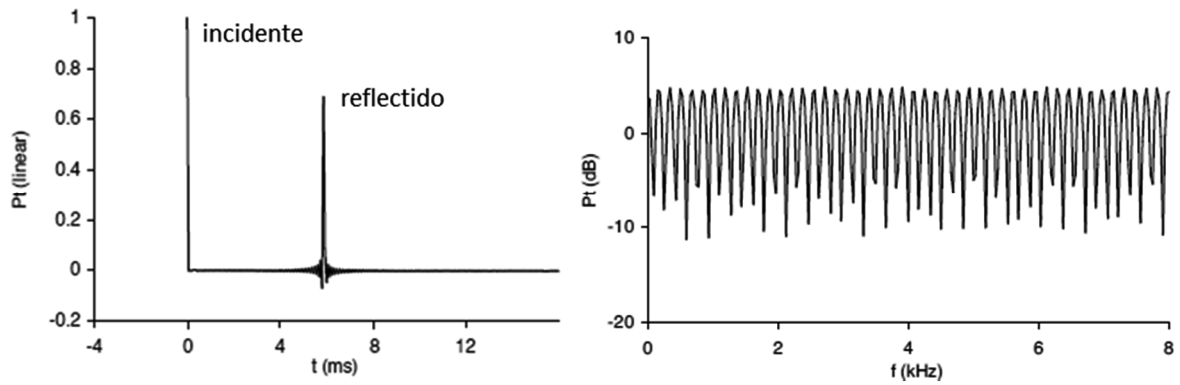


Figura 2.38 – Respostas temporal e em frequência resultantes da reflexão num semicilindro [1].

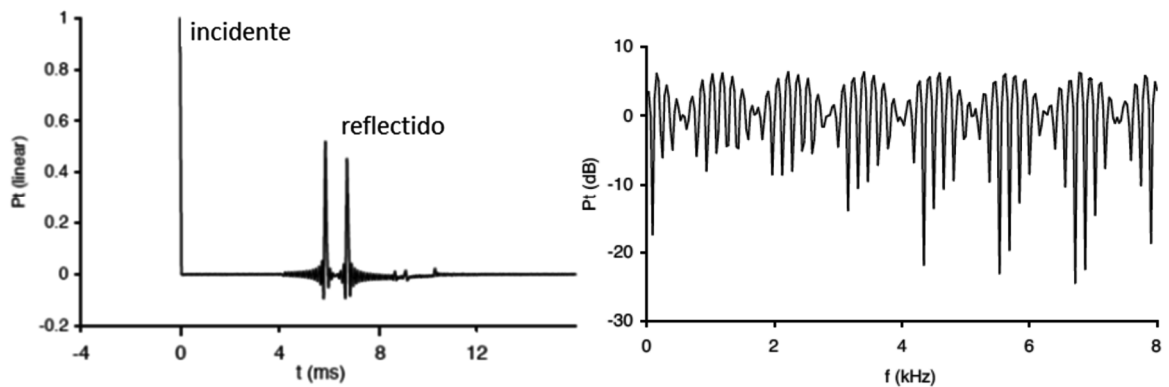


Figura 2.39 – Respostas temporal e em frequência resultantes da reflexão num arranjo de 4 semicilindros idênticos (dispostos simetricamente relativamente à fonte) [1].

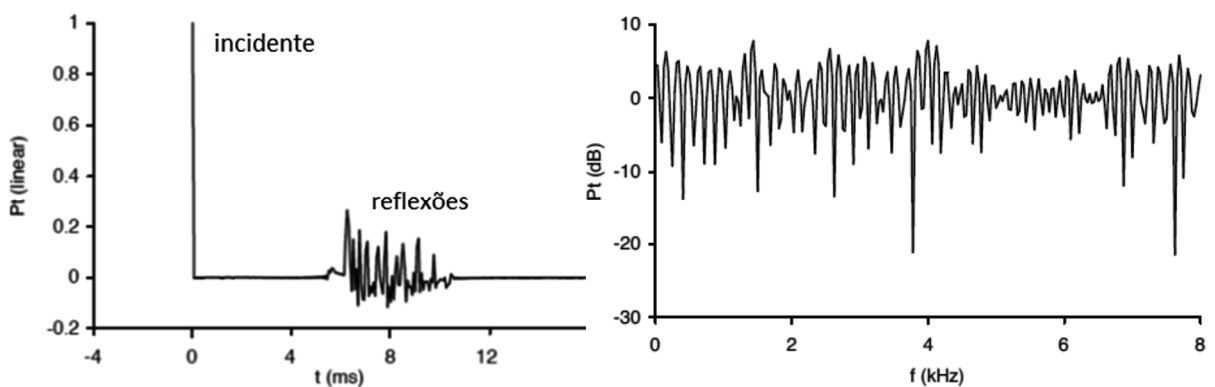


Figura 2.40 – Respostas temporal e em frequência resultantes da reflexão num arranjo periódico de semicilindros com diferentes dimensões [1].

2.5.3. DIFUSORES DE AMPLITUDE

Conforme vimos em 2.4.4., é possível criar reflexões difusas utilizando alternadamente superfícies reflectoras e absorventes, constituindo desta forma superfícies híbridas em que parte da energia incidente é absorvida e a restante é dispersada. Usando partes absorventes intercaladas com partes reflectoras para gerar dispersão não é particularmente inovador. Nos estúdios de gravação há já muitos anos que se tem utilizado esta técnica – Figura 2.41.

Actualmente já existem diversos produtos deste tipo, produzidos industrialmente, onde as partes absorventes são muito menores e a sua disposição é determinada por uma sequência pseudo-aleatória, para maximizar a dispersão gerada – Figura 2.42. Estes tipos de superfícies podem dispersar o som em 1D ou em 2D.



Figura 2.41 – Exemplos de estúdios de gravação onde são utilizadas superfícies híbridas (as partes escuras são absorventes sonoros).

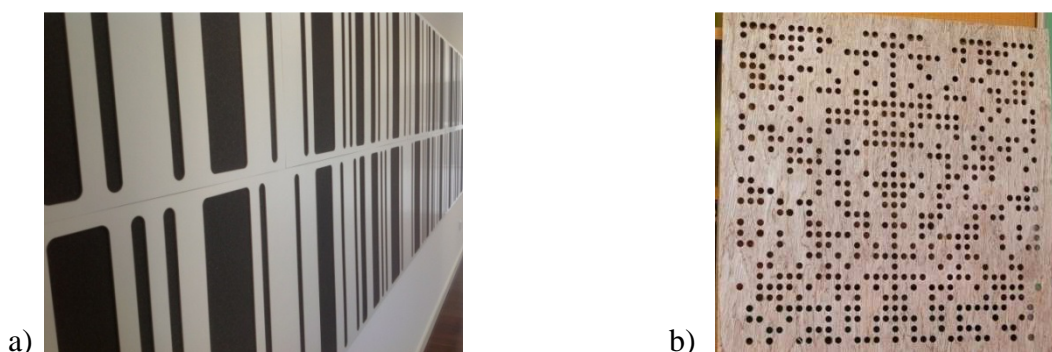


Figura 2.42 – Exemplos de produtos industriais baseados em sequências pseudo-aleatórias que optimizam a dispersão: a) dispersão 1D; b) 2D.

A construção de uma superfície híbrida consiste na utilização de um material absorvente (poroso, *e.g.* espumas de célula aberta, à esquerda na Figura 2.42 e Figura 2.43, ou fibras minerais, à direita na Figura 2.42) coberto por uma máscara rígida (normalmente de pequena espessura) perfurada de acordo com um determinado padrão de perfuração. A parte rígida da máscara é a parte que confere à superfície a capacidade de reflexão. A absorção ocorre nos furos da máscara perfurada, uma vez que o som que passa por estes é dirigido para a camada

de material absorvente. O som que atinge a parte rígida da máscara é reflectido e, devido à disposição aleatória das perfurações, a energia reflectida é dispersada. A matriz de perfuração é pois o elemento fundamental na dispersão da energia reflectida, sendo o seu desempenho otimizado obtido através de uma sequência binária pseudo-aleatória com propriedades de auto-correlação ideais [1].

A banda de frequências de eficiência destes sistemas híbridos, em termos de difusão, situa-se nas médias-altas frequências. Em termos de absorção sonora, a espessura do elemento poroso limita-a nas baixas frequências e a taxa de perfuração da máscara limita-a nas altas frequências. O material poroso que constitui o sistema híbrido tem uma elevada absorção sonora nas altas frequências, com a utilização da máscara, o sistema adquire um comportamento típico de um sistema ressonador, obtendo-se uma absorção adicional na gama das baixas-médias frequências, Figura 2.44. Nas altas frequências, a componente rígida da máscara provoca a reflexão de parte da energia sonora, evitando que haja a absorção desta em algumas partes do material poroso, provocando assim uma redução no coeficiente de absorção. É nestas frequências, onde a absorção é mais reduzida, que a superfície deve começar a gerar quantidades mais significativas de reflexões difusas.

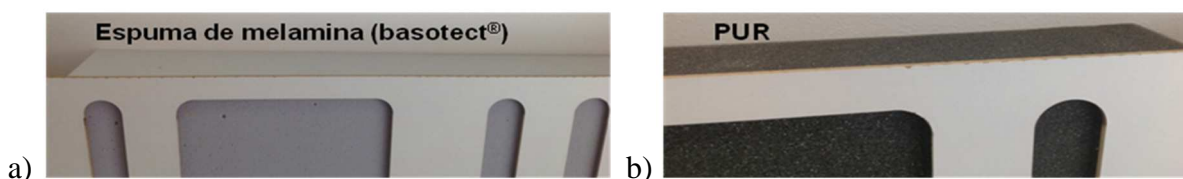


Figura 2.43 – Exemplos de produtos industriais que utilizam: a) espuma de melamina: b) espuma de poliuretano [23].

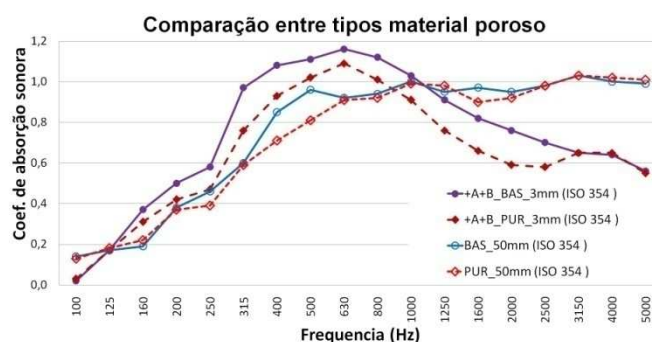


Figura 2.44 – Absorção sonora dos painéis da Figura 2.43 e das respectivas espumas [23].

A difusão destas superfícies pode ser otimizada, recorrendo a alterações que possam também providenciar alteração de fase nas reflexões. Isto pode ser conseguido através da adição de poços ou reentrâncias à superfície. Um exemplo é mostrado na Figura 2.45. O coeficiente de reflexão dessa superfície pode tomar três valores, para a frequência de projecto: -1, 0 e +1. O

desafio é obter uma sequência óptima (com boas propriedades de auto-correlação, tais como as que foram utilizadas por Schröder no desenvolvimento dos difusores de fase). Com a adição de poços às superfícies híbridas, mesmo com uma profundidade modesta, pode-se obter uma melhoria significativa do desempenho acústico. Melhor desempenho ainda se poderá obter se se utilizarem poços com profundidades diferentes.

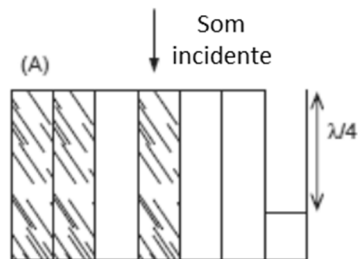


Figura 2.45 – Representação esquemática de um difusor híbrido com poços [1].

Outra forma, que pode ser mais simples, de melhorar o desempenho deste tipo de superfícies híbridas é dar-lhes uma curvatura de modo a reduzir as reflexões especulares – Figura 2.46. Essa curvatura poderá ter a forma de um semicilindro ou poderá ser uma curva resultante de um processo numérico de optimização.



Figura 2.46 – Painel híbrido curvo aplicado num estúdio de gravação [1].

Os difusores híbridos têm a vantagem de poder ser aplicados bastante mais próximos dos receptores, devido à absorção sonora que inerentemente possuem e alargam o desempenho acústico dos tradicionais painéis acústicos absorvedores, pois introduzem alguma difusão. Têm ainda a seu favor o facto de não introduzirem absorção excessiva nas médias-altas frequências. Por outro lado, os difusores híbridos planos são de construção simples e económica. Como podem ser montados mais próximos dos receptores que os difusores de fase, pelas razões acima apontadas, são um produto a ter em conta no condicionamento acústico de salas onde é necessária alguma absorção sonora e ao mesmo tempo a existência de reflexões difusas, como é o caso de salas críticas de pequena dimensão.

2.5.4. DIFUSORES DE SCHRÖEDER – DIFUSORES DE FASE

Quatro décadas atrás, Schröder [10] propôs uma abordagem sistemática para projectar um difusor, com base em sequências matemáticas da teoria de números. Schröder desenvolveu a grelha difusora de fase (*reflection phase grating*), que ficou conhecida como o difusor Schröder. Uma ilustração de tais difusores é dada na Figura 2.47.



Figura 2.47 – Difusor de Schröder original [1].

Este tipo de difusor consiste num conjunto (matriz) de poços (ou reentrâncias) lineares de diferentes profundidades mas de largura constante, separados por paredes rígidas finas (guias de onda). Os poços são prolongados ao longo do comprimento do difusor. A “grelha difusora” resulta das diferentes profundidades das cavidades – admite-se a propagação de ondas planas em cada uma das reentrâncias em direcção à superfície do fundo (perfeitamente reflectora), refletindo-se aí. As ondas planas percorrem comprimentos diferentes (devido às diferentes profundidades) e, portanto, possuem fases diferentes à saída das reentrâncias. Esta diferença de fase provoca uma interferência nas ondas reflectidas de modo a que a estrutura disperse o som uniformemente em todas as direcções.

Schröder [4] sugeriu que os melhores resultados, isto é, uma difusão uniforme, poderia ser obtida se as profundidades estivessem relacionadas de acordo com uma sequência de resíduos quadráticos (QR).

Schröder utilizou a solução de Fraunhofer que permite obter a pressão sonora reflectida por uma superfície S em campo afastado para desenvolver os difusores. Esta grandeza é dada por:

$$|p(\theta, \psi)| \approx \left| A \int_S R(x) \cdot e^{jkx[\text{sen}(\theta) + \text{sen}(\psi)]} dx \right| \quad (2.1)$$

onde $R(x)$ é o coeficiente de reflexão, θ é o ângulo de reflexão, ψ é o ângulo de incidência, k é o número de onda, A é uma constante e x é a coordenada de um ponto na superfície S do difusor unidimensional (Figura 2.48).

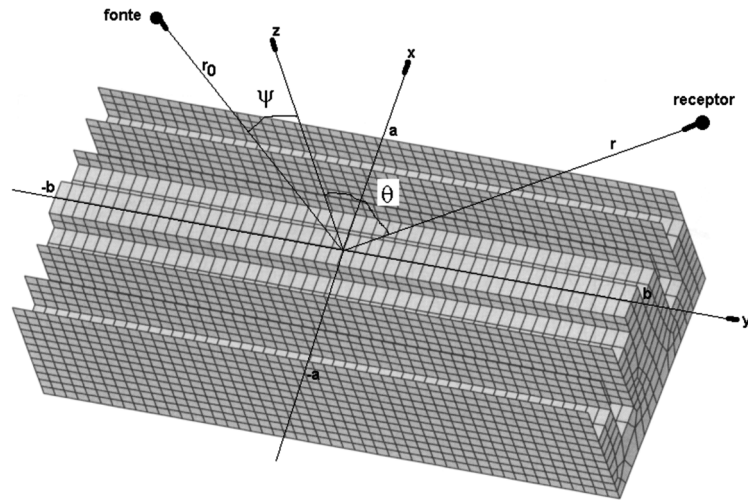


Figura 2.48 – Difusor de Schröder utilizado na solução de Fraunhofer [1].

A expressão (2.1) é muito semelhante a uma Transformada de Fourier, mas em vez da transformação se dar nas variáveis “habituais” tempo-frequência, dá-se nas variáveis kx e $[\text{sen}(\theta) + \text{sen}(\psi)]$. Tal como numa transformada de Fourier, se se escolher valores do coeficiente de reflexão, $R(x)$, de modo a ter um espectro de potência plano em relação a kx , então a amplitude será constante em relação à variável transformada $[\text{sen}(\theta) + \text{sen}(\psi)]$. Isto significa que a difusão não é constante em todas as direcções, mas sim em lóbulos de energia constante, determinados por $[\text{sen}(\theta) + \text{sen}(\psi)]$.

Para um difusor deste tipo apresentar um bom comportamento, o dispositivo deve ser periódico, uma vez que os lóbulos de difracção da energia são gerados pela periodicidade da superfície. Uma superfície periódica terá dispersão nas direcções onde a diferença de comprimento do percurso de onda reflectida, em dois pontos na superfície afastados exactamente de um período, L , é um valor múltiplo do comprimento de onda. Nessas direcções haverá interferência construtiva e surgirão lóbulos de energia constante. As direcções em que esses lóbulos ocorrem, no campo distante, podem ser calculadas com o auxílio da Figura 2.49, onde a diferença do comprimento de caminho é:

$$(r_1 + r_3) - (r_2 + r_4) = \overline{AB} - \overline{CD} = L[\text{sen}(\theta) + \text{sen}(\psi)] = m\lambda \quad (2.2)$$

onde $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \text{etc.}$ é a ordem dos lóbulos e λ é o comprimento de onda do som incidente. Deste modo, os lóbulos ocorrerão nas direcções dadas por:

$$\theta_m = \arcsen\left(\frac{m\lambda}{L} - \text{sen}(\psi)\right) \Rightarrow \left|\frac{m\lambda}{L} - \text{sen}(\psi)\right| \leq 1 \quad (2.3)$$

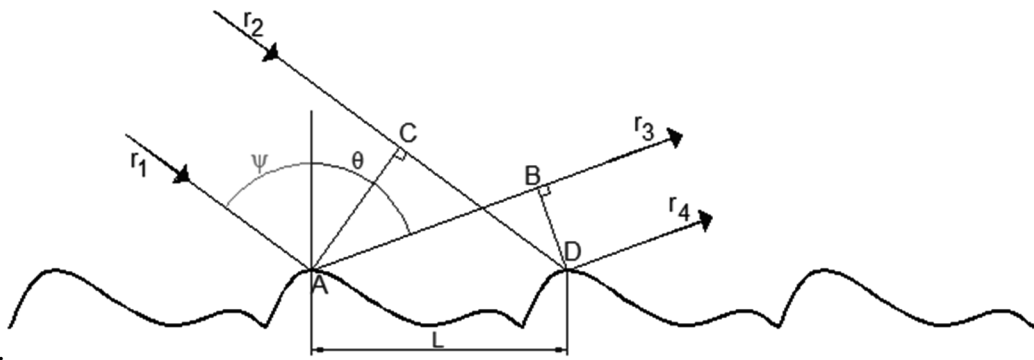


Figura 2.49 – Esquema ilustrativo para determinar a diferença de comprimento do percurso de duas frentes de onda reflectidas.

A partir da expressão (2.3) podemos concluir que, quando o ângulo de incidência é fixo, m pode tomar valores maiores para comprimentos de onda mais pequenos, isto é, quanto maior a frequência maior é o número de lóbulos.

Para $m = 0$, corresponde à reflexão especular pois $\text{sen}(\theta) = -\text{sen}(\psi) \Rightarrow \theta = -\psi$. Deste modo, os primeiros lóbulos reflectidos por uma superfície acontecem para $m = \pm 1$ (pode ser apenas o valor positivo ou negativo ou até ambos, dependendo do ângulo de incidência e do comprimento de onda).

Por exemplo, para incidência normal, $\psi = 0^\circ$, temos:

$$\theta_{\pm 1} = \arcsen\left(\frac{\pm \lambda}{L}\right) \quad (2.4)$$

com $\left|\frac{\pm \lambda}{L}\right| \leq 1 \Rightarrow \frac{\lambda}{L} \leq 1$, porque λ e L são sempre grandezas positivas. Deste modo os primeiros dois lóbulos (que neste caso são simétricos) surgem quando $\lambda \leq L$. Os lóbulos de segunda ordem (quando $m = \pm 2$) surgem quando $\frac{2\lambda}{L} \leq 1$. Ou seja, enquanto $\frac{L}{2} < \lambda \leq L$ apenas existe um lóbulo (os de 1ª ordem) de cada lado da direcção especular ($\psi = 0$). Isto pode ser estendido para o m -ésimo lóbulo: haverá $m - 1$ lóbulos de cada lado da reflexão especular (relembrando que é $\psi = 0^\circ$) se $\frac{L}{m} < \lambda \leq L$. Faz-se notar que a disposição dos lóbulos de difusão são simétricos relativamente à direcção da reflexão especular quando o ângulo de incidência é $\psi = 0^\circ$, pois para incidências oblíquas tal já não acontece.

A estratégia para se obter uma difusão óptima está na definição de $R(x)$ que, como é sabido, depende da impedância acústica superficial [1]. Ora, pode-se variar a impedância acústica superficial mudando a fase da onda reflectida (fazendo o som incidente percorrer caminhos diferentes antes de ser reflectido) ou a sua amplitude (absorvendo a energia). No primeiro caso, obtém-se um difusor de modulação de fase, no segundo caso, obtém-se um difusor com modulação de amplitude.

As profundidades dos poços num difusor de resíduos quadráticos (QRD) são determinadas pela sequência numérica (resultante do resto de uma divisão inteira) e por uma frequência de projecto. A sequência numérica baseia-se num número primo, que também determina o número total de poços que formam um módulo básico do difusor (*i.e.*, um período). A frequência de projecto é a frequência para a qual os poços começam a fazer a alterar a fase das ondas incidentes tal como exigido pela condição de difusão uniforme.

Outras sequências numéricas também têm sido utilizadas na concepção deste tipo de difusores acústicos. A sequência de raízes primitivas (PRD) é uma sequência popular no projecto de difusores de fase. Também para esta sequência numérica é utilizado um procedimento de concepção semelhante ao dos QRD's. A vantagem notória de tal desenho é a redução do lóbulo central e o nivelamento dos restantes lóbulos laterais para a mesma amplitude.

Outras sequências numéricas propostas por Schröder foram as sequências de comprimento máximo (MLS).

As sequências numéricas enumeradas atrás podem ser utilizadas para gerar difusores bi-dimensionais (2D), prolongando o conceito de lóbulos de dispersão de energia constante nas duas direcções ortogonais, criando uma dispersão de energia hemisférica.

A largura de banda de difusão nos difusores de Schröder é, essencialmente, ditada pela largura (constante) dos poços e pela profundidade máxima dos mesmos. Porém, a largura total do difusor (do período “padrão”), bem como o número primo utilizado na sequência numérica, também limita a largura de banda. Por outro lado, num dos primeiros trabalhos de D'Antonio e Konnert [13] sobre o design de difusores de fase, é afirmado que estes difusores só funcionam bem em frequências discretas, nomeadamente, na frequência de projecto e nos seus múltiplos, não tendo contudo difusão “ótima” em toda a largura de banda (*i.e.*, entre duas frequências “ótimas” os difusores de fase dispersam menos energia).

Embora os difusores de Schröder sejam concebidos para espalhar o som, sabe-se que oferecem uma quantidade razoável de absorção. Previsivelmente, a absorção é parcialmente causada pelas ressonâncias de quarto de onda dentro dos poços, mas não só. A má qualidade de construção do difusor é habitualmente uma causa do excesso de absorção. Outra razão é a largura dos poços ser demasiado pequena.

2.5.4.1. DIFUSORES QRD

A análise dos difusores de Schröder (sejam eles QRD, PRD ou MLS) é feita considerando-se uma onda plana incidente segundo a direcção y , no sentido contrário ao da orientação deste eixo na Figura 2.50. A onda plana é reflectida no fundo dos poços, reflectindo cada poço uma onda na direcção e sentido positivo do eixo y , e assumindo que não há perdas de energia neste processo. A pressão sonora num ponto externo ao difusor será dada pela interferência das ondas que são irradiadas por cada poço. Todas estas ondas têm a mesma amplitude mas 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.

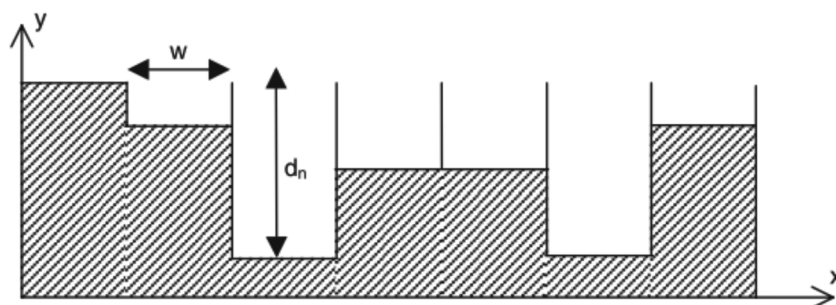


Figura 2.50 – Secção transversal de um difusor de resíduos quadráticos (QRD).

Em primeiro lugar, deve-se notar que todas as expressões que a seguir se apresentam para o dimensionamento se baseiam na hipótese inicial de campo distante, ou seja, que as distâncias entre o difusor e a fonte sonora e a distância difusor-receptor são grandes em comparação com o comprimento de onda da frequência de projecto. Esta hipótese ocorre em muitas situações reais e pode simplificar grandemente a análise matemática e dimensionamento do difusor.

Considera-se, ainda, que ondas planas se propagam nos poços. A largura dos poços, w , para que tal condição de propagação de ondas planas nos poços se verifique é:

$$w \leq \frac{\lambda_{min}}{2}, \text{ onde } \lambda_{min} = \frac{c}{f_{max}} \Rightarrow f_{max} \leq \frac{c}{2w} \quad (2.5)$$

em que c é a velocidade de propagação do som e λ_{min} é o menor comprimento de onda. 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 se considerarem paredes rígidas a separar os diferentes poços (guias-de-onda), devendo estas ser, teoricamente, o mais finas possível. No entanto, do ponto de vista do fabrico, estas paredes não podem ser demasiado finas para não entrarem em vibração facilmente, provocando dissipação da energia sonora incidente. Em [24], num trabalho desenvolvido no DEC-FCTUC, foi demonstrado que a utilização destes guias-de-onda é indispensável para se obter mais difusão. A espessura dos guias-de-onda deve ser cerca de 15 vezes menor que a largura dos poços, variando tipicamente entre os 1,5 mm e os 5 mm [25].

A largura dos poços não pode ser demasiado pequena de modo a evitar-se que os efeitos da viscosidade do ar (da camada limite viscosa) introduzam absorção sonora adicional à superfície. Em termos práticos, as reentrâncias estreitas conduzem a um trabalho de fabrico mais complexo e dispendioso, sendo típico adoptar o intervalo de valores: $2,5 \text{ cm} < w < 5 \text{ cm}$.

A sequência de resíduos quadráticos é baseada no número primo N (que corresponde também o número de poços que o difusor tem) e é obtida através da expressão:

$$s_n = n^2 \bmod N \quad (2.6)$$

onde “mod” indica o resto (inteiro) da divisão n^2/N não negativo e $n = 0, 1, \dots, N-1$, é o número de ordem do poço.

No Quadro 2.1 apresentam-se os valores correspondentes aos números primos entre 3 e 23 e na Figura 2.51 apresentam-se, de forma ilustrativa, as secções transversais de difusores QRD resultantes de números primos entre 5 e 37.

Os difusores de Schröder têm difusão ideal em frequências múltiplas inteiras da frequência de projecto, f_0 (normalmente definida como a frequência mínima limite, mas nem sempre, como veremos mais à frente), cujo comprimento de onda é:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} \quad (2.7)$$

A frequência de projecto não é a menor frequência para a qual o difusor gera mais dispersão do que uma superfície plana, esta é apenas a frequência para a qual a dispersão se dá ainda em lóbulos de igual energia. Estes surgem, em campo afastado, nas direcções dadas pela expressão (2.3).

A profundidade dos poços, d_n , é dada pela sequência através da expressão:

$$d_n = \frac{s_n \lambda_0}{2N} \quad (2.8)$$

Quadro 2.1 – Sequências de resíduos quadráticos [25].

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

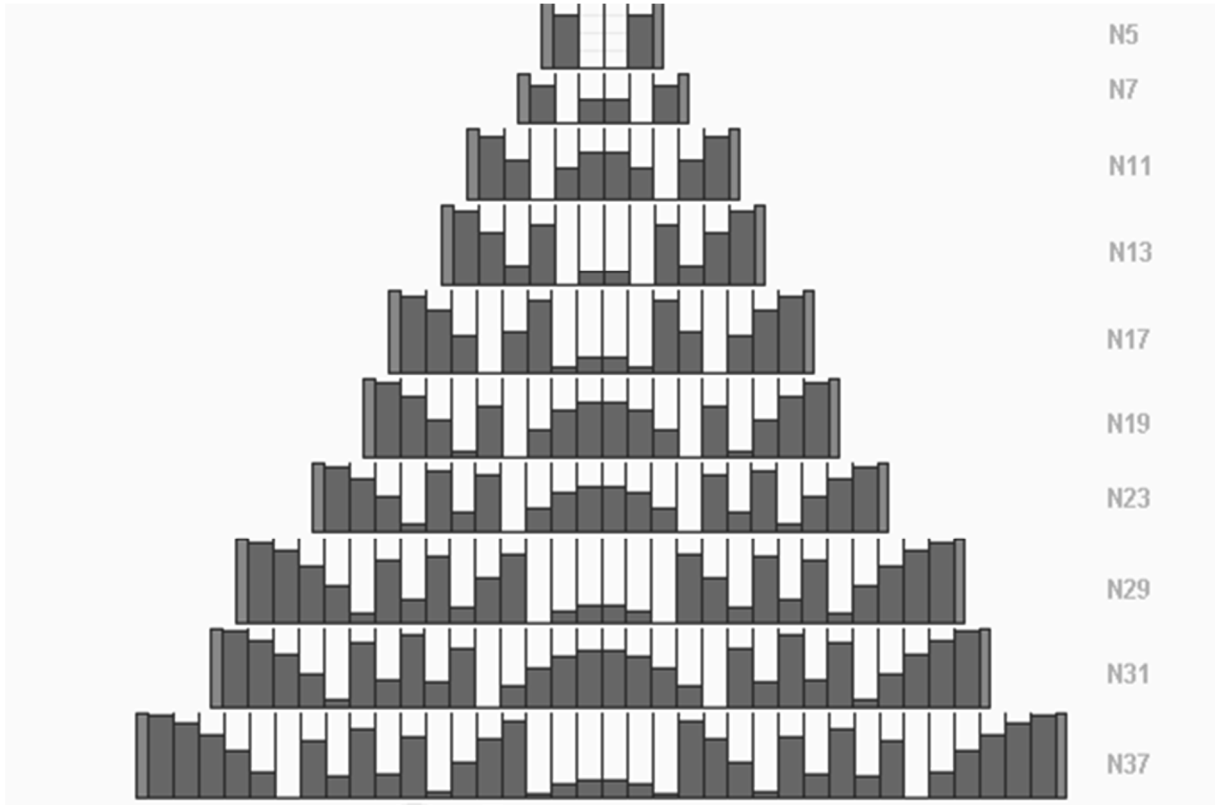


Figura 2.51 – Secções transversais de QRDs para N entre 5 e 37 (apenas 1 período) [26].

Se substituirmos as expressões (2.3) e (2.8) da solução de Fraunhofer dada por (2.1), obtêm-se, para a frequência de projecto, f_0 , a pressão sonora reflectida no m – ésimo lóbulo:

$$|p(\theta, \psi)| \approx \left| A \int_S R(x) e^{j2\pi x m / N w} dx \right| = \left| A \sum_{n=1}^N R_n e^{j2\pi n m / N} \right| \propto \sqrt{N} \quad (2.9)$$

A profundidade dos poços varia entre:

$$d_{min} = 0 \leq d_n \leq d_{max} = \frac{\lambda_0}{2} \cdot \frac{s_{max}}{N} \quad (2.10)$$

onde s_{max} é valor máximo da sequência de resíduos quadrático.

Rescrevendo a expressão (2.10) podemos dizer que, para uma dada profundidade máxima, a menor frequência em que o difusor produz lóbulos de igual energia é:

$$f_0 = \frac{c}{2d_{max}} \cdot \frac{s_{max}}{N} \quad (2.11)$$

Esta expressão mostra que, se se pretender obter difusão a muito baixas frequências, o difusor tem de ter poços muito profundos, o que muitas vezes se torna impraticável. De facto, para um valor d_{max} pré-definido (por exemplo, por razões arquitectónicas) é a relação $\frac{s_{max}}{N}$ que determina a eficiência de um difusor QRD para as baixas frequências. A Figura 2.52 mostra essa relação para os números primos compreendidos entre 5 e 43.

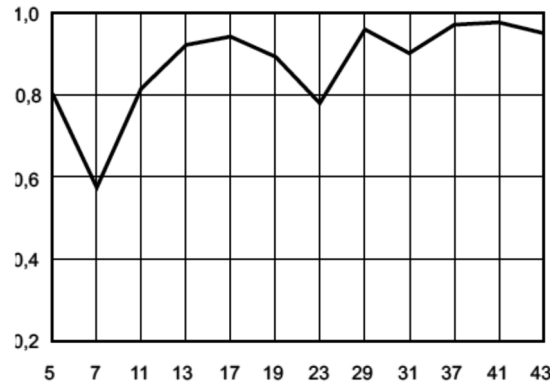


Figura 2.52 – Valores S_{max}/N para N entre 5 e 43 [25].

Podemos ver, na figura acima, que $N=7$ é o número primo que permite uma frequência mais baixa para uma profundidade máxima dos poços fixa. Essa é uma das razões por que $N=7$ é uma escolha muito habitual neste tipo de difusores (a outra razão prende-se com custos de produção). No entanto, é possível manipular as sequências de modo a diminuir a frequência mínima (para uma dada profundidade fixa), introduzindo um deslocamento de fase (d) apresentado na expressão (2.12):

$$s_n = (n^2 + d) \bmod N \quad (2.12)$$

Este deslocamento de fase não deve ser introduzido se a largura do período, L , for pequena, pois tem de se garantir que a frequência dada pela expressão (2.11) seja inferior à frequência a partir da qual o difusor começa a gerar lóbulos de difusão.

De facto, um difusor tem de dispersar energia em direcções não-especulares. Observando a expressão (2.3), e como se viu atrás, isso corresponde a que $m = \pm 1$. Os primeiros lóbulos surgem na direcção $\theta = \pm 90^\circ$, ou seja, quando $\sin(\theta) = \pm 1$. Reescrevendo (2.2) e tendo em atenção que $\lambda = c/f$, obtemos:

$$f_{min} = \frac{\pm c}{L[\pm 1 + \sin(\psi)]} \quad (2.13)$$

Para uma incidência normal ($\sin(\psi) = 0$) a expressão acima toma o seu valor máximo (a frequência tem de ser um número positivo) e, portanto, garante-se que, para outros ângulos de incidência, também se garante a geração de lóbulos. Deste modo, conclui-se que:

$$f_{min} \geq \frac{c}{L} = \frac{c}{N(w+e)} \quad (2.14)$$

onde $L = N \cdot (w + e)$, w é a largura dos poços, e é a espessura dos guias-de-onda e N é o número primo gerador da sequência numérica.

Ou seja, temos dois limites para as baixas frequências: um dependente da profundidade máxima dos poços, expressão (2.11), e outro resultante da largura total do difusor, expressão (2.14). A frequência de projecto mínima de um difusor QRD é o valor que verifica simultaneamente (2.11) e (2.14), isto é, será o que tiver maior valor.

Um difusor QRD é projectado para ter uma difusão óptima para a frequência de projecto f_0 e em frequências múltiplas inteiras dela. Contudo, o difusor comporta-se como um reflector especular para frequências críticas:

$$f_{criticas} = mNf_0 \quad (2.15)$$

com $m=1, 2, 3$, etc.

Nestas frequências críticas as ondas reflectidas pelos poços estão em fase (as profundidades dos poços são múltiplos inteiros de $\lambda_0/2$). Assim, a largura dos poços, w , e o número primo gerador da sequência, N , têm de ser escolhidos de modo a que a máxima frequência de desempenho óptimo do difusor, f_{max} , definida por (2.5), seja menor que a primeira frequência crítica. Isto leva a que:

$$f_{max} \leq \frac{c}{2w} \leq Nf_0 \Rightarrow N > \frac{c}{2wf_0} \quad (2.16)$$

A largura de banda de eficiência de um difusor QRD é então dada por:

$$f_0 = \frac{c}{2d_{max}} \cdot \frac{S_{max}}{N} \leq f_{min} = \frac{c}{L} \leq f_{banda_eficiência} \leq \frac{c}{2w} \leq f_{criticas} = Nf_0 \quad (2.17)$$

Para se determinar o número de lóbulos de dispersão, para uma dada frequência f , pode-se voltar a (2.3) e reescrever em ordem a m :

$$-1 \leq \frac{m\lambda}{L} - \text{sen}(\psi) \leq 1 \Leftrightarrow \frac{fL}{c}(\text{sen}(\psi) - 1) \leq m \leq \frac{fL}{c}(\text{sen}(\psi) + 1) \quad (2.18)$$

De (2.18) podemos ver que, quanto maior for a frequência, maior é o valor que m pode tomar e, logo, maior é o número de lóbulos. Por outro lado, também se pode inferir que quanto mais largos forem os poços (w), mais largo é o difusor (L), pois desprezando a espessura dos guias-de-onda, $L \approx Nw$. Por isso, a largura dos poços também é importante para o número de lóbulos de dispersão que podem formar para uma dada de frequência.

O número máximo de lóbulos pode ser obtido através da diferença entre os valores extremos da desigualdade expressa por (2.18):

$$\frac{fL}{c}(\text{sen}(\psi) + 1) - \frac{fL}{c}(\text{sen}(\psi) - 1) = 2\frac{fL}{c} \approx \frac{2fNw}{c} \quad (2.19)$$

O valor máximo da expressão (2.19) é obtido quando $f = f_{max}$, dado por (2.5). Substituindo em (2.18) conclui-se que o número máximo de lóbulos de difusão é igual ao número primo N .

Para se gerarem os lóbulos de máxima energia é necessário periodicidade dos módulos unitários projectados com recurso às expressões anteriores. Na Figura 2.53 observa-se um difusor QRD com 3 períodos de ordem $N = 7$. A ponderação do número de períodos a utilizar deve ser feita de modo a garantir a maior eficácia da superfície difusora. Observando a Figura 2.54, podemos constatar que, quando se utilizam muitos períodos, os lóbulos dispersados tornam-se bastante mais estreitos e com valores nulos entre eles, resultando numa dispersão desigual. Nesse

sentido, a melhor solução é utilizar um número pequeno de períodos, por exemplo 5, de modo a assegurar alguma periodicidade mas que não gere lóbulos demasiado estreitos. Como vimos, o comprimento do período deverá ser suficientemente grande para assegurar um elevado número de lóbulos laterais, o que implica a utilização de uma ordem N (número primo gerador da sequência numérica) relativamente grande.

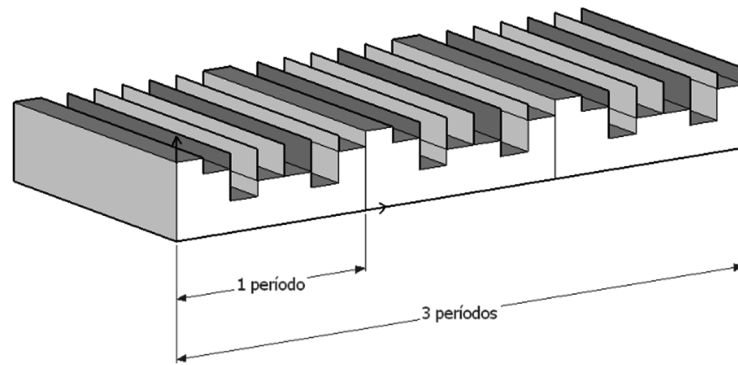


Figura 2.53 – QRD com 3 períodos de ordem $N=7$ [37].

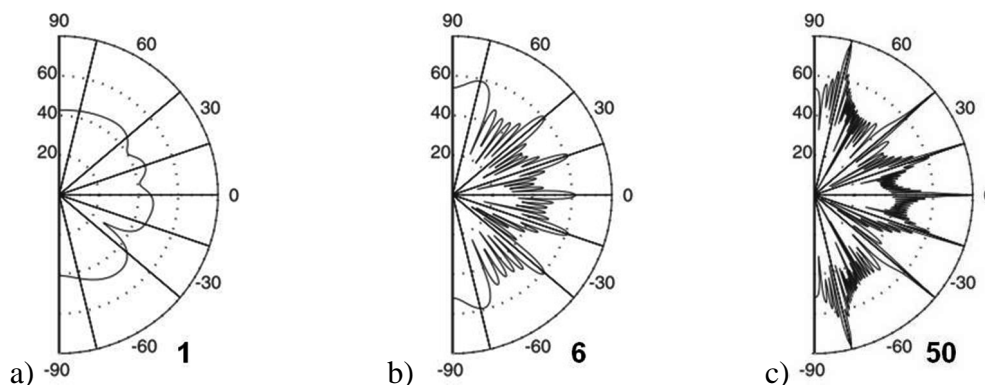


Figura 2.54 – Resposta polar de um QRD ($N=7$), para $f=3\text{kHz}$, para três períodos diferentes: a) um ; b) seis ; c) cinquenta [1].

Quando não é possível cobrir grandes superfícies com poucos períodos e/ou a largura de um período não pode ser elevada até à dimensão desejada, uma solução prática para este problema é o uso de esquemas de modulação. Ou seja, normalmente, a melhor opção é usar um difusor e o seu inverso (Figura 2.55), dispostos de forma a alcançar a aperiodicidade. Pode-se ainda utilizar QRD's com diferentes número de ordem (N) e/ou frequência de projecto (f_0).

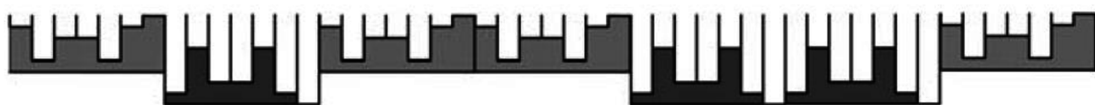


Figura 2.55 – Esquema de uma modulação usando um QRD $N=7$ e o seu inverso [1].

A sequência numérica a utilizar para a modulação deverá também ela ter boas propriedades de auto-correlação. Utilizam-se com sucesso sequências de Barker, que constam no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 – Sequências de Barker [1].

Nº de painéis	Sequência de Barker	
2	+1 -1	+1 +1
3	+1 +1 -1	
4	+1 +1 -1 +1	+1 +1 +1 -1
5	+1 +1 +1 -1 +1	
7	+1 +1 +1 -1 -1 +1 -1	
11	+1 +1 +1 -1 -1 -1 +1 -1 -1 +1 -1	
13	+1 +1 +1 +1 +1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 -1 +1	

Outra forma de contornar as limitações dos QRD's (periodicidade, absorção e largura de banda) é a utilização de estruturas fractais, sendo uma solução “elegante” para a resolução destes problemas. Difusores para altas frequências podem ser incorporados em difusores para baixas frequências, explorando assim a simetria própria das construções fractais de modo a fornecer uma difusão num espectro mais completo com um único dispositivo.

Os elementos fractais são elementos que mantêm a mesma escala de dimensões para diferentes níveis de ampliação. A técnica de manutenção da forma e proporção, em escalas diferentes pode assim ser usada na construção de painéis difusores, possibilitando a abrangência de uma largura de banda muito superior. Um difusor fractal é caracterizado pela existência de reentrâncias de diferentes escalas, em que reentrâncias mais pequenas se apresentam dentro das reentrâncias mais largas, a profundidades diferentes. Enquanto as reentrâncias de menores dimensões actuam nas altas frequências, as mais largas apresentam melhor desempenho nas baixas frequências. A Figura 2.56 mostra as características de um difusor fractal existente no mercado.

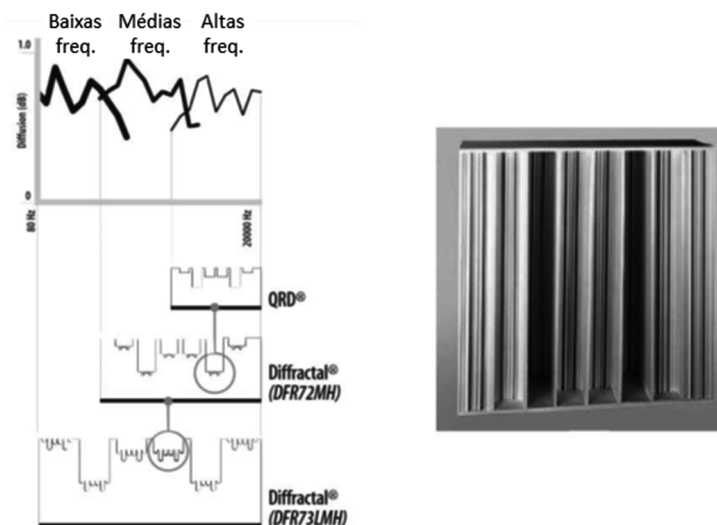


Figura 2.56 – Espectro de difusão de difusores fractais comercializados pela RPG [1].

2.5.4.2. DIFUSORES MLS

Schröder propôs igualmente a construção de difusores com base em sequências de comprimento máximo (MLS) [10]. Um sinal MLS é um sinal aparentemente aleatório, obtido de sequências binárias compostas por 0 e 1. Este sinal é utilizado na criação de ruído pseudoaleatório e apresenta um espectro de potência plano para todas as frequências.

Uma sequência MLS de ordem n é periódica, com período N dado por $N = 2^n - 1$. Existem diferentes sequências MLS para a mesma ordem. Em [23] é explicado de forma breve como se podem “construir” este tipo de sequências.

Um difusor MLS consiste em faixas de material com duas profundidades diferentes, estando estas dispostas em concordância com uma sequência predefinida. A largura de cada faixa de material deverá ser igual $w = \lambda_0/2$. Por exemplo, um difusor MLS com uma ordem $N = 7$ (Figura 2.57) apresentará uma superfície baseada na sequência [0,0,1,0,1,1,1].

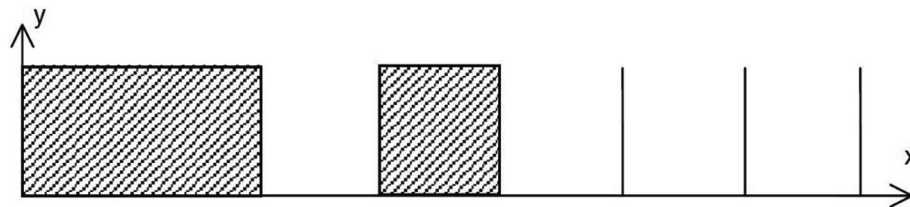


Figura 2.57 – Secção transversal de um difusor MLS, de ordem $N=7$ [1].

Quando, na frequência de projecto, $f_0 = c/\lambda_0$, a profundidade dos poços é igual a $d = \lambda_0/4$ o coeficiente de reflexão R_n (ver expressão (2.8)) toma valores +1 ou -1 (conforme a profundidade dos poços). Uma das consequências é que o lóbulo central (correspondente a $m = 0$) tem um nível de pressão sonora inferior em $-10 \log(N + 1)$ (em dB) relativamente aos lóbulos laterais. A Figura 2.58 apresenta a resposta polar para um difusor MLS, com período $N = 7$, na sua frequência de projecto, onde é observável que o lóbulo central é inferior aos lóbulos laterais.

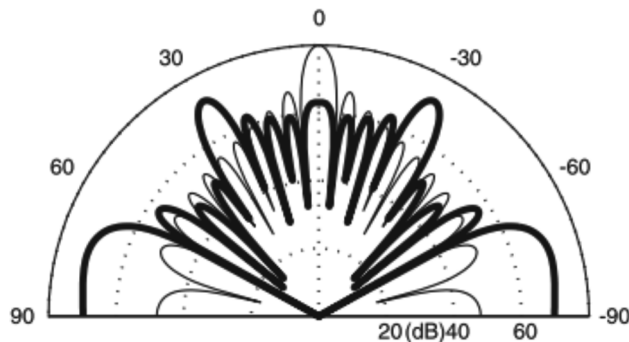


Figura 2.58 – Resposta polar de um difusor MLS com $N=7$ na sua frequência de projecto:

———— difusor MLS $N = 7$; - - - - - superfície plana [1].

Uma oitava acima da frequência de projecto, o difusor MLS apresenta uma reflexão especular. Nesta frequência crítica a profundidade do poço é metade do comprimento de onda, causando assim uma reflexão das ondas com a mesma fase, produzindo uma reflexão especular (ver Figura 2.59). Deste modo, os difusores baseados em sequências MLS apresentam apenas uma banda de frequências óptima de apenas uma oitava, sendo esta a principal limitação de desempenho destes difusores. De forma a contornar este problema, Schröder sugeriu diferentes sequências numéricas, tais como a sequência resíduos quadráticos já apresentada. Contudo, este tipo de difusores apresenta uma menor absorção nas baixas frequências que os QRD e PRD [25].

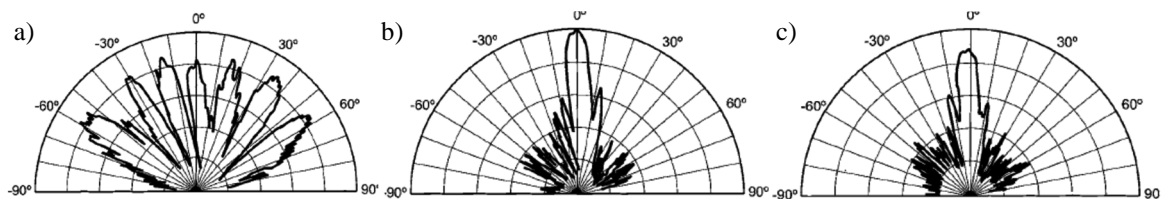


Figura 2.59 – Respostas polares de um difusor MLS com $N = 7$: a) na sua frequência de projecto; b) no dobro da sua frequência de projecto; c) placa plana [25].

2.5.4.3. DIFUSORES PRD

Em relação aos difusores QRD, os difusores baseados na sequência de raízes primitivas (PRD) são dimensionados de forma a diminuir a energia reflectida na direcção da reflexão especular de $-20\log(N - 1)$ em relação à de uma placa plana, e assim produzir um difusor com uma quebra na resposta à dispersão na direcção especular (Figura 2.60). Adicionalmente, devem apresentar a mesma energia nos outros lóbulos de difracção. Tal como nos QRD, a dispersão óptima apenas é atingida em múltiplos inteiros da frequência de projecto.

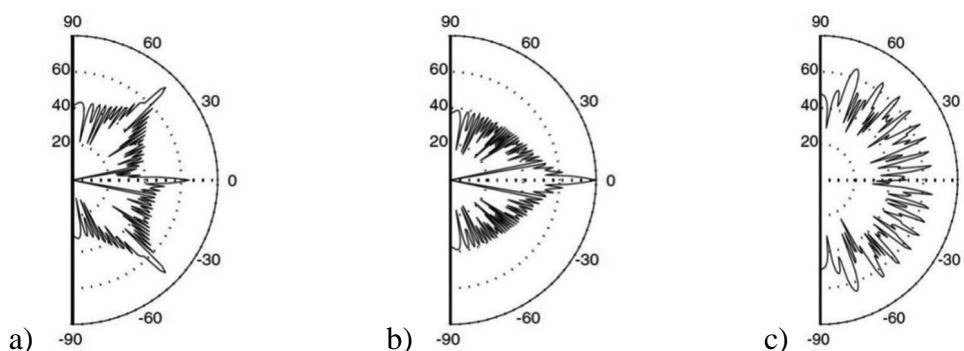


Figura 2.60 – Respostas polares de: a) Um PRD com $N=7$; b) Uma superfície plana; c) Um PRD com $N=37$ [1].

Da análise da Figura 2.60 conclui-se ainda que a reflexão especular de um PRD se reduz à medida que N aumenta. No entanto, comparativamente com uma placa plana, qualquer

superfície com poços, reduz a energia reflectida na direcção especular, desde que a profundidade dos poços seja da ordem de grandeza do comprimento de onda na frequência de interesse, pois quando uma sequência de profundidades é introduzida na superfície, ocorrem interferências destrutivas entre as ondas irradiadas pelos poços.

Para uma dada raiz primitiva r , a profundidade relativa dos $N - 1$ poços num difusor PRD com ordem N (um número primo) é dada por:

$$s_n = r^n \bmod N, \text{ com } n = 1, 2, 3, \dots, N - 1, \quad (2.20)$$

onde r é a menor raiz primitiva de N , sendo usualmente obtida por um processo de tentativa e erro, sendo um número inteiro que, quando aplicado nesta expressão, dá origem a todos os inteiros entre 1 e $N - 1$ (para que r seja uma raiz primitiva de N é preciso que o número de resíduos distintos gerados por (2.20) seja igual a $N - 1$). As raízes primitivas, para diferentes números de ordem N , podem igualmente ser consultadas em tabelas publicadas em trabalhos de referência. A título de exemplo, pode referir-se, no caso de ordem $N = 7$, a menor raiz primitiva é 3, dando origem à sequência [3, 2, 6, 4, 5, 1].

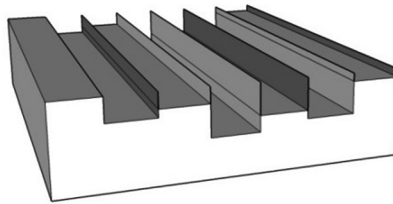


Figura 2.61 – Exemplo de uma configuração PRD com $N=7$ [37].

2.5.5. OUTRAS SEQUÊNCIAS

As sequências atrás apresentadas (QRD, MLS e PRD) não são únicas, embora sejam as mais populares, principalmente pela simplicidade no dimensionamento dos respectivos difusores. Contudo, existem outras sequências que poderão resultar em bons desempenhos, tais como [1]:

- *Index sequences;*
- *Short power residue sequences;*
- *The Chu sequences*

2.5.6. DIFUSORES BIDIMENSIONAIS, 2D

Os difusores de Schröder descritos até aqui apresentam variação de fase ou de amplitude apenas numa direcção, resultando uma dispersão do som incidente numa superfície semicilíndrica. A este tipo de difusores é usual classificá-los como difusores 1D. Os difusores de Schröder com alteração de fase ou de amplitude em duas direcções ortogonais, são

denominados por difusores 2D e dispersam o som de forma hemisférica. Estes são construídos de modo a que a dispersão seja otimizada nos dois planos ortogonais por exemplo, xOz e yOz). Como consequência, estes difusores têm aparência de uma grelha.

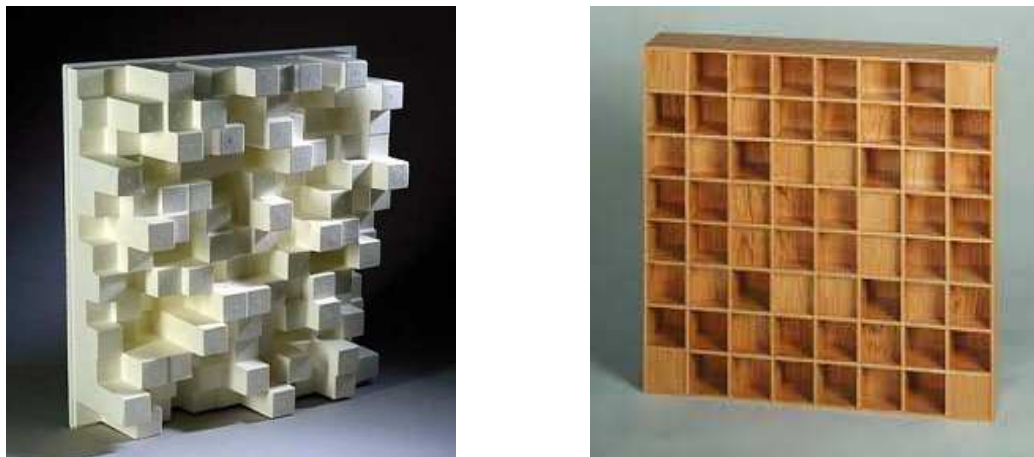


Figura 2.62 – Exemplos de difusores 2D existentes no mercado.

Os lóbulos resultantes da dispersão de um difusor bidimensional, cujas dimensões são $Nw \times Nw$, têm menor energia (uma redução de $10 \cdot \log(m)$, onde m é o número de lóbulos na dispersão do difusor 1D), que o difusor correspondente unidimensional com a mesma dimensão Nw . Contudo, terá o quadrado do número de lóbulos.

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

$$s_{n,m} = (n^2 + m^2) \bmod N \quad (2.21)$$

onde n e m são números inteiros e permitem calcular a profundidade do poço de ordem (n, m) . Outras sequências podem igualmente ser utilizadas, tais como a PRD bidimensionais (e até mesmo utilizar um tipo de sequência numa direcção e outra na direcção ortogonal, embora baseadas no mesmo número primo, contudo não estão provados quais as vantagens do aumento da complexidade construtiva no desempenho do difusor).

Nos difusores bidimensionais a relação S_{max}/N tende para 1 e, portanto, estes apresentam uma menor eficiência em baixas frequências, quando comparados com os correspondentes difusores unidimensionais. Por outro lado, devido ao facto de serem construídos como uma grelha, têm mais guias de onda (e mais poços também) e também têm uma absorção mais elevada, por unidade de área, do que os seus homólogos 1D. E são, por isso, ainda mais sensíveis a defeitos de construção (e.g., frinchas, vibrações dos guias-de-onda, etc...).

A sequência dada por (2.21) é periódica, sendo, por isso, possível iniciar os índices n e m a partir de qualquer número da sequência. Isso é útil se se pretender centrar o difusor de modo a que no centro fique o poço de profundidade nula (0). Por exemplo, o difusor bidimensional baseado em $N = 7$, apresentado na Figura 2.63 os índices n e m iniciaram-se em 4.

4	6	3	2	3	6	4
6	1	5	4	5	1	6
3	5	2	1	2	5	3
2	4	1	0	1	4	2
3	5	2	1	2	5	3
6	1	5	4	5	1	6
4	6	3	2	3	6	4

Figura 2.63 – Resíduos de um difusor QRD bidimensional com $N=7$ [1].

A título ilustrativo, a Figura 2.64 apresenta, à esquerda, a dispersão hemisférica, para uma frequência $f = 4 \cdot f_0$, de um QRD bidimensional baseado no número primo $N = 7$, comparativamente com a dispersão de uma superfície plana (à direita).

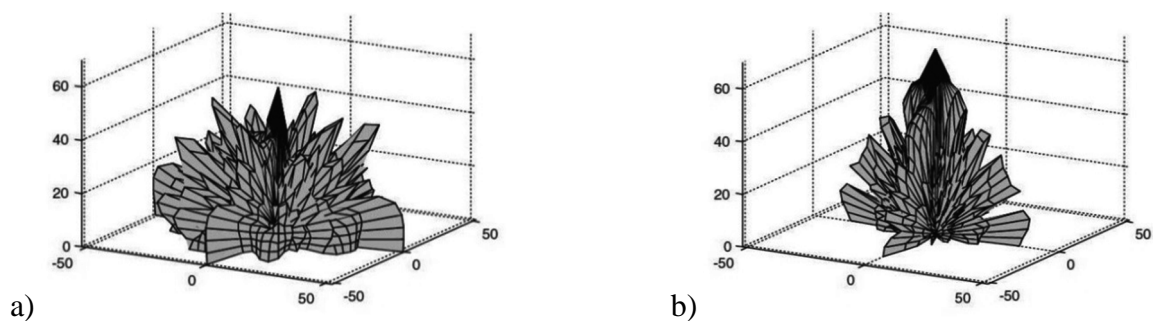


Figura 2.64 – a) Dispersão hemisférica de um QRD com $N=7$; b) Dispersão de uma superfície plana [1].

2.5.7. CRISTAIS SÓNICOS E METAMATERIAIS

A optimização do design dos difusores não foi abordada por muitos pesquisadores. Cox [27] descreve os processos de optimização de difusores acústicos escalonados (em patamares, como os de Schröder) e curvos. Utiliza um modelo baseado no Método dos Elementos de Fronteira (BEM) para o cálculo da difusão, complementado por um algoritmo de optimização, baseado em métodos “downhill simplex” e “quasi-Newton”, na busca (iterativa) do erro mínimo entre a difusão calculada e a desejada.

Perry [28] adoptou uma abordagem semelhante e usou um modelo de cálculo baseado no Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD) e um algoritmo de optimização evolutiva para projectar iterativamente difusores escalonados (em patamares e sem guias de onda) ou fractais, baseados nos anteriores.

Recentemente, tem-se observado uma procura de soluções no âmbito dos metamateriais. Uma definição possível de metamateriais é que são materiais constituídos por repetição de “blocos de construção” individuais e que, devido às propriedades desses “blocos de construção” e o seu arranjo espacial, o sistema agregado resultante tem propriedades (por exemplo, ópticas, acústicas, etc.), em escalas de distância mais longas, que podem ser muito diferentes das

características dos “blocos de construção” individuais e que também não são encontradas na natureza.

De facto, um difusor de Schröder até se pode enquadrar um pouco nesta descrição, pois são constituídos pela repetição espacial de poços (“blocos construtivos”) cujas profundidades são baseadas em sequências matemáticas e as propriedades desse conjunto de poços, em campo afastado, são diferentes das de cada poço individualmente.

Recentemente, têm surgido algumas propostas de difusores que, apesar de tudo, ainda são baseados nos conceitos fundamentais resultantes do trabalho de Schröder. Um deles, apresentado por Zhu et al [29], baseia-se na ideia de formar um difusor a partir de ressoadores de Helmholtz em vez de poços com a profundidade de $1/4$ de comprimento de onda. O método de design consiste em ajustar espacialmente a fase de cada ressoador de Helmholtz com a dos poços difusores de Schröder. A Figura 2.65 ilustra a proposta apresentada em [27], onde se pode observar em detalhe a secção de uma célula unitária (ressoador de Helmholtz).

A particularidade destes difusores é que têm uma espessura muito inferior ao comprimento de onda de projecto, sendo por isso indicados para as baixas frequências (podendo ser mais “finos” uma ordem de grandeza relativamente aos “tradicionais” difusores de Schröder). Os autores afirmam que as perdas termo-viscosas não alteram significativamente o campo reflectido (dispersão), até porque as dimensões típicas das células unitárias são relativamente grandes (podem ir até a $\lambda/4$).

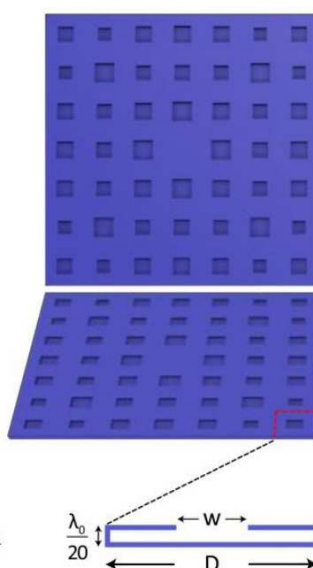


Figura 2.65 – Difusor proposto em [29]. w é largura do “gargalo”, D o comprimento da célula unitária e a profundidade da célula é $\lambda/20$.

Recorrendo novamente ao conceito da distribuição espacial da mudança de fase das reflexões, Jiménez et al [30] apresentam também um difusor de baixa espessura recorrendo a ranhuras cujas “paredes laterais” são constituídas por ressoadores de Helmholtz ver Figura 2.66.

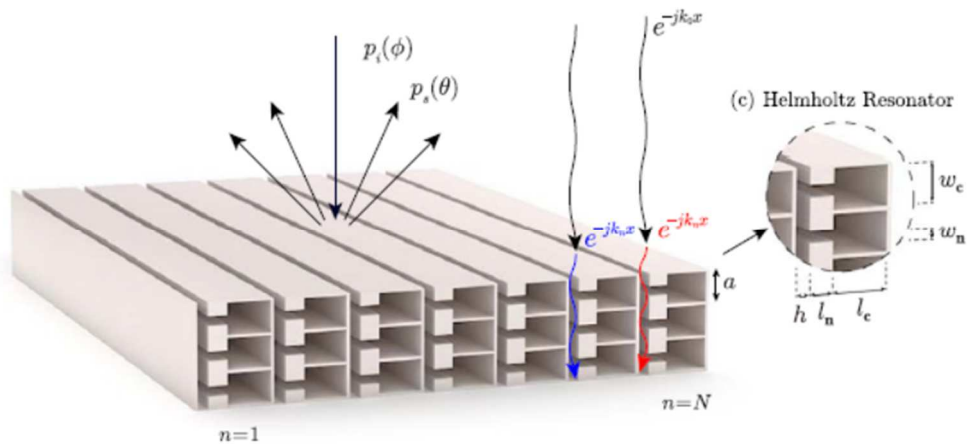


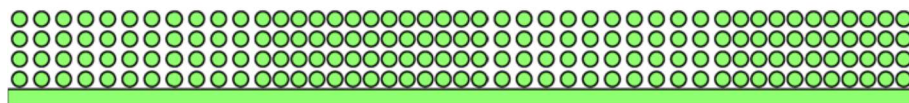
Figura 2.66 – Difusor proposto em [30].

A sintonização de ambos os tipos de “metadifusores” é, tal como nos difusores de Schröder, baseada no conceito que, em campo afastado, a pressão sonora dispersada pelo difusor é essencialmente uma transformada de Fourier do campo refletido ao longo da superfície do difusor. Portanto, estruturas cujas distribuição espacial do coeficiente de reflexão apresentem uma transformada de Fourier de amplitude constante apresentam boas propriedades de difusão sonora

Mais ainda, ambas as propostas acima podem ser adaptadas, com a correcta escolha dos diferentes parâmetros, para transformar estes difusores em absorvedores sonoros.

Também recentemente, um conceito alternativo aos difusores baseados nas teorias Schröder foi proposta por Redondo et al [31, 32, 33] no âmbito dos cristais sónicos. Um cristal sónico é um arranjo periódico no espaço de dispersores, tipicamente barras cilíndricas rígidas, imersos no ar. A periodicidade leva a uma modificação das relações de dispersão e a propagação sonora através dessas estruturas torna-se fortemente dispersiva e anisotrópica.

Os autores exploraram a optimização de cristais sónicos para actuar como difusores acústicos numa ampla faixa de frequências, em particular na gama de baixas frequências (até 250 Hz). Eles utilizaram técnicas de optimização, baseados em algoritmos evolutivos de múltiplos objetivos, combinados com um esquema numérico baseado no Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD) para prever e melhorar consideravelmente o desempenho destes difusores.



a)

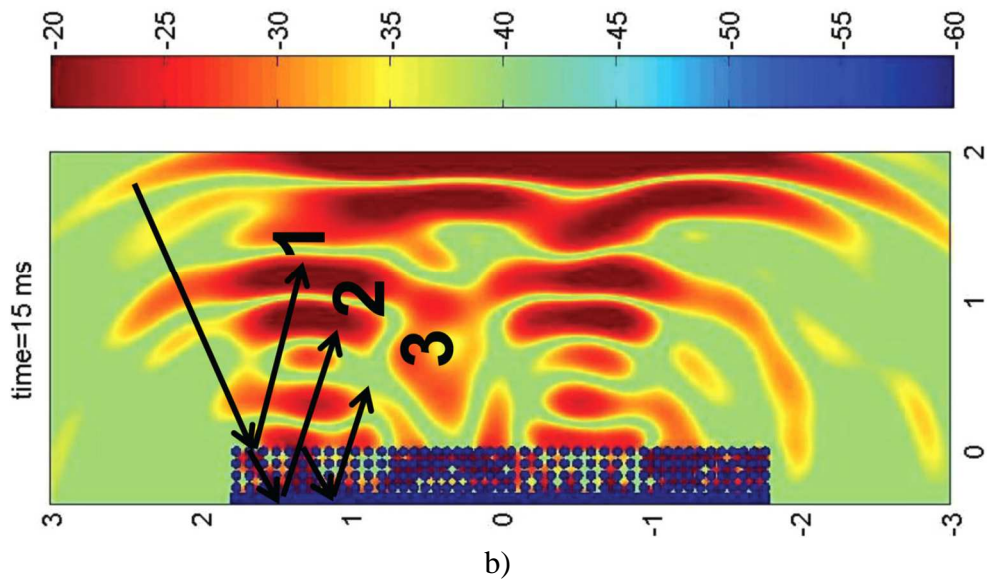


Figura 2.67 – a) Cristal sónico; b) Distribuição do nível de pressão sonora, obtida da simulação FDTD - resposta a um impulso de Ricker centrado em 500 Hz [32].

3. MEDIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE DIFUSORES

3.1. INTRODUÇÃO

Para se avaliar a eficiência das superfícies relativamente ao modo como estas reflectem o som incidente e poder compará-las, não só qualitativamente como quantitativamente, é necessário que existam parâmetros descritores e um processo de caracterização normalizado que permita obtê-los. Actualmente, esta caracterização e avaliação do desempenho são efectuadas através da determinação dos coeficientes de difusão e de dispersão, que permitem estabelecer comparações ao nível da eficácia das superfícies relativamente às reflexões difusas.

O método para medição da qualidade das reflexões difusas produzidas por uma superfície centra-se principalmente na medição da “resposta” polar, tendo sido a primeira forma que possibilitou a medição da dispersão provocada pelas superfícies. As respostas polares, apresentadas nos capítulos anteriores, são, pois, uma ferramenta essencial para caracterizar e avaliar a eficácia dos difusores pois representam, de forma gráfica, como uma superfície reflecte o som, em termos espaciais, sendo representados os níveis de pressão sonora, L_i (em dB), medidos (ou calculados) da energia sonora reflectida, ao longo de um arco compreendido entre -90° e $+90^\circ$, a uma distância r do difusor. No entanto, este método requer uma quantidade considerável de dados e é necessária uma resposta polar diferente para cada banda de frequências e para cada ângulo de incidência. Esta é uma das razões pela qual se definiram parâmetros de valor único que possibilitam a caracterização em termos de coeficientes de difusão, em cada banda de frequências, que resumem os dados das diferentes polares.

A reflexão de uma superfície também pode ser caracterizada por um coeficiente de dispersão (*scattering coefficient*), cujo significado e utilidade é diferente do coeficiente de difusão (*diffusion coefficient*): o coeficiente de difusão, d , descreve a uniformidade direccional da dispersão (mede a semelhança entre a resposta polar de uma superfície com uma distribuição uniforme); o coeficiente de dispersão, s , pode ser entendido como uma medida da quantidade de energia sonora reflectida que é removida da direcção especular, relacionando a energia reflectida em direcções não-especulares com a energia total reflectida. É importante frisar que o coeficiente de dispersão não inclui qualquer informação quanto à direcção do som reflectido.

Enquanto que o primeiro parâmetro é fundamental no desenvolvimento e optimização de superfícies difusoras (e para comparar os méritos de diferentes difusores) porque mede a capacidade de uma superfície dispersar o som em todas as direcções, o segundo parâmetro tem uma grande importância para os modelos geométricos de acústica de salas [34]. A par do coeficiente de absorção, α , este é um dos parâmetros de entrada fundamentais naqueles modelos, pois estes programas de simulação (e.g., traçado de raios) incorporam algoritmos separados para lidar com as reflexões difusas e com as reflexões especulares.

Seria útil, mas ambos os coeficientes não têm uma relação simples e directa entre si, embora tenha sido proposto um método para se obter o coeficiente de dispersão a partir das respostas polares [35].

Os dois coeficientes variam entre 0 e 1. Um coeficiente de difusão elevado (próximo de um) significa que a superfície dispersa uniformemente a energia sonora incidente – gráfico polar à esquerda na Figura 3.1. Um valor reduzido de d , próximo de 0, significa que a superfície concentra a energia reflectida numa dada direcção (não necessariamente na direcção especular). Valores elevados do coeficiente de dispersão (próximos de 1) significam que a energia dispersada pela superfície está em direcções não-especulares (não necessariamente homogeneamente distribuída, podendo estar concentrada numa direcção bem definida, mas não na direcção especular) – polar à direita na Figura 3.1. Pelo contrário, para valores baixos de s , próximos de 0, indica que a superfície reflecte energia essencialmente na direcção especular. A Figura 3.1 exemplifica as considerações feitas atrás neste parágrafo.

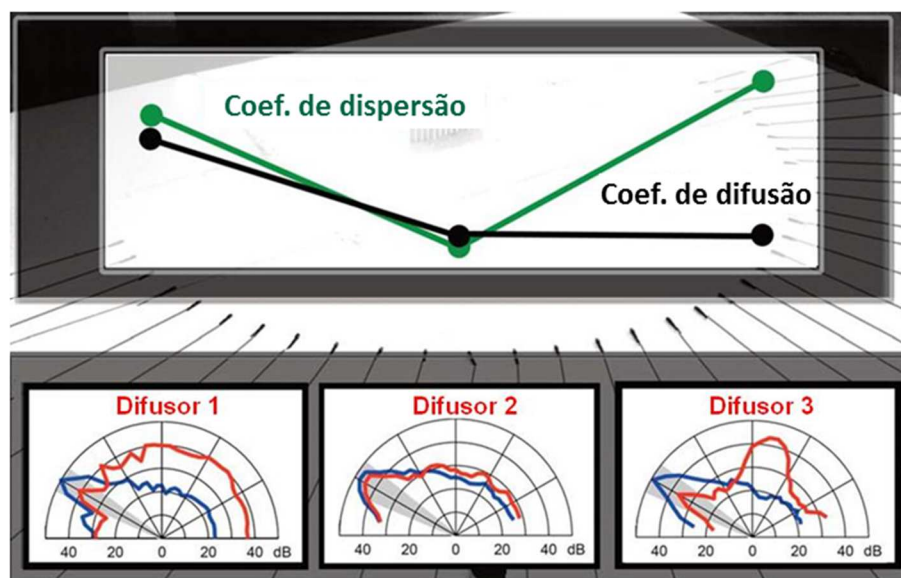


Figura 3.1 – Comparação entre o coeficiente de difusão e o coeficiente de dispersão - a linha azul representa a polar de uma superfície plana [36].

Outro aspecto a ter em conta, relativamente ao modo como está definido o coeficiente de dispersão, é que superfícies que redireccionam o som incidente têm valores elevados de s , pois

é entendido que removem energia da direcção especular. A título exemplificativo, pode-se observar esse comportamento na Figura 3.2. Nela pode-se observar que o coeficiente de difusão se mantém praticamente inalterável e de baixo valor quando se roda uma superfície plana pois trata-se uma reflexão especular (a polar à esquerda da Figura 3.2 mostra a energia reflectida concentrada numa dada direcção). Contudo, o coeficiente de dispersão é elevado, podendo dar a entender que essa superfície é um bom difusor, quando apenas redireccionou a energia sonora incidente.

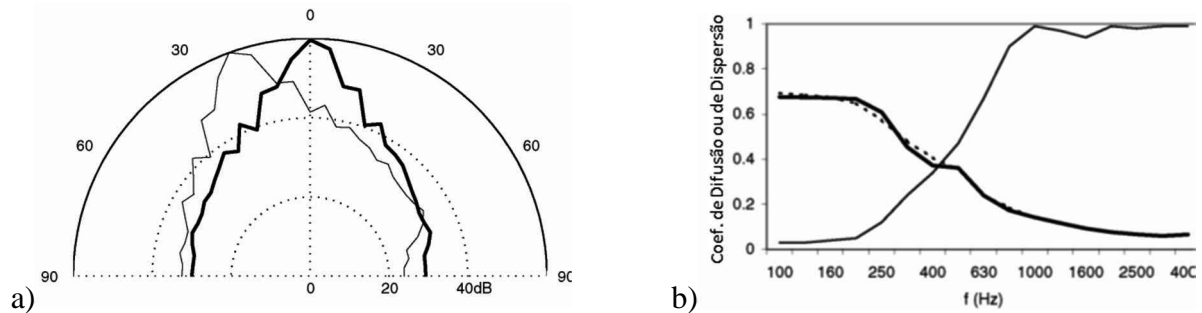


Figura 3.2 – a) Polares de — superfície plana e - - - superfície plana rodada de 20°;
 b) — Coef. de difusão da superfície plana, - - - Coef. de difusão da superfície plana rodada de 20°, — Coef. de dispersão da superfície plana rodada de 20° [1].

Chama-se também desde já a atenção que, como a superfície plana é finita, a difracção nas arestas faz com que o coeficiente de difusão aumente com a diminuição da frequência, pois a dimensão da amostra de teste é inferior ao comprimento de onda, actuando como uma fonte pontual e difractando omnidireccionalmente. Este facto tem de ser tido em conta quando se observa os gráficos do coeficiente de difusão para não se tirarem ilações erradas nas baixas frequências – uma forma de obviar este “problema” é normalizar o coeficiente de difusão e retirar esse efeito, como veremos mais à frente.

3.2. COEFICIENTE DE DIFUSÃO

O coeficiente de difusão direccional, d_{ψ} , é um parâmetro de valor único que representa a medida da uniformidade do som reflectido por uma superfície, compreendido entre 0 e 1, sendo obtido a partir dos diagramas polares e é apresentado de forma gráfica em função da frequência (Figura 3.3). Para se obterem os diagramas polares, em cada uma das bandas de frequência, tomam-se n ângulos distintos, igualmente espaçados entre si e uniformemente espaçados entre -90° e $+90^{\circ}$ e mede-se (ou calcula-se) o nível sonoro L_i em cada uma das direcções i (em dB). O coeficiente de difusão direccional para uma dada banda de frequência calcula-se através da expressão (3.1):

$$d_{\psi} = \frac{(\sum_{i=1}^n 10^{L_i/10})^2 - \sum_{i=1}^n (10^{L_i/10})^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n (10^{L_i/10})^2} \quad (3.1)$$

onde ψ é o ângulo de incidência da fonte sonora relativamente ao ponto de referência da superfície.

A Figura 3.3 representa o coeficiente de difusão (para incidência normal), d_0 , ao longo do domínio da frequência, estando representado o comportamento de uma superfície difusora e de uma placa plana, com as mesmas dimensões da superfície difusora (para efeitos de comparação de desempenho). Como referido atrás, dadas as dimensões finitas dos provetes de teste, ambas as superfícies em análise na referida Figura têm um coeficiente de difusão elevado nas baixas frequências, podendo induzir em erro que ambas as superfícies são bons difusores. Para evitar eventuais erros de análise, pode-se utilizar o coeficiente de difusão normalizado, $d_{n,\psi}$.

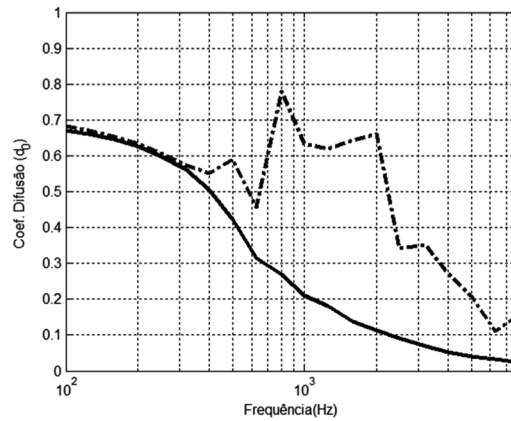


Figura 3.3 – Comparação entre as curvas do coef. de difusão para uma placa plana (a cheio a preto) e para uma superfície difusora, considerando uma incidência normal (a tracejado) [37].

O coeficiente de difusão normalizado é determinado a partir do coeficiente de difusão da superfície em avaliação e do coeficiente de difusão de uma placa plana, com as mesmas dimensões da superfície em análise e é dado por (3.2):

$$d_{n,\psi} = \frac{d_{\psi} - d_{\psi,plana}}{1 - d_{\psi,plana}} \quad (3.2)$$

onde d_{ψ} é o coeficiente de difusão da superfície em avaliação, na direcção de incidência ψ , e $d_{\psi,plana}$ representa o mesmo coeficiente mas para a placa plana (com as mesmas dimensões da superfície em análise). Este coeficiente, do ponto de vista teórico, toma valores positivos (entre 0 e 1). Contudo, devido a erros de medição experimental, em particular nas baixas frequências, podem surgir valores negativos.

Na Figura 3.4 apresenta-se a representação gráfica deste coeficiente referente ao exemplo apresentado na Figura 3.3. Podemos observar que a superfície difusora apresenta melhores características difusoras que uma placa plana sensivelmente entre os 500 Hz e os 4 kHz. Pode-se agora observar, com mais facilidade, em que bandas de frequência o difusor é mais eficiente, não havendo necessidade de “poluir” o gráfico com a curva da placa plana.

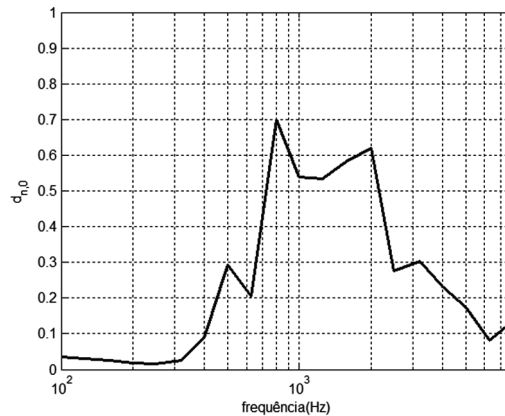


Figura 3.4 – Exemplo de curva do coeficiente $d_{n,\psi}$ para o difusor da Figura 3.3 [37].

Pode-se ainda calcular o coeficiente de difusão para incidência aleatória, que é uma média dos coeficientes de difusão direccional. No caso de difusores 2D (cuja polar é tridimensional) a média não é ponderada. No caso dos difusores 1D (cuja polar é bidimensional), a média é ponderada da seguinte forma: o peso da direcção normal é de 1 e nas restantes 6 posições angulares da fonte sonora ($\pm 35^\circ$, $\pm 60^\circ$ e $\pm 80^\circ$) a ponderação é de três.

A norma AES-4id-2001 [38] foi a primeira metodologia laboratorial a surgir para a caracterização e medição da uniformidade da difusão provocada por uma superfície, permitindo a determinação do coeficiente de difusão em campo livre, em câmaras anecóicas ou semi-anecóicas. Posteriormente, a ISO adoptou-a como a norma ISO 17497-2: 2012 [39], com muito poucas alterações. O método de medição do coeficiente de difusão consiste na medição da energia dispersada por uma superfície, utilizando microfones dispostos no chão, numa semicircunferência centrada no difusor (para difusores 1D) ou um único microfone móvel que percorre vários pontos numa superfície hemisférica em torno do difusor (no caso de difusores 2D) que são denominados, respectivamente, por goniómetro 2D e 3D – Figura 3.5. Estes microfones registam a resposta polar da superfície ao sinal de teste (em bandas de frequência). Essas medições são realizadas para ângulos de incidência particulares, pois a dispersão depende não só da frequência mas também do ângulo de incidência. Através da manipulação dos sinais medidos, determina-se o coeficiente de difusão a partir das diferentes polares.

A avaliação de difusores bidimensionais, cujos diagramas polares são superfícies tridimensionais (ver, por exemplo, Figura 2.60), requer meios logísticos mais avançados e

precisos, no entanto, os procedimentos são em tudo semelhantes aos utilizados na avaliação das respostas polares dos difusores de secção constante (1D).

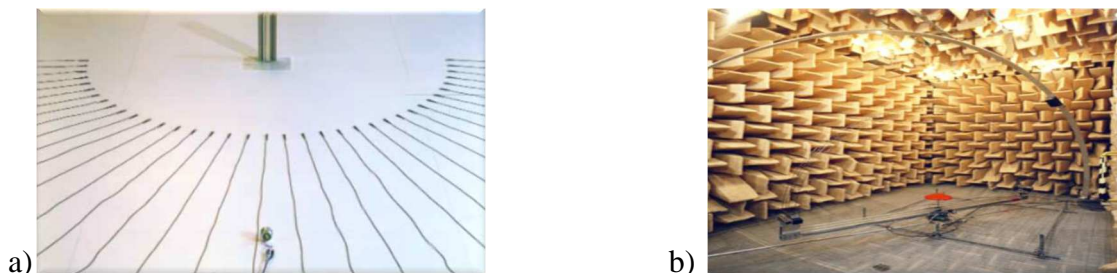


Figura 3.5 – a) Sistema de medição de uma superfície difusora 1D, com goniómetro 2D;
b) Sistema de medição de um difusor 2D, com um goniómetro 3D [36] [35].

Estes ensaios poderão ser realizados em amostras à escala real ou numa escala reduzida, atendendo à adaptação das frequências de estudo conforme o factor de escala. Para uma superfície de teste periódica (como, por exemplo, os QRD), aquela norma recomenda que, pelo menos, quatro sequências completas (período=4) sejam avaliadas de modo a que os lóbulos de difusão devidos à periodicidade se possam aproximar da realidade, tanto quanto possível.

As medições devem-se realizar em condições de campo afastado (*far field*). Contudo, obter as condições de campo afastado levaria muitas vezes à utilização de salas de grandes dimensões. Nesse caso, as normas acima referidas sugerem que condições aproximadas de campo afastado podem ser obtidas se 80% dos receptores (microfones) estiverem fora da zona especular, ver Figura 3.6, que a fonte sonora esteja situada a 10m do ponto de referência do difusor em teste e que os receptores estejam dispostos num semicírculo de raio 5m em torno do difusor. No entanto, algumas vezes os difusores podem ser utilizados em situações em que as fontes sonoras e os receptores estejam em campo próximo (*near field*). Para estes casos, as medições para determinar o coeficiente de difusão deverão decorrer em condições próximas da utilização real, permitindo assim verificar aberrações nas reflexões, tais como focalizações.

A discretização angular sugerida para os microfones é de 5° entre cada posição de medida, levando a que sejam feitas 37 medições de nível de pressão sonora em redor de um difusor 1D.

Uma vez que a emissão real da fonte não é um impulso sonoro, são utilizadas técnicas de medição e tratamento de sinais que permitem obviar esta impossibilidade. A técnica mais comum é a emissão de sequências MLS (*Maximum-Length Sequences*), uma vez que permite que as respostas avaliadas nos microfones sejam tratadas matematicamente de forma a recuperar o sinal da fonte como se de um impulso real se tratasse.

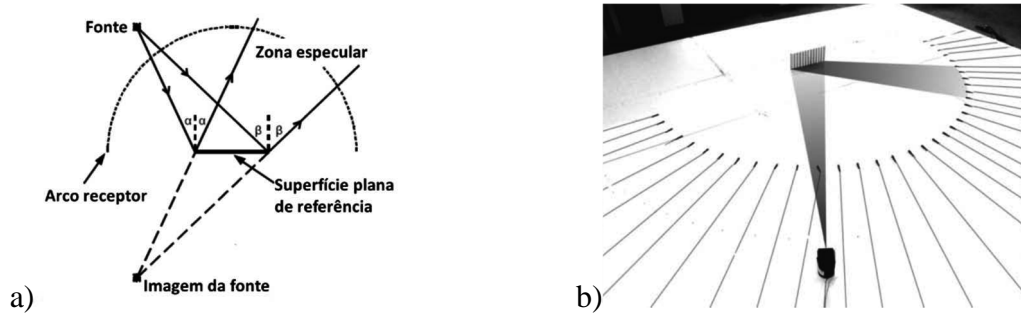


Figura 3.6 – a) Determinação da região especular [36] [37]; b) Zona especular (a cinzento) no laboratório [36].

A metodologia de medição preconizada nas referidas normas é a seguinte, para uma dada posição e orientação da fonte sonora, ψ :

- Sem o difusor na sua posição de ensaio (sala “vazia”), mede-se a resposta da sala em todos os microfones, o que corresponde ao sinal $h_2(t)$, e permite definir uma janela temporal para retirar a informação relevante do sinal – Figura 3.7.

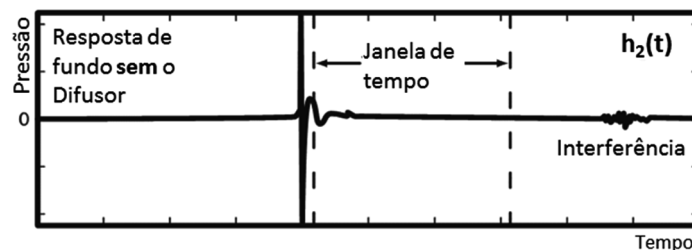


Figura 3.7 – Resposta no domínio do tempo medida numa dada posição, sem o difusor na sala [38] [39].

- Com o difusor na sua posição de ensaio, mede-se a resposta em todos os microfones, o que corresponde ao sinal $h_1(t)$, que permite observar a parte do sinal – Figura 3.8.

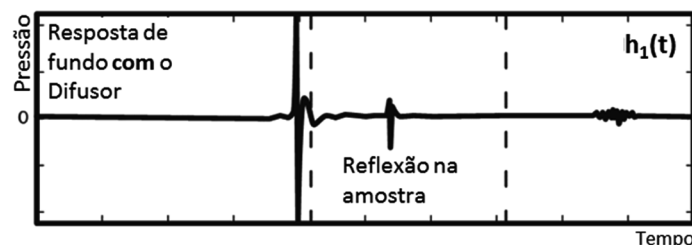


Figura 3.8 – Resposta temporal registada numa dada posição, com o difusor [38] [39].

- Para obter apenas a resposta correspondente à reflexão do difusor, há que subtrair as duas respostas, obtendo-se $h_3(t) = h_1(t) - h_2(t)$. Esta subtração permite eliminar (aproximadamente) a contribuição das ondas que provêm directamente da fonte sonora e do ruído de fundo da sala – Figura 3.9.

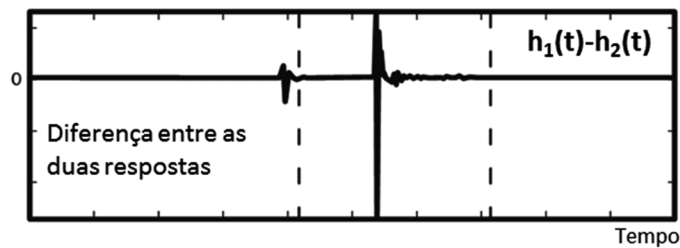


Figura 3.9 – Resposta isolada da reflexão do difusor obtida através da subtração de $h_1(t) - h_2(t)$ [38] [39].

- Aplica-se uma janela temporal de 10ms para isolar a reflexão, para cada uma das posições de medida – Figura 3.10.

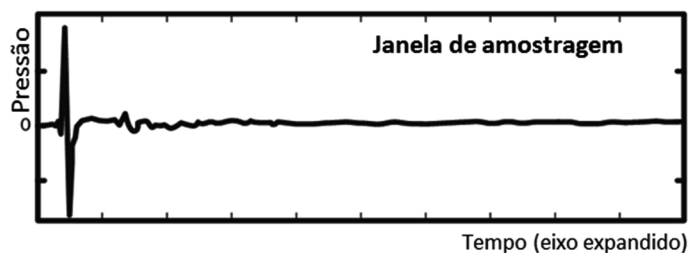


Figura 3.10 – Resposta $h_3(t)$ (apenas da reflexão) isolada no tempo [38] [39].

- Aplica-se a transformada de Fourier a cada um dos impulsos, que corresponde a cada uma posição de medida, de forma a obter as respostas, em frequência, da reflexão naquela direcção.
- Integra-se a resposta em frequência, para cada posição de medida (que corresponde a um ângulo de reflexão), de modo a obter o nível sonoro em bandas de frequência de terços de oitava, L_i , para cada uma das posições de medida i - ver expressão (3.1).
- Para cada banda de frequência de terços de oitava, calcula-se o coeficiente de difusão direccional d_ψ de acordo com a expressão (3.1).

O processo para a determinação do coeficiente de difusão está esquematizado na Figura 3.11.

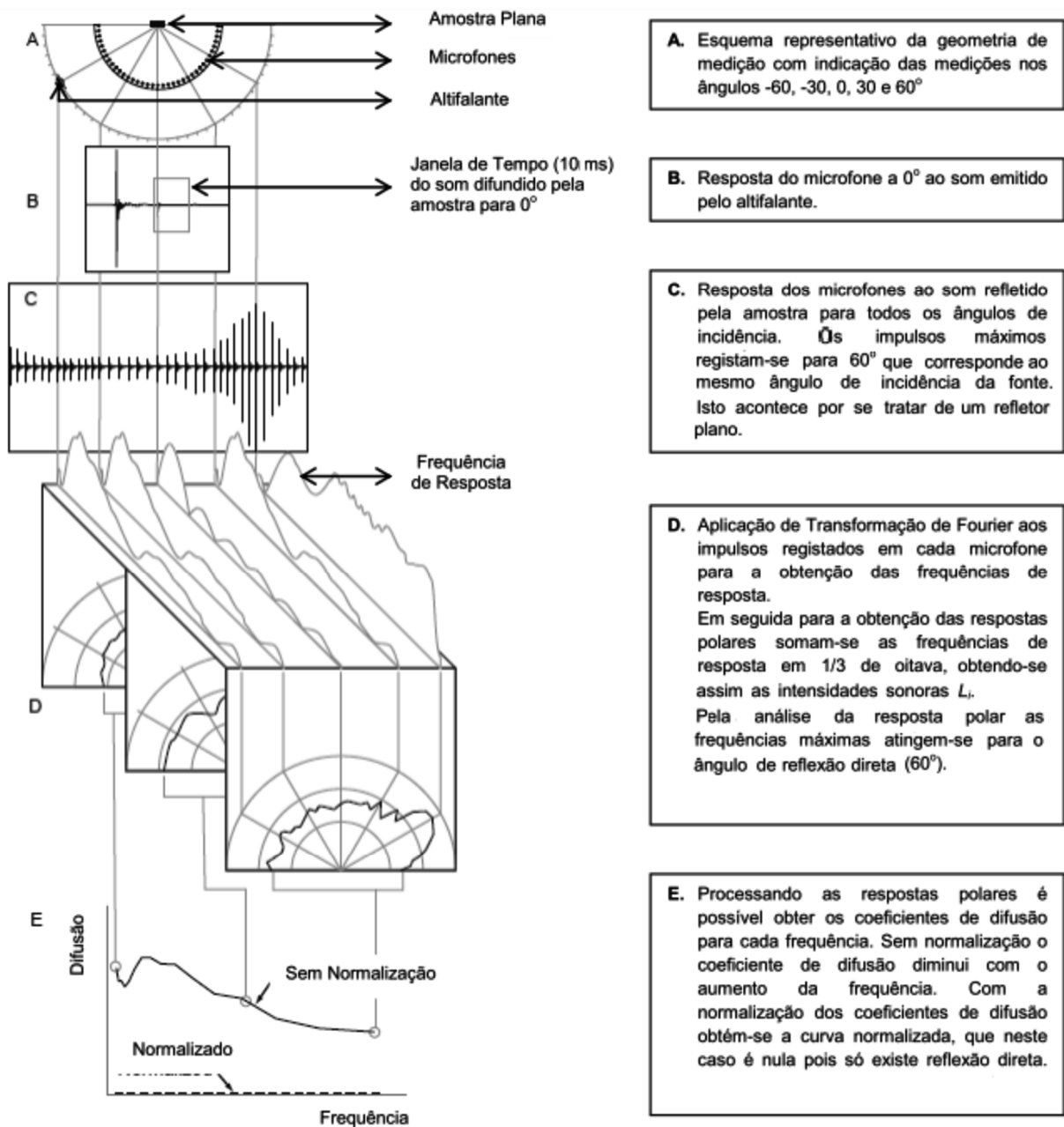


Figura 3.11 – Resumo do processo de obtenção do coeficiente de difusão d_p para uma placa plana de acordo com as normas AES-4id-2001 [38] e ISO 17497-2: 2012 [39].

3.3. COEFICIENTE DE DISPERSÃO

O coeficiente de dispersão, s , representa a capacidade de uma superfície redireccionar aleatoriamente a energia sonora incidente. A determinação experimental do coeficiente de dispersão é descrita na norma ISO 17497-1: 2004 [38] e resulta do trabalho desenvolvido por M. Vorländer e E. Mommertz [41]. O princípio subjacente à medição do coeficiente de

dispersão consiste na separação do som reflectido na direcção especular e a componente dispersada nas restantes direcções. A componente especular é a parcela de energia que é reflectida à semelhança de uma superfície plana, quando esta tem uma dimensão comparável ao comprimento de onda. Este conceito pode ser melhor entendido quando analisado o efeito da reflexão e difusão no domínio do tempo. Observe-se a Figura 3.12. À esquerda da figura mostram-se (sobrepostos) três impulsos que foram reflectidos, em campo livre, por uma superfície ondulada para três orientações diferentes. Quando se analisa um impulso reflectido por uma superfície para diferentes orientações da amostra de teste, a parte inicial da reflexão está altamente correlacionada, sendo esta idêntica à componente especular da reflexão. Em contraste, as partes finais não se encontram em fase e dependem bastante da orientação da amostra de teste. A energia, na parte final do impulso reflectido, contém a parte dispersada. Assim, através da manipulação dos sinais reflectidos extrai-se a parte da energia especular dos impulsos reflectidos.

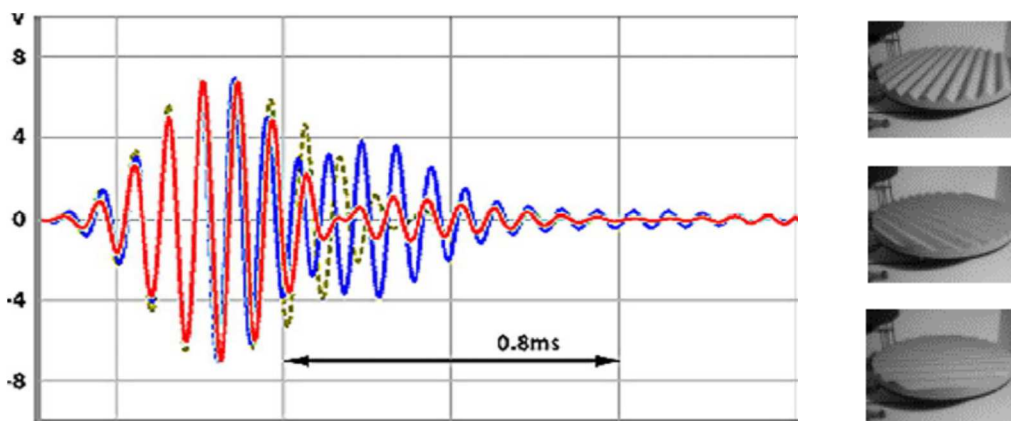


Figura 3.12 – Resposta impulsiva para três posições da amostra de teste [1] [40].

Este princípio é directamente aplicado às medições realizadas numa câmara reverberante, em que a amostra é colocada numa mesa giratória e as respostas dos impulsos são obtidas para diferentes orientações da amostra.

A Figura 3.13 representa esquematicamente o fenómeno da dispersão de energia que ocorre quando uma onda sonora atinge uma superfície com rugosidades. Quando uma dada energia incidente, $E_{incidente}$, atinge uma superfície parte é absorvida ou dissipada: $E_{absorvida} = \alpha_s \cdot E_{incidente}$, onde α_s é o coeficiente de absorção sonora. A restante é reflectida: $E_{reflectida} = (1 - \alpha_s) \cdot E_{incidente}$. Desta energia reflectida, uma parte é dispersada em direcções não-especulares, $E_{dispersada} = E_{reflectida} \cdot s = [(1 - \alpha_s) \cdot E_{incidente}] \cdot s$, e a restante na direcção especular, $E_{especular} = [(1 - \alpha_s) \cdot E_{incidente}] \cdot (1 - s)$, onde s é o coeficiente de dispersão.

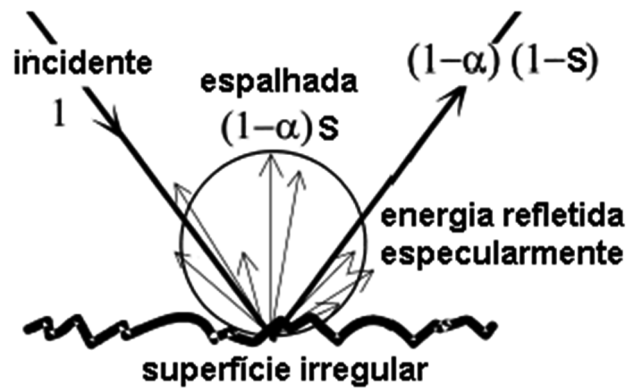


Figura 3.13 – Esquema da dispersão sonora numa superfície rugosa – componentes normalizadas relativamente à $E_{incidente}$ [1].

O coeficiente de dispersão é definido como o quociente entre a energia reflectida nas direcções não especulares e a energia total reflectida, sendo dado pela expressão:

$$s = \frac{E_{dispersada}}{E_{reflectida}} = 1 - \frac{E_{especular}}{E_{reflectida}} \quad (3.3)$$

Se se introduzir o coeficiente de absorção especular aparente, $\alpha_{especular}$, como:

$$\frac{E_{especular}}{E_{incidente}} = (1 - \alpha_s) \cdot (1 - s) = (1 - \alpha_{especular}) \quad (3.4)$$

Podemos reescrever (3.3):

$$s = \frac{\alpha_{especular} - \alpha_s}{1 - \alpha_s} \quad (3.5)$$

O método referido na ISO 17497-1 [40] pode realizar-se em câmara reverberante, com amostras à escala real ou em modelos a uma escala reduzida – Figura 3.14. A grande vantagem de realizar os ensaios à escala reduzida é que a câmara reverberante não necessita de ser tão grande e, portanto, é mais fácil garantir que as condições higrotérmicas no interior são invariantes durante os ensaios. De facto, a temperatura e a humidade, bem como a velocidade do ar no interior da câmara reverberante, têm influência nos resultados medidos, principalmente nas altas frequências. Assim, é preferível realizar as medições mais rapidamente, evitando as flutuações que possam vir a ocorrer entre medições. Contudo, utilizando as amostras à escala real, a mesa rotativa tem de rodar mais devagar pois a sua própria rotação vai induzir movimento no ar, que pode influenciar os resultados obtidos. Por outro lado, há outras questões práticas a ter em conta, como, por exemplo, é difícil e oneroso fabricar uma mesa rotativa perfeitamente plana de grandes dimensões (diâmetro de 3,6m), bem como transportá-la em segurança (entrar pela porta da câmara reverberante pode ser um problema).

A propósito da reprodutibilidade dos ensaios, estes são ainda muito sensíveis às deslocações de ar no interior da câmara reverberante e devendo-se aguardar algum tempo de modo a evitar erros de medição devido à movimentação do ar conduzindo assim a medições mais precisas. Embora não esteja recomendado na norma, é regra de boa prática, por exemplo, que, após o fecho da porta da câmara reverberante, se espere cerca de 15min para estabilizar o movimento do ar no interior da câmara.

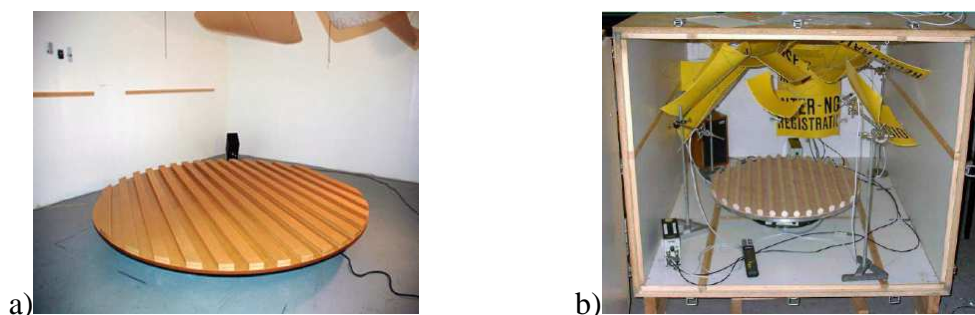


Figura 3.14 – a) Ensaios à escala real; b) Ensaios à escala reduzida [42].

A avaliação laboratorial consiste na medição dos impulsos sonoros em campo difuso, atendendo às disposições da NP EN 354 [44], para uma amostra numa mesa circular rotativa.

A separação das duas energias (especular e dispersa nas direcções não especulares), que está na base desta metodologia laboratorial, é obtida fazendo a média dos impulsos medidos para as diversas rotações da amostra (ponto a partir do qual surgem as reflexões difusas, Figura 3.12) com “sintonia de fase” (*phase-locked*). O impulso medido relativo às reflexões especulares (parte inicial do gráfico da Figura 3.12) apresenta um comportamento semelhante para as várias posições do provete, sendo a sua média muito próxima do valor para cada uma das orientações. Contudo, o impulso relativo às reflexões dispersas nas direcções não especulares (parte final do gráfico da Figura 3.12, no caso particular, nos últimos 0,8 ms) toma um comportamento de interferência destrutiva do sinal. Assim, a média dos impulsos para as várias orientações resulta num sinal que contém apenas a energia reflectida de forma especular, já que a média da energia reflectida de forma difusa dá aproximadamente zero. Desta forma, é importante garantir a medição de um elevado número de respostas impulsivas para que o valor médio contenha essencialmente a componente especular das reflexões.

Na realidade, são necessários quatro tipos de tempo de reverberação, medidos em diferentes condições, para a obtenção do coeficiente de dispersão. Os impulsos são medidos sem e com a amostra, com a mesa rotativa parada, seguindo a NP EN 354 [44], obtendo-se os tempos de reverberação T_1 e T_2 , respectivamente. Nesta fase, são necessárias pelo menos seis medições, através de duas posições para a fonte e três posições para o microfone (Figura 3.15).

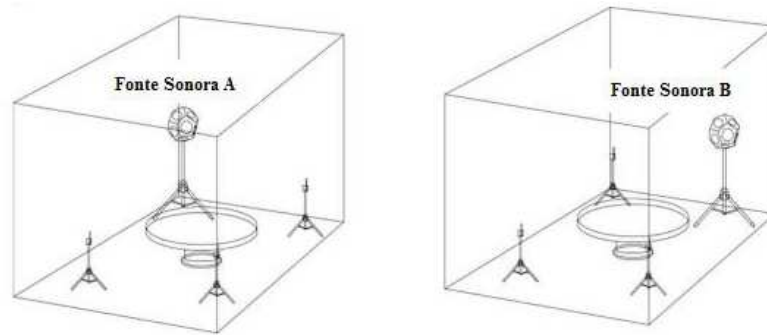


Figura 3.15 – Disposição das fontes sonoras e dos microfones na câmara reverberante para medição dos tempos de reverberação (6 medições por posição) [42].

A segunda parte dos ensaios é realizada com a mesa rotativa em movimento, primeiro sem amostra e depois com a amostra na mesa rotativa. Obtém-se assim, respectivamente, T_3 e T_4 . Para isso, em cada posição fonte-receptor é gerado e recebido um sinal periódico pseudoaleatório MLS de forma contínua, enquanto a mesa rotativa está em funcionamento. A duração total da medição deverá ser igual ao tempo correspondente a uma volta completa da mesa rotativa. Pode-se, em alternativa, para cada posição fonte-receptor, efectuar n medições com a amostra rodada entre cada medição de $360^\circ/n$. O valor de n deverá estar entre 60 e 120, sendo 72 um valor comum, correspondendo a variações angulares de 5° . O sinal utilizado deverá ser sempre o mesmo em todas as medições para assegurar a homogeneidade e igualdade nos resultados obtidos. Para obter uma resposta que não dependa do tempo, é necessário efectuar uma média com sintonia de fase (*phase-locked*) das n medições. Este processo poderá ser feito através da média das respostas dos impulsos de pressão ou através da média dos sinais recebidos antes de calcular as respostas dos impulsos de pressão.

A Figura 3.16 resume esquematicamente os ensaios a realizar para as medições dos diversos tipos de tempo de reverberação.

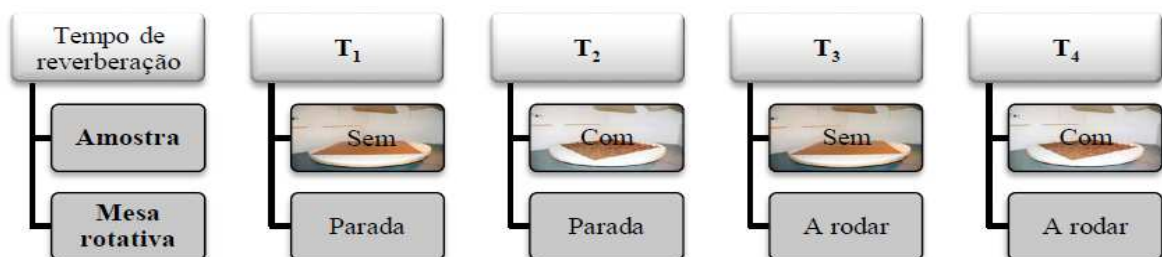


Figura 3.16 – Resumo dos ensaios a realizar, de acordo com a ISO 17497-1: 2004 [42].

O coeficiente de absorção sonora da amostra é então calculado de acordo com a expressão:

$$\alpha_s = 55,3 \frac{V}{S} \left(\frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - \frac{4V}{S} (m_2 - m_1) \quad (3.6)$$

O coeficiente de absorção sonora especular aparente é calculado utilizando a seguinte expressão:

$$\alpha_{especular} = 55,3 \frac{V}{S} \left(\frac{1}{c_2 T_4} - \frac{1}{c_1 T_3} \right) - \frac{4V}{S} (m_4 - m_3) \quad (3.7)$$

em que V é o volume da câmara reverberante (em m^3), S é a área de superfície da amostra de teste (em m^2), c_i e m_i são, respectivamente, a velocidade do som no ar (em m/s) e o coeficiente de atenuação no ar (em m^{-1}) durante a medição de T_i .

O coeficiente de dispersão s é, então, calculado de acordo com a expressão (3.5).

O coeficiente de dispersão fornece resultados ambíguos quando a superfície é anisotrópica. A Figura 3.17 apresenta o coeficiente de dispersão (em função da frequência) de dois difusores, um unidimensional (que dispersa o som num plano), 1D, e outro bidimensional (que dispersa o som no espaço), 2D. Apesar de serem difusores bem diferentes, o comportamento do coeficiente de dispersão é semelhante para ambos difusores, com valores elevados a partir dos 500Hz. Aparentemente este facto é estranho pois o difusor 1D apenas dispersa energia num plano, comportando-se no outro plano ortogonal como um reflector especular. Isto ocorre porque a topologia muda dramaticamente quando a superfície é rodada durante o ensaio e, portanto, esta superfície é vista como um bom difusor se se analisarem apenas os resultados obtidos para o coeficiente de dispersão.

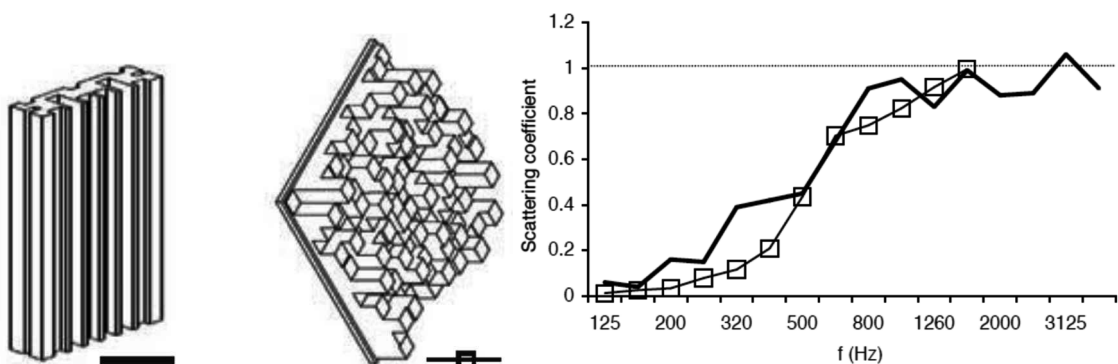


Figura 3.17 – Curvas do coeficiente de dispersão para dois tipos de difusores, 1D e 2D [1].

Uma vez que o método de medição é concebido para medir a rugosidade da superfície, os resultados são apenas fiáveis quando a profundidade estrutural da amostra (ver Figura 3.18) é pequena em comparação com o tamanho da amostra. A norma limita a altura estrutural da amostra empiricamente a $h \leq d/16$, onde d é o diâmetro da mesa rotativa e h a profundidade estrutural do provete.

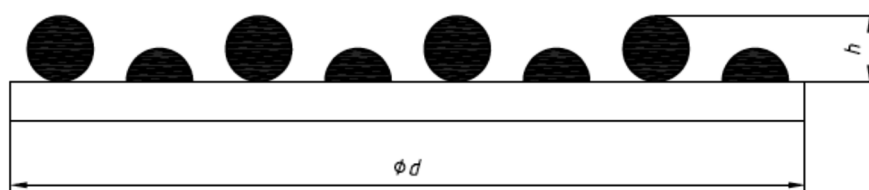


Figura 3.18 – Definição da profundidade estrutural do provete [40].

Por outro lado, a medição do coeficiente de dispersão de provetes não circulares é muito sensível às arestas dos provetes. Para minorar a sua influência, é sugerido que os provetes sejam embutidos na mesa rotativa – Figura 3.19.

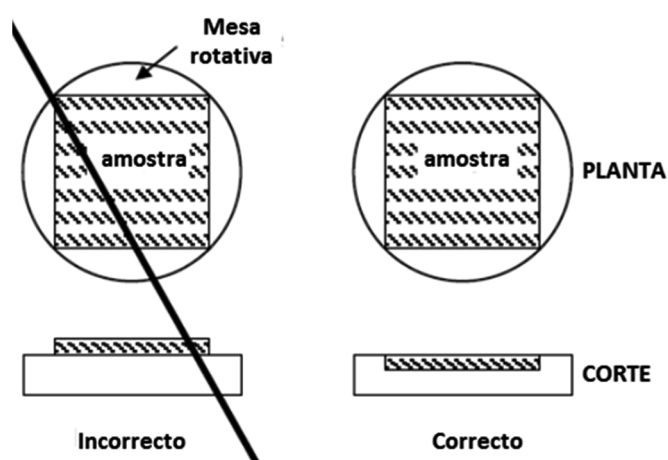


Figura 3.19 – Esquema de montagem de provetes quadrados na mesa rotativa [1].

4. IMPLEMENTAÇÃO DAS TÉCNICAS EXPERIMENTAIS E AVALIAÇÃO DE COMPORTAMENTO ACÚSTICO DE DIFUSORES

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, aborda-se a implementação da técnica experimental definida na Norma ISO 17497-2 [39], descrita na Secção 3.2 deste trabalho, que permite a obtenção do coeficiente de difusão direcional.

Posteriormente, são apresentados alguns estudos experimentais de avaliação do coeficiente de difusão de alguns difusores que foram já apresentados no Capítulo 2.

São apresentados dois estudos paramétricos, um para determinar a influência de determinados parâmetros no desempenho de difusores híbridos [23], conforme descritos em 2.5.3 e outro, para avaliar a influência dos materiais que constituem difusores do tipo QRD [24].

4.2. CÂMARA SEMI-ANECÓICA DO DEC/FCTUC

Foi adaptada uma sala do Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, de dimensões iniciais de $5.00m \times 4.3m \times 2.70m$, para ser criada uma sala semi-anecóica que permitisse realizar ensaios de acordo com a norma ISO 17497-2 [39] – Figuras 4.1 e 4.2 [43].



Figura 4.1 – Fotografias da câmara semi-anecóica adaptada do DEC/FCTUC.



Figura 4.2 – Localização do provete de teste e do microfone nos ensaios.

As paredes e tecto da sala foram revestidos com materiais absorvedores sonoros de modo que as condições acústicas no seu interior se aproximem de campo livre. Para tal, as paredes foram revestidas com painéis de aglomerado negro de cortiça, com 30 mm de espessura, que por sua vez são cobertos por placas de 50 mm de espessura de espuma de poliuretano (com 90 kg/m^3), colocados a formarem uma superfície semicilíndrica, aumentando assim a área de superfície absorvedora exposta – Figura 4.3.

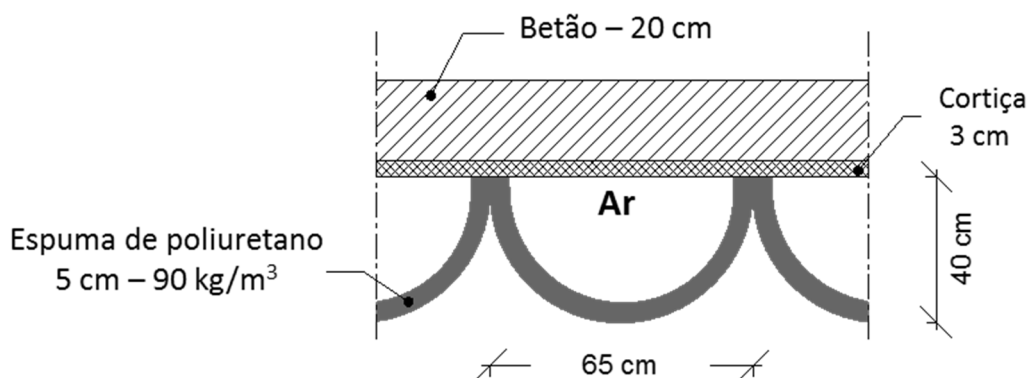


Figura 4.3 – Forma de montagem do revestimento de placas de espuma de poliuretano [45].

O tecto da sala foi revestido com painéis de fibra de coco, com 25 mm de espessura, sendo depois recobertos, tal como as paredes, por placas de espuma de poliuretano conforme representado na Figura 4.3.

As soluções de revestimento foram testadas em câmara reverberante de acordo com NP EN 354: 2007 [44] – Figura 4.4. Como podemos observar, a absorção sonora apresenta um valor próximo de 1.0 a partir dos 160 Hz . Posteriores medições no interior da sala mediram um ruído de fundo $L_{A[100-500]\text{Hz}} = 17\text{ dB}(A)$, que corresponde a um índice $NR\ 18$.



Figura 4.4 - Curva de absorção sonora da solução de revestimento utilizada na sala semi-aneecóica do DEC/FCTUC [45].

O espaço útil de trabalho ficou assim com dimensões de $4.20m \times 3.50m \times 2.35m$. Para medições do coeficiente de difusão em um plano, 1D, foram adoptadas duas possíveis configurações de ensaio – Figura 4.5. Em ambas as situações consegue-se ter mais de 80% das posições de medida fora da região especular, para provetes com uma largura de $60cm$ – a diferença do layout à direita da Figura 4.5 é que permite ensaios com a fonte a incidir até 40° enquanto que a montagem da esquerda apenas permite incidências até 25° . De qualquer modo, os trabalhos aqui referidos foram todos realizados com a fonte a incidir perpendicularmente ao ponto médio da amostra, $\psi = 0^\circ$.

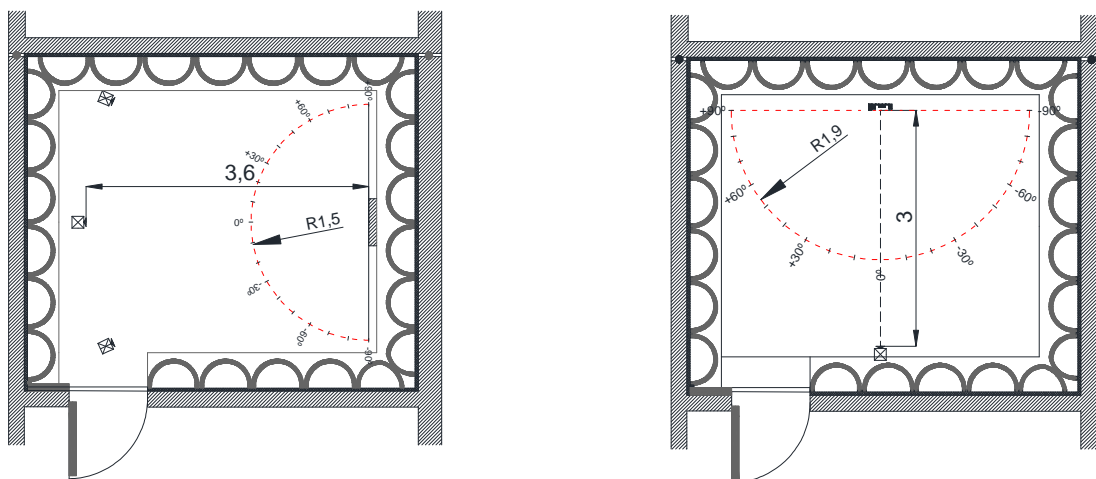


Figura 4.5 – Dois layouts de teste possíveis (em planta).

Dada a dimensão da sala, não é possível garantir, como referido na norma, que os ensaios se realizem com a fonte sonora distanciada de $10m$ do difusor e com os microfones dispostos em semicírculo de raio de $5m$ em torno do difusor. Contudo, permite estudar difusores de modo que 80% dos receptores (microfones) estão fora da zona especular (embora não permita estudar difusores, à escala real 1:1, com largura superior a $60cm$). Embora estas condições não sejam

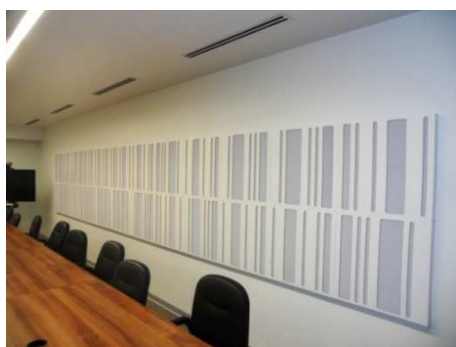
óptimas são as possíveis dadas a dificuldade de meios para se obter uma câmara com as características referidas na norma. Testes realizados na sala mostraram que esta é consistente, sendo apenas necessário garantir que as condições higrotérmicas no seu interior não variem (significativamente) durante os ensaios, tendo óbvias limitações nas baixas frequências – embora nessa gama de frequências, dada a dimensão das amostras, a difracção nas suas arestas provoque sempre num coeficiente de difusão elevado, contudo, avaliando uma placa plana de dimensões análogas ao provete em estude, podemos obter conclusões qualitativas com alguma segurança. Refira-se que o objectivo desta sala não é “certificar” produtos, mas ser um instrumento de apoio ao desenvolvimento de soluções.

Nos ensaios realizados foi adoptada uma resolução angular de 10° , obtendo-se desta forma 19 respostas de impulso entre -90° e $+90^\circ$. Os ensaios foram todos realizados com a fonte sonora posicionada para uma incidência normal relativamente à superfície da amostra de teste ($\psi = 0^\circ$). As respostas impulsivas foram obtidas através da técnica de MLS, com o máximo de sequências definidas por $2^{14} - 1 = 16383$, sendo realizadas 16 médias, resultando uma duração de $\Delta t = 20,5$ s.

O processo de tratamento dos sinais e de obtenção do coeficiente de difusão foi realizado de acordo com o exposto anteriormente na Secção 3.2.

4.3. AVALIAÇÃO DE SUPERFÍCIES HÍBRIDAS

Com este trabalho pretendeu-se avaliar o coeficiente de difusão de superfícies híbridas que actualmente existem no mercado nacional, painéis CF MLS produzidos pela empresa Castelhana & Ferreira (Figura 4.6).



a)



b)

Figura 4.6 – Painéis híbridos: a) Espuma basotect; b) Espuma PUR.

Estes painéis são constituídos por um absorvedor poroso (espuma de melamina, conhecida comercialmente por Basotect e espuma poliuretano PUR25FR), com 50 mm de espessura, revestido por uma placa de MDF (de 3 mm de espessura) rasgada de acordo com uma sequência

MLS. Existem comercialmente dois modelos, que correspondem a dois segmentos de uma sequência MLS:

+ **A**: 00010111110010101110
 + **B**: 01101000100111100010

As sequências MLS +**A** e +**B** são sequenciais, sendo a +**B** a continuação da +**A** – o objectivo é utilizar-se estes painéis em conjunto. Quando se pretende revestir uma grande área utiliza-se uma modulação baseada nas sequências de Barker, conforme referido no Quadro 2.2.

As sequências de rasgos foram obtidas através da função recursiva:

$$n(k + 7) = n(k) \oplus n(k + 6) \quad (4.1)$$

onde \oplus representa operador XOR (operador lógico no qual a resposta da operação é “verdade”, valor “1”, quando as variáveis de entrada assumem valores diferentes entre si). A Figura 4.7 apresenta os três primeiros instantes do “registor” (*shift register*) implementado para a função recursiva (4.1), cujo estado inicial é 0111111. A sequência MLS tem uma periodicidade $2^7 - 1 = 127$ dos quais se extraíram dois segmentos de 20 elementos (a +**A** e a +**B**).

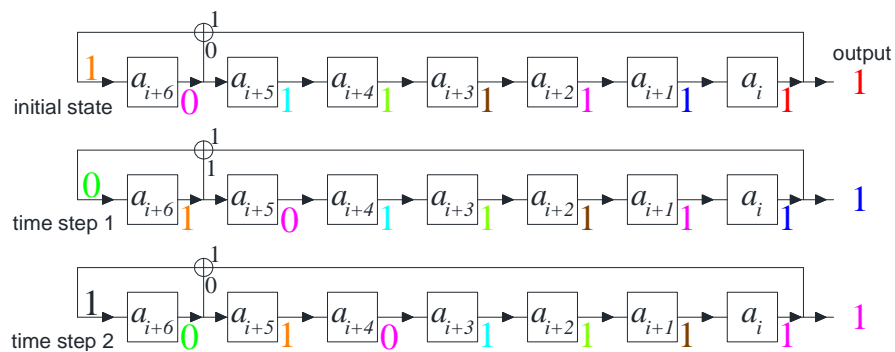


Figura 4.7 – Os “registos de deslocamento” da função recursiva (4.1) nos três primeiros elementos da sequência MLS utilizada para a construção dos painéis híbridos em estudo [23].

Na Figura 4.8 apresentam-se os painéis resultantes. Ao valor “0” fez-se corresponder a parte reflectora e ao valor “1” fez-se corresponder a parte absorvente sonora (corresponde ao rasgo).

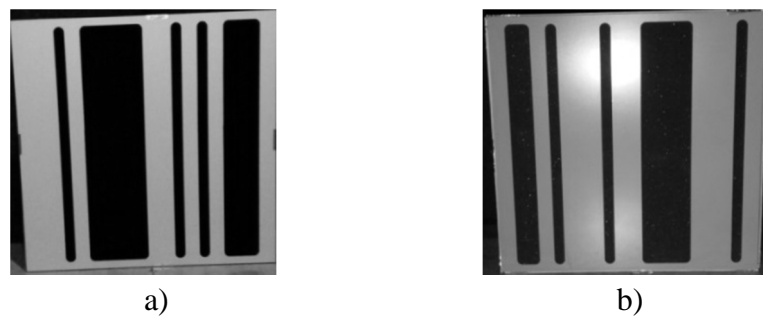


Figura 4.8 – Painéis CF MLS em espuma PUR: a) +**A**; b) +**B**.

Neste trabalho estudaram-se ainda os painéis “simétricos” ou “reversos”, isto é, aqueles em que o “0” corresponde à parte absorvente e ao “1” a parte reflectora – Figura 4.9.

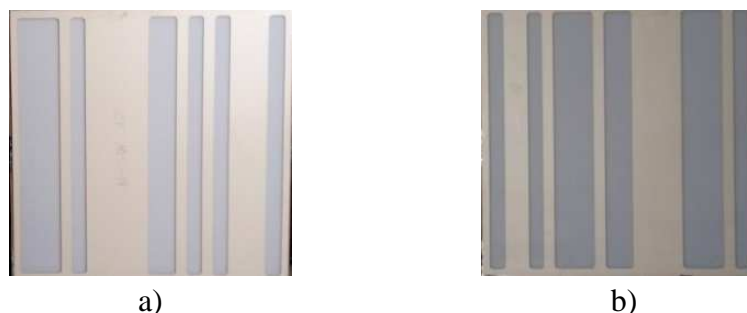


Figura 4.9 – Painéis CF MLS em espuma Basotect: a) **-A**; b) **-B**.

A taxa de perfuração dos painéis **+A** e **+B** é, respectivamente, de 47% e 38%. A taxa de perfuração dos painéis **-A** e **-B** é, respectivamente, 44% e 53%.

Os painéis **+A** e **+B** foram ensaiados em câmara reverberante, de acordo com a norma NP EN 354: 2007 [44], para se determinar o coeficiente de absorção sonora em campo difuso.

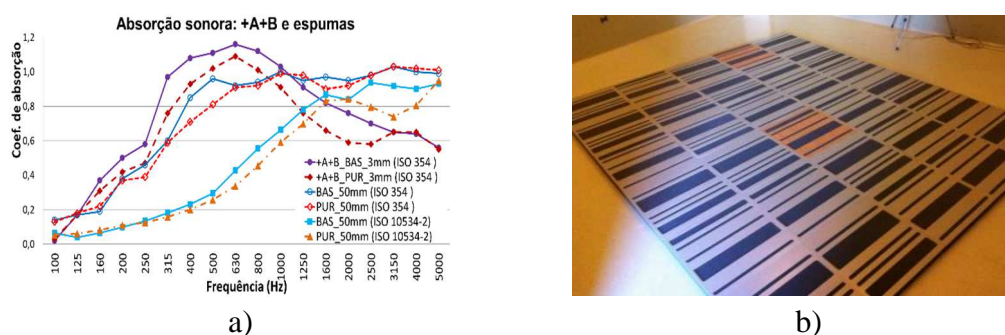


Figura 4.10 – a) Coeficiente de absorção sonora dos painéis **+A+B** (e das espumas utilizadas na construção dos painéis); b) Provetes de teste na câmara reverberante.

Algumas conclusões interessantes podem-se retirar da análise das curvas de absorção sonora apresentadas à esquerda da Figura 4.10:

- os painéis com espuma de melamina (Basotect) apresentam mais absorção sonora que os painéis com PUR;
- a utilização da “máscara” de MDF (3mm de espessura) rasgada, retira absorção sonora nas altas frequências e contribui para um comportamento ressonante nas médias frequências.

O tamanho original dos painéis é de $600\text{mm} \times 600\text{mm}$. Contudo, foram estudados provetes à escala 1:2, uns com $300\text{mm} \times 600\text{mm}$ e outros com $600\text{mm} \times 600\text{mm}$, que serviam para simular a utilização de dois painéis lado a lado (isto porque se se utilizassem 2 painéis lado a lado, de modo a que a área de teste fosse de $1200\text{mm} \times 600\text{mm}$, não se conseguia garantir que mais de 80% dos receptores (microfones) estivessem fora da região especular.

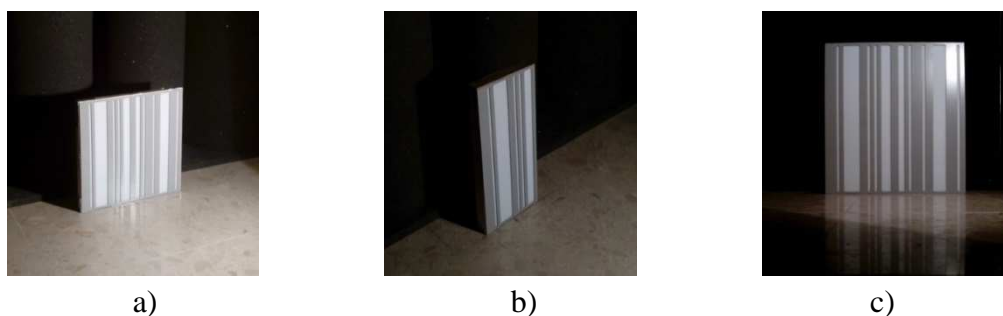


Figura 4.11 – a) escala real 1:1 (600mm × 600mm); b) escala 1:2 (300mm × 600mm);
c) +**AB**: escala 1:2 (600mm × 600mm).

Neste trabalho, pretendeu-se estudar ainda a influência da espessura da “máscara” de madeira perfurada. Para tal, ensaiou-se a versão “normal”, constituída por uma placa de MDF com 3mm de espessura (Figura 4.12a) e uma versão com uma espessura de 12mm (Figura 4.12b).

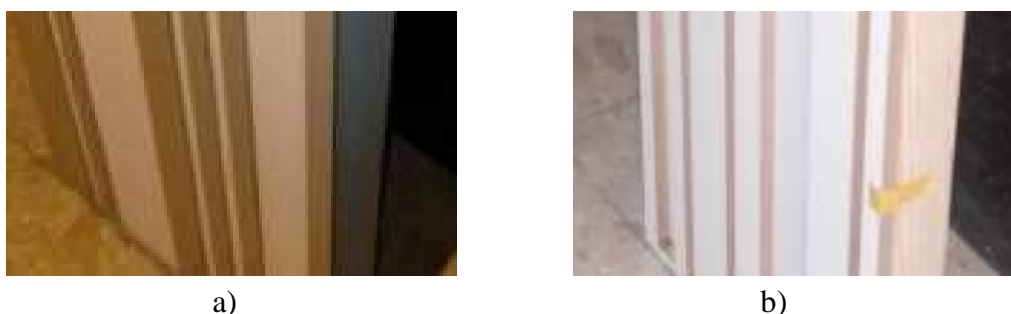


Figura 4.12 – Espessura da placa de MDF rasgada (“máscara”): a) 3mm; b) 12mm.

Um total de 25 testes foram realizados, incluindo alguns para analisar a influência do sistema de montagem do provete – Figura 4.13. Foram realizados testes onde o painel era encaixado numa caixa fechada (cobrindo as faces laterais e as costas dos mesmos); numa “moldura” que cobria as faces laterais deixando as costas descobertas; e sem qualquer tipo de suporte, com as faces laterais e costas descobertas. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 4.14 e 4.15. Como se pode observar nas referidas figuras, não se detecta uma alteração clara dos resultados, quer nos ensaios à escala real quer à escala 1:2.

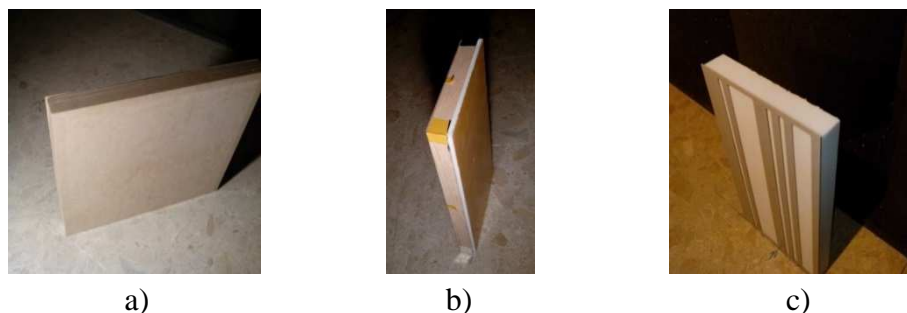
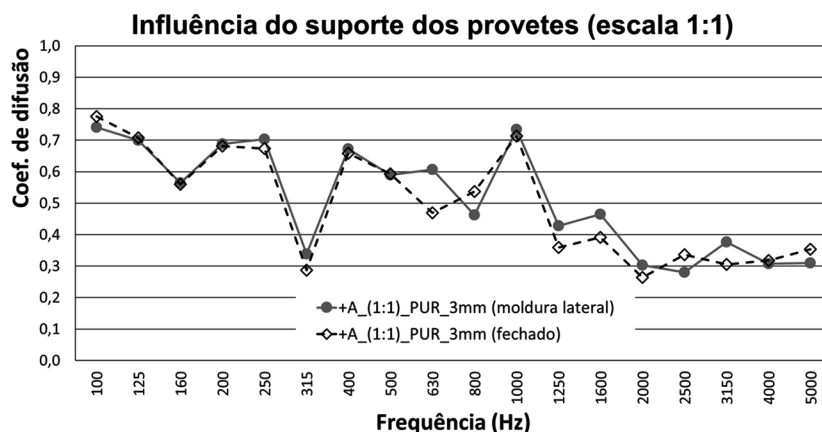
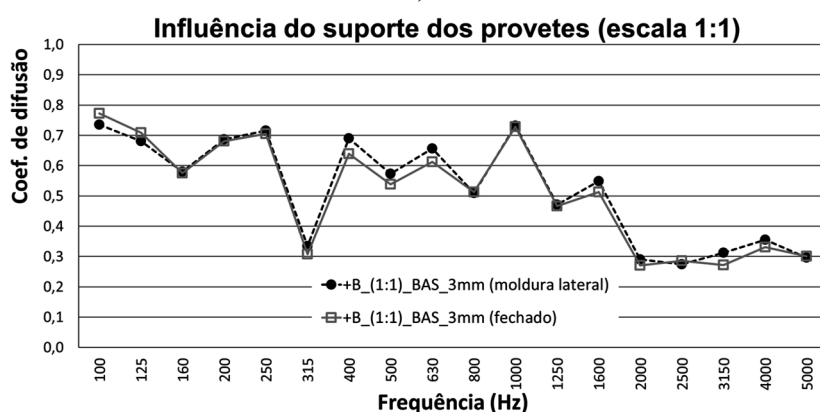


Figura 4.13 – Sistema de montagem do provete de teste: a) com laterais e costas fechadas;
b) Apenas as faces laterais tapadas (moldura lateral); c) Sem qualquer tipo de suporte (aberto).



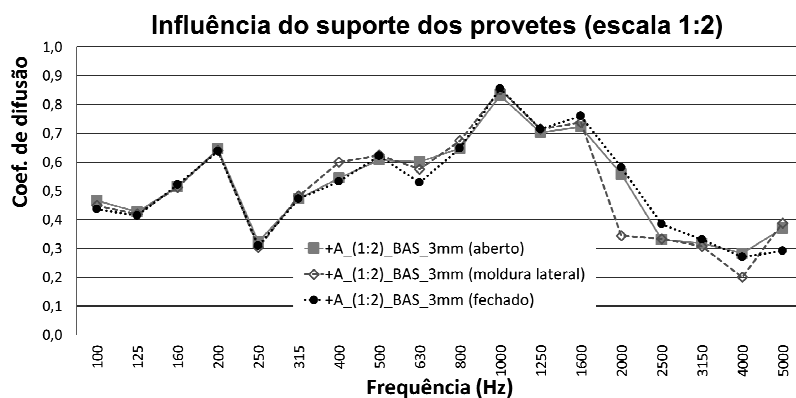
a)



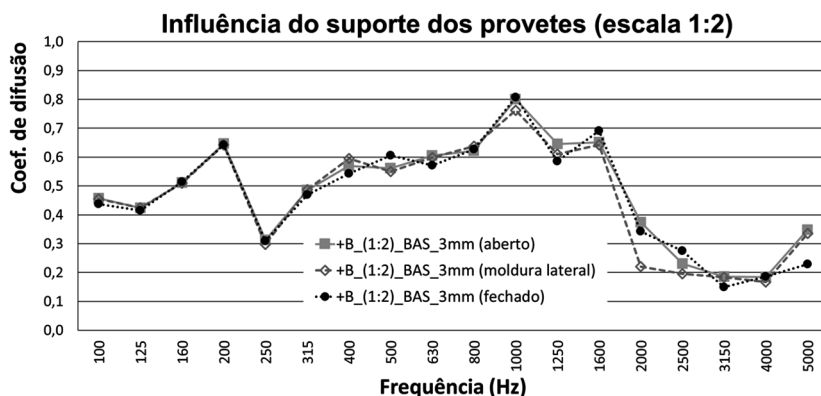
b)

Figura 4.14 – Influência do suporte dos provetes – ensaios à escala real de 1:1.

a) Modelo +A; b) Modelo +B.



a)

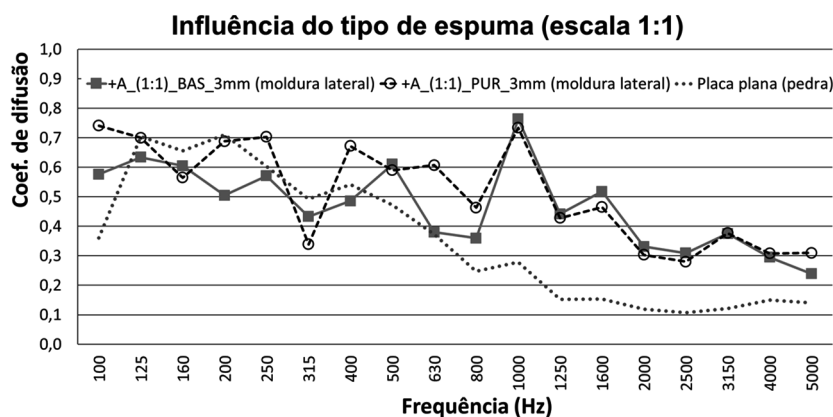


b)

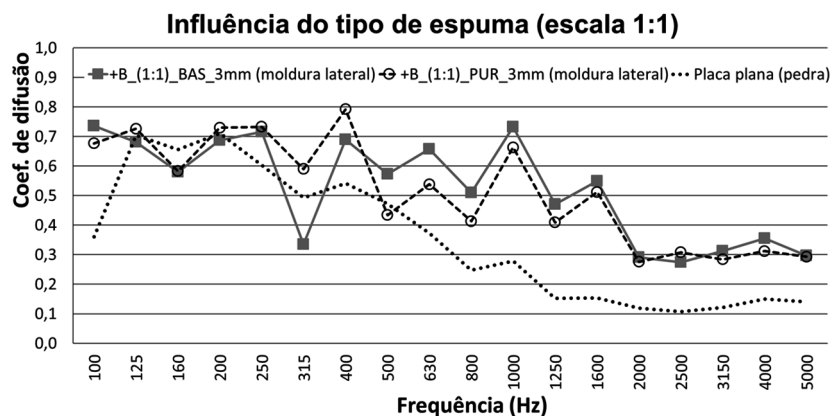
Figura 4.15 – Influência do suporte dos provetes – ensaios à escala real de 1:2.

a) Modelo +A; b) Modelo +B.

Como referido anteriormente, um dos objectivos deste trabalho era avaliar a influência do tipo de espuma no coeficiente de difusão. Conforme se pode observar na Figura 4.16, em ambos os painéis +A e +B, com a utilização da espuma de melamina (Basotect), a partir dos 1000 Hz obtém-se um coeficiente de difusão ligeiramente superior, comparativamente ao caso em que se utiliza a espuma de poliuretano. Também se conclui que, para frequências superiores a 400Hz, todos os casos apresentam um coeficiente de difusão superior a uma placa plana (com as dimensões semelhantes aos provetes em estudo, 600mm × 600mm).



a)



b)

Figura 4.16 – Influência do tipo de espuma, Basotec vs. PUR. a) +A; b) +B (em ambas as figuras se encontra representado o coef. de difusão de uma placa plana).

Outro dos objectivos era determinar quais dos painéis têm um coeficiente de difusão mais elevado. Observando a Figura 4.17 a conclusão que se pode retirar é que não há diferenças significativas entre os casos representados. No entanto, aparentemente, o painel +B tem ligeiramente menos difusão do que as outras sequências (que por sua vez é o painel que tem a menor taxa de perfuração dos 3 modelos). Aparentemente, pode ser uma incongruência, pois teoricamente quanto maior for a taxa de perfuração menor é o comportamento ressonante e mais absorção sonora nas altas frequências deverá ter o painel (ou seja, deverá apresentar um comportamento mais próximo do de uma placa de espuma).

A Figura 4.18 apresenta os resultados da comparação entre as sequências “directas” com respectivas sequências “reversas”. Era expectável que as curvas fossem muito semelhantes, contudo, o que se pode verificar é que os painéis “reversos” (painel -A e painel -B) têm ligeiramente mais difusão nas médias-altas frequências (entre os 1000Hz e os 4000 Hz) que os respectivos “directos”.

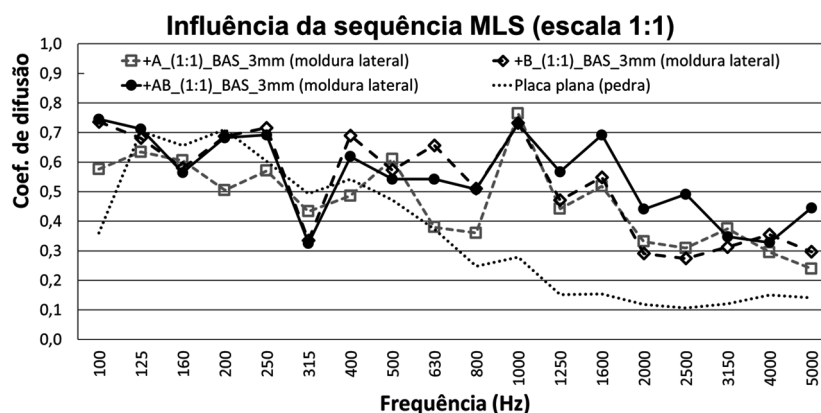
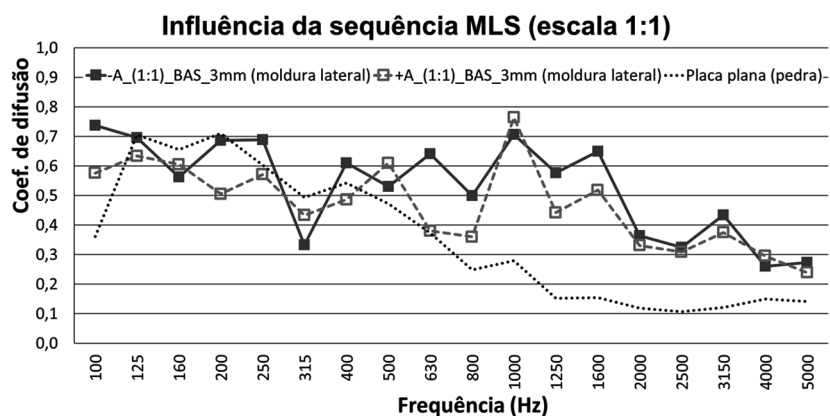
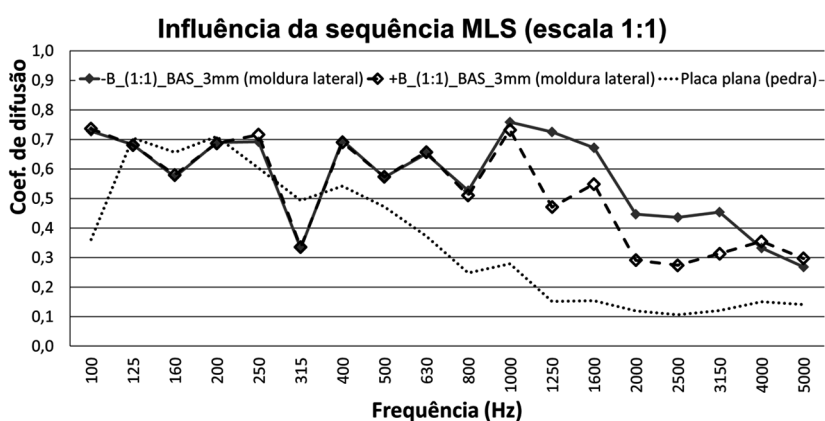


Figura 4.17 – Influência da sequência MLS.



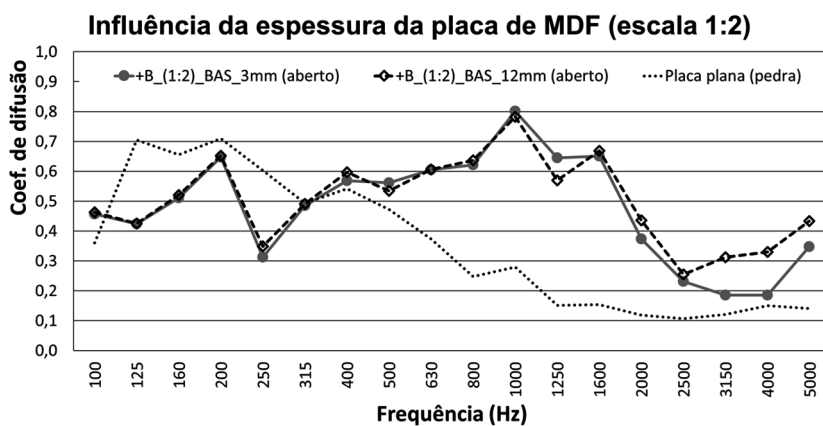
a)



b)

Figura 4.18 – Influência da sequência MLS: sequência “directa” e sequência “reversa”.
 a) +A e -A; b) +B e -B.

Na Figura 4.19, podemos ver a influência da espessura da “máscara” de MDF rasgada. Podemos observar que a “máscara” perfurada com maior espessura tem ligeiramente mais difusão nas altas frequências. Contudo, esse acréscimo de difusão pode ser devido à maior difracção nas arestas dos rasgos.



a)

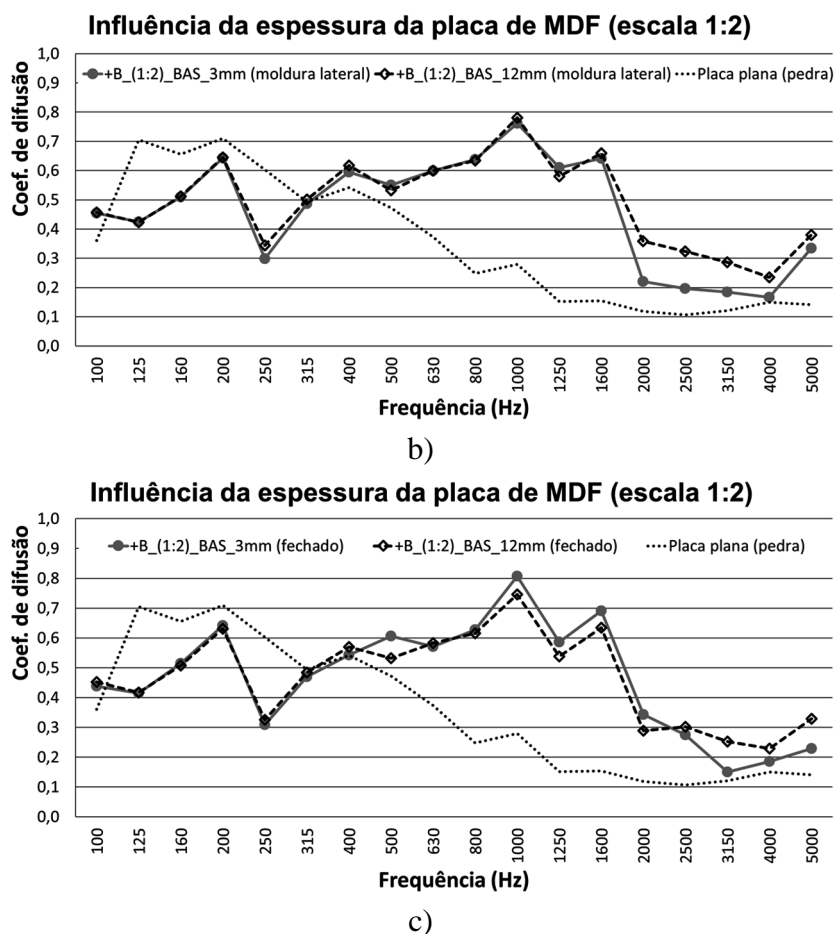


Figura 4.19 – Influência da espessura da placa de MDF (“máscara”) para os diferentes sistemas de montagem do provete de teste: a) Sem qualquer tipo de suporte; b) Apenas as faces laterais tapadas; c) Com laterais e costa fechadas.

As principais conclusões que se retiram deste trabalho são as seguintes:

- este tipo de superfícies híbridas tem um coeficiente de difusão superior a uma placa plana (de dimensões semelhantes) a partir dos 400Hz;
- a banda de frequências onde o coeficiente de difusão é mais elevado situa-se entre os 800Hz e os 2000Hz;
- nessa banda de frequências, aparentemente, quanto maior a taxa de perfuração maior é o coeficiente de difusão – Figura 4.20.

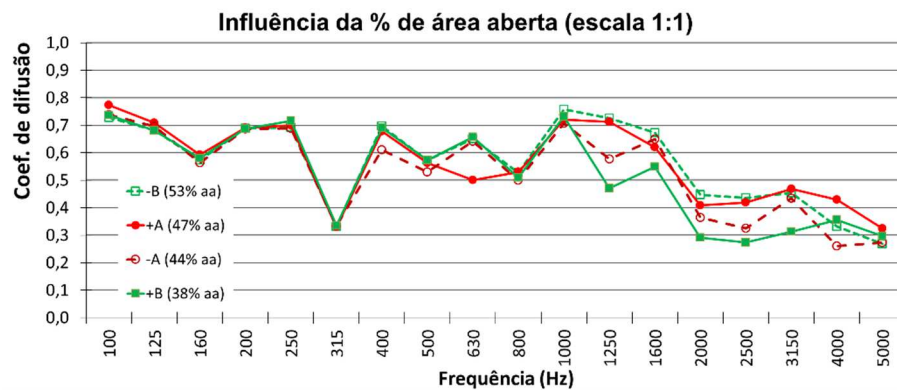


Figura 4.20 – Influência da taxa de perfuração da “máscara” de MDF rasgada.

Deve salientar-se que estas superfícies híbridas se apresentam como uma boa solução para situações onde são necessárias absorção sonora e ao mesmo tempo reflexões difusas. Em particular, as soluções estudadas têm um custo relativamente reduzido (quando comparado com outras soluções puramente difusoras ou absorvedoras) e podem ser ainda optimizadas.

4.4. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS CONSTITUINTES DE DIFUSORES TIPO QRD

Grande parte dos difusores existentes no mercado corresponde a soluções do tipo Schröder, conhecidas por QRD (*quadratic residue diffuser*), cujas profundidades dos elementos são baseadas numa dada sequência de resíduos quadráticos (conforme descrito em 2.5.4).

No mercado existem variações deste tipo de difusores, muitas vezes mais por motivos estéticos do que propriamente como resultado de uma optimização do seu desempenho. Por outro lado, por uma questão de custo, quer na sua produção quer no transporte, esses difusores são fabricados em materiais muito diversos, desde de diferentes tipos de “plásticos” à madeira maciça. Neste trabalho, pretendeu-se avaliar a influência do tipo de material que constitui o difusor, nomeadamente a influência da densidade [24]. Para tal, foram construídos 3 difusores, à escala real, do tipo QRD7, desenhados para a frequência de 1400 Hz, constituídos por três materiais diferentes: madeira maciça (Figura 4.21), aglomerado de cortiça (Figura 4.22) e poliestireno extrudido, XPS (Figura 4.23).

Como alguns dos modelos existentes no mercado também dispensam a utilização de guias-de-onda, por uma simplificação de construção, neste trabalho também se pretendeu avaliar a influência da sua utilização. Deste modo, foram construídos e avaliados dois difusores em madeira maciça em que um possuía guias-de-ondas e o outro não (Figura 4.24).

Para além da avaliação de um único difusor, foi ainda avaliada a utilização conjunta de dois difusores idênticos, correspondendo a um período $p = 2$ (Figura 4.25).

Assim, foram construídos três difusores, cujas dimensões exteriores são de aproximadamente $80\text{mm} \times 300\text{mm} \times 600\text{mm}$, idênticos em termos geométricos (ver Figuras 4.26 e 4.27), mas constituídos por materiais diferentes cujas massas volúmicas são as seguintes:

- madeira maciça: $m_v=456\text{ kg/m}^3$
- aglomerado de Cortiça: $m_v=173.6\text{ kg/m}^3$
- poliestireno Extrudido (XPS): $m_v=28.3\text{ kg/m}^3$

Para além dos difusores, também foram ensaiadas placas planas (com a mesma dimensão dos difusores) para se poderem comparar os resultados obtidos – Figura 4.28.



Figura 4.21 – Difusor QRD em madeira maciça com guias-de-onda [24].



Figura 4.22 – Difusor QRD em aglomerado de cortiça com guias-de-onda [24].

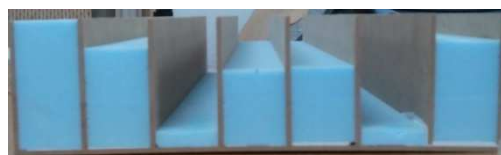


Figura 4.23 – Difusor QRD em XPS com guias-de-onda [24].

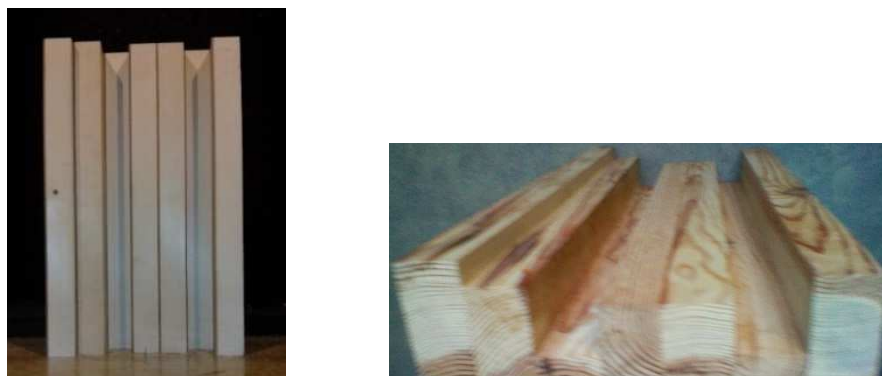


Figura 4.24 – Difusor QRD em madeira maciça sem guias-de-onda [24].



Figura 4.25 – Dois difusores QRD (período $p = 2$): a) Em madeira maciça com guias-de-onda; b) Em madeira maciça sem guias-de-onda; c) Em aglomerado de cortiça com guias-de-onda [24].

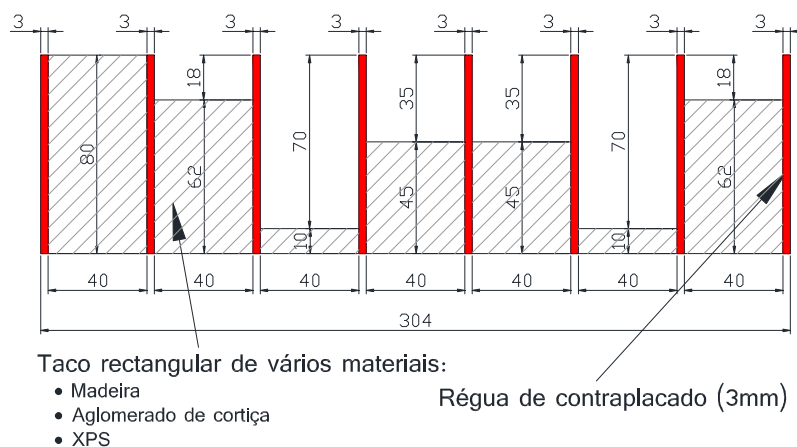


Figura 4.26 – Dimensões do difusor tipo QRD ($f_0 = 1400\text{Hz}$) utilizado [24].

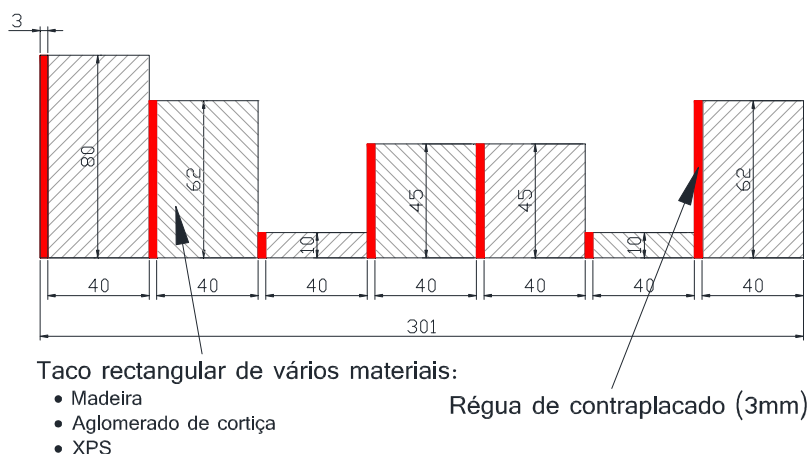


Figura 4.27 – Dimensões do difusor tipo adaptado sem guias-de-onda [24].



Figura 4.28 – Placa plana 600mm × 600mm utilizada para comparação dos resultados obtidos com dois difusores (período $p = 2$) [24].

A abordagem do estudo foi essencialmente experimental, com a determinação do coeficiente de difusão de acordo com a metodologia descrita na Secção 3.2 (ISO 17497-2 [39]). Porém, também foi utilizado o Método dos Elementos de Fronteira (BEM) para modelação numérica dos difusores acústicos e obtenção do respectivo coeficiente de difusão, conforme será descrito no Capítulo 5, com o objectivo de validar os resultados experimentais devido a alguns constrangimentos existentes na sala semi-anechoica adaptada (descrita na Secção 4.2).

Para o modelo BEM utilizado, considerou-se uma superfície rígida, de comprimento infinito segundo a direcção do eixo z , inserida num meio acústico infinito (Figura 4.29), excitado por uma fonte de pressão sonora cilíndrica posicionada em $S(x_F, y_F)$, oscilando com a frequência angular ω . O campo reflectido bidimensional produzido pela fonte sonora cilíndrica (ao longo da direcção z), que actua no meio acústico, na presença de um elemento difusor, é calculado no domínio da frequência utilizando o Método de Elementos de Fronteira (BEM) descrito no Capítulo 5, sendo utilizada uma abordagem clássica BEM que pode ser descrita pela equação integral de fronteira, assumindo que Γ representa a interface do difusor que será discretizado em N elementos de fronteira constantes. As integrações resultantes são calculadas, como se

verá no Capítulo 5, utilizando um esquema de quadratura de Gauss e a resolução do sistema de equações resultante permite obter a pressão nodal. O campo sonoro reflectido em qualquer ponto do domínio pode, então, ser calculado através da aplicação da equação integral de fronteira.

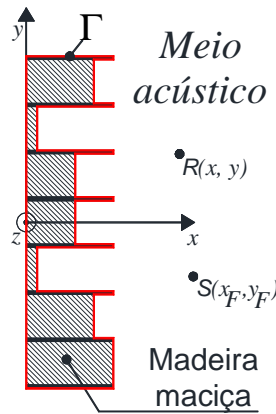


Figura 4.29 – Geometria do modelo numérico implementado [24].

Na Figura 4.30, estão representados os resultados obtidos para os difusores constituídos pelos diferentes materiais. Pode-se observar que, no caso da avaliação de apenas um difusor, que o mais denso (em madeira maciça) tem um coeficiente de difusão mais elevado. Contudo, o mesmo já não se verifica no ensaio com dois difusores. Em ambos os casos, os difusores têm melhor desempenho que uma placa plana a partir dos 630Hz e 800Hz, respectivamente. Também se verifica que, apenas no difusor de madeira maciça, é visível a frequência de projecto $f_0 \approx 1400\text{Hz}$ corresponder ao valor máximo do coeficiente de difusão.

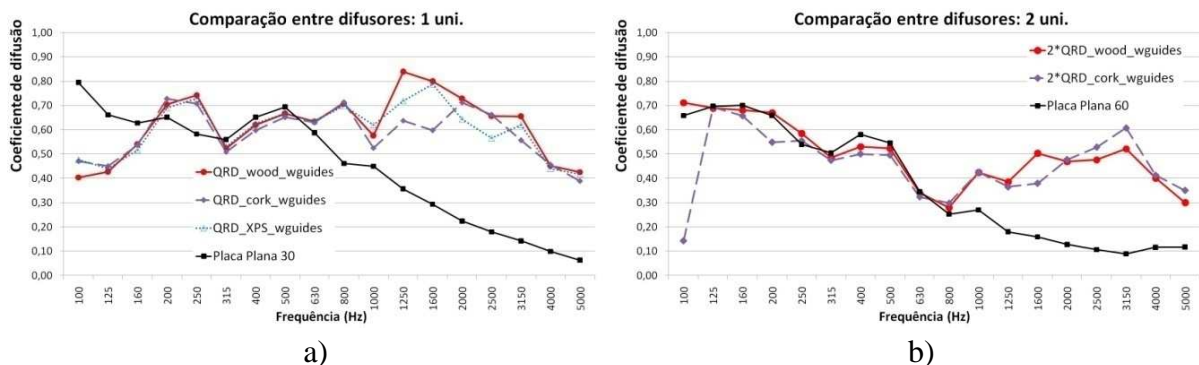


Figura 4.30 - Comparação de difusores de materiais diferentes: a) um difusor; b) dois difusores (período $p = 2$).

Na Figura 4.31, estão representados os resultados obtidos para difusores de madeira maciça com e sem guias-de-onda. Nos mesmos gráficos também se apresentam os resultados obtidos para as respectivas placas planas. É visível, de uma forma generalizada, que a utilização dos guias-de-onda conduz a coeficientes de difusão mais elevados, sendo notório que os valores

máximos do coeficiente de difusão ocorrem entre as bandas de terço de oitava dos 1250 Hz e 1600 Hz e entre as dos 2500 Hz e 3150 Hz (que corresponde, à frequência de projecto, f_0 , e a $2 \cdot f_0$, respectivamente). A ausência de guias-de-onda altera os valores da frequência para os quais são atingidos os valores máximos do coeficiente de difusão. Mas a maior consequência da não utilização dos guias-de-onda é a quebra acentuada daquele coeficiente, d , na banda dos 2000Hz.

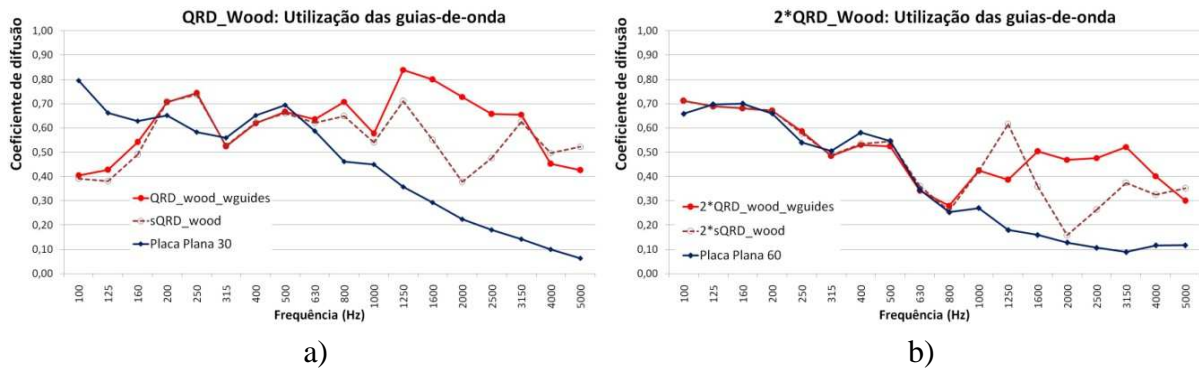


Figura 4.31 - Influência dos guias-de-onda: a) um difusor; b) dois difusores (período $p = 2$).

Na Figura 4.32, representam-se os resultados obtidos que mostram a influência de se medir um difusor ou dois difusores. Na Figura 4.32a), estão representados os resultados obtidos para difusores de madeira maciça e na Figura 4.32b), os resultados dos difusores de aglomerado de cortiça, em quaisquer dos casos com guias-de-onda. Como expectável, o coeficiente de difusão é inferior quando aumenta o período e, conseqüentemente, a dimensão do provete em avaliação [45].

Para a modelação numérica foi admitido que o material que constitui o difusor é perfeitamente reflector (impedância acústica infinita). Deste modo, as comparações que são apresentadas nas Figuras 4.33 e 4.34 são referentes ao difusor de madeira maciça. Apresentam-se, ainda, os resultados experimentais e numéricos referentes às placas planas que servem de comparação para o desempenho dos difusores.

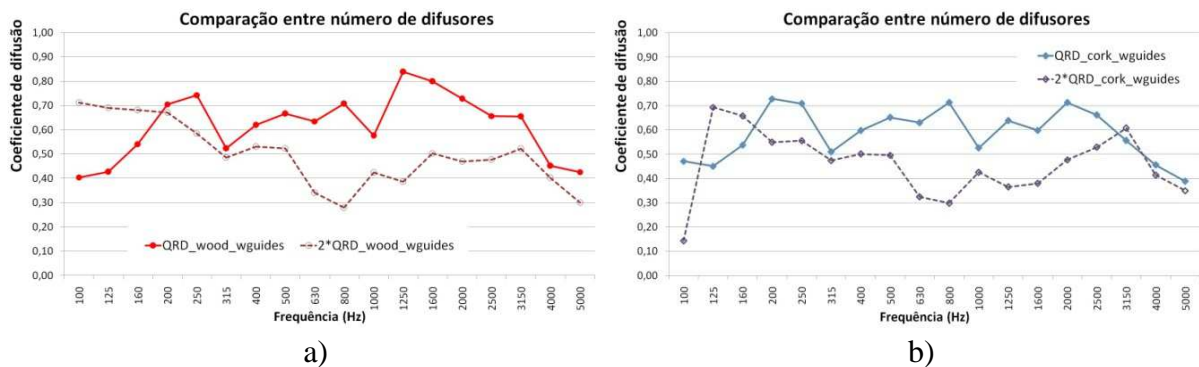


Figura 4.32 - Influência do número de difusores analisados: a) QRD em madeira maciça; b) QRD em aglomerado de cortiça.

A utilização de um maior número de repetições da superfície difusora permite uma melhor representação das condições de aplicação reais dos mesmos, em parte pela redução do efeito da difracção nos bordos dos painéis. Contudo, medir uma grande quantidade de painéis exige instalações laboratoriais de grande dimensão para garantir as distâncias mínimas entre os painéis, fonte e receptores. Assim, como se viu anteriormente, na sala de ensaio utilizada, de forma a garantir que mais de 80% dos receptores estão fora da zona especular, apenas é possível utilizar no máximo 2 difusores à escala real (é possível utilizar provetes noutra escala, mas seria necessário caracterizar a absorção sonora, quer da madeira maciça quer do aglomerado de cortiça, de forma a garantir que essas características se mantêm à frequência dos ensaios à escala – e, já agora, que a resposta da fonte sonora também se mantenha idêntica).

Da análise dos resultados apresentados nas Figuras 4.33 e 4.34, pode-se dizer, de uma forma geral, que os resultados são bastante satisfatórios. Tem de se excluir as baixas frequências, justificadamente quer devido às dimensões da sala de ensaio, quer à janela temporal utilizada para a extracção da reflexão quer ainda devido às diferentes condições higró-térmicas, que não foi possível garantir que tenham permanecido constantes durante a realização do trabalho. De qualquer modo, os resultados nas baixas frequências obtidos para dois difusores são mais aproximados.

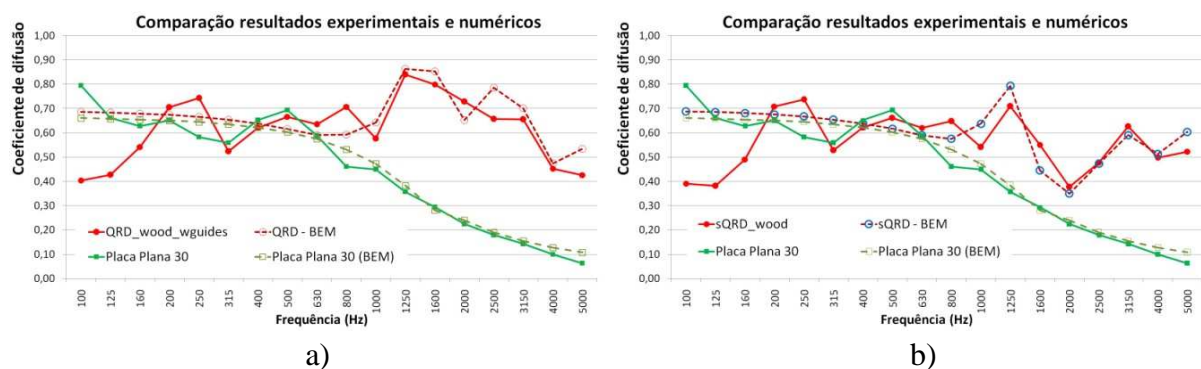


Figura 4.33 - Comparação dos resultados experimentais e numéricos para 1 difusor: a) com guias-de-onda; b) sem guias-de-onda.

O modelo BEM poderá ainda ser ajustado de modo a ter a mesma resolução no domínio da frequência que o existente no método de ensaio, permitindo que as somas energéticas realizadas para as bandas de terço de oitavo tenham as mesmas componentes – tal será realizado no Capítulo 7.

Este estudo demonstrar que os difusores analisados com maior densidade têm maior coeficiente de difusão. Contudo, consegue-se um razoável desempenho com materiais de densidade inferior. Assim, a utilização de materiais mais leves pode ser uma opção viável se for tido em consideração quer o custo de fabrico quer o custo de transporte. A utilização de cortiça poderá ser uma boa hipótese pois sendo um material ecológico e esteticamente atractivo é de fácil

mecanização. Para tal, tem de ser avaliada a absorção sonora de dispositivos com este material de forma a não retirarem energia de forma excessiva.

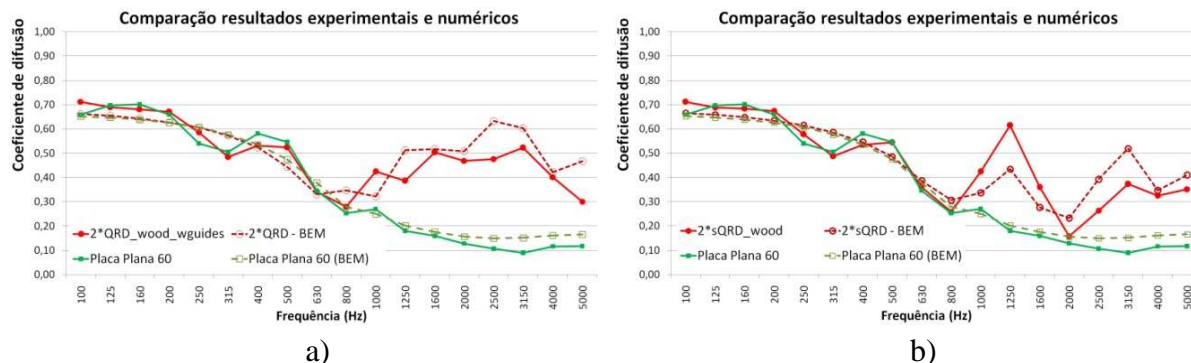


Figura 4.34 - Comparação dos resultados experimentais e numéricos para 2 difusores; a) com guias-de-onda; b) sem guias-de-onda.

Foi ainda demonstrado que, para QRD's tradicionais, a utilização de guias-de-onda é fundamental, não só para que o desempenho seja o expectável em fase de dimensionamento do difusor (manutenção da frequência de projecto), como para não diminuir a eficiência do difusor.

O modelo BEM utilizado mostrou ser uma ferramenta de extrema utilidade em fase de desenvolvimento, quer pela qualidade dos resultados obtidos face aos dados experimentais, quer pela versatilidade que permite.

A sala semi-anecóica utilizada, dadas as suas limitações dimensionais, não permitiu retirar conclusões nas baixas frequências nem permite a utilização de um elevado número de períodos dos difusores. Contudo, mostrou ser “consistente” para frequências superiores a 315 Hz, desde que alguns cuidados sejam implementados no protocolo de ensaio. Por outro lado, a utilização de provetes à escala permite a utilização de períodos maiores.

5. MODELAÇÃO NUMÉRICA

5.1. INTRODUÇÃO

A modelação numérica de elementos difusores sonoros pode ser realizada com recurso a diferentes técnicas, incluindo os métodos numéricos clássicos, como o método dos elementos finitos (FEM), o método dos elementos de fronteira (BEM) ou o método das diferenças finitas (FDM). Na realidade, cada um destes métodos apresenta um conjunto de vantagens e de inconvenientes na sua aplicação a problemas acústicos que interessa referir.

O FEM é, possivelmente, o método de aplicação mais generalizado na modelação de diferentes problemas físicos, baseando-se na discretização do domínio a analisar num conjunto de elementos discretos, de forma simples. Dentro de cada um destes elementos, assume-se que a variação espacial da grandeza básica a analisar (que no caso da propagação de ondas acústicas será a pressão) pode ser representada por funções matemáticas simples, usualmente polinómios, originando assim uma representação matemática bastante conveniente. No entanto, este tipo de abordagem implica a discretização de todo o domínio de propagação do som, ou seja, no caso aqui estudado, de todo o ar em redor do difusor. Embora esta necessidade não seja um problema no caso de domínios fechados e de pequena dimensão, se se pretender simular meios abertos, infinitos ou semi-infinitos, no caso da análise numérica de um difusor acústico, em que é habitual considerar cenários em que a fonte sonora se encontra a alguns metros do difusor, e em que se pretende calcular a resposta em pontos (receptores), também eles a alguns metros do difusor, esta discretização do meio terá que abranger uma área considerável em redor do objecto. Complementarmente, é necessário ter em consideração que uma malha de elementos finitos terá que ser “truncada” a partir de determinada distância, sendo necessário, nos limites da malha, impor condições de fronteira adequadas que simulem campo livre (eliminando a influência de reflexões no limite da malha). Processos como a imposição de condições de Robin (impedância), a introdução de PMLs (*Perfectly Matched Layer*) ou o recurso a elementos infinitos têm vindo a ser desenvolvidos para este efeito, mas a sua eficácia não é total.

No que respeita ao FEM, deve referir-se que a malha de elementos é ainda dependente da frequência de excitação. Pensando que o campo de pressões é representado por funções

polinomiais simples, em cada elemento discreto, facilmente se compreende que, para representar correctamente o comportamento ondulatório de um campo de pressões acústicas, a densidade da malha a considerar deve ser tanto maior quanto menor for o comprimento de onda. Esta necessidade de malhas mais refinadas torna o método pouco apelativo nas altas frequências, e ainda menos no caso de problemas tridimensionais, em que o custo computacional se torna impraticável.

Por último, e no que respeita ao Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD), devido à sua simplicidade matemática, facilidade de implementação e uso extensivo no contexto de obtenção da solução de equações diferenciais parciais, o método FDTD também tem sido aplicado à análise da propagação de ondas acústicas, do comportamento de difusores sonoros e do desempenho cristais sónicos [32, 46, 47]. Este método numérico utiliza diferenças finitas para aproximar tanto derivados espaciais como temporais, e revelou simular eficientemente, no domínio do tempo, os múltiplos fenómenos físicos observados na presença daquelas estruturas acústicas.

Por contraponto, o BEM surge como uma alternativa muito adequada a este tipo de problemas. Para o estudo da propagação de ondas sonoras o BEM poderá, na realidade, ser indicado como o método que possui maiores potencialidades, sendo normalmente a melhor opção para o estudo de sistemas infinitos ou semi-infinitos. O BEM possui a vantagem de apenas requerer a discretização das fronteiras e de eventuais discontinuidades que possam existir no meio de propagação, evitando a discretização espacial do domínio de propagação que, por norma, alguns dos restantes métodos exigem. Ao basear-se em soluções fundamentais, que se mantêm válidas no infinito, não vai implicar a introdução de erros adicionais devido ao truncamento da discretização do meio, permitindo por isso uma análise com elevado rigor matemático. Utilizando o BEM para a determinação das variáveis necessárias sobre todas as fronteiras discretizadas, a pressão sonora pode depois ser determinada em qualquer ponto do domínio de propagação, podendo ser encarada como um pós-processamento realizado a partir da solução.

Embora o BEM apresente vantagens significativas, este método numérico apresenta também alguns inconvenientes. Ainda que recorra apenas à discretização das fronteiras, e de tipicamente necessitar de um número de elementos reduzido para simular um determinado sistema físico, a matriz de sistema que origina e que permite calcular as variáveis necessárias sobre a fronteira é totalmente preenchida e não-simétrica, o que impossibilita a aplicação de técnicas mais eficientes de resolução do sistema de equações inerentes ao método. Por esse motivo, o método pode levar à necessidade de recursos computacionais bastante elevados do ponto de vista da memória RAM necessária. Refira-se, ainda, uma outra dificuldade que se prende com a formulação matemática. O BEM tem por base o uso de soluções analíticas calculadas para uma situação em que, no meio em análise, não existem discontinuidades. Estas soluções fundamentais são conhecidas apenas para situações simples, podendo revelar-se de obtenção bastante difícil quando o caso em estudo for o de um sistema não linear ou heterogéneo. Por fim, deve compreender-se que o BEM requer a avaliação de um conjunto de integrais ao longo

da fronteira discretizada, estando o rigor dos resultados sempre dependente do rigor com que são efectuadas estas integrações.

A literatura disponível sobre a utilização do BEM em problemas acústicos é muito vasta, e destacam-se, como exemplos, os trabalhos [48] a [52], que abordam não só aspectos relacionados com a formulação matemática do método como ainda alguns relacionados com aplicações práticas onde o BEM se revela como particularmente adequado.

No que se segue, apresenta-se a formulação matemática do BEM, incluindo-se ainda uma breve descrição de uma simplificação do BEM, baseada na aproximação de Kirchoff, que se considerou poder ser útil para uma análise preliminar da tipologia de problemas a resolver, por causa do seu custo computacional ser menor. Uma vez que um dos objectivos deste trabalho se centra na optimização de formas orgânicas de difusores, apresenta-se, também neste capítulo, a metodologia de optimização baseada num algoritmo genético simples.

5.2. EQUAÇÕES GERAIS

É usual considerar-se que a propagação do som num meio fluido, onde a velocidade ($c(\underline{x})$) e a densidade ($\rho(\underline{x})$) são variáveis no espaço, pode ser representada pela equação escalar de propagação de ondas no domínio do tempo, definida como

$$\rho(\underline{x})\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho(\underline{x})} \nabla P(\underline{x}, t) \right) = \frac{1}{c(\underline{x})^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} P(\underline{x}, t) \quad (5.1)$$

onde $P(\underline{x}, t)$ representa a pressão sonora no ponto \underline{x} e no instante t , e ∇ representa um operador diferencial dado por $\nabla = \left[\frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \right]^T$ para problemas bidimensionais. Se a densidade do meio de propagação for constante, a equação diferencial (4.1) pode ser simplificada, dando lugar a

$$\nabla^2 P(\underline{x}, t) = \frac{1}{c(\underline{x})^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} P(\underline{x}, t) \quad (5.2)$$

onde $\nabla^2(\cdot) = \frac{\partial^2}{\partial x^2}(\cdot) + \frac{\partial^2}{\partial y^2}(\cdot)$ representa o operador de Laplace.

Se se considerar que a pressão acústica referida em (5.2) apresenta uma variação harmónica no tempo, esta pode escrever-se como

$$P(\underline{x}, t) = p(\underline{x}, \omega) e^{-i\omega t} \quad (5.3)$$

onde $p(\underline{x}, \omega)$ é um valor complexo, ω é a frequência angular, $e^{-i\omega t}$ é a função exponencial com argumento complexo, e $i = \sqrt{-1}$. Substituindo a equação (5.3) na equação (5.2), esta última pode reescrever-se no domínio da frequência, com a forma

$$\nabla^2 p(\underline{x}, k) + \frac{\omega^2}{c(\underline{x})^2} p(\underline{x}, k) = 0 \quad (5.4)$$

Esta equação não é mais do que a conhecida equação de Helmholtz, habitualmente usada na análise da propagação de ondas acústicas no domínio da frequência. Se adicionalmente se considerar que o meio é homogéneo do ponto de vista da velocidade de propagação, o número de onda passará a ser constante, $k = \frac{\omega}{c}$, podendo escrever-se

$$\nabla^2 p(\underline{x}, k) + k^2 p(\underline{x}, k) = 0 \quad (5.5)$$

Partindo, agora, da equação diferencial definida na equação (5.5), pode definir-se o conceito de solução fundamental como sendo aquela que satisfaz integralmente a equação diferencial em todo o domínio, na ausência de quaisquer fronteiras impostas por descontinuidades, ou seja, no caso em que o domínio é infinito e homogéneo. Assim, pode dizer-se que a solução fundamental da equação (5.5) é a função $G(\underline{x}, \underline{x}_0, k)$ tal que

$$\nabla^2 G(\underline{x}, \underline{x}_0, k) + k^2 G(\underline{x}, \underline{x}_0, k) = \delta(\underline{x} - \underline{x}_0) \quad (5.6)$$

em que \underline{x}_0 e \underline{x} são dois pontos do domínio que correspondem, respectivamente, à origem (centro) da função e ao ponto receptor, e δ é a função delta de Dirac definida como

$$\delta(\underline{x} - \underline{x}_0) = \begin{cases} 0 & \text{se } \underline{x} \neq \underline{x}_0 \\ +\infty & \text{se } \underline{x} = \underline{x}_0 \end{cases} \quad (5.7)$$

No caso em apreço, ou seja, para a equação de Helmholtz, esta solução fundamental é conhecida, e encontra-se publicada na literatura científica (veja-se, por exemplo, em [53] e [56]), correspondendo a

$$G(\underline{x}, \underline{x}_0, k) = -\frac{i}{4} H_0^{(2)}(kr) \quad (5.8)$$

onde $r = \|\underline{x} - \underline{x}_0\|$ é a distância entre os pontos \underline{x} e \underline{x}_0 , e $H_0^{(2)}$ é a função de Hankel de segundo tipo e de ordem 0.

5.3. MÉTODOS NUMÉRICOS

5.3.1. MÉTODO DOS ELEMENTOS DE FRONTEIRA

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,

$$p_{inc}(\underline{x}_p, \underline{x}_0) + \int_S q(\underline{x}) p^*(\underline{x}_p, \underline{x}) dS = \int_S q^*(\underline{x}_p, \underline{x}) p(\underline{x}) dS + Cp(\underline{x}_p) \quad (5.9)$$

onde $p(\underline{x})$ e $q(\underline{x})$ representam, respectivamente, a pressão e o seu gradiente na direcção normal à fronteira da inclusão no ponto \underline{x} , $p(\underline{x}_p)$ representa a pressão no ponto de aplicação do carregamento virtual e $p_{inc}(\underline{x}_p, \underline{x}_0)$ é a pressão do campo incidente. C é uma constante que assume o valor 1 se o ponto estiver no domínio de propagação, $1/2$ se estiver na fronteira e 0 se estiver fora do meio de propagação.

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:

$$p^*(\underline{x}_p, \underline{x}) = -\frac{i}{4} H_0^{(2)}(k_{\alpha_f} r) \quad (5.10)$$

onde $k_{\alpha_f} = \omega/\alpha_f$, ω é a frequência e α_f a velocidade de propagação das ondas no meio fluido 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

$$q^*(\underline{x}_p, \underline{x}) = \frac{\partial p^*(\underline{x}_p, \underline{x})}{\partial \vec{n}} = \frac{ik_{\alpha_f}}{4} H_1^{(2)}(k_{\alpha_f} r) \frac{\partial r}{\partial \vec{n}} \quad (5.11)$$

onde $H_1^{(2)}$ é a função de Hankel de 2ª espécie e ordem 1.

Em lugar da utilização do gradiente de pressões, $q = \frac{\partial p}{\partial \vec{n}}$, é usual recorrer-se à representação da equação integral em função de pressões e de velocidades das partículas segundo a direcção 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.

Se em lugar de uma fronteira contínua se considerar que esta se encontra discretizada num conjunto de segmentos rectilíneos (elementos de fronteira), 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:

$$\begin{aligned}
 p_{inc}(\underline{x}_p, \underline{x}_0) - i\rho\omega \sum_{n=1}^N v_n^n \int_{S_n} p^*(\underline{x}_p, \underline{x}_n) dS_n \\
 = \sum_{n=1}^N p^n \int_{S_n} q^*(\underline{x}_p, \underline{x}_n) dS_n + Cp(\underline{x}_p)
 \end{aligned}
 \tag{5.12}$$

onde p^n e v_n^n representam as pressões e as velocidades 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.

Após a resolução deste sistema de equações, a mesma equação (5.12) pode ser usada para determinar a pressão acústica num qualquer ponto do meio de propagação.

A formulação apresentada até aqui corresponde à formulação clássica do BEM, que apresenta algumas limitações na sua utilização. De facto, se o objecto a discretizar apresenta fronteiras paralelas entre si e com pequena distância entre elas, as equações correspondentes a elementos que se encontram frente a frente tornam-se semelhantes, e dão origem a um sistema mal condicionado, com consequentes problemas numéricos. Esta formulação não permite, aliás, simular elementos de espessura nula, uma vez que, ao discretizar essa fronteira fina, irão ser gerados elementos sobrepostos (de um e de outro lado dessa fronteira), e as equações correspondentes tornam-se semelhantes e originam mesmo um sistema singular. Além disso, se o ponto carregado se encontra muito próximo de outros elementos, a função que é necessário integrar torna-se quase-singular, e a integração numérica pode produzir resultados pouco rigorosos, conduzindo a resultados também pouco rigorosos.

Uma forma de ultrapassar esta limitação consiste na utilização do “Dual-BEM”, que combina a equação integral apresentada (equação (5.9)) com a chamada formulação hipersingular do BEM. No caso da análise de difusores acústicos, esta metodologia pode revelar-se útil se estes difusores integrarem elementos finos, como as paredes de separação entre poços de difusores do tipo QRD. Trabalhos de referência, como Wu [48] ou Marburg [50], tratam em detalhe toda a formulação do BEM e do Dual-BEM.

5.3.2. APROXIMAÇÃO DE KIRCHOFF

Embora a utilização do BEM para previsão do comportamento de um difusor seja muito apropriada, a sua complexidade e o seu custo computacional associado a essa utilização podem tornar-se condicionantes para a sua aplicação a problemas de grande dimensão. Uma vez que a matriz gerada pela equação (5.12) é, normalmente, uma matriz completamente preenchida, envolvendo um conjunto de integrações numéricas para o cálculo de cada uma das entradas dessa matriz, caso a geometria seja discretizada com um número elevado de elementos o tempo de cálculo e, sobretudo, a quantidade de memória computacional podem ser demasiado

elevados. Assim, caso seja possível evitar a formação e resolução da matriz do BEM pode conseguir-se um ganho computacional muito significativo.

Uma estratégia que permite obviar esse custo computacional (embora seja, assumidamente, de aplicabilidade limitada e constitua uma simplificação) é a chamada aproximação de Kirchoff (veja-se, por exemplo, [48]). Esta estratégia pode constituir-se, assim, como uma metodologia mais expedita de previsão do desempenho de difusores acústicos. Para a compreender, pode tomar-se como ponto de partida a equação integral que dá origem ao BEM, equação (5.9) considerando um ponto \underline{x}_p no domínio de propagação, na forma:

$$p_{inc}(\underline{x}_p, \underline{x}_0) + \int_S q(\underline{x}) p^*(\underline{x}_p, \underline{x}) dS = \int_S q^*(\underline{x}_p, \underline{x}) p(\underline{x}) dS + p(\underline{x}_p) \quad (5.13)$$

No caso geral, nesta equação, a pressão sonora ($p(x)$) e a sua derivada ($q(x)$) são grandezas que não se conhecem inicialmente (ou pelo menos uma delas), sendo determinadas a partir da resolução de um sistema de equações. Para evitar essa resolução, pode considerar-se que, se um objecto estiver sujeito a uma onda sonora incidente, e se forem conhecidas algumas propriedades da sua superfície, pode ser considerada a condição de fronteira designada como condição de Kirchoff, dada por:

$$p(\underline{x}_p) = [1 + R]p_{inc}(\underline{x}_p, \underline{x}_0) \quad (5.14)$$

onde $p_{inc}(\underline{x}_p, \underline{x}_0)$ representa a pressão gerada pela fonte emissora de ondas sonoras localizada em \underline{x}_0 num ponto da fronteira \underline{x}_p , e R é o coeficiente de reflexão da superfície. No caso de uma superfície rígida, em que $R = 1$, a pressão na superfície pode ser dada simplesmente como:

$$p(\underline{x}_p) = 2p_{inc}(\underline{x}_p, \underline{x}_0) \quad (5.15)$$

Segundo esta equação, a pressão na superfície é simplesmente o dobro da pressão incidente; por outro lado, tratando-se de uma superfície rígida, a velocidade de vibração na superfície será nula, pelo que $q(\underline{x}_p) = 0$. Desta forma, torna-se possível simplificar a equação (5.12), transformando-a em:

$$p(\underline{x}_p) = - \int_S [q^*(\underline{x}_p, \underline{x}) \times 2p_{inc}(\underline{x}_p, \underline{x}_0)] dS + p_{inc}(\underline{x}_p, \underline{x}_0) \quad (5.16)$$

De acordo com esta aproximação, a pressão sonora num qualquer ponto pode ser determinada sem necessidade de resolução de qualquer sistema, e torna-se apenas necessário o conhecimento do campo incidente gerado pela fonte que excita o meio acústico. Assim, a única dificuldade na implementação do método é a da realização das integrações necessárias na equação (5.16) ao longo de toda a fronteira. No entanto, estas podem ser realizadas por métodos numéricos usuais, como a integração de Gauss.

Note-se que, neste tipo de abordagem, se torna necessário assumir que a pressão sonora no tardo do elemento difusor é nula, uma vez que se assume que não chegará aí qualquer energia

incidente. Na realidade, esta limitação leva a que a aproximação de Kirchoff apenas seja válida nas altas frequências, não encontrando correspondência com a realidade se a largura do difusor não for muito grande e, sobretudo, se a frequência de excitação for baixa.

5.4. PROBLEMAS TRIDIMENSIONAIS

Os métodos numéricos atrás formulados podem ser também usados na resolução de problemas tridimensionais, com as necessárias adaptações. Em primeiro lugar, para este tipo de problemas, importa referir que a Helmholtz, usada na análise da propagação de ondas acústicas no domínio da frequência, se mantém válida na forma

$$\nabla^2 p(\underline{x}, k) + k^2 p(\underline{x}, k) = 0 \quad (5.25)$$

No entanto, para esta situação, o operador diferencial ∇^2 passará a tomar a forma

$$\nabla^2(\cdot) = \frac{\partial^2}{\partial x^2}(\cdot) + \frac{\partial^2}{\partial y^2}(\cdot) + \frac{\partial^2}{\partial z^2}(\cdot) \quad (5.26)$$

Da mesma forma, interessa referir que as soluções fundamentais a adoptar serão necessariamente distintas, e a solução fundamental e a sua primeira derivada assumem a seguinte forma:

$$G(\underline{x}, \underline{x}_0, k) = \frac{1}{4\pi r} e^{-ikr} \quad (5.27)$$

$$\frac{\partial G(\underline{x}, \underline{x}_0, k)}{\partial \vec{n}} = \frac{e^{-ikr}}{4\pi} \left(\frac{1}{r^2} + \frac{ik}{r} \right) \frac{\partial r}{\partial \vec{n}} \quad (5.28)$$

5.5. DEFINIÇÃO COMPUTACIONAL DE DIFUSORES OPTIMIZADOS COM FORMAS ORGÂNICAS

Conforme referido no início deste documento, grande parte das soluções de difusão sonora actualmente usadas baseiam-se em geometrias angulosas e em geometrias rígidas e, por vezes, muito condicionantes do ponto de vista arquitectónico. Tendo em consideração aquele que é o objectivo principal do trabalho de Tese que se pretendeu desenvolver, ou seja, a definição de difusores optimizados com formas orgânicas, julga-se importante, desde já, definir algumas possíveis estratégias para atingir essa finalidade.

Tratando-se de formas orgânicas, ou seja, geometrias suaves e curvilíneas com forma natural, o seu estudo deverá, necessariamente, passar pela concepção de uma estratégia suficientemente geral. Propõe-se, para tal, o uso de um conjunto de funções matemáticas designadas por

“funções de base radial” (usualmente designadas por RBF, do inglês *radial basis functions*) como base de interpolação entre um conjunto de pontos de controlo que, eles próprios, se situam na superfície do difusor.

Esta técnica de interpolação deriva do trabalho pioneiro de Roland Hardy [53] e retomada por Franke [54]. Várias adaptações do método proposto inicialmente por Hardy têm vindo a ser publicadas, fazendo uso de diferentes funções de base radial e pode-se encontrar em [55] uma extensa revisão destes trabalhos.

Embora exista um conjunto muito alargado de funções deste tipo que poderiam ser usadas, recorre-se, aqui, às funções do tipo MQ RBF (*Multi-Quadrics*) para ajudar na definição desta metodologia. Estas funções, tal como a generalidade das RBFs, dependem apenas da distância entre um ponto de origem (centro da RBF) e um ponto de destino e de um parâmetro livre, chamado de parâmetro de forma, sendo dadas por:

$$\phi(\underline{x}) = \sqrt{r^2 + c^2} \quad (5.29)$$

Hardy em [53] observou que estas funções conduziam a superfícies suaves e sem o comportamento oscilatório observado, por exemplo, na interpolação de Lagrange. Observou ainda que o tipo de superfície obtida era muito dependente do parâmetro de forma, e que condicionava significativamente a qualidade dos resultados obtidos. Neste trabalho, para a interpolação das curvas foi utilizado o parâmetro de forma $c = 0.1$.

Considerando um número NC de pontos de controlo, que definem a superfície do difusor, com coordenadas (x^i, y^i) , um possível esquema de interpolação pode ser assembled recorrendo a um conjunto de NC RBF, cada uma delas centrada num ponto de controlo, de forma a que:

$$\sum_{j=1}^{NC} A_j \phi_j(x^i) = y^i, \text{ para cada } i=1\dots NC \quad (5.30)$$

Aplicando a equação (5.30) a cada ponto de colocação, constrói-se um sistema de NC equações e NC incógnitas, cuja solução fornece as amplitudes de cada RBF, A_j .

Uma representação esquemática deste tipo de interpolação encontra-se representada na Figura 5.1. Nesta figura, 10 pontos de controlo são usados como pontos fixos a respeitar na superfície do difusor e, através destes pontos, faz-se passar uma curva suave. Na Figura 5.1a, os pontos de controlo apenas apresentam duas ordenadas possíveis, ou seja $y = 0.0$ ou $y = refv$ (sendo $refv$ um valor especificado à partida).

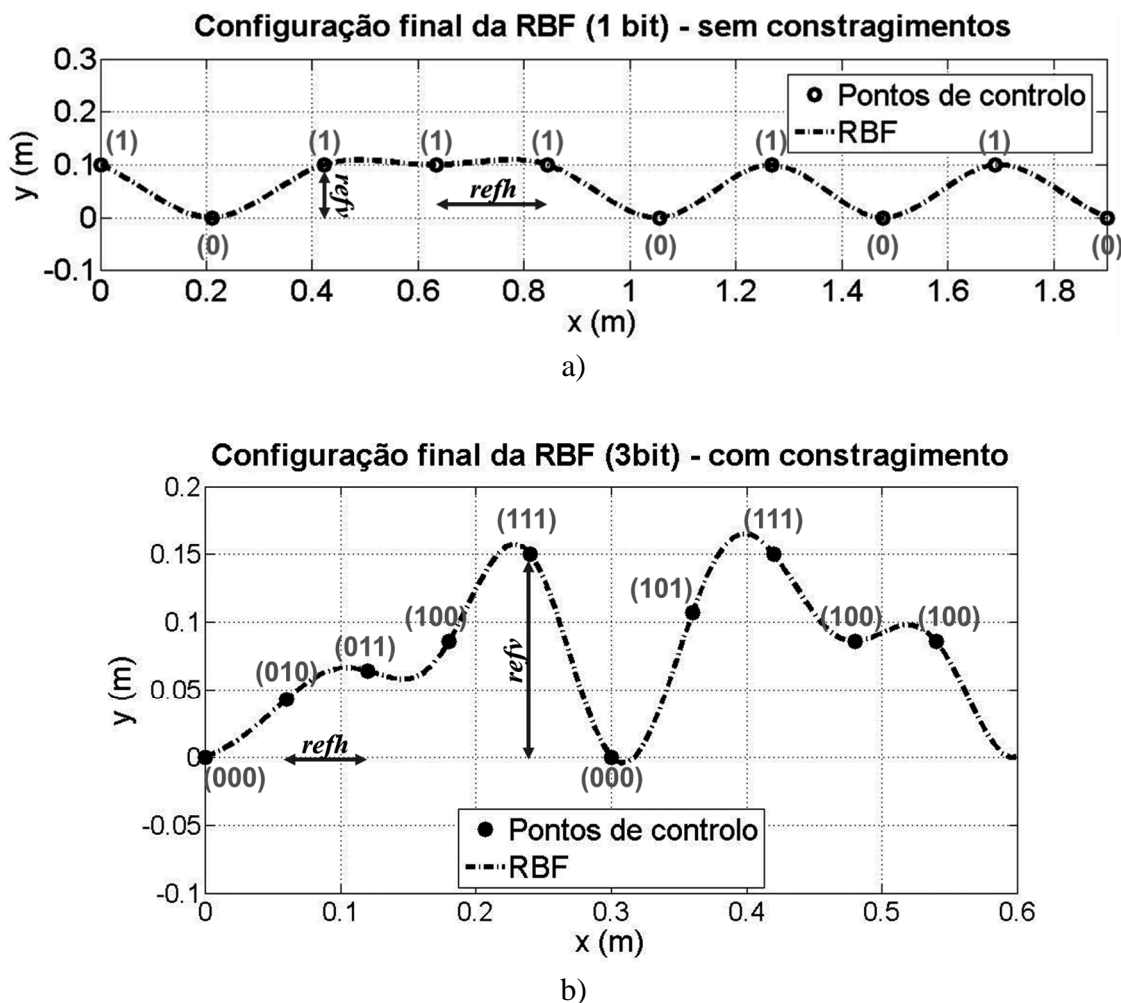


Figura 5.1 – Exemplos de interpolação com RBF passando por 10 pontos de controlo (a cinzento, entre parêntesis, codificação binária da altura dos pontos de controlo). a) Duas alturas possíveis (1 bit) e pontos extremos livres; b) Oito alturas possíveis (3 bits) e pontos extremos constrangidos.

A Figura 5.1b apresenta também uma curva definida por 10 pontos de controlo, contudo, estes podem tomar 8 alturas possíveis, entre $y = 0.0$ ou $y = refv$. Ao contrário da Figura 5.1a, cujos pontos extremos eram “livres”, podendo tomar um dos dois valores possíveis, nesta figura um ponto auxiliar (o 11º) é restringido a ter a mesma altura do primeiro ponto de controlo, e curva nesse ponto é obrigada a ter o mesmo declive que no 1º ponto de controlo.

Para ser possível uma análise numérica do comportamento acústico de uma superfície deste tipo, esta curva suave, que na realidade resulta de um somatório de curvas matematicamente simples, terá ainda que sofrer um tratamento adicional. Quer no caso da utilização do BEM, que na utilização da aproximação simplificada de Kirchoff, esta curva deverá ser discretizada num conjunto de segmentos, sempre com a preocupação de garantir um número mínimo de segmentos por comprimento de onda (ou seja, a discretização dependerá da frequência); neste trabalho usaram-se no mínimo 10 segmentos por cada comprimento de onda.

Com base na descrição das metodologias de análise atrás apresentadas, e na estratégia de definição de geometrias suaves proposta, é agora importante perceber de que forma se pode usar um algoritmo de otimização para tentar definir formas orgânicas de difusores otimizados. Um possível algoritmo de otimização encontra-se descrito na Figura 5.2, incorporando a utilização de um “algoritmo genético” como peça fundamental no processo de otimização.

Os algoritmos genéticos são inspirados na teoria da evolução de Darwin, que considera que quanto melhor um indivíduo se adaptar ao seu meio ambiente, maior será sua hipótese de sobreviver e gerar descendentes. Deste modo, a solução de um problema através de algoritmos genéticos utiliza um processo evolucionário, onde cada iteração é chamada de geração, e é composta por indivíduos mais aptos do que os da geração anterior. Os algoritmos genéticos distinguem-se dos outros métodos de otimização por trabalharem com a codificação dos parâmetros de entrada (e não com os próprios parâmetros), operarem um conjunto de indivíduos (população) em vez de apenas um “estado”, utilizarem uma função de custo (ou de mérito) para classificar os indivíduos e basearem-se em regras de iteração probabilísticas (operadores genéticos) para evoluir a população (as soluções).

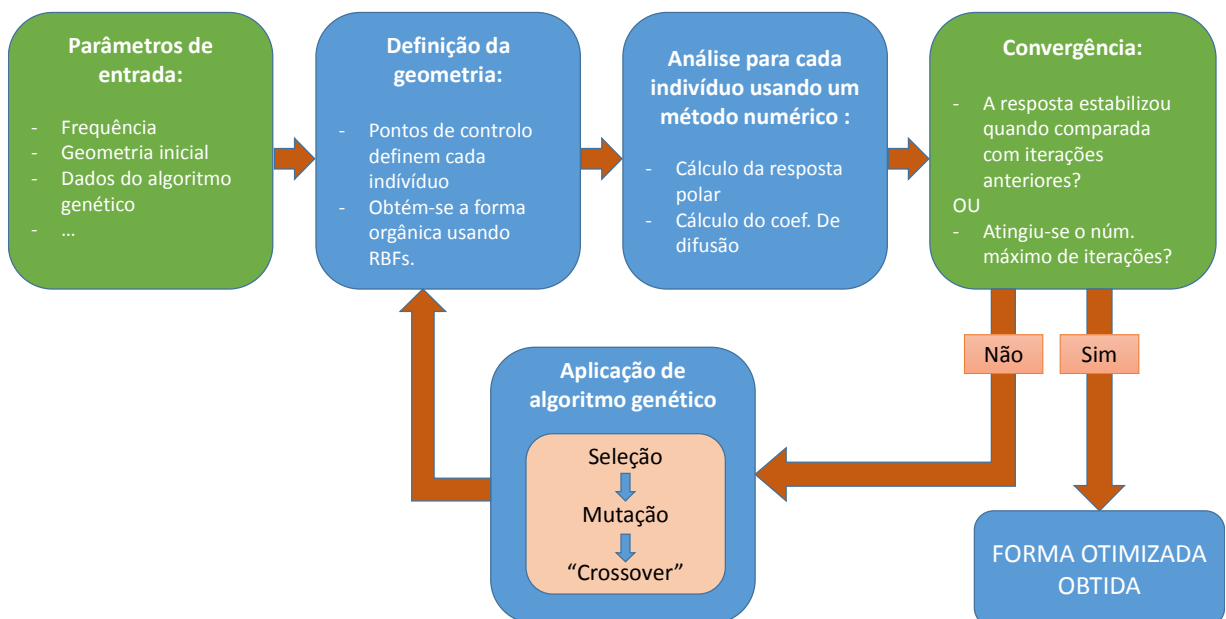


Figura 5.2 – Diagrama de fluxo do algoritmo de análise e otimização proposto.

Inicialmente, uma população de indivíduos (difusores) pode ser formada aleatoriamente ou ser fixa e as características de cada indivíduo são determinadas pelos seus genes. Ao desenhar difusores, os genes são simplesmente um conjunto de números que descrevem a superfície: pontos de controlo das RBF. No presente caso, como se estabeleceu que os pontos de controlo estão uniformemente distribuídos ao longo da largura do difusor, a codificação de cada

indivíduo é apenas referente à altura (“y”) de cada um deles. A codificação utilizada foi binária (como se verá adiante, foram utilizadas duas, “1 bit” e “3 bit”).

Cada indivíduo (ou a forma do difusor) possui um valor de aptidão (ou figura de mérito) que indica quão bem ele se comporta a dispersar o som: o coeficiente de difusão, que é avaliado numericamente. A selecção dos difusores que morrem sem deixar descendência pode ser feita aleatoriamente, com os menos adaptados (i.e., os piores difusores, aqueles com o coeficiente de difusão mais baixo) sendo os mais prováveis de não serem seleccionados.

Os indivíduos são ordenados de acordo com a aptidão (coeficiente de difusão) e são lhes atribuídas probabilidades decrescentes de serem seleccionados. A probabilidade de selecção é proporcional ao seu valor de aptidão (coeficiente de difusão), em relação ao somatório da aptidão de todos os indivíduos da população. Assim, quanto maior for a aptidão (coeficiente de difusão) de um indivíduo (difusor), maior é a probabilidade de ele ser seleccionado para a próxima geração. A escolha é feita então aleatoriamente de acordo com essas probabilidades, utilizando o mecanismo de “roulette wheel”. Dessa forma consegue-se escolher como pais os mais bem adaptados e novas populações são produzidas através da reprodução dos anteriores indivíduos seleccionados e a população idosa morre.

Muitas vezes, para evitar que os melhores indivíduos (os mais aptos, isto é, os que têm o maior coeficiente de difusão) não desapareçam da população (pois existe essa possibilidade), eles podem ser automaticamente colocados na próxima geração, através da reprodução “elitista”.

Os descendentes são produzidos por pares de pais reprodutores e possuem genes que são um “cruzamento” (“crossover”) dos genes de seus pais. Existem várias formas de fazer este cruzamento, a que foi implementada foi a recombinação em dois pontos: são seleccionados 2 pontos de corte no cromossoma (série binária que codifica a altura de cada um dos pontos de controlo das RBF) de cada um dos progenitores e tudo o que está entre estes dois pontos é trocado, gerando assim dois descendentes (que substituem os progenitores na nova população). Estes dois pontos são determinados aleatoriamente e a probabilidade de ocorrer efectivamente um cruzamento é controlada por uma “probabilidade de cruzamento”. Se essa probabilidade for de 100%, então toda a nova geração resulta do cruzamento dos progenitores seleccionados. Se for nula, todos os descendentes são constituídos por cópias exactas dos cromossomas dos progenitores seleccionados (não significando que a nova população seja a mesma pois os progenitores já passaram por um processo de selecção). Convém que essa probabilidade de cruzamento seja elevada, de forma que a convergência não seja lenta. Porém, não deverá ser demasiado elevada de forma a deixar uma parte da população antiga sobreviver de modo a não se perderem os indivíduos mais aptos.

Se tudo o que acontecer for uma combinação ou cruzamento dos genes dos pais, então o sistema nunca procura fora da população dos progenitores por melhores soluções. Para permitir mudanças dramáticas na população de difusores e impedir que a evolução estagne num máximo local, a “mutação” também é necessária. Este é um procedimento aleatório em que há uma

pequena probabilidade de qualquer gene na sequência da “criança” ser mudado aleatoriamente, ao invés de ser directamente proveniente dos pais. Essa “probabilidade de mutação” não deve ser muito elevada pois assim muitos cromossomas são alterados e a evolução torna-se essencialmente aleatória. No presente trabalho considerou-se este valor inversamente proporcional ao produto do número de pontos de controlo pelo número de bits utilizados para codificar a ordenada dos mesmos (como veremos em seguida, o espaçamento entre os pontos de controlo, que define as abcissas, é constante).

Através destes operadores genéticos, selecção, cruzamento (“crossover”) e mutação (e reprodução elitista), a adequação das sucessivas populações deve melhorar no processo de iterativo de optimização. Este processo iterativo continua até que seja atingido um número limite de gerações (de iterações) ou que a população se torne suficientemente adaptada, cujo difusor produzido com a melhor forma não se altere ao longo de várias gerações e, desse modo, possa ser classificado como óptimo.

Chama-se a atenção que a utilização de algoritmos genéticos pode não conduzir, de uma forma geral, a soluções únicas (máximos globais) mas a soluções óptimas (máximos locais) – esta convergência, como se verá no próximo capítulo, depende do universo de soluções possíveis, quanto menor for, mais vezes o sistema converge para uma dada solução.

No final, o processo de optimização proposto irá conduzir a uma geometria suave, optimizada para uma dada banda de frequência (ou bandas de frequências), e que permitirá um desempenho máximo nessa mesma banda.

5.6. AVALIAÇÃO INICIAL DO ALGORITMO DE OPTIMIZAÇÃO

5.6.1. INTRODUÇÃO

Nesta secção apresenta-se uma avaliação do algoritmo de optimização proposto. Como referido anteriormente, formas simples orgânicas (curvilíneas), definidas com base na utilização de funções de base radial (RBF), são optimizadas de modo a terem um elevado coeficiente de difusão. Assim, numa primeira parte, analisa-se a convergência do algoritmo de optimização e a influência dos diversos parâmetros de controlo. Para tal, e por uma questão de rapidez de análise, foi utilizada a aproximação Kirchoff, conforme descrita na Secção 5.3.2, para se obter o coeficiente de difusão para incidência normal, para uma banda de frequências de oitava. Nesta secção, consideram-se ainda apenas duas alturas possíveis para os pontos de controlo das RBF (codificação “1 bit”), $y=0$ m ou $y=refv$, valor definido pelo utilizador, e não são impostas quaisquer restrições geométricas aos pontos de controlo das extremidades da curva.

Para a população inicial, em vez de esta ser constituída por um determinado número de indivíduos definidos aleatoriamente, optou-se por todos esses indivíduos fossem uma superfície

plana unidimensional (um segmento de recta) de comprimento fixo, definidos por um conjunto de pontos de controlo. De seguida, avalia-se o “mérito” de cada indivíduo, calculando-se o coeficiente de difusão para a banda de frequências de oitava pré-definida pelo utilizador. Em função dos resultados obtidos, o algoritmo genético provoca alterações nos indivíduos, criando-se uma nova geração. Este ciclo repete-se até se atingir um valor para o coeficiente de difusão que não se altera de geração para geração ou, então, quando se atinge o número máximo de iterações (de gerações) previamente definido.

Nesta secção apresentam-se alguns casos de estudo que pretendem demonstrar a “robustez” do algoritmo de optimização proposto e apresentado na Figura 5.2. Assim, pretende-se avaliar como converge o método, qual o número de iterações (gerações) mínimo para se obter um valor óptimo, a influência do número de indivíduos que constitui a população, o número de pontos de controlo que o descrevem e a altura máxima que podem tomar.

Nesta avaliação preliminar do processo de optimização optou-se por utilizar a aproximação de Kirchoff, para se obter o coeficiente de difusão como figura de mérito (ou aptidão) de cada difusor (ou indivíduo), dada a maior rapidez, sabendo-se de antemão que os valores obtidos serão aproximações do valor “real”.

Também se optou por se estudar apenas uma banda de frequências de oitava, no caso concreto centrada nos 1000 Hz, e apenas para incidência normal.

Parte dos resultados que se apresentam nas secções seguintes constam do trabalho [56].

5.6.2. PARÂMETROS DE ENTRADA

Como referido anteriormente, os parâmetros de entrada são os seguintes:

- f : banda de frequência, em oitava, para a qual se pretende optimizar o coeficiente de difusão – nesta secção foi escolhida a banda dos 1000 Hz;
- $nfreq_bands$: o número de frequências discretas, na banda de frequência f , utilizadas para calcular o coeficiente de difusão;
- $controlpoint$: o número de pontos de controlo das RBF (como a dimensão do difusor é fixa a $L=1.90$ m, o nº de pontos de controlo define o espaçamento na horizontal, direcção x , $refh$) – ver Figura 5.1a;
- $refv$: altura máxima que cada um dos pontos de controlo das RBF pode tomar (na direcção y). Nesta secção só são possíveis duas alturas para os pontos de controlo, não sendo possível alturas intermédias – corresponde a uma codificação de 1 bit – ver Figura 5.1a. Como referido atrás, a configuração inicial foi $y=0.0$ para todos os pontos de controlo de cada individuo da população inicial, correspondendo a uma placa plana.

Nesta fase, o objectivo foi o de avaliar apenas a influência do número de indivíduos de uma população, $npop$, e o número de gerações, $ngen$, que define o número de iterações a realizar.

Para o cálculo do coeficiente de difusão, d , a fonte sonora foi posicionada a 0° (incidência normal) relativamente ao ponto médio do difusor, situada a uma distância de 500 m. Foram utilizados 181 receptores, igualmente espaçados (discretização angular de 1°), dispostos num arco de raio $r = 250$ m centrado no ponto médio do difusor. Por uma questão de rapidez, pois o esforço computacional é menor, foi utilizada a aproximação de Kirchoff, para se obter o coeficiente de difusão.

5.6.3. PARÂMETROS DE CONTROLO DO ALGORITMO GENÉTICO

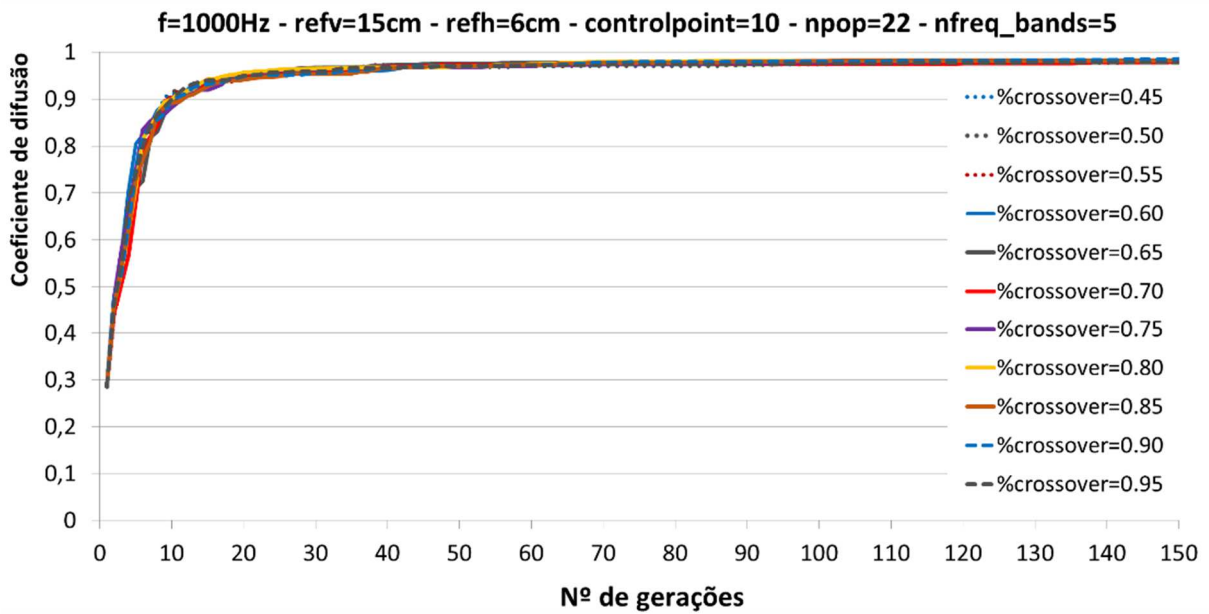
Os parâmetros de controlo do algoritmo genético (selecção, “*crossover*” e mutação) não foram objecto de estudo neste trabalho, pois, como se verá, o algoritmo genético converge rapidamente para soluções optimizadas, permanecendo constantes para todos os casos de estudo apresentados neste trabalho. Contudo, fez-se uma análise paramétrica para verificar se a “probabilidade de cruzamento” influencia quer a convergência quer o valor máximo obtido pelo algoritmo de optimização. Deste modo, escolhendo-se uma população de 22 indivíduos cuja forma inicial era uma superfície plana (com uma largura de 0.60 m), definidos por 10 pontos de controlo, igualmente espaçados na horizontal de 0.06 m e cuja altura máxima possível era de 0.15 m, fizeram-se 10 optimizações (“runs”) consecutivas, para a banda de oitava centrada nos 1000 Hz (e incidência normal), até se atingir 150 gerações (iteraões), para cada valor da “probabilidade de cruzamento” entre 0.45 e 0.95.

A figura 5.3 apresenta a evolução do valor médio dos 10 “runs” do coeficiente de difusão (para incidência normal) – as Figuras 5.3b) e 5.3c) são ampliações do gráfico apresentado na Figura 5.3a). Como se pode observar na referida figura, não se pode concluir que exista uma clara influência na evolução do sistema, quer no valor final (ao fim das 150 iteraões) quer na rapidez com que se atinge um valor próximo do valor final. Aliás, em quaisquer dos casos, em média, o sistema praticamente já convergiu para o valor final ao fim de apenas 50 iteraões. Também se pode observar que variação do valor médio final é bastante pequena, facto que é melhor observado na Figura 5.4.

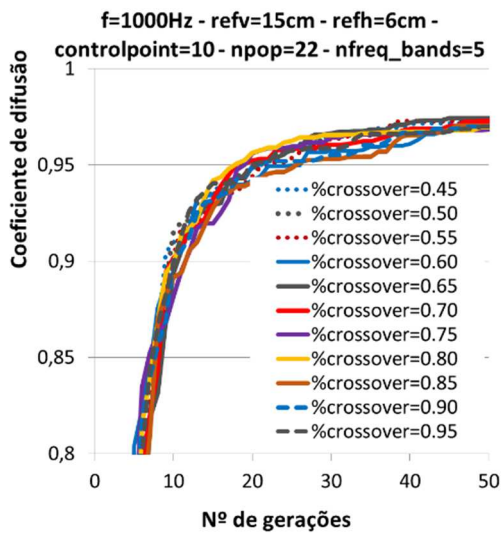
O gráfico apresentado na Figura 5.4a) representa a variação da média do coeficiente de difusão (para incidência normal) dos 10 “runs”, enquadrado pelo valor máximo e o valor mínimo obtido do coeficiente de difusão, em função da probabilidade de cruzamento (% *crossover*). A Figura 5.4b) apresenta a variação da dispersão relativamente ao valor médio, entendendo-se a dispersão como a diferença entre o valor máximo e o valor mínimo.

Como se pode observar, o valor médio (bem como o valor máximo) é praticamente constante, o que demonstra que, pelo menos neste estudo paramétrico, a “percentagem de cruzamento” tem pouca influência na evolução do sistema. Apesar do sistema não convergir para um valor único, a verdade é que a dispersão dos valores finais é bastante pequena, variando entre os 1.6%

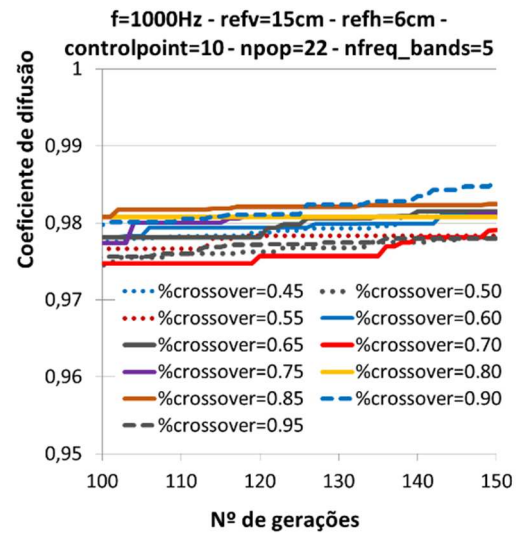
e os 4.1%. Deste modo, a escolha para este operador recaiu para aquele onde se obteve menor dispersão (% crossover=70%).



a)



b)



c)

Figura 5.3 – a) Análise da influência da probabilidade de cruzamento na convergência do algoritmo de otimização. b) Pormenor da Figura 5.3a) para as primeiras 50 gerações; c) Pormenor da Figura 5.3a) para as últimas 50 gerações.

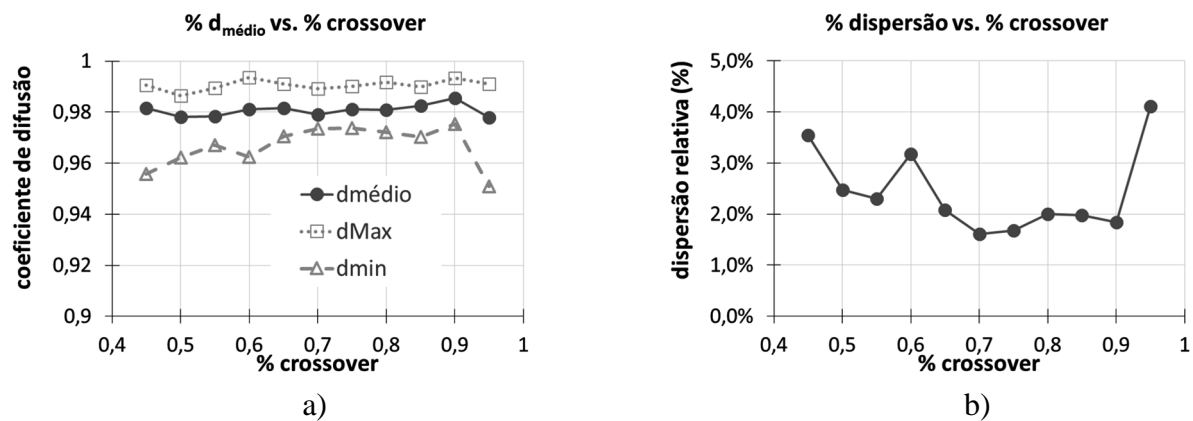


Figura 5.4 – a) Variação do valor médio do coeficiente de difusão (para incidência normal) do da optimização da Figura 5.3, enquadrada pelos valores máximos e mínimos do coeficiente de difusão obtidos nos 10 “runs” consecutivos; b) Variação da dispersão relativa (em %) – entende-se como dispersão relativa a diferença entre os valores máximo e mínimo do coeficiente de difusão obtidos em vários “runs” relativamente à média obtida.

Relativamente à “probabilidade de mutação”, sabendo-se que esta deverá ser relativamente baixa de modo que a busca não se torne aleatória, decidiu-se que fosse inversamente proporcional ao número de bits necessários para codificar cada indivíduo (difusores). Para tal, é preciso especificar o número de pontos de controlo das RBF, assim como a sua posição. Como se admitiu que os pontos de controlo são uniformemente distribuídos na horizontal (eixo dos $xx's$), para codificar cada ponto de controlo basta codificar a altura dos mesmos. Nesta secção a altura de cada ponto de controlo só pode ter dois estados, ou é nula ($y=0$ m) ou toma um valor definido pelo utilizador, ou seja, apenas é necessário 1 bit por cada ponto de controlo para definir o “cromossoma” de cada indivíduo (números a cinzento na Figura 5.1a). Porém, no capítulo seguinte, utilizaram-se 3 bits para definir a altura de cada ponto de controlo (que faz com que cada ponto de controlo possa tomar oito alturas diferentes, entre $y=0$ e o valor máximo definido pelo utilizador) – ver Figura 5.1b. Quer isto dizer que, neste caso, a “probabilidade de mutação” é 3 vezes menor que no caso de 1 bit!

Resta acrescentar que, para se garantir que os dois melhores indivíduos de cada geração passam para a geração seguinte, foi implementada a “selecção elitista”.

5.6.4. CONVERGÊNCIA

A primeira análise efectuada foi à convergência da optimização, para um máximo local d_{max} . Para tal, foram executados vários testes consecutivos (“runs”) sem alterar qualquer parâmetro de entrada (acima identificados) e, em seguida, foi verificada a configuração final (RBF) e o coeficiente de difusão máximo obtido. A Figura 5.5 ilustra os resultados obtidos para 3 testes cujo nº de iterações (ou nº de gerações - *ngen*) foi de 20, 30 e 40. No primeiro caso, fizeram-se

3 “runs” consecutivos sem alterar qualquer parâmetro. No segundo caso, fizeram-se 6 “runs” e, no último caso, foram executados 3 “runs”. O outro parâmetro do algoritmo genético foi $n_{pop} = 8$ (nº de indivíduos de uma população). A altura dos pontos de controlo das RBF foi de $refv = 8.5\text{ cm}$, o nº de pontos de controlo foi $controlpoint = 20$ (que define um espaçamento horizontal entre eles de $refh = 10\text{ cm}$). A banda de frequências foi a $f = 1000\text{ Hz}$, tendo sido utilizadas 5 frequências discretas, igualmente espaçadas nessa banda de frequências ($nfreq_bands = 5$).

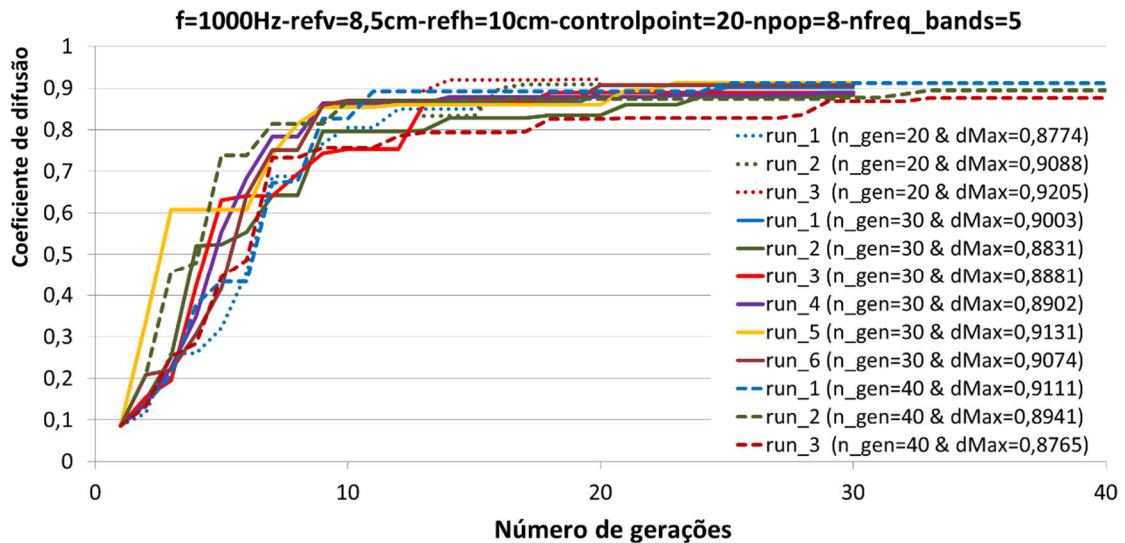


Figura 5.5 – Convergência de vários testes consecutivos.

Uma vez mais, pode-se observar na referida figura, que o processo de otimização exibe alguma variabilidade e não conduz a um valor máximo único do coeficiente de difusão, embora a dispersão dos resultados seja pequena, cerca de 4% relativamente à média dos valores. Este é um comportamento típico da otimização por algoritmos genéticos. Julga-se que este comportamento poderá ser melhor controlado (reduzindo a dispersão) se se aumentar o número de gerações. Contudo, depende muito da dimensão do espaço das soluções, que é tanto maior quanto maior for o número de pontos de controlo e o número de bits utilizados para codificar a altura de cada um deles.

Na Figura 5.6, podem-se observar as configurações finais (RBF) obtidas nos testes realizados com $n_{gen} = 40$ da figura acima. Embora as configurações finais sejam diferentes, elas exibem formas semelhantes, que aparentemente podem corresponder a desvios laterais ou inversões.

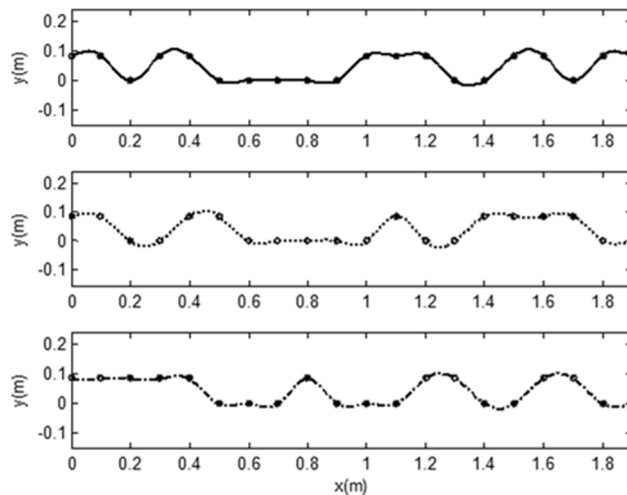


Figura 5.6 – Exemplos de configurações finais (RBF) para os “runs” com $ngen = 40$ da Figura 5.5. Em cima: $d_{max} = 0.9111$; no centro: $d_{max} = 0.89411$; em baixo: $d_{max} = 0.8765$ (valores obtidos através da aproximação de Kirchoff).

A Figura 5.7 exhibe os resultados de alguns testes numéricos, a fim de observar a influência do número de gerações (número de iterações), $ngen$. A partir desta figura, pode-se inferir que 40 gerações ($ngen = 40$) são suficientes (para as condições indicadas na figura) para se obter as soluções óptimas ou quase-óptimas (d_{max} praticamente não varia).

A Figura 5.8 mostra como evolui a população de 8 indivíduos no caso das 80 iterações constantes na figura anterior. Pode-se verificar que, neste caso, rapidamente se obtém o indivíduo mais apto e que depois, através da selecção elitista, se consegue manter um par de indivíduos mais aptos, enquanto as restantes operações genéticas vão tentando gerar novos indivíduos, sem no entanto, ao longo de aproximadamente 60 iterações, o conseguirem.

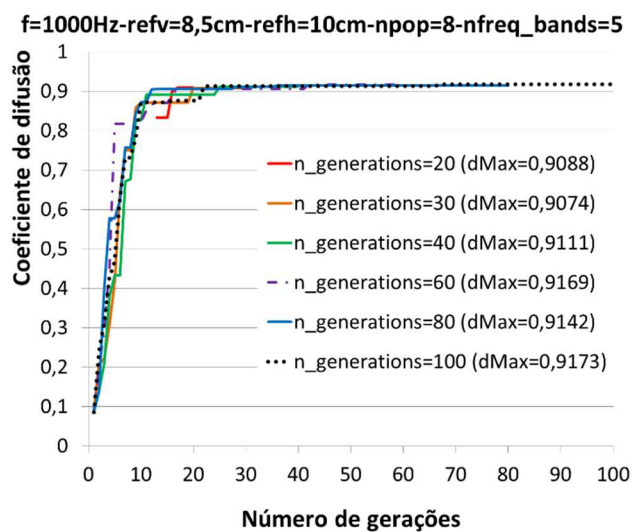


Figura 5.7 – Evolução do coeficiente de difusão máximo d_{max} para diferentes números de gerações (iteraões).

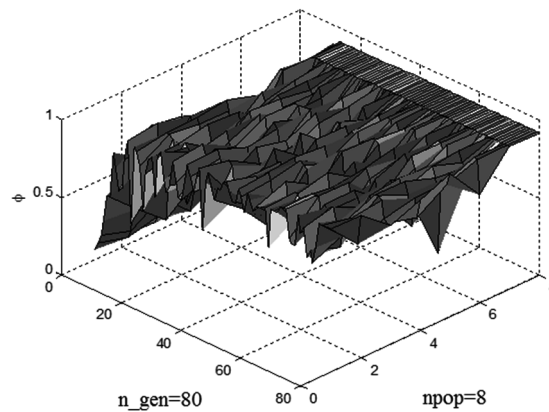


Figura 5.8 – Evolução do coeficiente de difusão máximo, d_{max} , no processo de otimização para diferentes número de indivíduos da população.

5.6.5. INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE INDIVÍDUOS, n_{pop}

De modo a testar a influência da dimensão da população, n_{pop} , no valor do coeficiente de difusão máximo, foram realizados, para os mesmos dados de entrada da subsecção anterior, 100 iterações para duas populações com número de indivíduos diferentes, com 8 elementos e com 24 elementos. Os resultados da média do coeficiente de difusão (calculado como anteriormente, recorrendo à aproximação de Kirchoff) são apresentados na Figura 5.9.

Pode-se observar, nessa figura, que o número de indivíduos que compõe a população promove uma mais rápida convergência para o valor “final” (entenda-se aqui como “final” o valor do coeficiente de difusão atingido à centésima iteração). Contudo, como também se pode observar, esse valor máximo é quase idêntico para as duas populações.

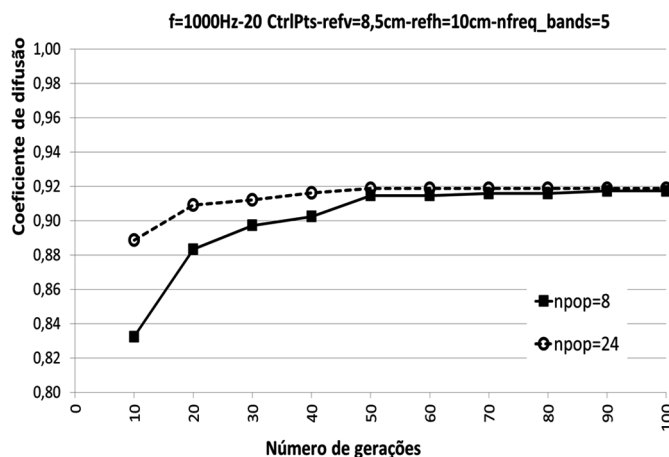


Figura 5.9 – Evolução do coeficiente de difusão (médio) para duas populações com 8 e 24 indivíduos

Na Figura 5.10 pode-se observar o valor obtido para o coeficiente de difusão (médio, pois foram realizados vários “runs”) ao fim de 20, 30 e 40 iterações, para populações com 8, 16, 24, 32 e 48 indivíduos. Também a partir desta figura se consegue concluir que o aumento do número de indivíduos de uma população promove uma mais rápida evolução do coeficiente de difusão. Contudo, a diferença entre o coeficiente de difusão à 40ª iteração para a população mais pequena (com 8 indivíduos) e a população maior (com 48 indivíduos) é bastante pequena (menos de 3%, respectivamente 0.902 e 0.928).

A Figura 5.11 mostra a evolução do coeficiente de difusão (médio), onde se tomou como referência o valor do mesmo à 40ª iteração. Também aqui se confirma que a dimensão da população promove uma mais rápida convergência para um máximo.

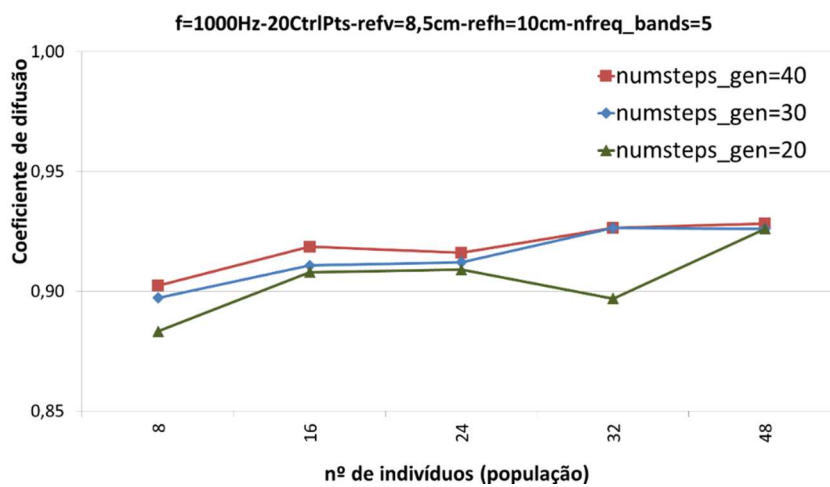


Figura 5.10 – Coeficiente de difusão (médio) obtido ao fim de 20, 30 e 40 iterações, para populações com diferentes números de indivíduos.

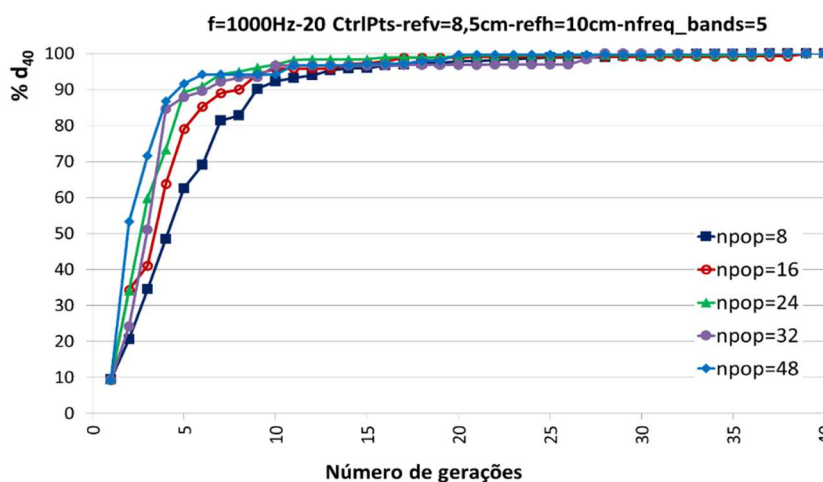


Figura 5.11 – Evolução do coeficiente de difusão relativamente ao seu valor à 40ª iteração para populações com dimensões diferentes (*npop* de 8 a 48).

5.6.6. INFLUÊNCIA DA ALTURA DOS PONTOS DE CONTROLO DAS RBF, $refv$

A altura dos pontos de controlo é um parâmetro importante da configuração geométrica. Para mostrar a importância desta altura $refv$ fez-se um estudo paramétrico realizando-se sucessivas otimizações, partindo de uma população inicial de 8 indivíduos, $n_{pop} = 8$, para a banda de oitava centrada em $f = 1000 \text{ Hz}$ (até 40 iterações) e com 20 pontos de controlo ($controlpoint = 20$). Uma vez que o tamanho do difusor é mantido fixo (1.90 m), corresponde a um espaçamento entre pontos de controlo de $refh = 0.1 \text{ m}$. Nas próximas figuras apresentam-se as configurações obtidas, bem como o diagrama polar para $f = 1000 \text{ Hz}$, e a Figura 5.33 resume os resultados obtidos neste estudo paramétrico. Uma vez mais, o coeficiente de difusão é calculado recorrendo à aproximação de Kirchoff.

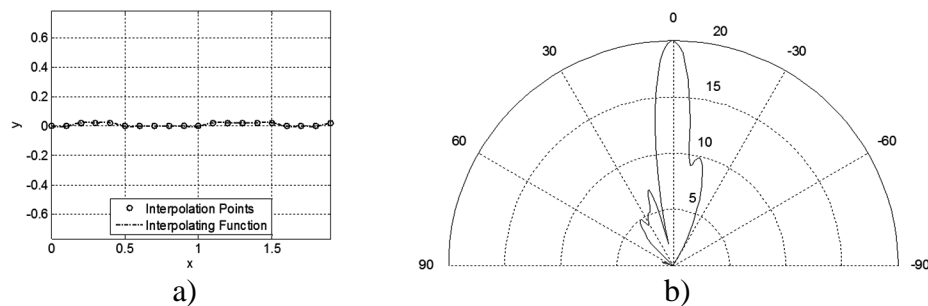


Figura 5.12 – Otimização para $refv = 2.125 \text{ cm}$. a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000 \text{ Hz} - d_{max} = 0.116$.

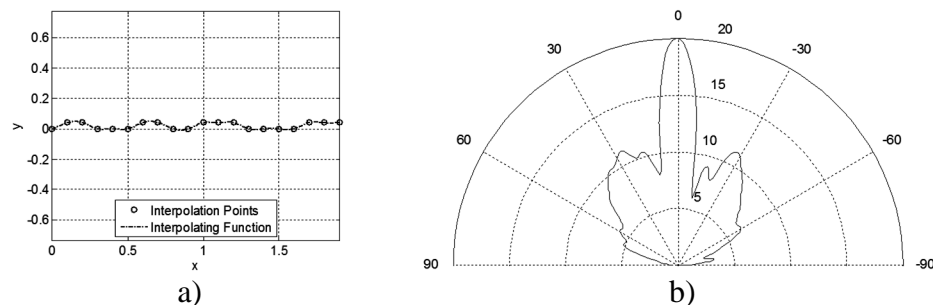


Figura 5.13 – Otimização para $refv = 4.25 \text{ cm}$. a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000 \text{ Hz} - d_{max} = 0.261$.

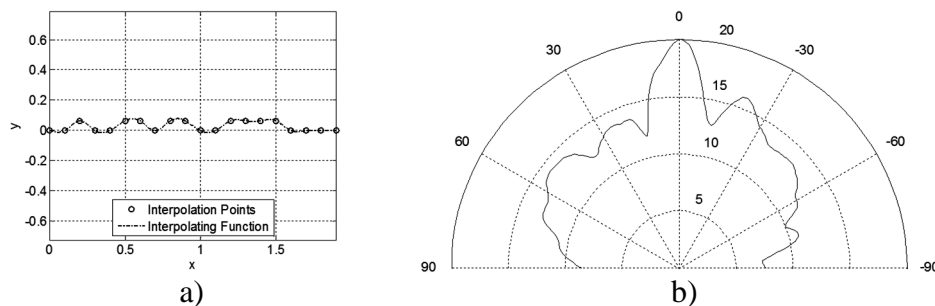


Figura 5.14 – Otimização para $refv = 6.375 \text{ cm}$. a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000 \text{ Hz} - d_{max} = 0.646$.

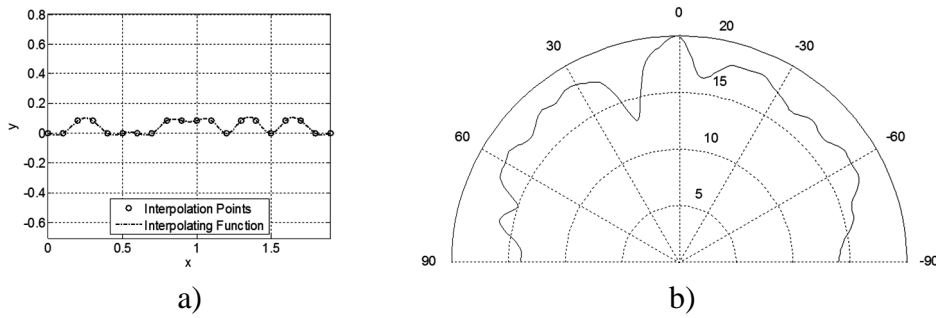


Figura 5.15 – Otimização para $refv = 8.5\text{ cm}$. a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000\text{ Hz}$ – $d_{max} = 0.912$.

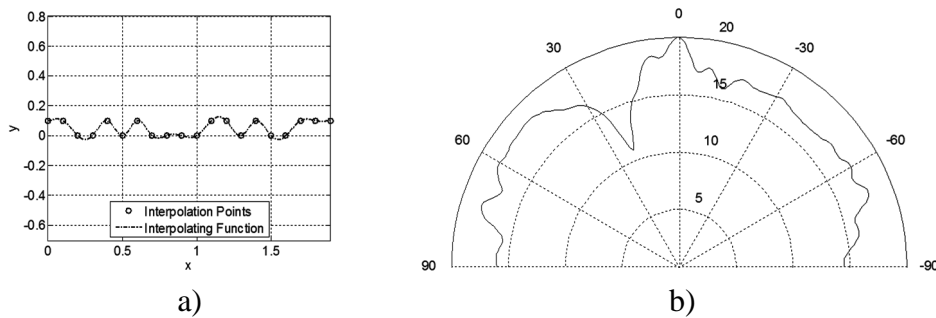


Figura 5.16 – Otimização para $refv = 10.0\text{ cm}$. a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000\text{ Hz}$ – $d_{max} = 0.922$.

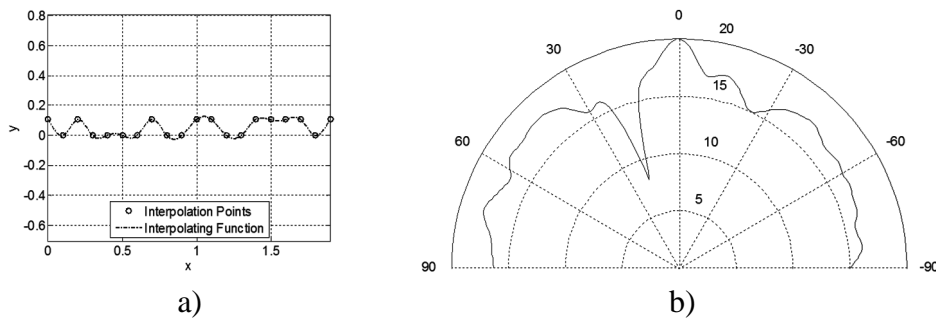


Figura 5.17 – Otimização para $refv = 10.625\text{ cm}$. a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000\text{ Hz}$ – $d_{max} = 0.912$.

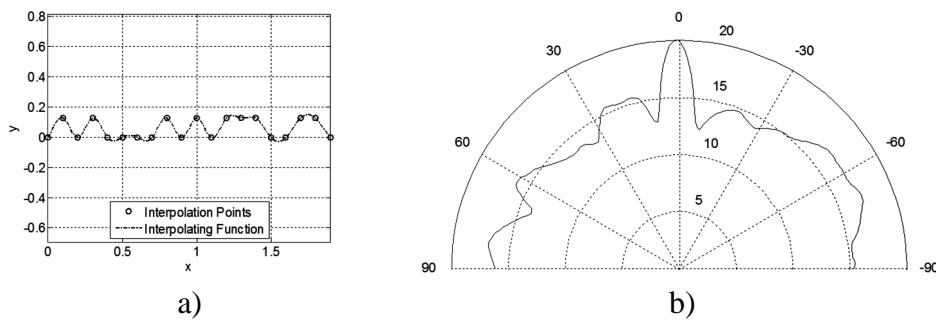


Figura 5.18 – Otimização para $refv = 12.75\text{ cm}$. a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000\text{ Hz}$ – $d_{max} = 0.875$.

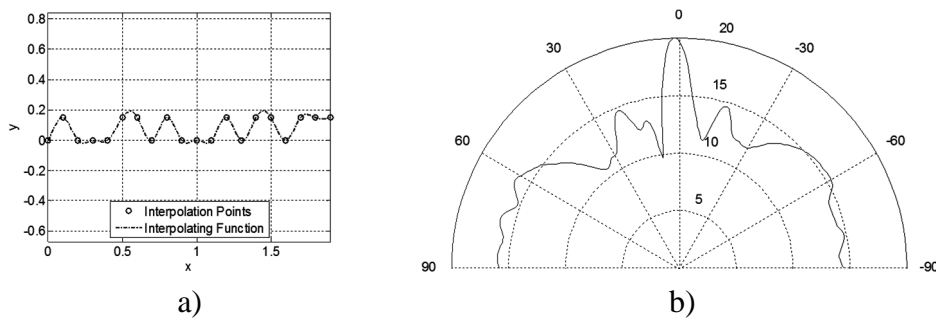


Figura 5.19 – Otimização para $refv = 14.875\text{ cm}$. a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000\text{ Hz}$ – $d_{max} = 0.801$.

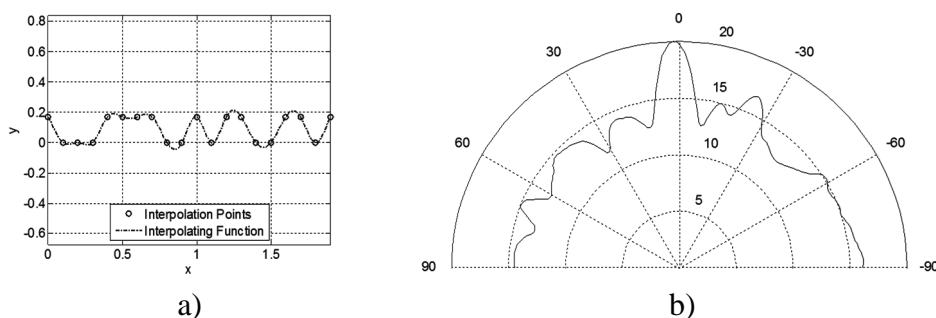


Figura 5.20 – Otimização para $refv = 17.0\text{ cm}$. a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000\text{ Hz}$ – $d_{max} = 0.818$.

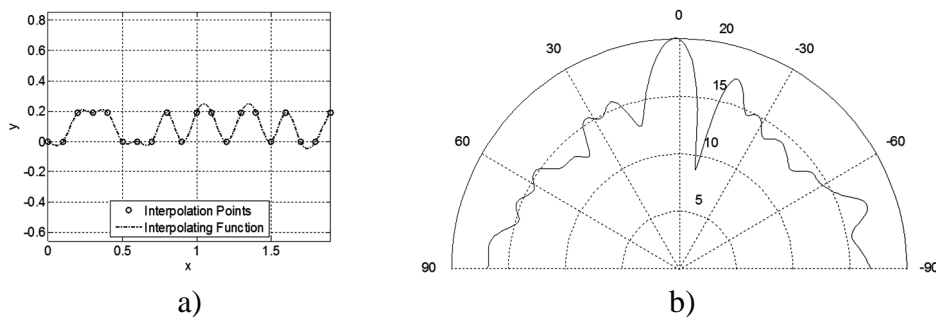


Figura 5.21 – Otimização para $refv = 19.125\text{ cm}$. a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000\text{ Hz}$ – $d_{max} = 0.825$.

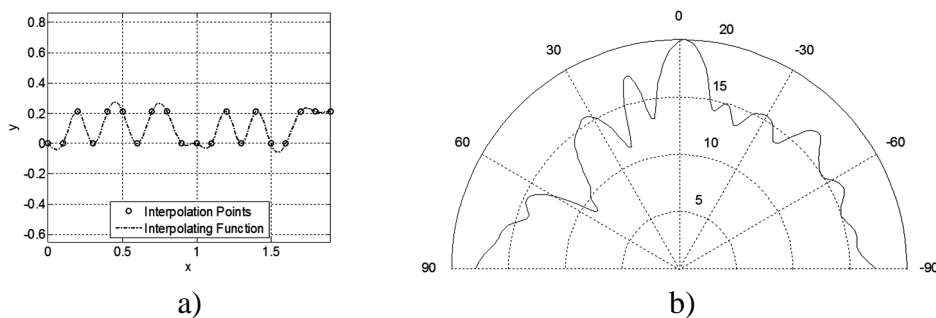


Figura 5.22 – Otimização para $refv = 21.25\text{ cm}$. a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000\text{ Hz}$ – $d_{max} = 0.808$.

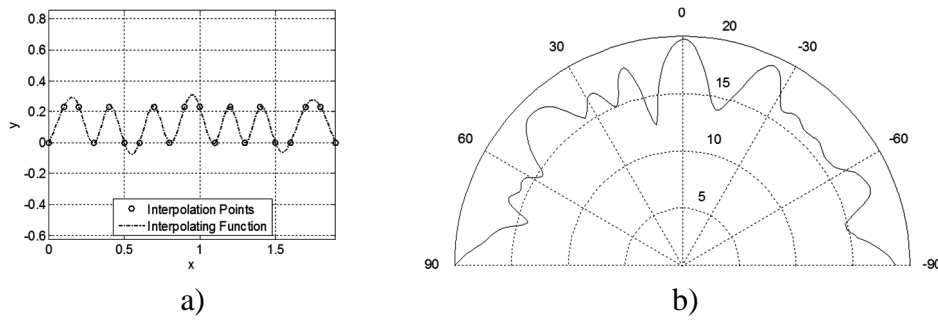


Figura 5.23 – Otimização para $refv = 23.375$ cm. a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000$ Hz – $d_{max} = 0.888$.

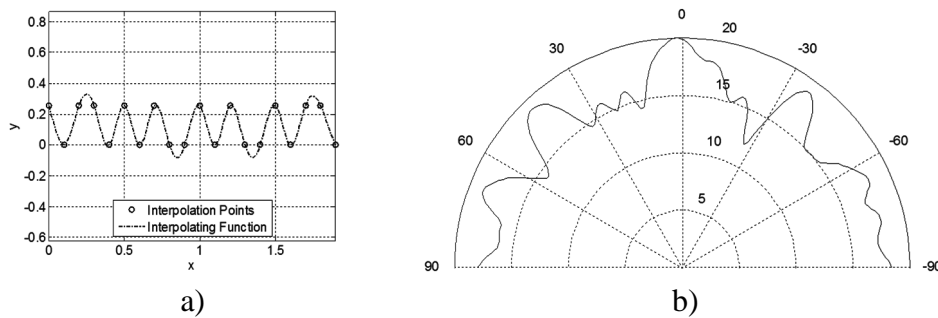


Figura 5.24 – Otimização para $refv = 25.5$ cm. a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000$ Hz – $d_{max} = 0.888$.

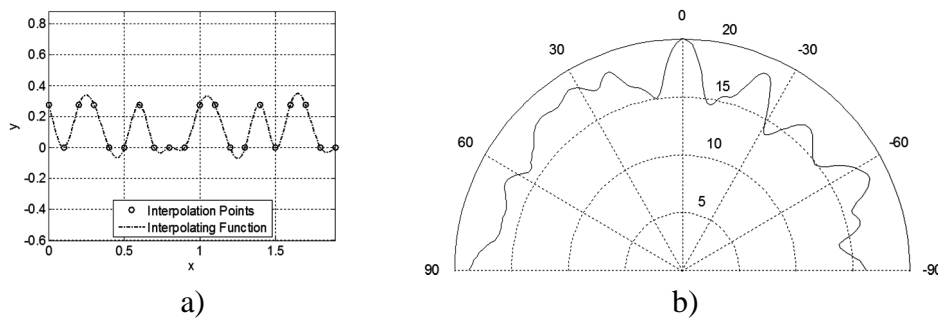


Figura 5.25 – Otimização para $refv = 27.625$ cm. a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000$ Hz – $d_{max} = 0.910$.

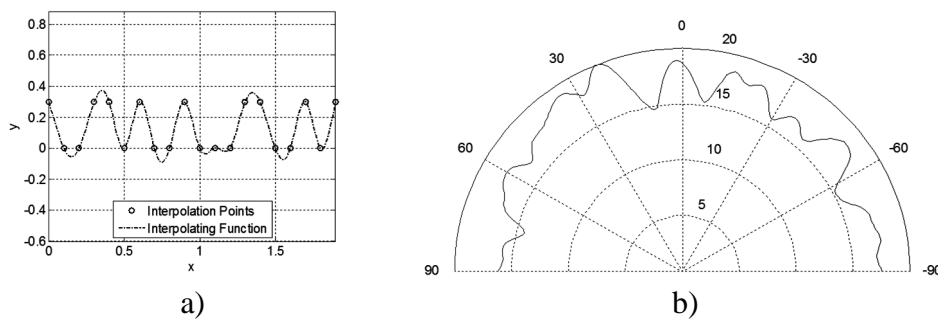


Figura 5.26 – Otimização para $refv = 29.75$ cm. a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000$ Hz – $d_{max} = 0.926$.

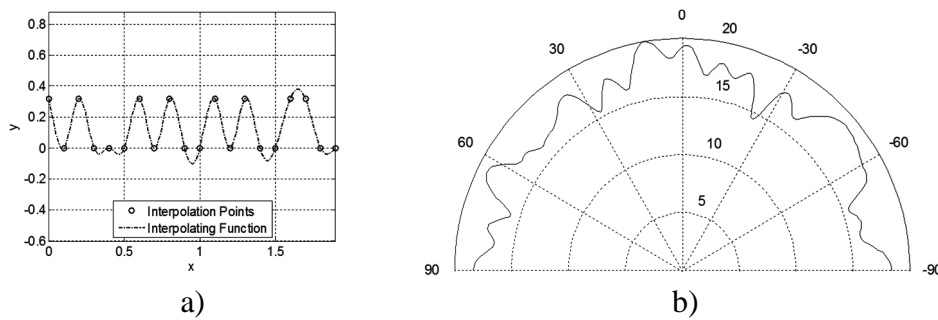


Figura 5.27 – Otimização para $refv = 31.875\text{ cm}$. a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000\text{ Hz}$ – $d_{max} = 0.939$.

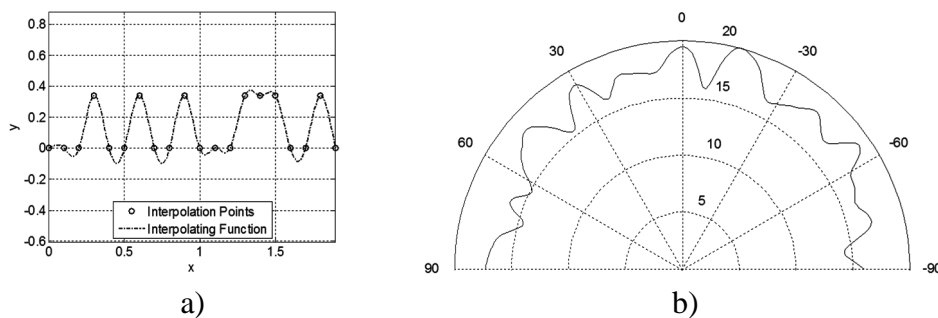


Figura 5.28 – Otimização para $refv = 34.0\text{ cm}$. a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000\text{ Hz}$ – $d_{max} = 0.919$.

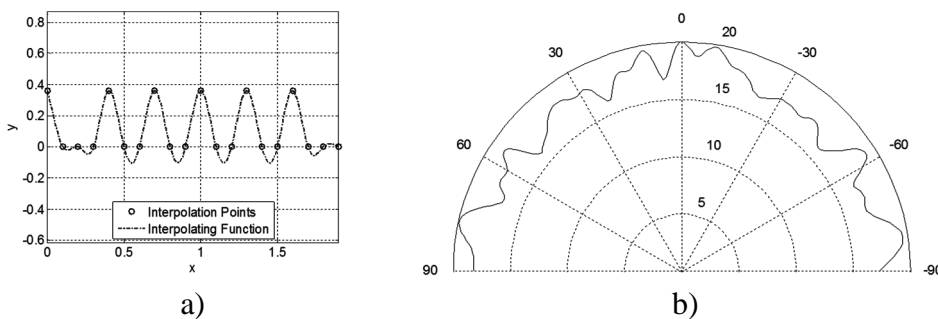


Figura 5.29 – Otimização para $refv = 36.73\text{ cm}$. a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000\text{ Hz}$ – $d_{max} = 0.947$.

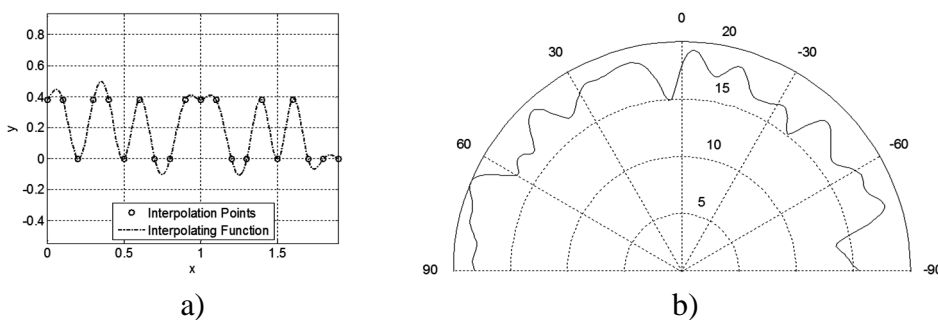


Figura 5.30 – Otimização para $refv = 38.25\text{ cm}$. a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000\text{ Hz}$ – $d_{max} = 0.927$.

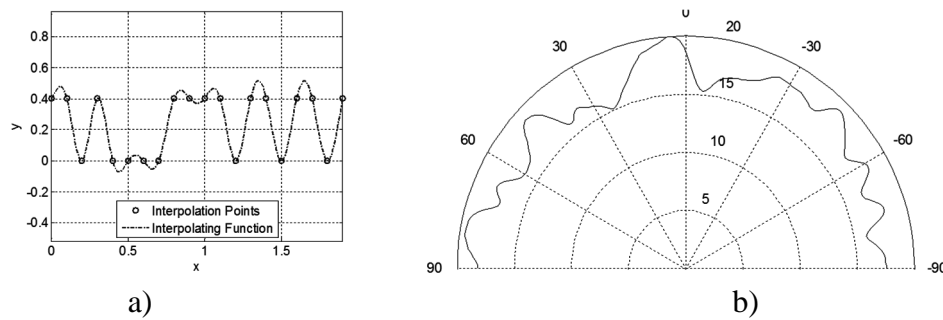


Figura 5.31 – Otimização para $refv = 40.375 \text{ cm}$. a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000 \text{ Hz}$ – $d_{max} = 0.922$.

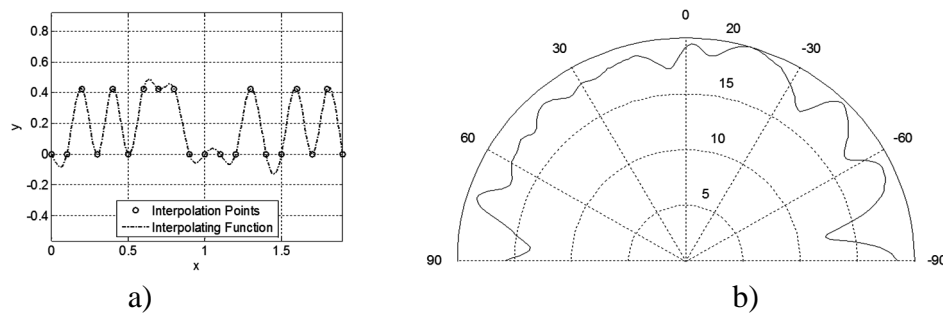


Figura 5.32 – Otimização para $refv = 42.5 \text{ cm}$. a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000 \text{ Hz}$ – $d_{max} = 0.924$.

A Figura 5.33 resume os resultados obtidos, apresentando a variação de d_{max} com a altura dos pontos de controlo das RBF. Claramente, se a altura é muito pequena, quando comparada com o comprimento de onda ($\lambda = 0.34 \text{ m}$), o difusor tem um desempenho pobre; quando $refv$ atinge $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda ($\lambda = 0.085 \text{ m}$) obtém-se uma excelente difusão, com d_{max} a atingir valores ligeiramente acima de 0.9. É interessante notar que uma nova redução de d_{max} ocorre quando a altura é metade do comprimento de onda, após o que o desempenho parece estabilizar. Este comportamento pode ser atribuído à interacção construtiva/destrutiva entre as várias reflexões.

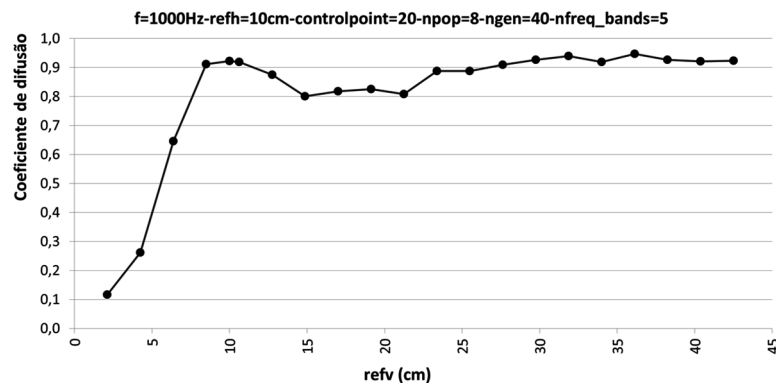


Figura 5.33 – Influência da altura dos pontos de controlo das RBF ($refv$) para otimização na banda de oitava de 1000 Hz.

Tendo em atenção a análise realizada para a banda de oitava centrada nos 1000 Hz, fez-se uma rápida análise paramétrica (com apenas 20 iterações) para outras bandas de oitava. A Figura 5.34 mostra os resultados obtidos para as bandas de oitava dos 500 Hz, 2000 Hz e 4000 Hz (mostra-se ainda, como comparação, os resultados obtidos na banda dos 1000 Hz). Refira-se que os resultados apresentados não correspondem a uma média de vários “runs” mas sim apenas a uma única otimização e que os valores para o coeficiente de difusão foram, uma vez mais, obtidos através da aproximação de Kirchoff.

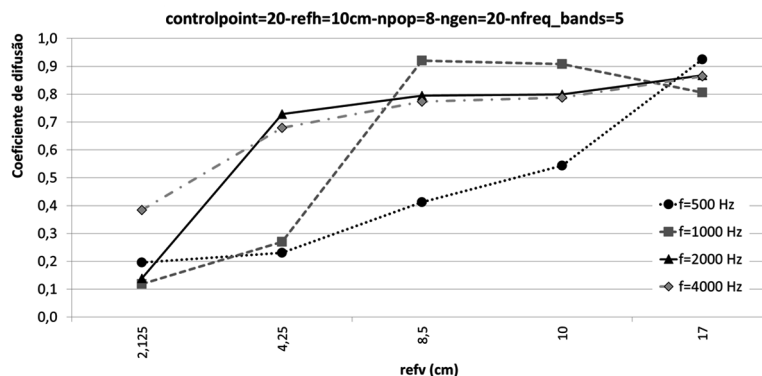


Figura 6.31 – Influência da altura dos pontos de controlo das RBF ($refv$).

Como se pode observar na figura acima, para as frequências mais baixas é necessário ter uma altura mais elevada para os pontos de controlo de modo a se obter mais difusão, e para as frequências mais altas já se consegue ter mais capacidade de reflexões difusas com menores alturas para os pontos de controlo.

5.6.7. INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE PONTOS DE CONTROLO DAS RBF, $controlpoint$

Para se avaliar a influência do número de pontos de controlo das RBF, realizou-se um estudo paramétrico, partindo de uma população inicial de 8 indivíduos, $npop = 8$, fazendo-se sucessivas otimizações para a banda de oitava de 1000 Hz (até 40 iterações) e com a altura máxima $refv = 0.1 m$. Uma vez que o tamanho do difusor é mantido fixo (1.90 m), o aumento do número de pontos de controlo irá levar a um menor espaçamento entre eles, e, assim, as variações da geometria são mais acentuadas. Nas próximas figuras apresentam-se as configurações obtidas, bem como a polar para $f = 1000 Hz$.

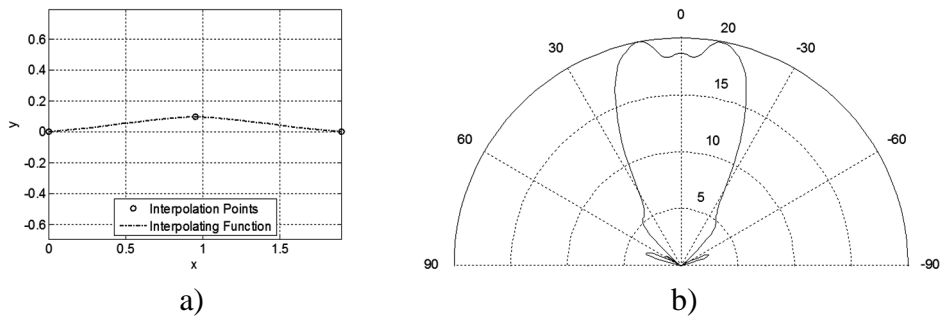


Figura 5.35 – Otimização para $Controlpoint = 3$ ($refh = 95$ cm). a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000$ Hz – $d_{max} = 0.291$.

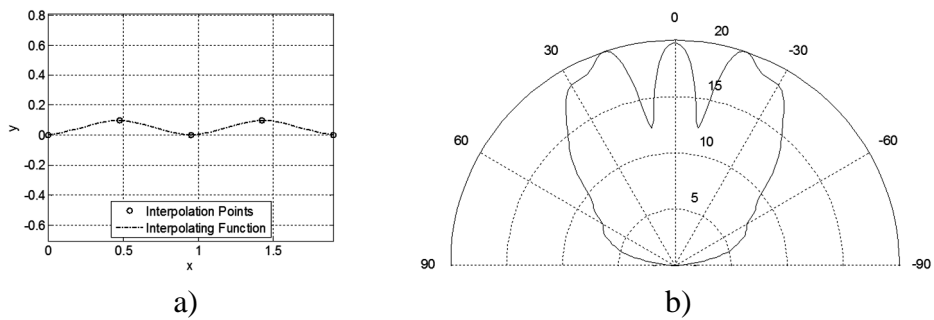


Figura 5.36 – Otimização para $Controlpoint = 5$ ($refh = 47.5$ cm). a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000$ Hz – $d_{max} = 0.488$.

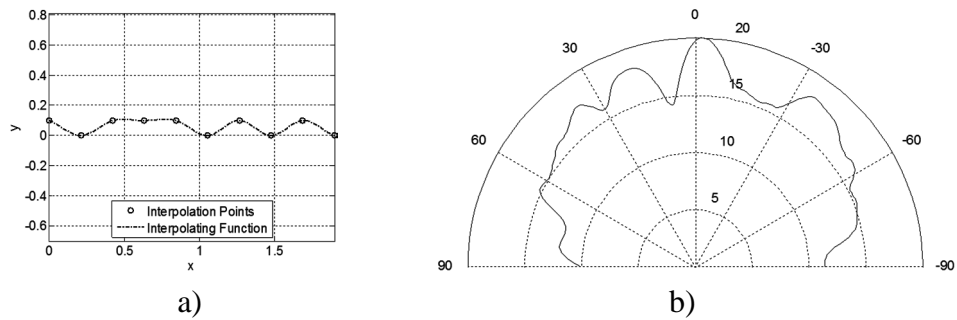


Figura 5.37 – Otimização para $Controlpoint = 10$ ($refh = 21.11$ cm). a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000$ Hz – $d_{max} = 0.824$.

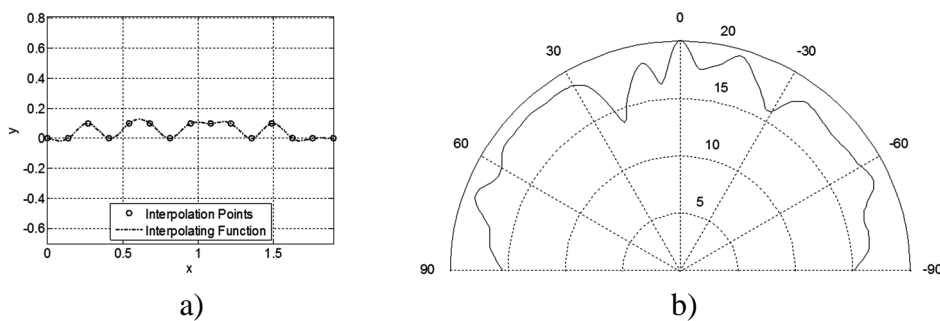


Figura 5.38 – Otimização para $Controlpoint = 15$ ($refh = 13.57$ cm). a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000$ Hz – $d_{max} = 0.943$.

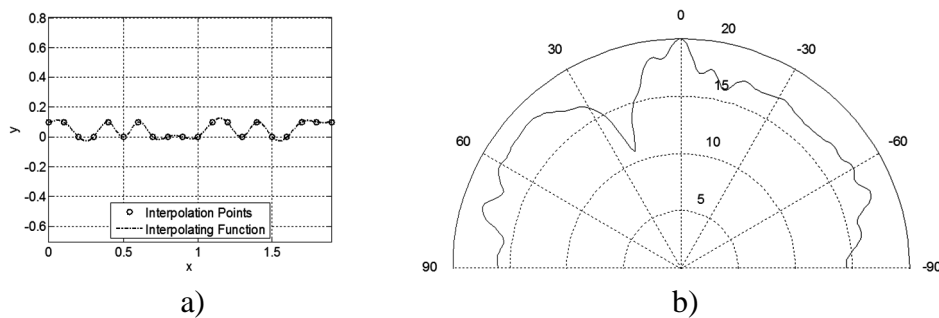


Figura 5.39 – Otimização para $Controlpoint = 20$ ($refh = 10.00\text{ cm}$). a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000\text{ Hz}$ – $d_{max} = 0.922$.

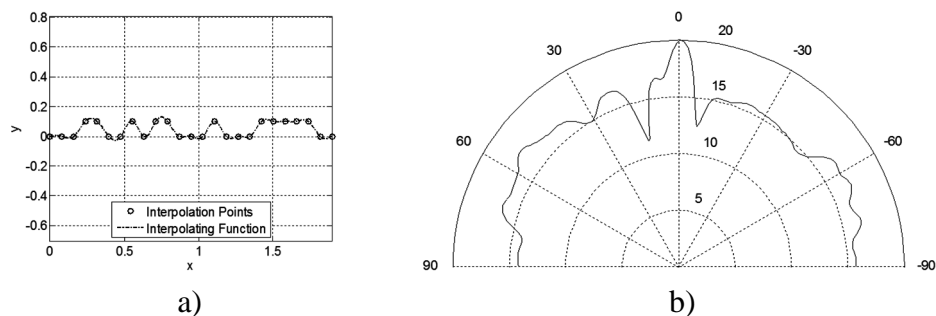


Figura 5.40 – Otimização para $Controlpoint = 25$ ($refh = 7.92\text{ cm}$). a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000\text{ Hz}$ – $d_{max} = 0.911$.

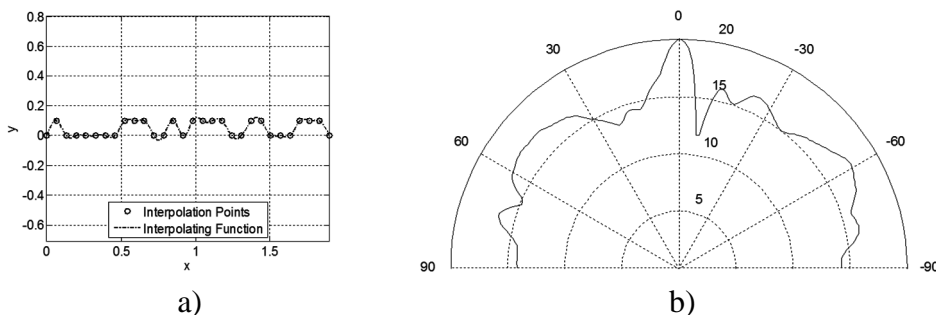


Figura 5.41 – Otimização para $Controlpoint = 30$ ($refh = 6.3\text{ cm}$). a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000\text{ Hz}$ – $d_{max} = 0.898$.

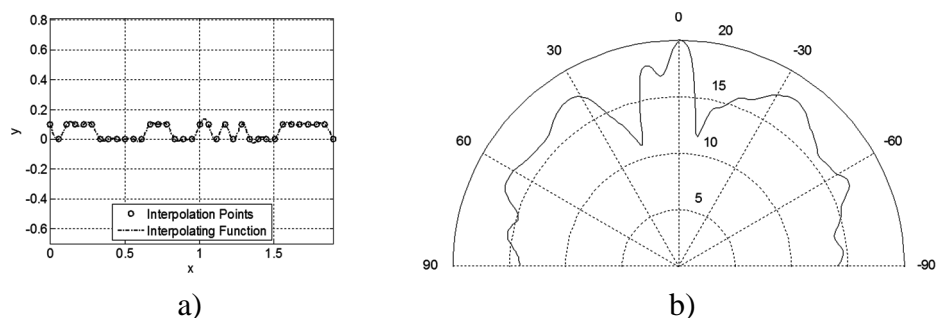


Figura 5.42 – Otimização para $Controlpoint = 35$ ($refh = 5.59\text{ cm}$). a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000\text{ Hz}$ – $d_{max} = 0.884$.

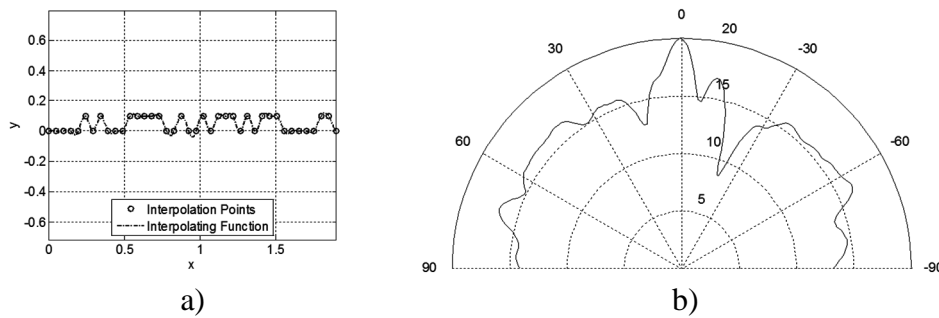


Figura 5.43 – Otimização para $Controlpoint = 40$ ($refh = 4.87\text{ cm}$). a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000\text{ Hz}$ – $d_{max} = 0.875$.

A Figura 5.44 resume os resultados obtidos para este estudo paramétrico. A partir da observação da figura pode-se verificar que 15 pontos de controlo, $controlpoint = 15$ (que corresponde a um $refh = 0.135\text{ m}$), devem ser utilizados para definir uma superfície suficientemente irregular que produza reflexões difusas máximas. É expectável que, à medida que se consideram frequências mais altas, mais pontos de controlo deverão ser utilizados para gerarem irregularidades compatíveis com o comprimento de onda – esse estudo será realizado nas próximas secções.

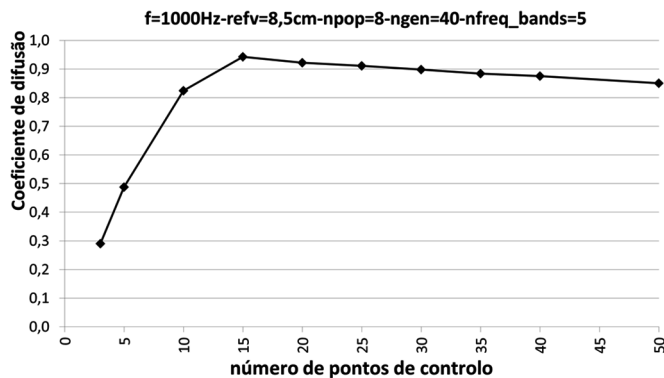


Figura 5.44 – Influência do número de pontos de controlo das RBF ($controlpoint$).

5.6.8. INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE FREQUÊNCIAS DISCRETAS UTILIZADAS PARA O CÁLCULO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO, $nfreqbands$

Para se avaliar de forma breve a influência do número de frequências discretas utilizadas no cálculo do coeficiente de difusão respeitante à banda de oitava para a qual se pretende otimizar, realizou-se um estudo paramétrico fazendo variar esse parâmetro de entrada para 5, 7 e 12 frequências, para uma otimização na banda de oitava dos 1000 Hz, para um difusor definido por 20 pontos de controlo, cuja altura pode tomar o valor de 0 cm ou de 10 cm, e com uma largura total de 1.90 m (correspondendo a um afastamento entre pontos de controlo também de 10 cm). Para o processo de otimização foi definida uma população de 8 indivíduos e a

otimização foi parada quando se atingiram as 40 gerações (iterações). Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 5.45 a 5.47.

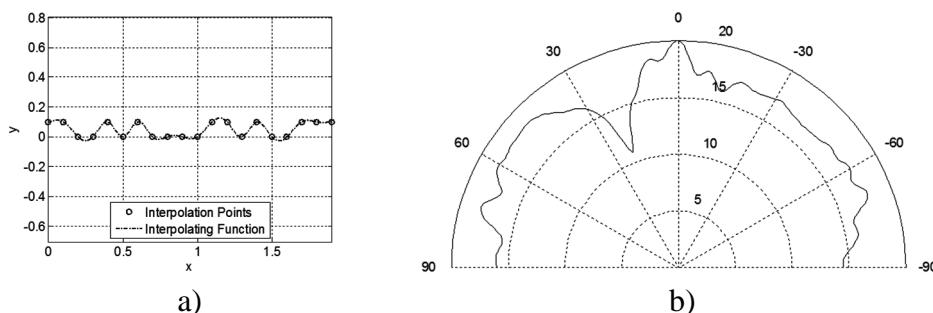


Figura 5.45 – Otimização para $f = 1000 \text{ Hz}$, $refv = 10 \text{ cm}$, $controlpoints = 20$ para $nfreqbands = 5$. a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000 \text{ Hz}$ – $d_{max} = 0.922$

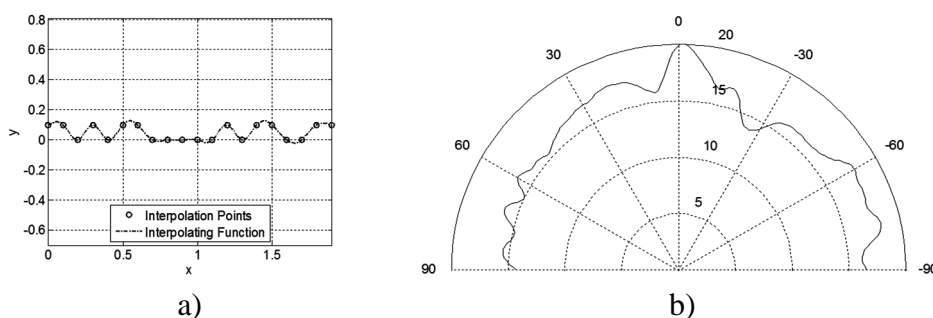


Figura 5.46 – Otimização para $f = 1000 \text{ Hz}$, $refv = 10 \text{ cm}$, $controlpoints = 20$ para $nfreqbands = 7$. a) Configuração geométrica; b) Polar para $f = 1000 \text{ Hz}$ – $d_{max} = 0.915$

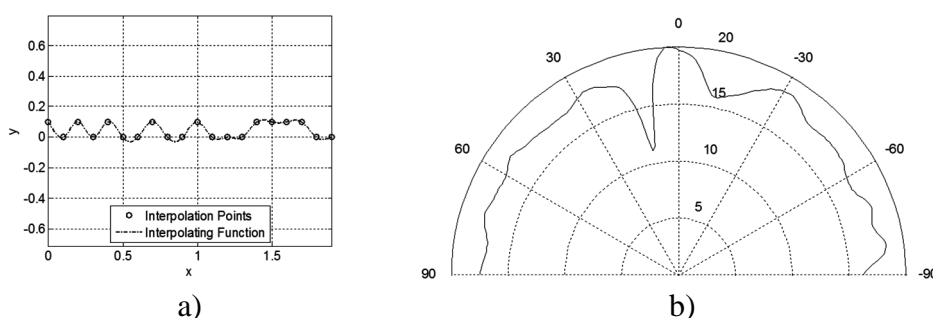


Figura 5.47 – Otimização para $f = 1000 \text{ Hz}$, $refv = 10 \text{ cm}$, $controlpoints = 20$ para $nfreqbands = 12$. a) Config. geométrica; b) Polar para $f = 1000 \text{ Hz}$ – $d_{max} = 0.952$

A Figura 5.48 apresenta o coeficiente de difusão calculado, utilizando 5 frequências discretas em cada banda de terço de oitava, recorrendo à aproximação de Kirchoff. A figura apresenta ainda, para efeitos de comparação, o coeficiente de difusão de uma placa plana com a mesma dimensão dos difusores (1.90 m), calculado do mesmo modo que os três difusores. Como se pode observar no gráfico referente à análise em bandas de oitava, os três difusores apesar de terem diferentes formas, apresentam coeficientes de difusão na banda de frequência de

otimização bastante semelhantes. Todos eles apresentam um bom desempenho nas 3 bandas de terço de oitava que compõem a banda de oitava dos 1000 Hz. Mesmo analisando o gráfico em bandas de terços de oitava, os coeficientes de difusão também são bastantes parecidos. Desta forma, pode-se concluir que fazer a otimização utilizando apenas 5 frequências discretas é uma opção válida pois o tempo de computação é ligeiramente menor e os resultados são semelhantes.

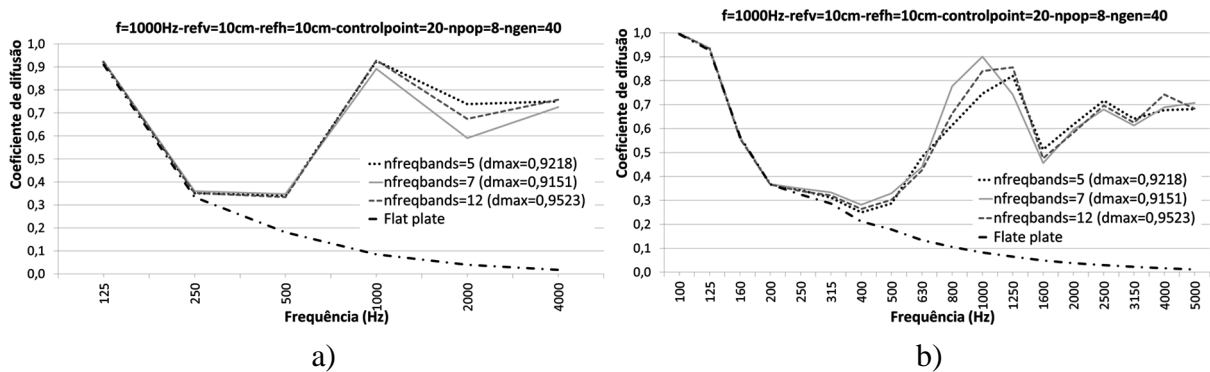
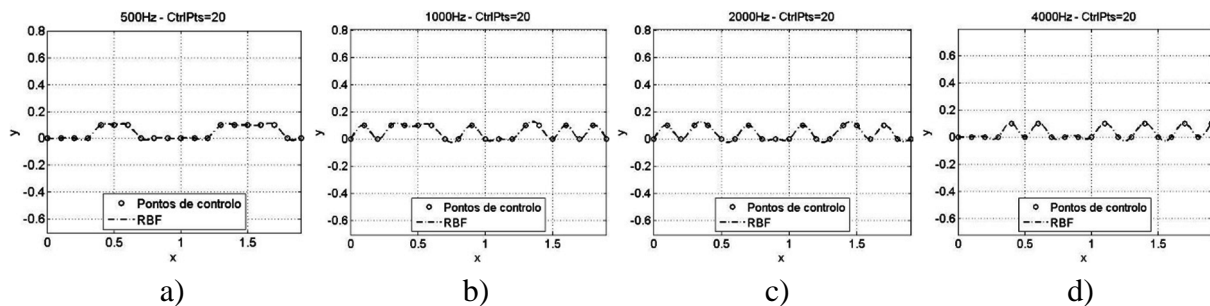


Figura 5.48 – Influência do número de frequências discretas (*nfreqbands*) utilizadas na otimização. Coeficiente de difusão: a) Bandas de oitava; b) Bandas de 1/3 oitava.

5.6.9. COEFICIENTE DE DIFUSÃO

Em seguida, nesta análise preliminar verifica-se se as formas obtidas através do processo de otimização proposto atingem os objectivos da otimização, isto é, se correspondem a superfícies com elevado coeficiente de difusão nas respectivas bandas de oitava. Deste modo, dos resultados apresentados na Figura 5.34, escolheram-se 4 difusores (com comprimento de 1.90 m) que foram otimizados, para incidência normal, com 20 pontos de controlo cuja altura máxima é $refv = 10\text{ cm}$ e calcularam-se os coeficientes de difusão. Os resultados obtidos apresentam-se na Figura 5.49.



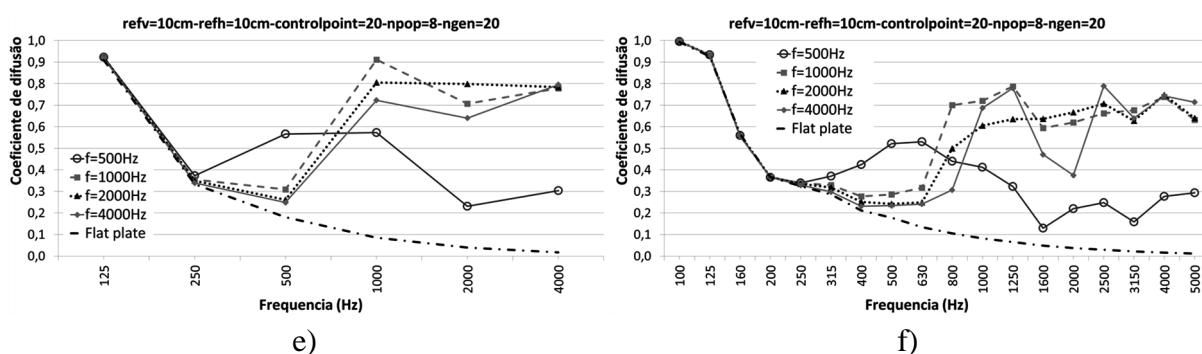


Figura 5.49 – Resultados obtidos da optimização para 20 pontos de controlo, $refv = 10\text{ cm}$, e 20 iterações (com ref^a à Figura 5.34). Formas optimizadas para a banda de oitava: a) $f=500\text{ Hz}$; b) $f=1000\text{ Hz}$; c) $f=2000\text{ Hz}$; d) $f=4000\text{ Hz}$. Coeficientes de difusão em: e) bandas de oitavas; f) 1/3 oitavas.

Como era expectável, a optimização para frequências mais baixas conduz a formas com patamares com maior largura enquanto para frequências maiores se obtêm superfícies mais irregulares.

Analisando-se os resultados obtidos para o coeficiente de difusão, pode-se dizer que, de uma forma geral, os difusores obtiveram resultados elevados nas bandas de oitava para as quais foram optimizados e que são os melhores nas respectivas bandas de optimização.

Os valores máximos não são idênticos aos obtidos no algoritmo de optimização, pois para o cálculo do gráfico da Figura 5.49f) foram utilizadas 5 frequências discretas para o cálculo em cada banda de terços de oitava e no algoritmo de optimização foram apenas utilizadas 5 frequências discretas em cada banda de oitava. Na Figura 5.49, está ainda representado o coeficiente de difusão de uma placa plana de dimensões comparáveis às superfícies optimizadas. Por comparação, pode-se, pois, concluir que estas superfícies conduzem a bons difusores sonoros.

5.6.10. APROXIMAÇÃO DE KIRCHOFF VERSUS BEM

Nesta análise preliminar, resta examinar se os resultados obtidos no processo de optimização utilizando a aproximação de Kirchoff para determinar o coeficiente de difusão correspondem também a valores elevados quando calculamos mais realisticamente o problema utilizando o BEM na avaliação do coeficiente de difusão.

A Figura 5.50 apresenta o coeficiente de difusão normalizado dos 4 difusores optimizados da Figura 5.49. Lembra-se que esses difusores foram optimizados para bandas de oitava, com 20 pontos de controlo cujo afastamento entre eles é de 10 cm e a altura máxima também é de 10 cm.

Como se pode observar, os resultados obtidos com a aproximação de Kirchoff são bastante diferentes dos resultados mais precisos (BEM), com excepção dos obtidos para o difusor otimizado para a banda dos 500 Hz. De uma forma genérica, as maiores discrepâncias entre as duas abordagens numéricas surgem a partir das bandas de frequência de terço de oitavas que pertencem à banda de oitava dos 1000 Hz.

Por outro lado, também se pode inferir, da observação dos 8 gráficos da Figura 5.50, que, de um modo geral, a aproximação de Kirchoff sobrestima o valor do coeficiente de difusão.

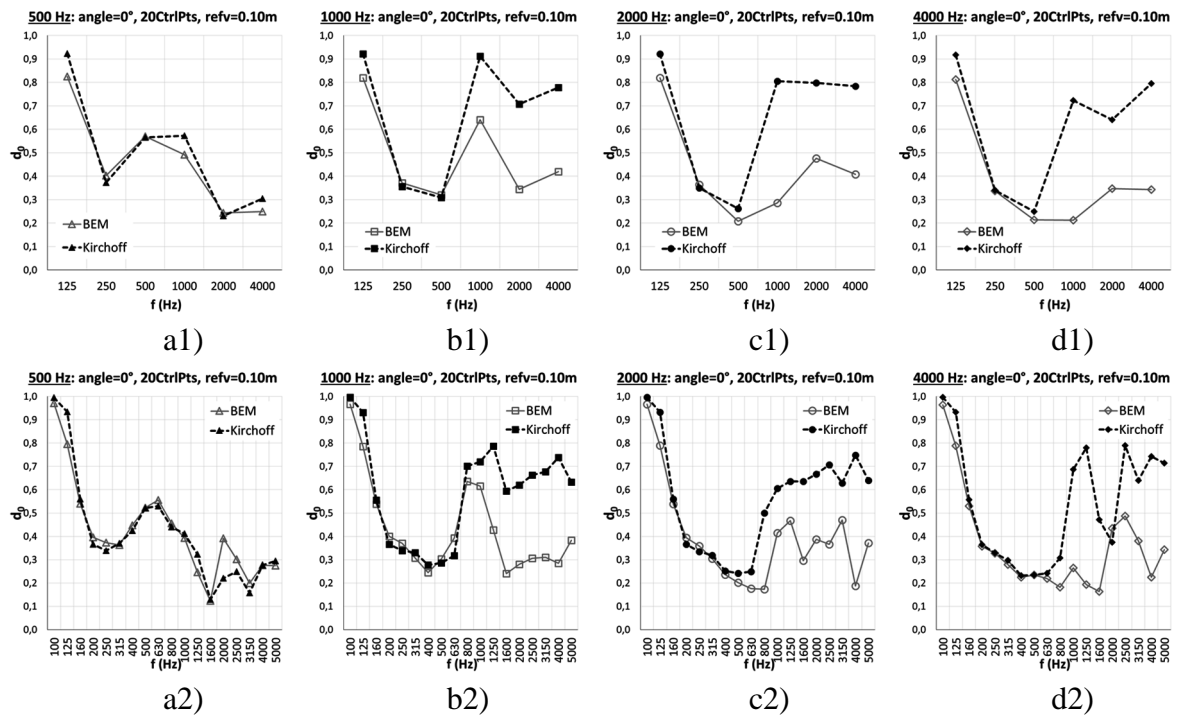


Figura 5.50 – Comparação dos resultados para o coeficiente de difusão obtidos através da aproximação de Kirchoff e BEM em bandas de oitava (#1) e em 1/3 de oitava (#2). Difusores otimizados para a banda de oitava: a#) $f=500\text{Hz}$; b#) $f=1000\text{ Hz}$; c#) $f=2000\text{ Hz}$; d#) $f=4000\text{ Hz}$.

O único difusor cujos resultados são semelhantes, o difusor otimizado para a banda dos 500 Hz, Figura 5.49a), é de todos o que apresenta menos irregularidades, sendo constituído por patamares, reduzindo desta forma a interacção entre os diversos elementos da superfície.

Para verificar se a altura que os pontos de controlo pode influenciar a discrepância entre os métodos numéricos (na verdade, tratou-se de verificar se a aproximação de Kirchoff é válida), avaliam-se dois conjuntos de difusores cujas alturas dos pontos de controlo são pequenas ($refv = 4.25\text{ cm}$) e relativamente grandes ($refv = 17\text{ cm}$). Para essas duas alturas, optimizaram-se 4 difusores, respectivamente, para as bandas de oitava dos 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz e 4000 Hz. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 5.51 e 5.52.

Observando a Figura 5.51, correspondente a $refv = 4.25\text{ cm}$, verifica-se que a altura é suficientemente pequena para que a aproximação de Kirchoff seja válida, conduzindo a resultados muito próximos aos obtidos com o BEM.

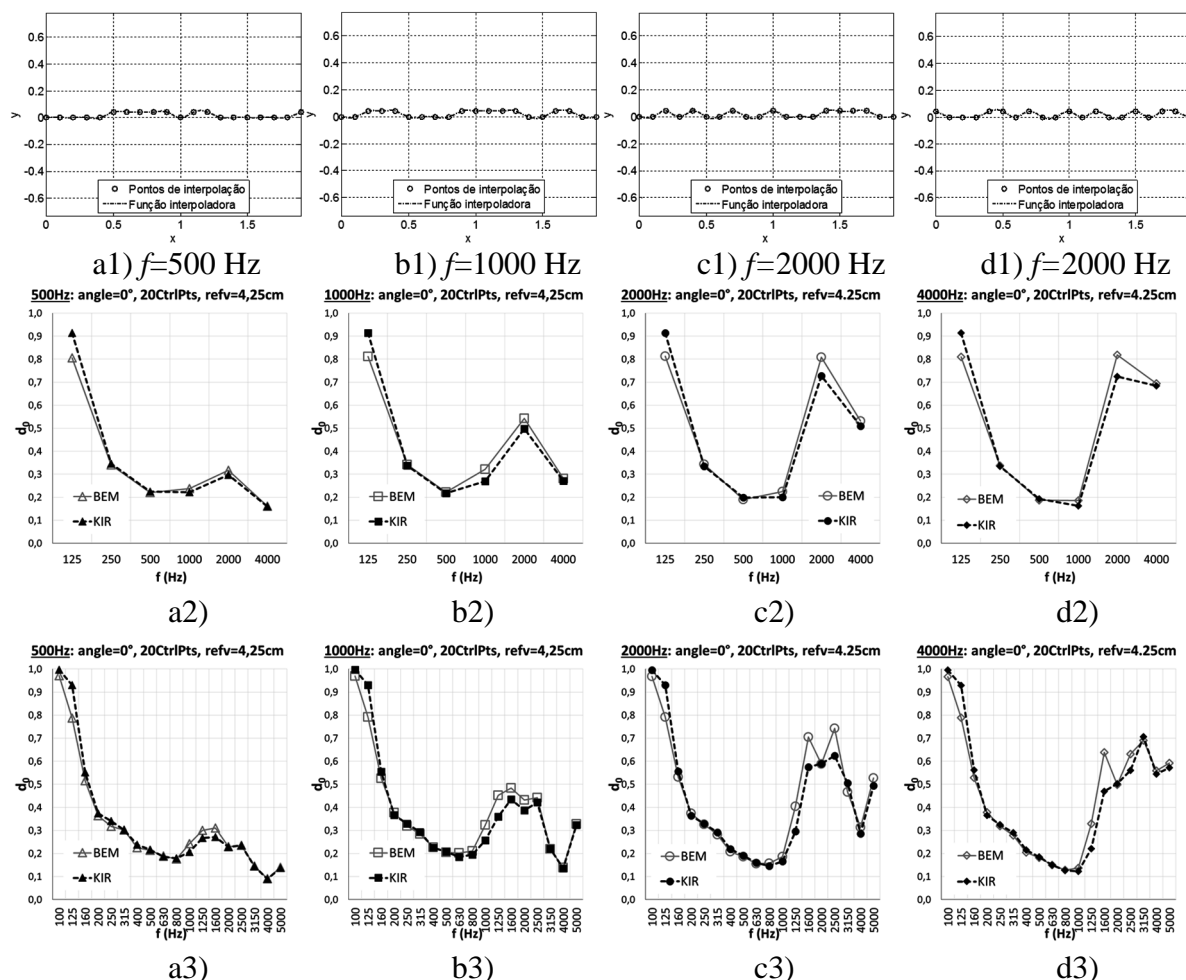


Figura 5.51 – Comparação dos resultados para o coeficiente de difusão obtidos através da aproximação de Kirchoff e BEM em bandas de oitava (#2) e em 1/3 de oitava (#3). Difusores otimizados para a banda de oitava: a#) $f=500\text{ Hz}$; b#) $f=1000\text{ Hz}$; c#) $f=2000\text{ Hz}$; d#) $f=4000\text{ Hz}$.

Para $refv = 17\text{ cm}$, Figura 5.52, os difusores resultantes da optimização são bastante irregulares (“enrugados”), o que faz com que a aproximação de Kirchoff não seja válida, observando-se uma grande variação em relação aos resultados do BEM.

Verifica-se ainda se o espaçamento entre os pontos de controlo (na horizontal), $refh$, que é uma consequência directa do número de pontos de controlo utilizados (pois a largura do difusor é constante e igual a 1.90 m), influencia a precisão da aproximação de Kirchoff. Para tal, comparam-se dois difusores otimizados para a banda de oitava dos 1000 Hz , ambos com $refv = 10\text{ cm}$ (a altura máxima dos pontos de controlo), mas um com poucos pontos de

controlo, 10 (correspondendo a $refh = 21.11cm$), e outro com bastantes pontos de controlo, 40 (correspondendo a $refh = 4.87cm$). Os resultados obtidos são apresentados na Figura 5.53.

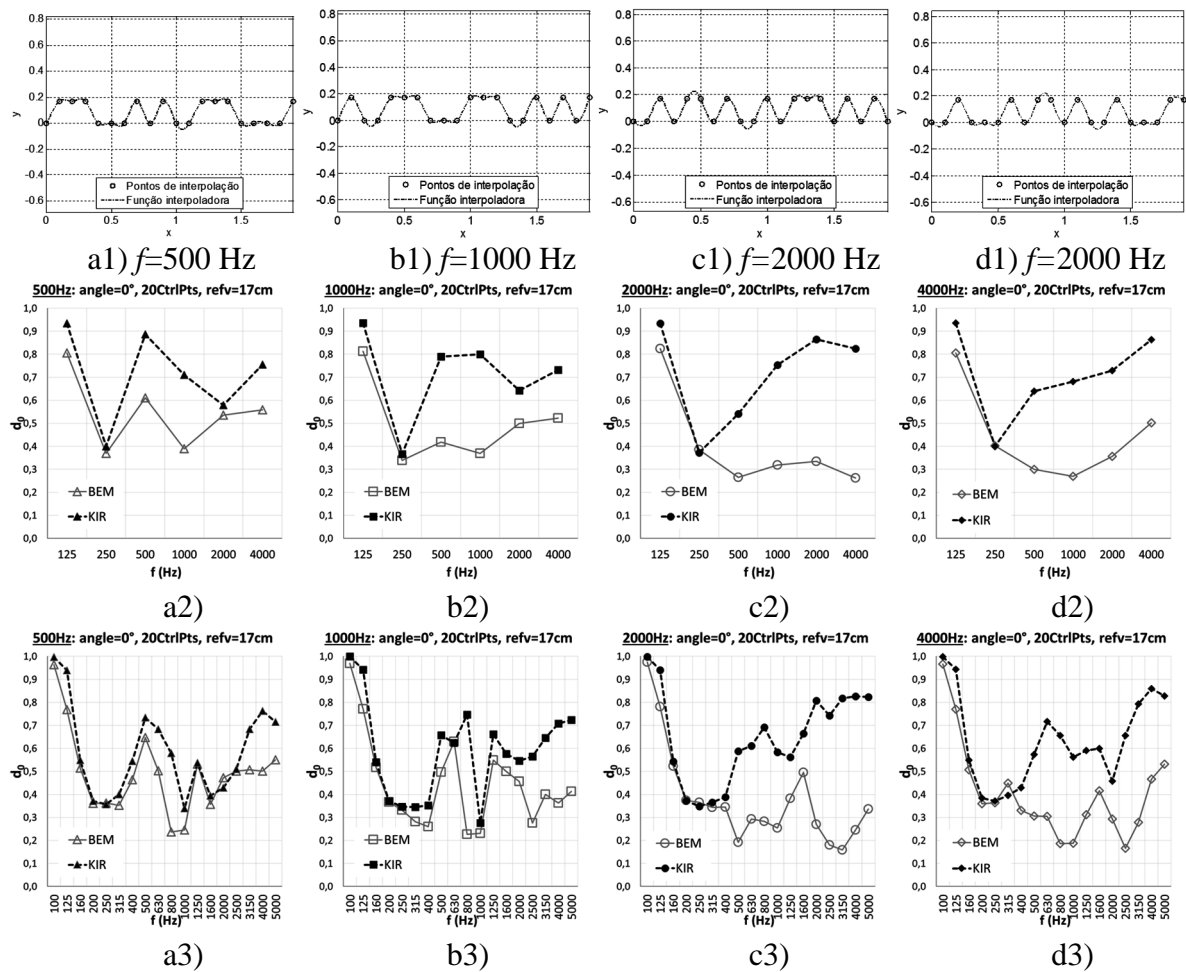


Figura 5.52 – Comparação dos resultados para o coeficiente de difusão obtidos através da aproximação de Kirchoff e BEM em bandas de oitava (#2) e em 1/3 de oitava (#3). Difusores otimizados para a banda de oitava: a#) $f=500$ Hz; b#) $f=1000$ Hz; c#) $f=2000$ Hz; d#) $f=4000$ Hz.

Como se pode observar na Figura 5.53, mesmo com $refh = 21.11$ cm entre pontos de controlo, se obteve uma solução com poucas irregularidades. Desse modo, a aproximação de Kirchoff ainda é válida e os resultados são semelhantes aos obtidos com o BEM. O aumento do número dos pontos de controlo torna superfície mais irregular e, conseqüentemente, a aproximação de Kirchoff deixa de ser válida.

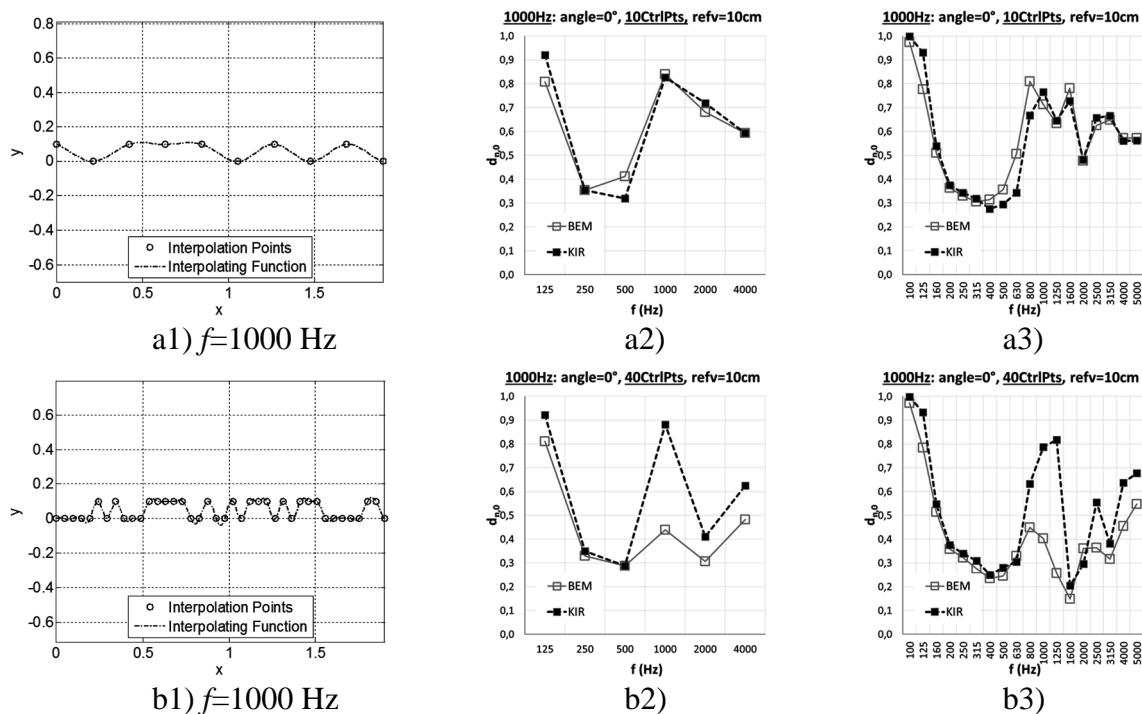


Figura 5.53 – Comparação dos resultados para o coeficiente de difusão obtidos através da aproximação de Kirchoff e BEM em bandas de oitava (#2) e em 1/3 de oitava (#3) para difusores otimizados para a banda de oitava $f=1000$ Hz, com; a#) 10 pontos de controlo; b#) 40 pontos de controlo.

5.7. INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE ELEMENTOS DE FRONTEIRA UTILIZADOS NO CÁLCULO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO

Nesta secção, pretende-se avaliar a influência da dimensão dos elementos utilizados para discretizar a superfície dos difusores (elementos fronteira) para o cálculo do coeficiente de difusão.

Por uma questão de não se aumentar muito o tempo que leva cada “run” de optimização (uma vez que, em cada iteração, cada um dos difusores que constitui a população é avaliado numericamente), no algoritmo de BEM implementado tomou-se, para a dimensão dos elementos discretos em que se subdivide a superfície do difusor, o valor máximo recomendado na literatura $\lambda/10$ (onde λ é o comprimento de onda referente à frequência central de cada uma das bandas de frequência em análise) – corresponde ao menor número de elementos de fronteira para que o método numérico apresente bons resultados. Contudo, após o processo de optimização, a avaliação do coeficiente de difusão já é realizado com um número maior de elementos, sendo $numels = 100$ o número mínimo por defeito.

Para então se avaliar a influência da discretização da superfície, realizou-se um estudo paramétrico para o difusor apresentado na Figura 5.54. esta figura mostra a discretização utilizada e os respectivos resultados obtidos são apresentados na Figura 5.55.

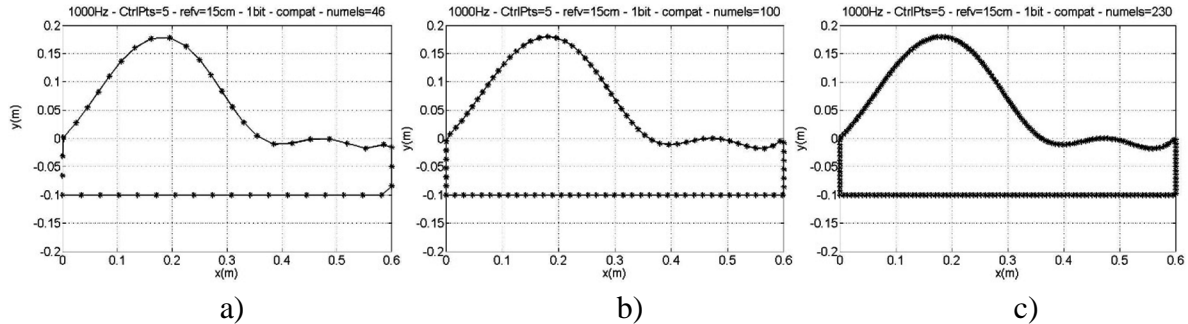


Figura 5.54 – Discretização em elementos fronteira do difusor da Figura 6.3b, para $f=1000\text{Hz}$: a) em 46 elementos; b) em 100 elementos; c) em 230 elementos.

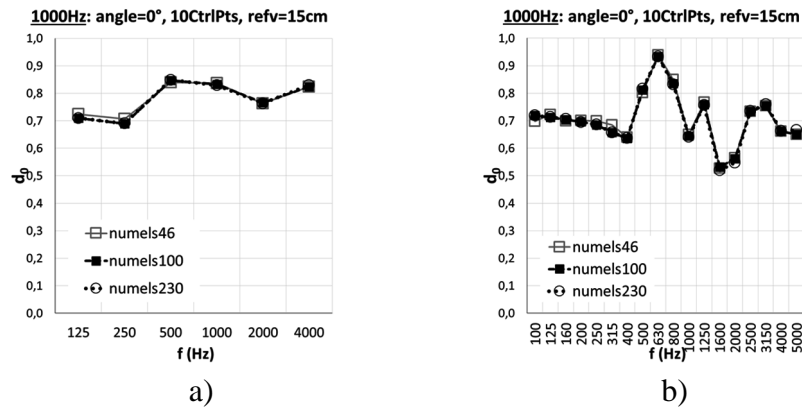


Figura 5.55 – Coeficiente de difusão do difusor da Figura 5.54 calculado com diferente número de elementos fronteira: a) em bandas de oitava; b) em bandas de 1/3 de oitava.

Como se pode observar na figura acima, não há diferenças significativas nos resultados obtidos. A figura seguinte repete a Figura 5.55, com uma escala diferente, para facilitar a análise dos resultados.

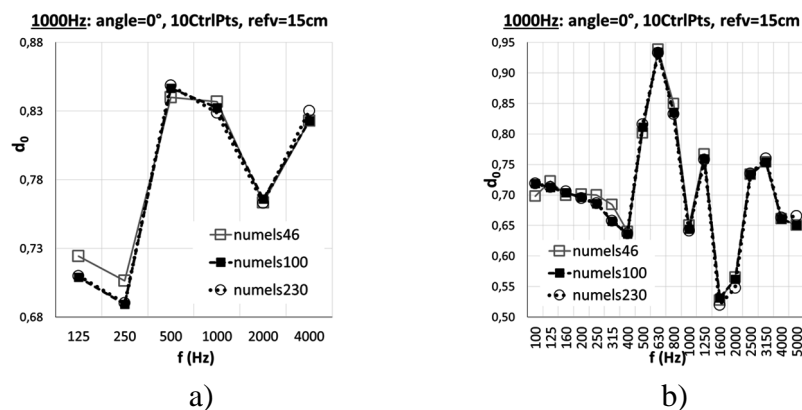


Figura 5.56 – Repetição da Figura 5.55 com escala ampliada.

No caso apresentado na Figura 5.55, a banda de oitava de otimização é a centrada nos 1000 Hz. Nesta banda, o valor obtido para o coeficiente de difusão com 46 elementos fronteira (número mínimo de elementos) é ligeiramente mais elevado (0.837) que os restantes casos (0.832 e 0.829, respectivamente, para 100 e 230 elementos). Como se vê, a variação é bastante pequena. Onde se observam as maiores discrepâncias é nas baixas frequências. Desta forma, durante o processo de otimização, o número de elementos foi sempre determinado para garantir a regra que estabelece o comprimento dos elementos fronteira de modo a obter $\lambda/10$. Contudo, após a otimização, na análise posterior do desempenho do difusor, o número mínimo de elementos fronteira é 100, eventualmente podendo ser usados mais elementos de modo a assegurar que se discretiza, no mínimo, 10 elementos por cada comprimento de onda em análise. Esta alteração faz-se sentir, essencialmente, nas menores frequências já que, nas mais altas frequências, dependendo do comprimento do contorno do difusor, a regra impõe a utilização de maior número de elementos do que o valor pré estabelecido de 100 (já que os comprimentos de onda são mais pequenos).

5.8. CONCLUSÕES DA ANÁLISE PRELIMINAR DO ALGORITMO PROPOSTO

Neste capítulo apresentou-se o algoritmo de otimização e a metodologia implementada. Foi apresentado de forma breve o método numérico que permite a obtenção da figura de mérito que classifica cada difusor, o coeficiente de difusão sonora. De seguida, apresentou-se a estratégia de interpolação que permite obter as curvas suaves através das funções de base radial (RBF). Posteriormente, fez-se uma breve descrição do funcionamento do algoritmo genético implementado, fazendo referência aos diferentes parâmetros de controlo que permitem fazer evoluir uma população inicial de indivíduos de modo a serem mais aptos. Finalmente testou-se, realizando-se casos de estudo, o funcionamento e os resultados obtidos do algoritmo de otimização.

A secção anterior mostrou que a abordagem seguida conduz a bons resultados, demonstrando ser um método válido para a otimização de superfícies tendo em vista a difusão. Mostrou-se que o método converge rapidamente e que, embora não convirja para uma única solução, a dispersão das soluções sub-óptimas é bastante pequena. Outra conclusão que se pode retirar deste estudo preliminar é que o aumento do número de indivíduos de uma população, n_{pop} , permite acelerar a convergência para uma solução sub-óptima, contudo, aparentemente, conduz a resultados semelhantes.

Também se verificou que a altura dos pontos de controlo (*refv*) e o afastamento entre eles (que resulta do número de pontos de controlo, *controlpoints*) têm influência no desempenho. Logo, se estes parâmetros não estiverem limitados por motivos construtivos ou arquiteturais, deverão ser cuidadosamente escolhidos de modo a permitir obter valores mais altos para o coeficiente

de difusão. Foi verificado que, para as baixas frequências, $refv$ deverá ser relativamente elevado e que o espaçamento entre os pontos de controlo ($refh$) não precisa de ser pequeno, isto é, que não são necessários muitos pontos de controlo.

Também se demonstrou que não é necessário, durante o processo de otimização, avaliar o coeficiente de difusão na banda de oitava utilizando muitas frequências discretas. Por uma questão de economia de tempo de cálculo, utilizar 5 frequências discretas conduz à obtenção de bons resultados. A esse respeito, na Figura 5.57 apresenta-se uma comparação entre o cálculo dos coeficientes de difusão (em bandas de oitava) dos difusores constantes da Figura 5.49, calculados (com recurso à aproximação de Kirchoff) com apenas 5 frequências discretas em cada banda de terço de oitava e com uma discretização fina de 1 Hz. Os resultados são praticamente idênticos e a utilização de apenas 5 frequências discretas é muitíssimo mais rápida.

Assim, o esforço computacional utilizado não é muito elevado e a otimização é bastante rápida, o que faz com que o procedimento numérico aqui apresentado seja uma ferramenta extremamente útil no desenvolvimento de superfícies do tipo difusor sintonizado.

Verificou-se, ainda, que a aproximação de Kirchoff nem sempre é válida e, por isso, no capítulo seguinte, será utilizado o BEM para o cálculo do coeficiente de difusão de forma a aumentar a precisão da avaliação, à custa da rapidez com que se chega a uma solução. Nesse capítulo serão apresentados estudos de caso que exploram toda a potencialidade do algoritmo proposto no desenvolvimento e otimização de difusores, nomeadamente, vai-se permitir a variação das coordenadas geométricas dos pontos de controlo das RBF (permitir a variação da sua altura em patamares) e aplicar constrangimentos geométricos aos pontos de controlo extremos (o primeiro e o último), de forma a reproduzir situações realistas de aplicação/fabricação.

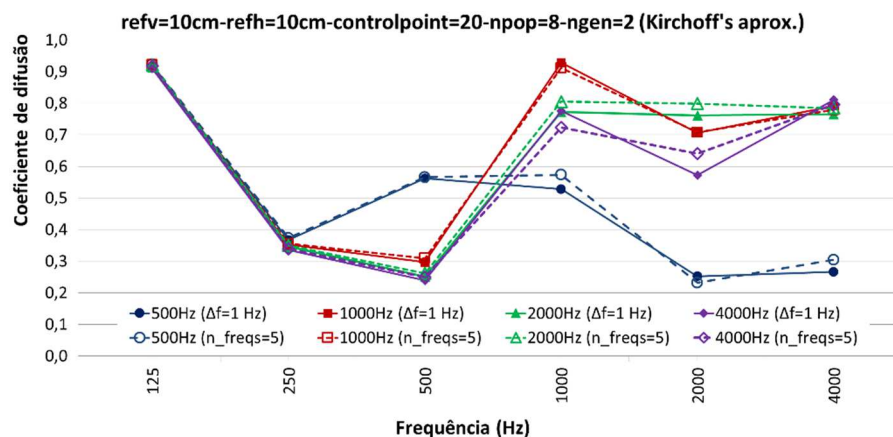


Figura 5.57 – Coeficientes de difusão dos difusores da Figura 5.49 calculados com uma discretização em frequência de 1 Hz e com 5 frequências discretas (cálculo realizado utilizando a aproximação de Kirchoff).

Posteriormente, será apresentada a aplicação do algoritmo de optimização para se obter difusores optimizados para vários ângulos de incidência (relembra-se que, nesta secção, a optimização foi feita para incidência normal). O processo de optimização será ainda estendido de modo a permitir a optimização para várias bandas de terço de oitava (até aqui apenas se optimizava para uma única banda de oitava). Por fim, uma vez que a utilização de um único difusor, cujas dimensões standards de mercado são 600 mm x 600 mm, dificilmente será suficiente para melhorar a acústica de uma sala crítica, apresentar-se-á uma aplicação do método proposto para a optimização de vários módulos idênticos tendo em vista a utilização conjunta dos mesmos.

6. OPTIMIZAÇÃO DE DIFUSORES: ESTUDOS DE CASO

6.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresentam-se estudos de caso utilizando o algoritmo de análise e optimização proposto na Secção 5.5 e sintetizado na Figura 5.2. O objectivo deste capítulo é mostrar efectivamente as capacidades do algoritmo de optimização proposto.

Na secção seguinte explora-se a introdução de constrangimentos geométricos de modo a obrigar que os pontos de controlo nas extremidades tivessem a mesma altura. De modo a possibilitar a utilização de vários módulos idênticos, lado a lado, dos difusores resultantes da optimização, impôs-se ainda aos pontos de controlo extremos (o primeiro e o último) que tivessem, para além da mesma altura, o mesmo declive (tangente). Desta forma, a utilização conjunta de vários módulos permite reconstituir uma curva sem descontinuidades. Ainda nesta secção será analisada a influência destas restrições geométricas na convergência do método e nas soluções (curvas/difusores) obtidas.

Em seguida, é introduzida a possibilidade dos pontos de controlo poderem tomar valores intermédios, codificando essas alturas em patamares. Foi utilizado, como exemplo de aplicação, uma codificação “3 bits”, correspondendo a 8 patamares (2^3) entre $y=0$ m e $y=refv$ – ver Figura 5.1b.

Nas últimas secções apresentam-se estudos de caso resultantes de optimizações para diversos ângulos de incidência e para várias bandas de frequência. Também se apresentam alguns casos em que a optimização foi efectuada para a utilização conjunta de vários módulos idênticos, lado a lado.

6.2. CONSTRANGIMENTOS GEOMÉTRICOS

Nesta secção os difusores a otimizar têm a largura standard de mercado, $L = 0.6$ m, e todos os exemplos que se irão apresentar foram estudados tendo a fonte sonora colocada para incidência normal e as optimizações correspondem à maximização do respectivo coeficiente de difusão para uma banda de oitava, utilizando para o seu cálculo apenas 5 frequências discretas. As populações iniciais de cada optimização são constituídas por 22 indivíduos planos, $refv = 0.0$ m. A razão da escolha deste número de indivíduos deve-se ao facto de se ter paralelizado a

implementação do algoritmo de optimização, recorrendo a uma *workstation* com 22 processadores e, neste contexto, cada processador lidava com um indivíduo.

Introduziram-se restrições geométricas à definição das superfícies por RBF através do número de pontos de controlo e das respectivas alturas, tendo em atenção a futura produção das soluções obtidas.

Como a utilização de apenas um único módulo é, de uma forma geral, pouco eficiente para se atingir os objectivos de um bom condicionamento acústico de salas, talvez o mais provável seja a utilização de múltiplos módulos. Para que não existam descontinuidades nas juntas entre os diferentes módulos, impôs-se que os pontos (de controlo) nas extremidades tivessem a mesma altura. Este constrangimento geométrico foi resolvido acrescentando mais um ponto de controlo extra (acrescentou-se mais uma equação e uma variável ao sistema de equações 5.30), localizado no extremo do difusor (que no presente caso corresponde a $x = 0.6\text{ m}$), obrigando-o a ter a mesma altura do primeiro ponto de controlo (na extremidade oposta, $x = 0.0\text{ m}$). Assim, quando se escreve que uma determinada optimização se realizou com n pontos de controlo, na prática são $n + 1$, sendo que n são “livre” e o último está restringido a ter a mesma altura do primeiro – ver Figura 6.1a. A este caso chamou-se de “*h igual*”.

Acrescentou-se ainda outra restrição tendo em vista a obrigatoriedade do declive da superfície nos extremos do difusor ser idêntica, de modo a que, quando se utilizarem diversos difusores lado a lado não haja qualquer descontinuidade na superfície formada pelo conjunto. Para este constrangimento geométrico é necessário adicionar mais uma equação ao sistema de equações definido por 5.30. Como se considera que o declive da tangente à superfície no ponto de controlo situado em $x = 0.6\text{ m}$ terá que ser idêntico ao declive da tangente no ponto de controlo situado em $x = 0.0\text{ m}$ (para além de ambos terem a mesma altura), adicionou-se um ponto de controlo auxiliar (o segundo) situado já fora do difusor, em $x = 0.6 + refh$ (onde $refh$ é o afastamento, na horizontal, entre pontos de controlo). Obriga-se, então, a que os declives da curva em ambas as extremidades do difusor sejam iguais. A estes estudos de caso apresentados com este constrangimento geométrico chamou-se de “*compatível*”- ver Figura 6.1b.

As próximas figuras mostram alguns exemplos obtidos, para optimizações na banda de oitava centrada nos 1000 Hz, para difusores definidos por 5 e 10 pontos de controlo e cuja altura máxima é $refv = 8,5\text{ cm}$ e $refv = 15\text{ cm}$. Nestes exemplos considerou-se uma codificação da altura dos pontos de controlo do tipo “1 bit”, conforme já descrito no capítulo anterior.

Apresentam-se exemplos aos pares, agrupados com o mesmo número de pontos de controlo e com a mesma altura, para melhor se analisar o efeito das restrições geométricas. Como se pode observar, as restrições geométricas têm influência na forma do difusor e, conseqüentemente, no seu desempenho. Nas figuras também se apresenta uma representação de uma utilização de 3 módulos idênticos de forma a visualizar a o efeito de compatibilizar os extremos do difusor.

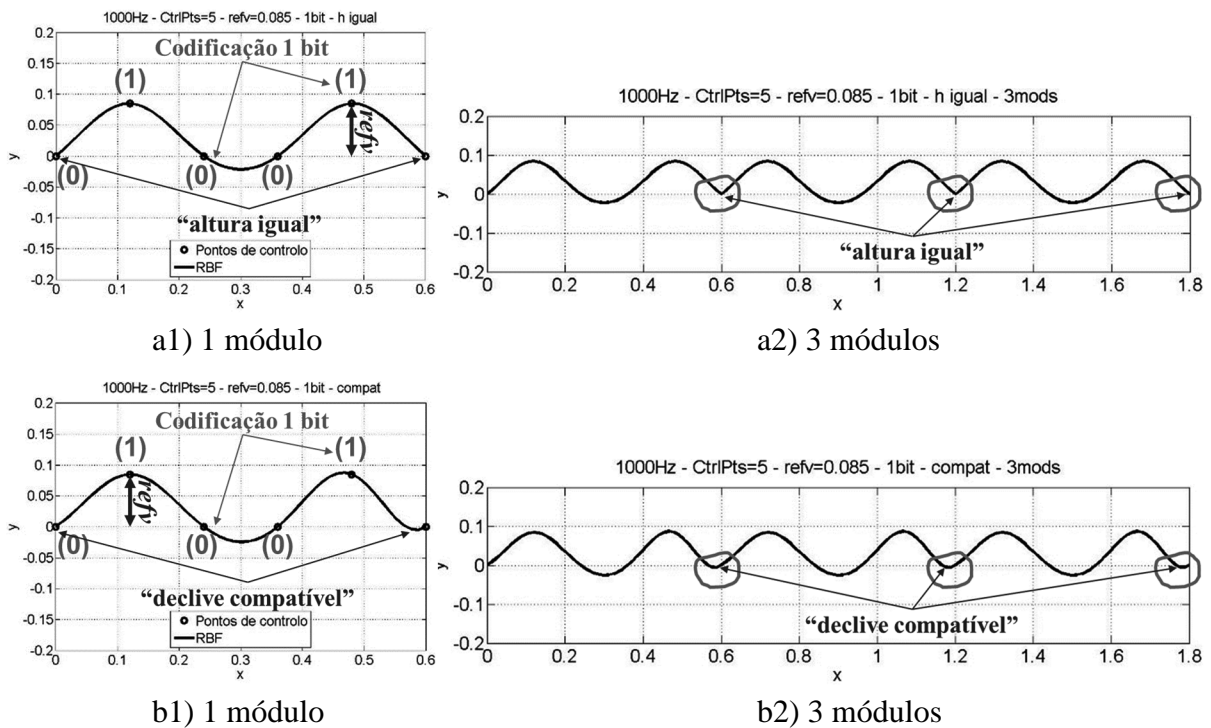


Figura 6.1 – Exemplos das restrições geométricas de otimizações com 5 pontos de controlo e $refv = 8,5\text{ cm}$: a) “*h igual*”, onde o 6º ponto de controlo tem a mesma altura do 1º ponto de controlo; b) “*compatível*”, onde o 6º ponto de controlo tem a mesma altura do 1º ponto de controlo e o declive da tangente em ambos os pontos é igual.

Calculou-se o coeficiente de difusão (para incidência normal) para os exemplos acima apresentados, quer em bandas de oitava quer em bandas de 1/3 de oitava, cujos resultados se apresentam na Figura 6.2.

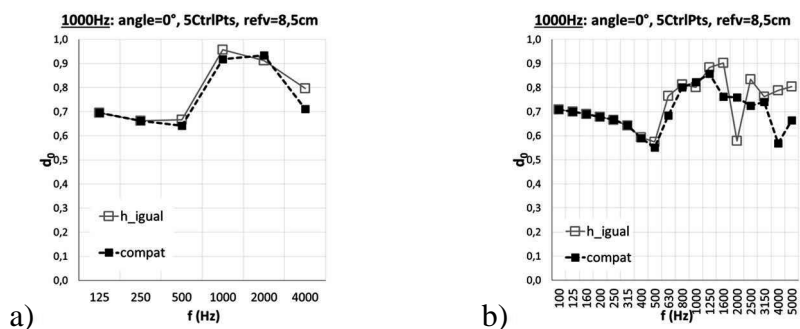


Figura 6.2 – Coeficiente de difusão dos difusores da figura 6.1 (1 módulo): a) em bandas de oitava; b) em bandas 1/3 de oitava.

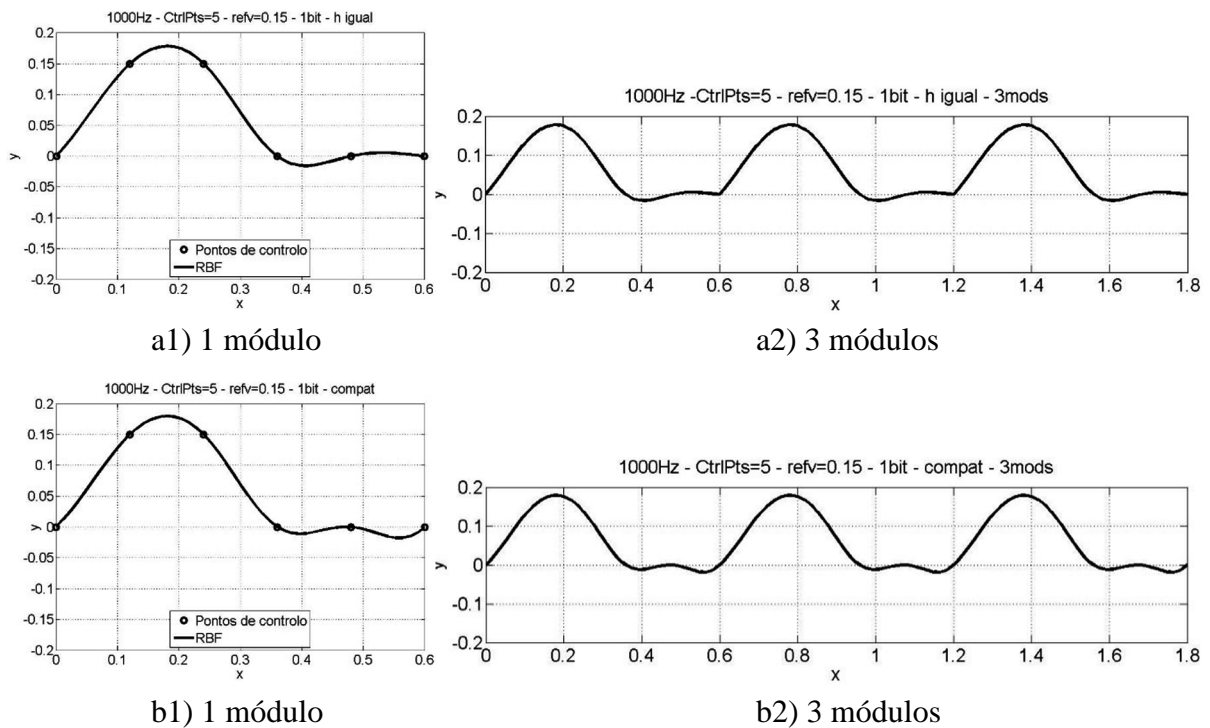


Figura 6.3 – Exemplos das restrições geométricas de otimizações com 5 pontos de controlo e $refv = 15\text{ cm}$: a) “*h_igual*”, onde o 6º ponto de controlo tem a mesma altura do 1º ponto de controlo; b) “*compatível*”, onde o 6º ponto de controlo tem a mesma altura do 1º ponto de controlo e o declive em ambos os pontos é igual.

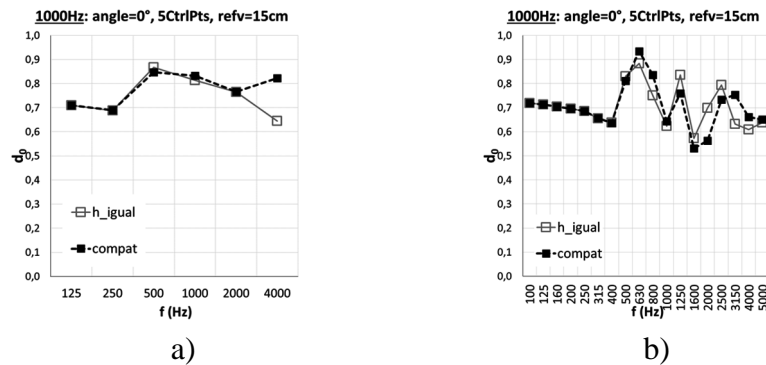


Figura 6.4 – Coeficiente de difusão dos difusores da figura 6.3 (1 módulo): a) em bandas de oitava; b) em bandas 1/3 de oitava.

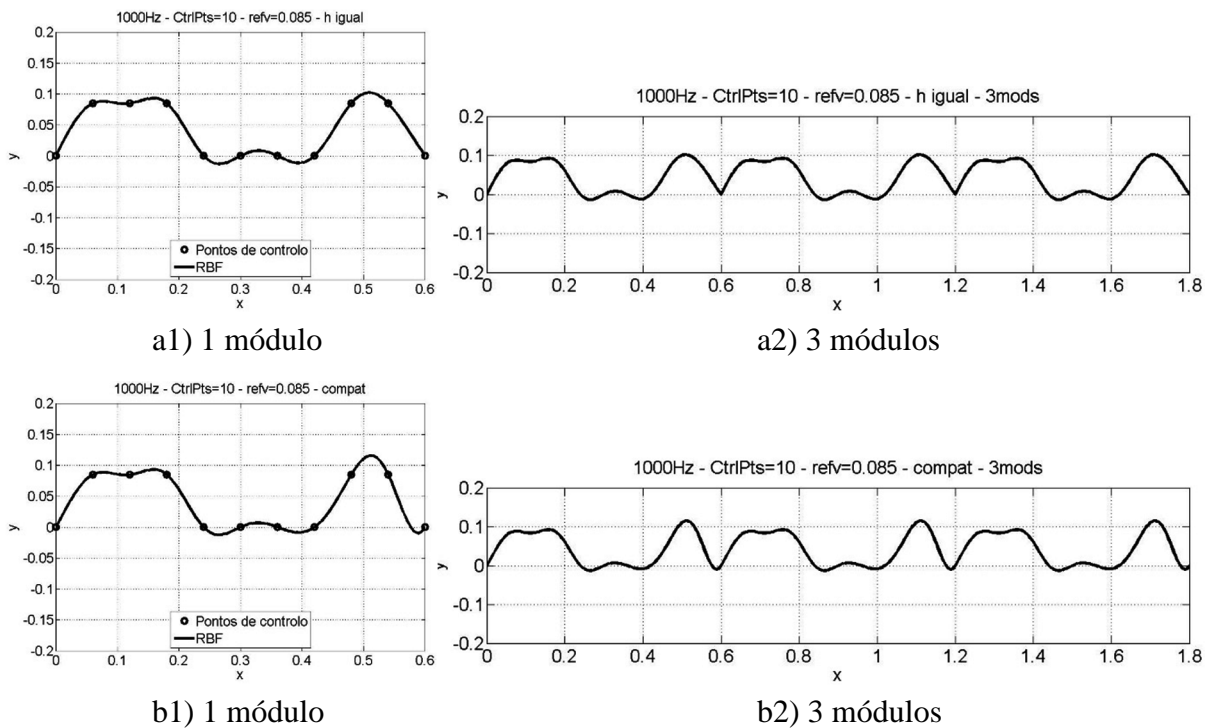


Figura 6.5 – Exemplos das restrições geométricas de otimizações com 10 pontos de controlo $refv = 8,5\text{ cm}$ e: a) “*h igual*”, onde o 11º ponto de controlo tem a mesma altura do 1º ponto de controlo; b) “*compatível*”, onde o 11º ponto de controlo tem a mesma altura do 1º ponto de controlo e o declive em ambos os pontos é igual.

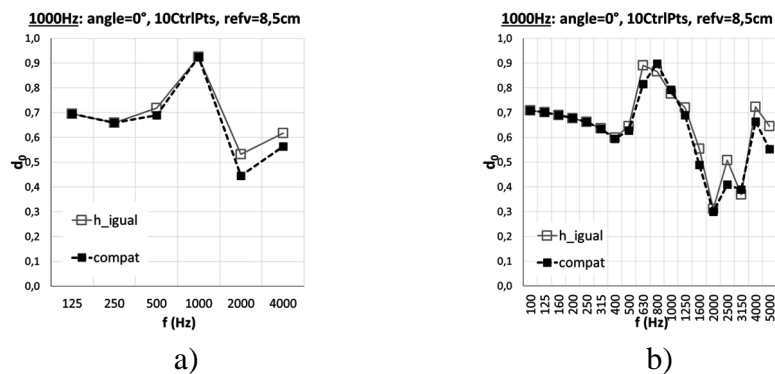


Figura 6.6 – Coeficiente de difusão dos difusores da figura 6.5 (1 módulo): a) em bandas de oitava; b) em bandas 1/3 de oitava.

Faz-se notar que o difusor apresentado na Figura 6.7b não resultou de um processo de otimização, simplesmente se obrigou a que o difusor da Figura 6.7a tivesse a restrição geométrica dos pontos extremos serem “compatíveis”. Apesar das duas configurações (Figuras 6.7a e 6.7b) serem muito semelhantes, verifica-se, observando o resultado apresentado na Figura 6.8, que o difusor não otimizado não apresenta um bom desempenho na banda dos

1000 Hz. Este resultado indica claramente a importância do procedimento de otimização e a sensibilidade do coeficiente de difusão aos pequenos detalhes geométricos.

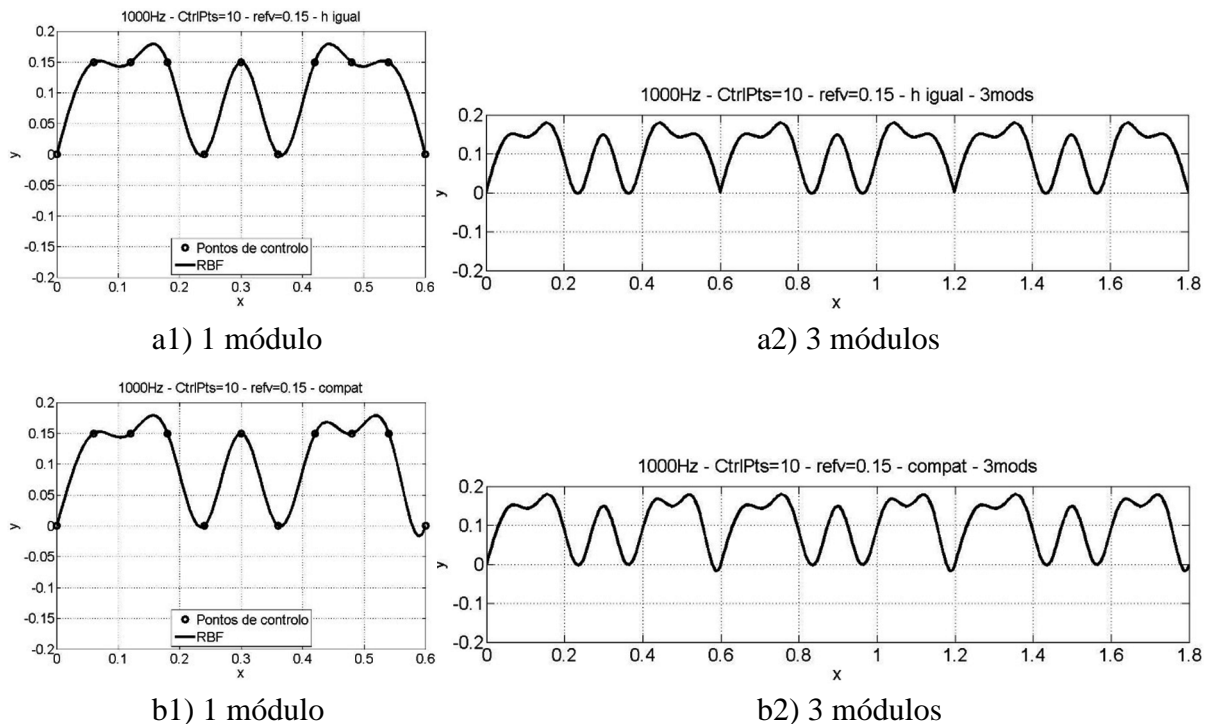


Figura 6.7 – Exemplos das restrições geométricas de otimizações com 10 pontos de controlo e $refv = 15\text{ cm}$: a) “*h igual*”, onde o 11º ponto de controlo tem a mesma altura do 1º ponto de controlo; b) “*compatível*”, onde o 11º ponto de controlo tem a mesma altura do 1º ponto de controlo e o declive em ambos os pontos é igual.

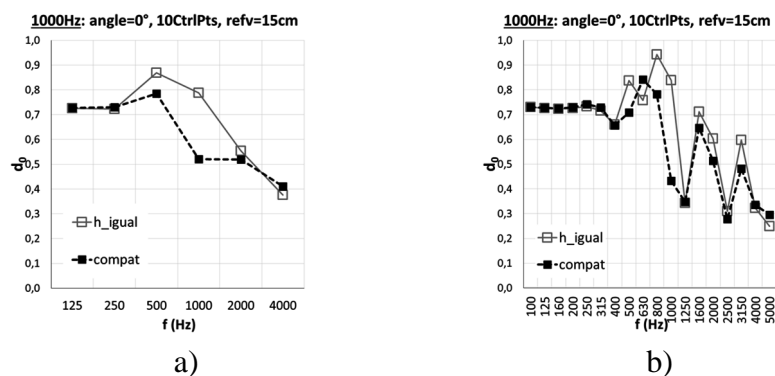


Figura 6.8 – Coeficiente de difusão dos difusores da figura 6.7 (1 módulo): a) em bandas de oitava; b) em bandas 1/3 de oitava.

Para os exemplos apresentados nas Figuras 6.1, 6.3, 6.5 e 6.7, determinou-se a diferença entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo das curvas, $y_{max} - y_{min}$, cujos resultados se apresentam no Quadro 6.1.

Quadro 6.1 – Comparação entre as alturas máxima e mínima das RBF

Constr. Geo.	Altura igual				Compatíveis			
	5		10		5		10	
n_CtrlPts	5		10		5		10	
refv	0,085	0,15	0,085	0,15	0,085	0,15	0,085	0,15
$y_{max} - y_{min}$ (m)	0,107	0,195	0,116	0,182	0,112	0,198	0,129	0,197

Da observação do quadro acima, pode-se concluir que, ao obrigar-se a que as curvas sejam “compatíveis” nos extremos, aumenta-se a profundidade (ou desnível) da curva RBF que define os difusores.

Para se avaliar a influência dos constrangimentos geométricos, fizeram-se vários “runs” sucessivos para 5, 10 e 20 pontos de controlo, para duas alturas diferentes $refv = 8,5\text{ cm}$, e $refv = 15\text{ cm}$. A população inicial foi de 22 indivíduos planos e utilizou-se BEM para se avaliar o coeficiente de difusão. O processo optimização era concluído ao fim de 100 gerações (iterações). Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 6.2 e a Figura 6.9 apresenta graficamente esses resultados.

Quadro 6.2 - Resultados de diversas simulações com codificação 1 bit (valores médios)

Constr. Geo.	Altura igual						Compatíveis					
	5		10		20		5		10		20	
n_CtrlPts	5		10		20		5		10		20	
refv	0,085	0,15	0,085	0,15	0,085	0,15	0,085	0,15	0,085	0,15	0,085	0,15
d_0 (1 bit)	0,954	0,920	0,926	0,960	0,962	0,925	0,923	0,840	0,945	0,872	0,962	0,909

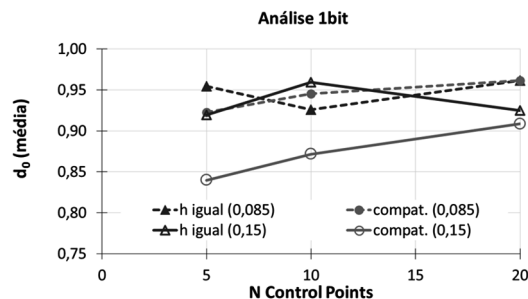


Figura 6.9 – Coeficiente de difusão (médio) ao fim de 100 iterações para $refv = 8,5\text{ cm}$ e $refv = 15\text{ cm}$, para os dois tipos de constrangimento, “altura igual” e “compatível”.

Da análise do Quadro 6.2 (e da Figura 6.9) pode-se constatar que, de uma forma geral, a restrição de os pontos de controlo extremos terem apenas a mesma altura conduz a difusores com maior coeficiente de difusão do que aqueles que têm as extremidades compatíveis (há apenas uma excepção para 10 pontos de controlo).

Também se pode observar que a altura dos pontos de controlo $refv = 8,5\text{ cm}$ conduz a difusores com maior coeficiente de difusão do que aqueles que têm $refv = 15\text{ cm}$. Isso é válido para ambos os tipos de constrangimentos geométricos (com a excepção para 10 pontos de controlo).

De seguida passa-se a analisar a convergência dos casos de teste acima enunciados. As Figuras 6.10 a 6.15 ilustram a evolução dos diversos casos e a Figura 6.16 mostra a variação da dispersão relativa (em %) – entende-se como dispersão relativa a diferença entre os valores máximo e mínimo do coeficiente de difusão obtidos em vários “runs” relativamente à média obtida.

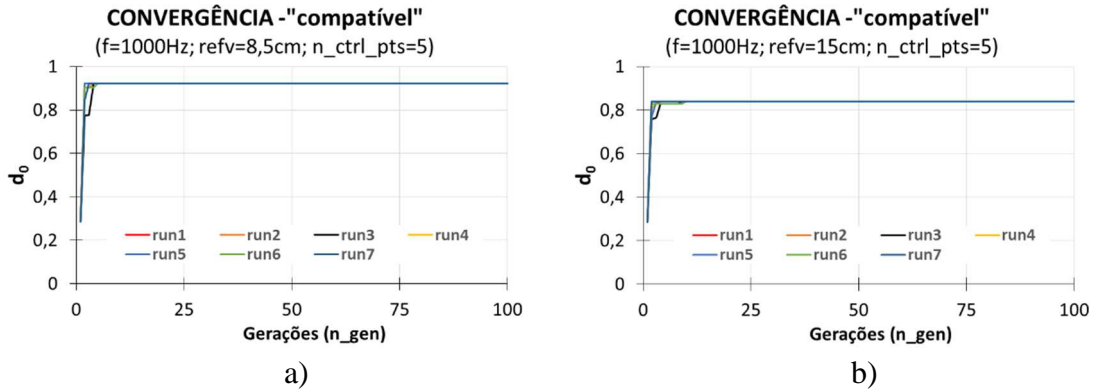


Figura 6.10 – Convergência para $f = 1000\text{ Hz}$ para 5 pontos de controlo e com o constrangimento geométrico “compatível”: a) $refv = 8.5\text{ cm}$; b) $refv = 15\text{ cm}$.

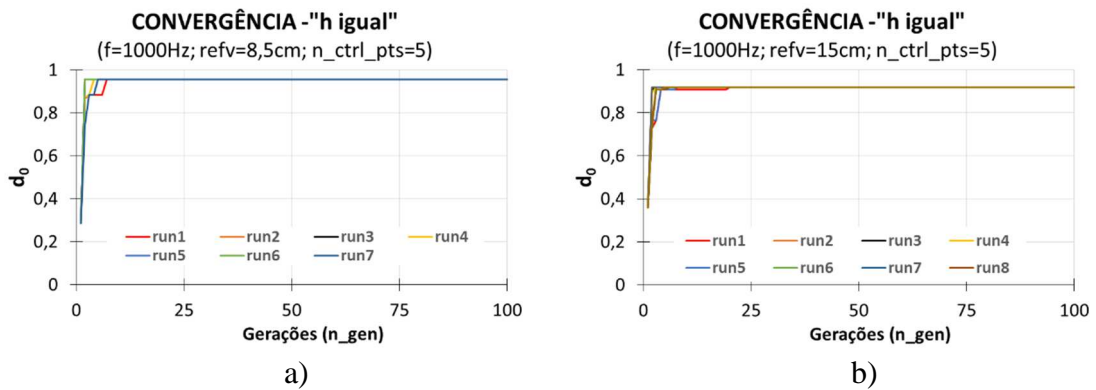


Figura 6.11 – Convergência para $f = 1000\text{ Hz}$ para 5 pontos de controlo e com o constrangimento geométrico “altura igual”: a) $refv = 8.5\text{ cm}$; b) $refv = 15\text{ cm}$.

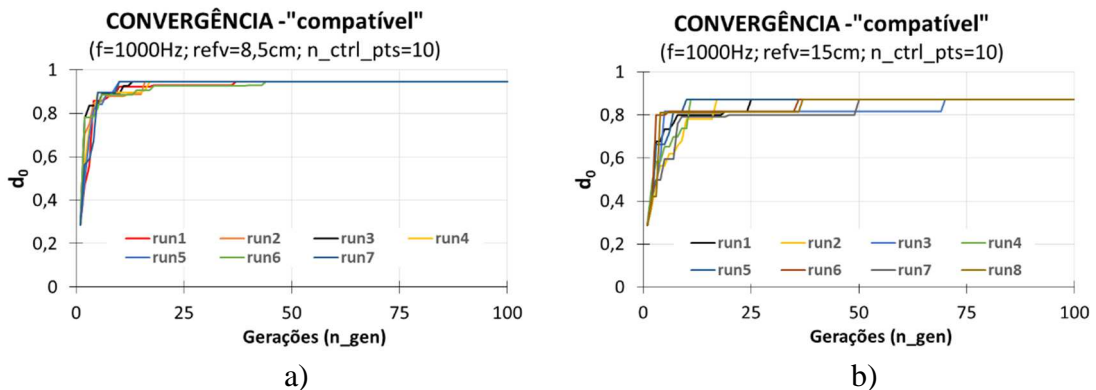


Figura 6.12 – Convergência para $f = 1000\text{ Hz}$ para 10 pontos de controlo e com o constrangimento geométrico “compatível”: a) $refv = 8.5\text{ cm}$; b) $refv = 15\text{ cm}$.

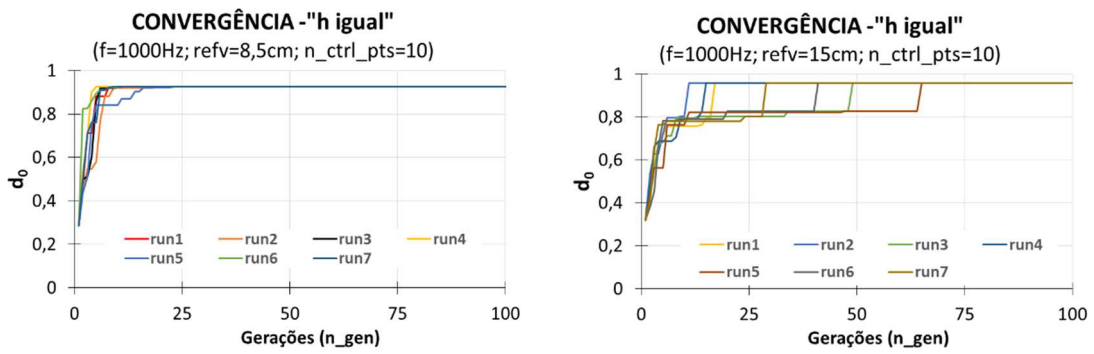


Figura 6.13 – Convergência para $f = 1000 \text{ Hz}$ para 10 pontos de controlo e com o constrangimento geométrico “altura igual”: a) $refv = 8.5 \text{ cm}$; b) $refv = 15 \text{ cm}$.

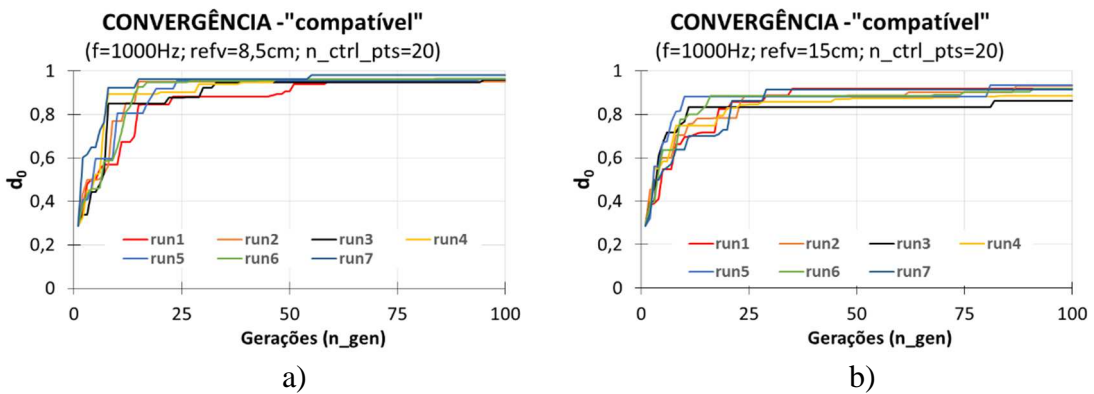


Figura 6.14 – Convergência para $f = 1000 \text{ Hz}$ para 20 pontos de controlo e com o constrangimento geométrico “compatível”: a) $refv = 8.5 \text{ cm}$; b) $refv = 15 \text{ cm}$.

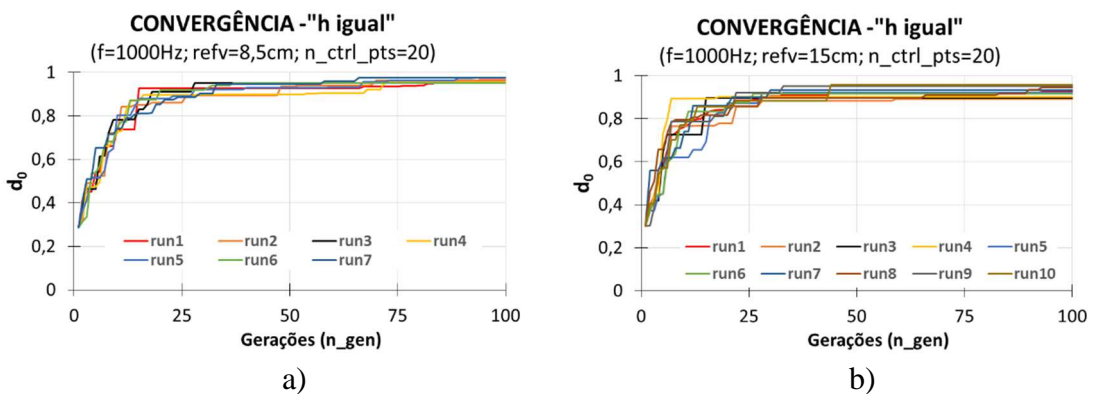


Figura 6.15 – Convergência para $f = 1000 \text{ Hz}$ para 20 pontos de controlo e com o constrangimento geométrico “altura igual”: a) $refv = 8.5 \text{ cm}$; b) $refv = 15 \text{ cm}$.

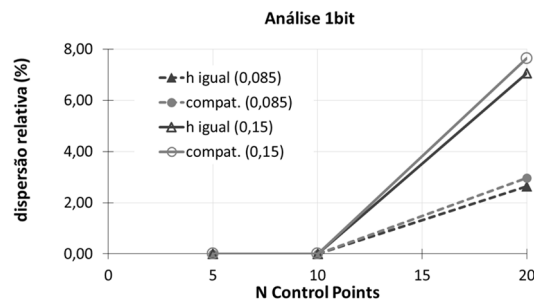


Figura 6.16 – Dispersão relativa do coeficiente de difusão (em relação ao valor médio) ao fim de 100 iterações para $refv = 8,5\text{ cm}$ e $refv = 15\text{ cm}$, para os dois tipos de constrangimento, “altura igual” e “compatível”.

Como se pode observar nas últimas figuras, para 5 e 10 pontos de controlo ambos os sistemas convergiram para um único valor. Na verdade, ao impor constrangimentos geométricos aos pontos de controlo, reduz-se o universo das soluções possíveis e, desta forma, aumenta-se a probabilidade de convergir para um valor único. Com o aumento do número de pontos de controlo, aumenta-se o universo de possíveis soluções e o sistema deixa de convergir para uma única solução. É bastante claro que a dispersão dos valores finais do coeficiente de difusão aumenta com o número de graus de liberdade restringidos (embora não seja significativo). Mais significativo é o aumento da dispersão relativa com o aumento da altura máxima dos pontos de controlo ($refv$). De facto, a mudança de um dos pontos de controlo de “0” para “1” ou de “1” para “0” acarreta uma mudança mais significativa da forma da superfície e, conseqüentemente, do coeficiente de difusão.

6.3. CODIFICAÇÃO DA ALTURA DOS PONTOS DE CONTROLO EM PATAMARES: 3 BIT

O próximo passo na evolução do algoritmo de optimização proposto foi permitir que os pontos de controlo pudessem tomar valores intermédios entre 0 e o valor máximo $refv$ (definido pelo utilizador). A ideia é que esses valores não possam variar continuamente mas por patamares (igualmente distantes) pré-definidos. Se se quantificar esses patamares recorrendo à álgebra binária, o número de bits utilizados para codificar a altura de cada ponto de controlo define o número de patamares disponíveis.

Com o aumento do número de bits para codificar cada indivíduo (difusor) o universo de soluções possíveis aumenta, sendo da ordem de grandeza de $(2^{n_bits})^{n_CtrlPts}$ (sem tomar em consideração as soluções simétricas e constrangimentos geométricos). Por exemplo, para 5 pontos de controlo e uma codificação de 3 bits, corresponde a um universo de 32768 indivíduos possíveis. A grande vantagem do algoritmo genético, como se confirmará nos próximos exemplos ao longo deste trabalho, é que em vez de se testar os 32768 indivíduos, com uma

população de 22 indivíduos e, por exemplo, 50 iterações, o processo converge para um valor sub-máximo avaliando apenas 1100 vezes o coeficiente de difusão (ou seja, de um modo simplista, é cerca de 30 vezes mais rápido).

Nos casos de estudo que se seguem foram utilizados 3 bits (mas podia ser outro valor), permitindo deste modo 8 patamares para cada ponto de controlo – ver Figura 5.1b. Nesta primeira análise, foram realizados testes para situações análogas aos exemplos utilizados na sub-secção anterior, de modo a comparar os respectivos resultados. Deste modo, para a banda de oitava centrada em $f = 1000 \text{ Hz}$, foram analisados casos com 5, 10 e 20 pontos de controlo, para alturas máximas $refv = 8,25 \text{ cm}$ e $refv = 15 \text{ cm}$, e com o mesmo tipo de restrições geométricas aos pontos de controlo extremos: “altura igual” (*h-igual*) e “compatível”.

De seguida, passa-se a analisar a convergência dos casos de teste acima enunciados. As Figuras 6.17 a 6.22 ilustram a evolução dos diversos casos e o Quadro 6.3 resume os resultados obtidos – para facilitar a comparação com os resultados obtidos para 1 bit, apresentam-se novamente os resultados do Quadro 6.2.

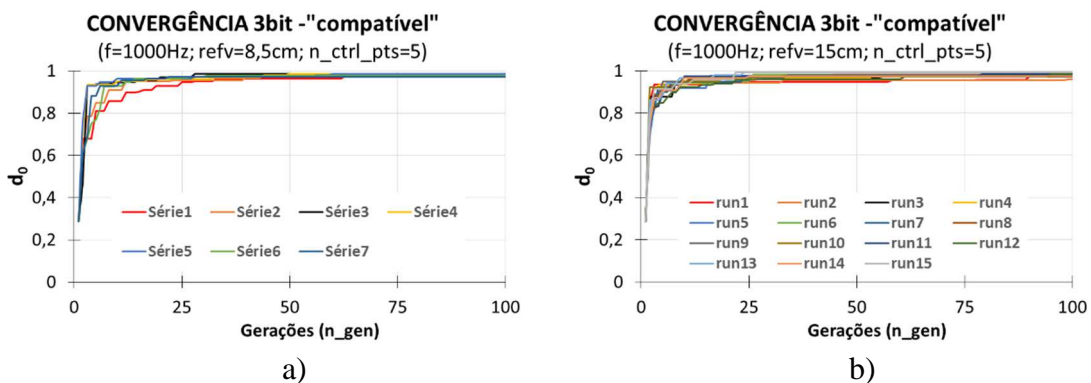


Figura 6.17 – Convergência para $f = 1000 \text{ Hz}$ para 5 pontos de controlo e com o constrangimento geométrico “compatível”: a) $refv = 8.5 \text{ cm}$; b) $refv = 15 \text{ cm}$

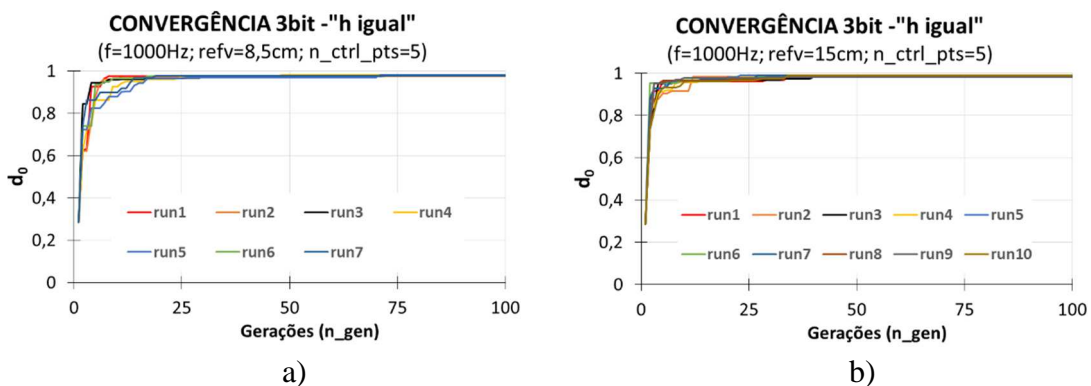


Figura 6.18 – Convergência para $f = 1000 \text{ Hz}$ para 5 pontos de controlo e com o constrangimento geométrico “altura igual”: a) $refv = 8.5 \text{ cm}$; b) $refv = 15 \text{ cm}$

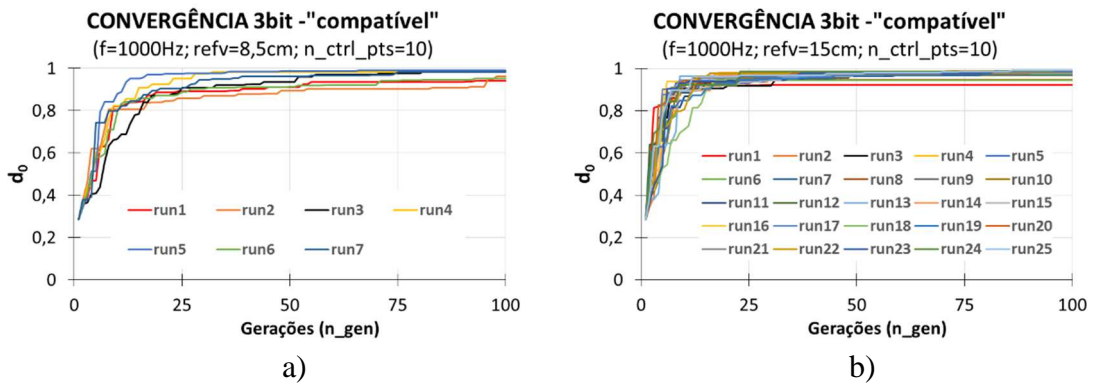


Figura 6.19 – Convergência para $f = 1000 \text{ Hz}$ para 10 pontos de controlo e com o constrangimento geométrico “compatível”: a) $\text{refv} = 8.5 \text{ cm}$; b) $\text{refv} = 15 \text{ cm}$

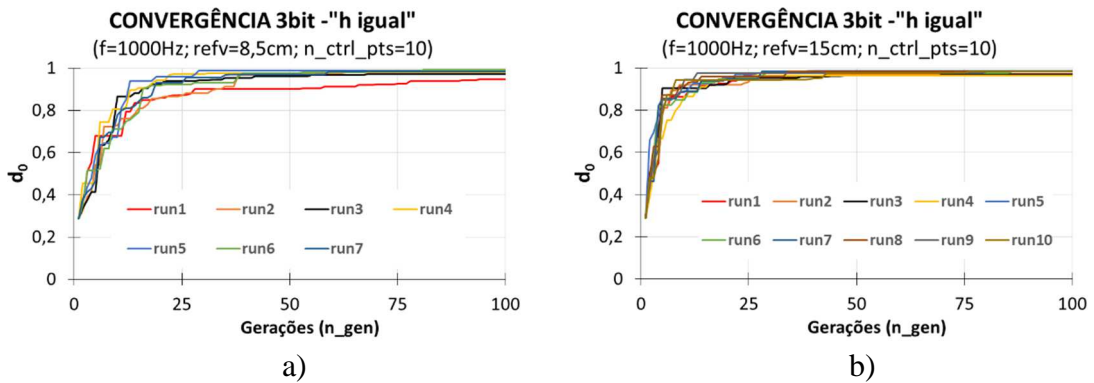


Figura 6.20 – Convergência para $f = 1000 \text{ Hz}$ para 10 pontos de controlo e com o constrangimento geométrico “altura igual”: a) $\text{refv} = 8.5 \text{ cm}$; b) $\text{refv} = 15 \text{ cm}$

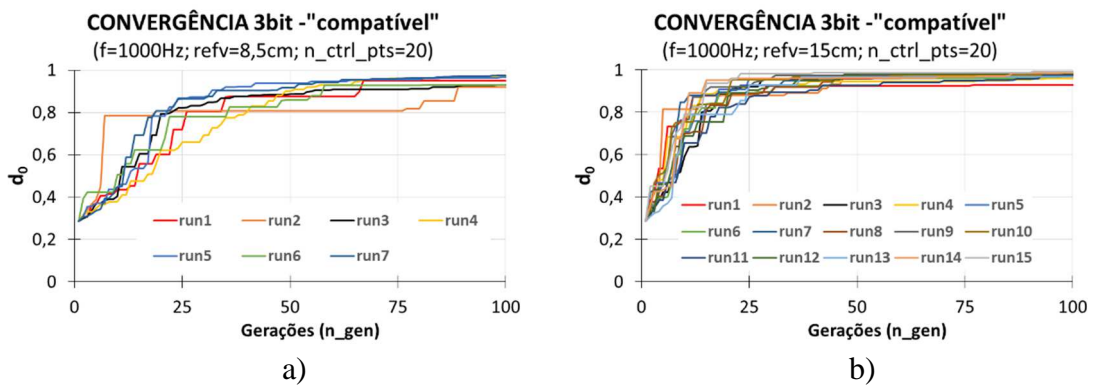


Figura 6.21 – Convergência para $f = 1000 \text{ Hz}$ para 20 pontos de controlo e com o constrangimento geométrico “compatível”: a) $\text{refv} = 8.5 \text{ cm}$; b) $\text{refv} = 15 \text{ cm}$

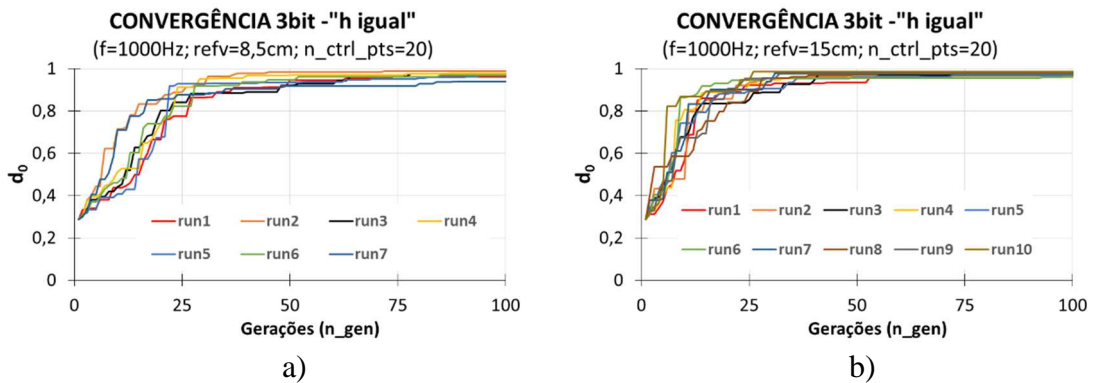


Figura 6.22 – Convergência para $f = 1000 \text{ Hz}$ para 20 pontos de controlo e com o constrangimento geométrico “altura igual”: a) $refv = 8.5 \text{ cm}$; b) $refv = 15 \text{ cm}$

Quadro 6.3 - Resultados das simulações com codificação 3 bit para $f = 1000 \text{ Hz}$: Média dos vários “runs” do coeficiente de difusão e a respectiva dispersão relativa.

Constr. Geo.	Altura igual						Compatíveis					
	5		10		20		5		10		20	
n_CtrlPts	0,085	0,15	0,085	0,15	0,085	0,15	0,085	0,15	0,085	0,15	0,085	0,15
d_0 (3 bit)	0,978	0,987	0,978	0,977	0,968	0,972	0,981	0,980	0,971	0,974	0,948	0,974
Dispersão Rel. (%)	0,315	0,722	4,402	1,585	5,135	2,336	1,313	3,101	4,963	6,960	5,791	6,342
d_0 (1 bit)	0,954	0,920	0,926	0,960	0,962	0,925	0,923	0,840	0,945	0,872	0,962	0,909
Dispersão Rel. (%)	0,000	0,000	0,000	0,000	2,648	7,058	0,000	0,000	0,000	0,000	2,961	7,642

A Figura 6.23 ilustra de forma gráfica os resultados apresentados no Quadro 6.3. Abaixo, para facilitar a comparação entre as duas codificações, a Figura 6.24 ilustra novamente as Figuras 6.9 e 6.16 referentes às otimizações com 1 bit.

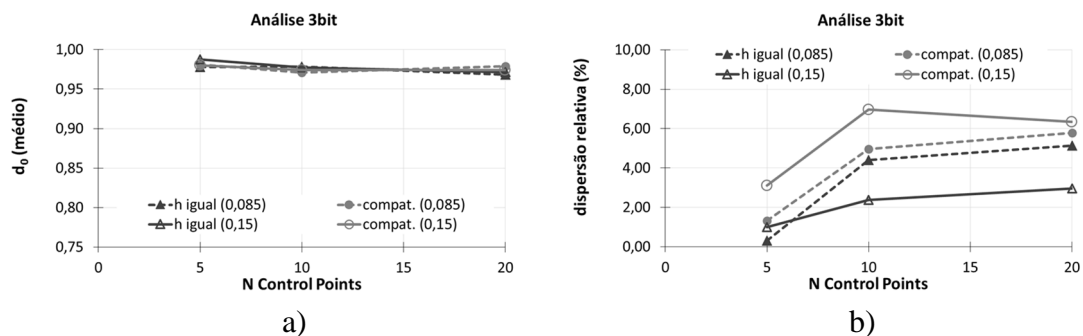


Figura 6.23 – Resultados obtidos para 3 bit para otimização na banda de oitava $f = 1000 \text{ Hz}$, $refv = 8,5 \text{ cm}$ e $refv = 15 \text{ cm}$ e para os dois tipos de constrangimento, “altura igual” e “compatível”: a) Coeficiente de difusão (médio) final; b) Dispersão relativa dos valores finais do coeficiente de difusão (em relação ao valor médio).

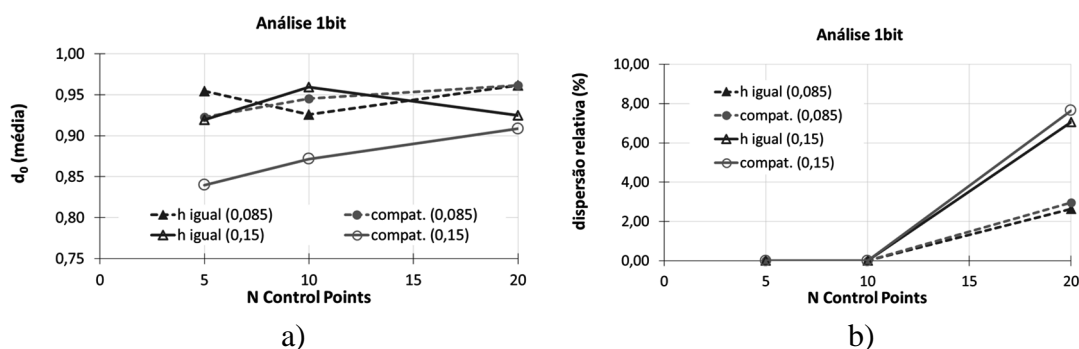


Figura 6.24 – Resultados obtidos para 1 bit para optimização na banda de oitava $f = 1000 \text{ Hz}$, $refv = 8,5 \text{ cm}$ e $refv = 15 \text{ cm}$ e para os dois tipos de constrangimento, “altura igual” e “compatível”: a) Coeficiente de difusão (médio) final; b) Dispersão relativa dos valores finais do coeficiente de difusão (em relação ao valor médio).

A primeira conclusão que se pode retirar é de que o aumento do número de patamares que os pontos de controlo podem tomar, aumentou a eficiência dos difusores, isto é, aumentou o valor final do coeficiente de difusão. Este aumento de possíveis posições dos pontos de controlo aumentou o universo de soluções possíveis e com isso aumentou também as soluções sub-óptimas. Deste modo, a dispersão relativa dos diversos “runs” também aumentou comparativamente ao caso da codificação de 1 bit.

Outra observação interessante é que a dispersão relativa é maior com os extremos “compatíveis”, sendo ainda mais elevada para $refv = 15 \text{ cm}$.

Embora os valores finais médios obtidos do coeficiente de difusão tenham pouca variação, quer relativamente a $refv$ quer ao número de pontos de controlo, o facto é que os maiores valores médios foram obtidos para 5 pontos de controlo. Também a dispersão relativa é menor quanto menor for o número de pontos de controlo.

As Figura 6.25 e 6.26 mostram a evolução do valor do coeficiente de difusão médio (dos diferentes “runs”) relativamente ao valor médio máximo (média dos valores do coeficiente de difusão à 100ª iteração). Estas curvas permitem avaliar a rapidez (média) com que cada caso converge para o valor máximo (médio).

Da observação da Figura 6.25 pode-se concluir que, quanto maior for o número de pontos de controlo, mais lenta é a convergência (em média) para o valor final (médio), independentemente do tipo de constrangimento geométrico imposto. Também se pode observar que o constrangimento geométrico “altura igual” dos pontos de controlo das extremidades do difusor é, genericamente, mais rápida a convergir do que o constrangimento que obriga as curvas serem “compatíveis”.

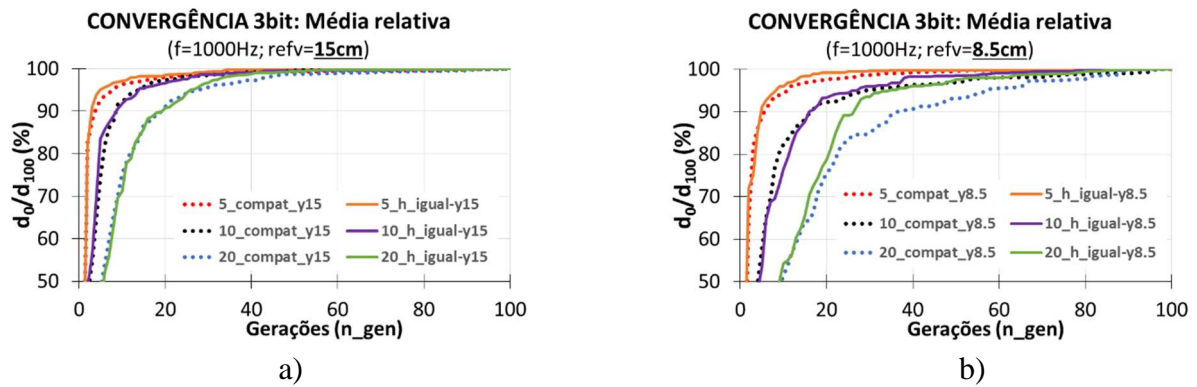


Figura 6.25 – Convergência da média das otimizações, na banda de oitava $f = 1000$ Hz, relativamente ao valor final (à 100ª iteração), para os dois tipos de constrangimento, “altura igual” e “compatível”: a) $refv = 15$ cm; b) $refv = 8,5$ cm.

A observação da Figura 6.26 permite verificar que, de uma forma geral, a convergência relativa dos valores médios para $refv = 15$ cm é mais rápida do que para $refv = 8.5$ cm.

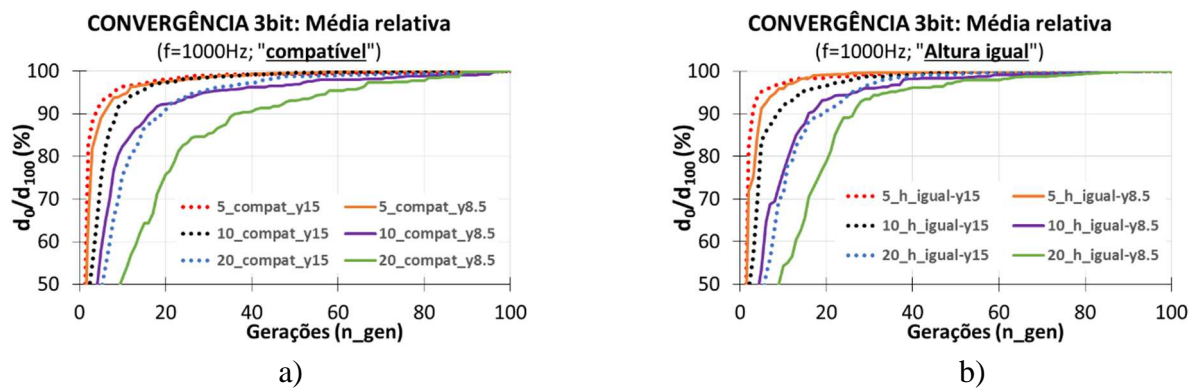


Figura 6.26 – Convergência da média das otimizações, na banda de oitava $f = 1000$ Hz, relativamente ao valor final (à 100ª iteração), para $refv = 15$ cm e $refv = 8,5$ cm os dois tipos de constrangimento: a) “compatível”; b) “altura igual”.

Para se saber se as populações (difusores) evoluíram muito mais, prolongou-se, para os casos com $refv = 15$ cm, o número de interações para 150. O Quadro 6.4 regista os resultados obtidos.

Quadro 6.4 - Resultados das simulações até à 150ª iteração, com codificação 3 bit - $f = 1000$ Hz e $refv = 15$ cm: Média dos vários “runs” do coeficiente de difusão.

n_gerações	"h igual" (refv=0,15 m)						"compatível" (refv=0,15 m)					
	100			150			100			150		
n_CtrlPts	5	10	20	5	10	20	5	10	20	5	10	20
d_0 (médio)	0,987	0,977	0,972	0,989	0,982	0,978	0,980	0,974	0,974	0,983	0,978	0,979
% dispersão	1,002	2,374	2,965	0,722	1,585	2,336	3,101	6,960	6,342	2,008	5,428	5,613

Como se pode observar no quadro acima, houve de facto uma melhoria dos resultados (o valor médio do coeficiente de difusão aumentou e a dispersão diminuiu). Porém, são aumentos muito pouco significativos (no melhor dos casos o valor médio aumentou 0,6%) tendo em conta que houve um aumento de 50% do tempo de cálculo. Desta forma, pode-se considerar que 100 iterações são suficientes para se obter soluções com um elevado coeficiente de difusão.

Para avaliar a influência dos constrangimentos geométricos, para o caso com 3 bits, avaliaram-se, para $refv = 8.5\text{ cm}$ e para $refv = 15\text{ cm}$, 6 difusores otimizados, retirados dos casos ilustrados nas Figuras 6.17 a 6.22 cujos coeficientes de difusão são muito semelhantes, $d_0 = 0.983 \pm 1\%$. As respectivas configurações geométricas são ilustradas da Figura 6.27 à Figura 6.32.

Para avaliar as formas obtidas, a Figura 6.33 apresenta a variação da altura entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo do perfil dos difusores, $y_{Max} - y_{min}$.

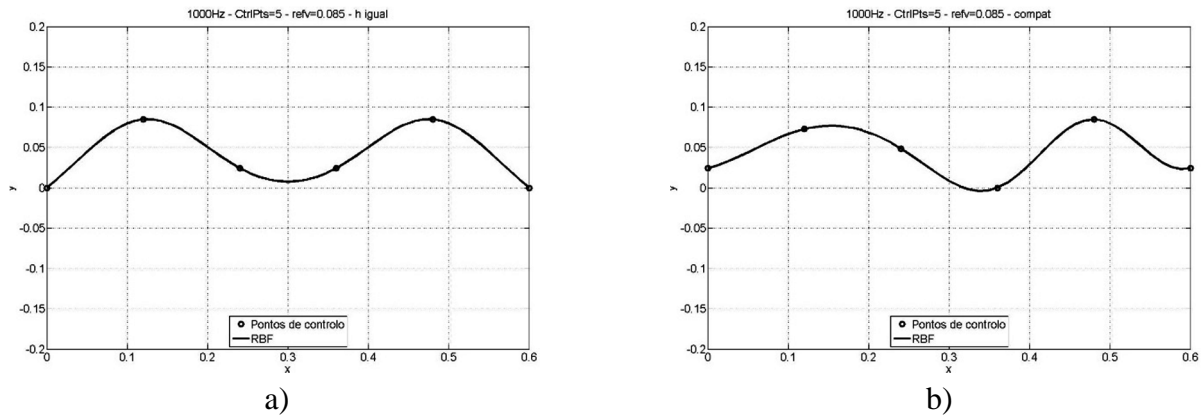


Figura 6.27 – Formas optimizadas para $f = 1000\text{ Hz}$, 5 pontos de controlo e $refv = 8.5\text{ cm}$, com os constrangimentos: a) “altura igual” ($d_0 = 0.976$); b) “compatível” ($d_0 = 0.984$).

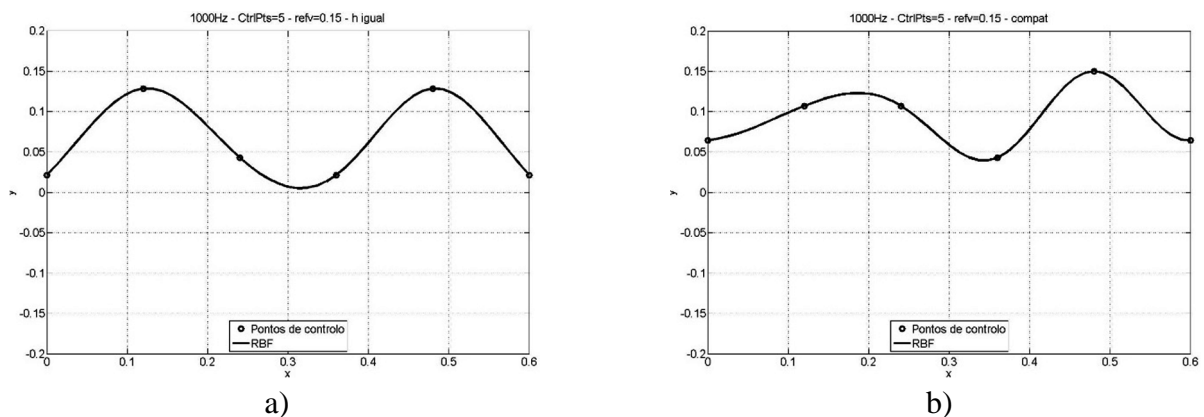


Figura 6.28 – Formas optimizadas para $f = 1000\text{ Hz}$, 5 pontos de controlo e $refv = 15\text{ cm}$, com os constrangimentos: a) “altura igual” ($d_0 = 0.986$); b) “compatível” ($d_0 = 0.983$).

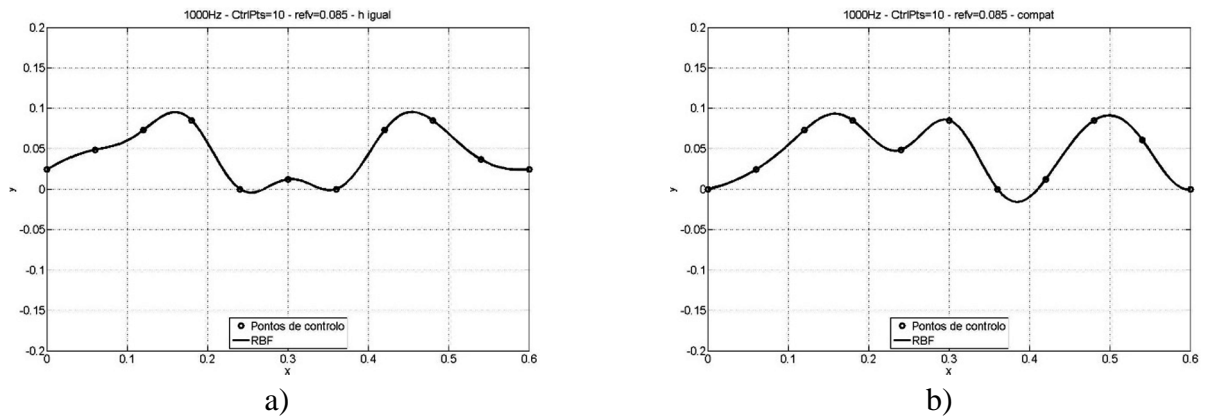


Figura 6.29 – Formas otimizadas para $f = 1000 \text{ Hz}$, $CtrlPts = 10$ e $refv = 8.5 \text{ cm}$, com os constrangimentos: a) “altura igual” ($d_0 = 0.987$); b) “compatível” ($d_0 = 0.982$).

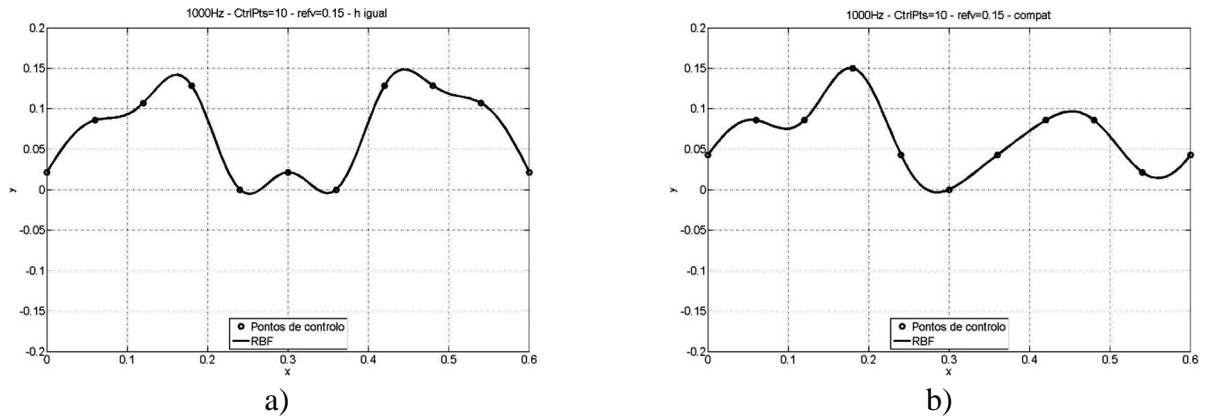


Figura 6.30 – Formas otimizadas para $f = 1000 \text{ Hz}$, $CtrlPts = 10$ e $refv = 15 \text{ cm}$, com os constrangimentos: a) “altura igual” ($d_0 = 0.983$); b) “compatível” ($d_0 = 0.986$).

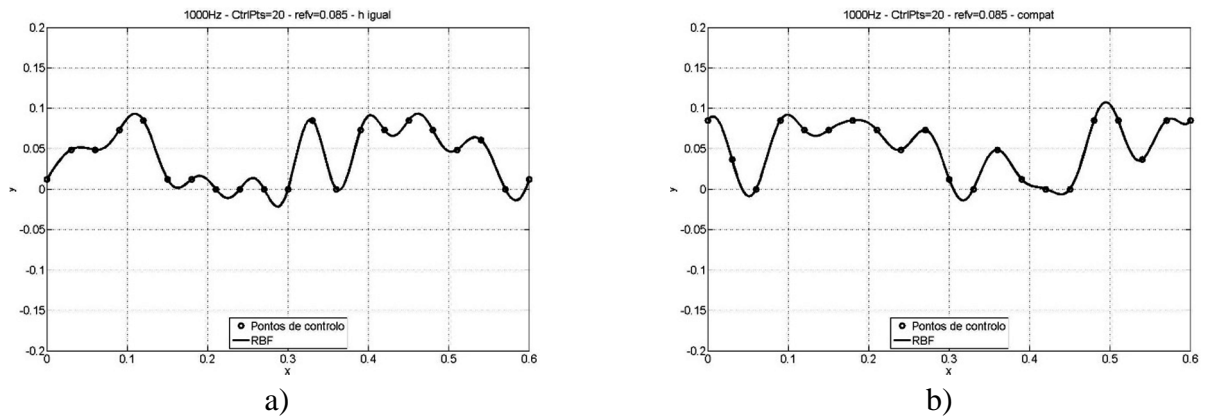


Figura 6.31 – Formas otimizadas para $f = 1000 \text{ Hz}$, $CtrlPts = 20$ e $refv = 8.5 \text{ cm}$, com os constrangimentos: a) “altura igual” ($d_0 = 0.989$); b) “compatível” ($d_0 = 0.972$).

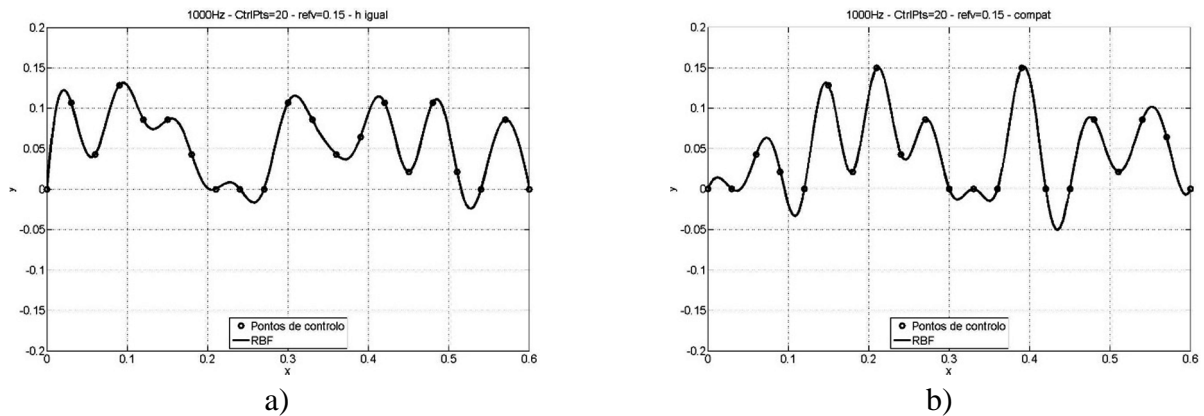


Figura 6.32 – Formas optimizadas para $f = 1000 \text{ Hz}$, $CtrlPts = 20$ e $refv = 15 \text{ cm}$, com os constrangimentos: a) “altura igual” ($d_0 = 0.984$); b) “compatível” ($d_0 = 0.986$).

Da observação da forma das curvas dos difusores nas figuras acima pode-se constatar que, para 5 e 10 pontos de controlo, a optimização para os casos em que os extremos são (apenas) obrigados a terem a mesma altura (h igual) conduziu a curvas simétricas ou “quase-simétricas”. Como também era expectável, o aumento do número dos pontos de controlo torna as curvas optimizadas mais “enrugadas”.

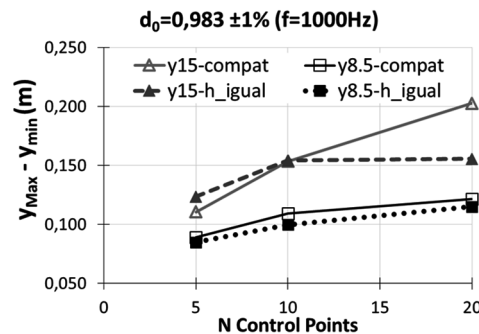


Figura 6.33 – Variação da altura entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo (desnível) do perfil dos difusores apresentados nas Figuras 6.27 a 6.32.

Da observação da Figura 6.33, para o mesmo $refv$, o desnível das curvas ($y_{Max} - y_{min}$) aumenta quando o número de pontos de controlo aumenta – consequência directa do “enrugamento” das curvas. Também se pode inferir que, para o $refv$ menor, o constrangimento “compatível” (que obriga a que, para além dos pontos extremos terem a mesma altura, a curva nesses pontos tenha o mesmo declive) conduz a difusores mais “profundos”. Para $refv = 15 \text{ cm}$, o aumento da “profundidade” do difusor cresce com o número de pontos de controlo, contudo depende do tipo de constrangimento.

As próximas figuras mostram o coeficiente de difusão dos difusores apresentados nas Figuras 6.27 a 6.32. Como a optimização foi realizada para bandas de oitava, opta-se por apresentar a comparação dos resultados apenas em bandas de frequência de oitava.

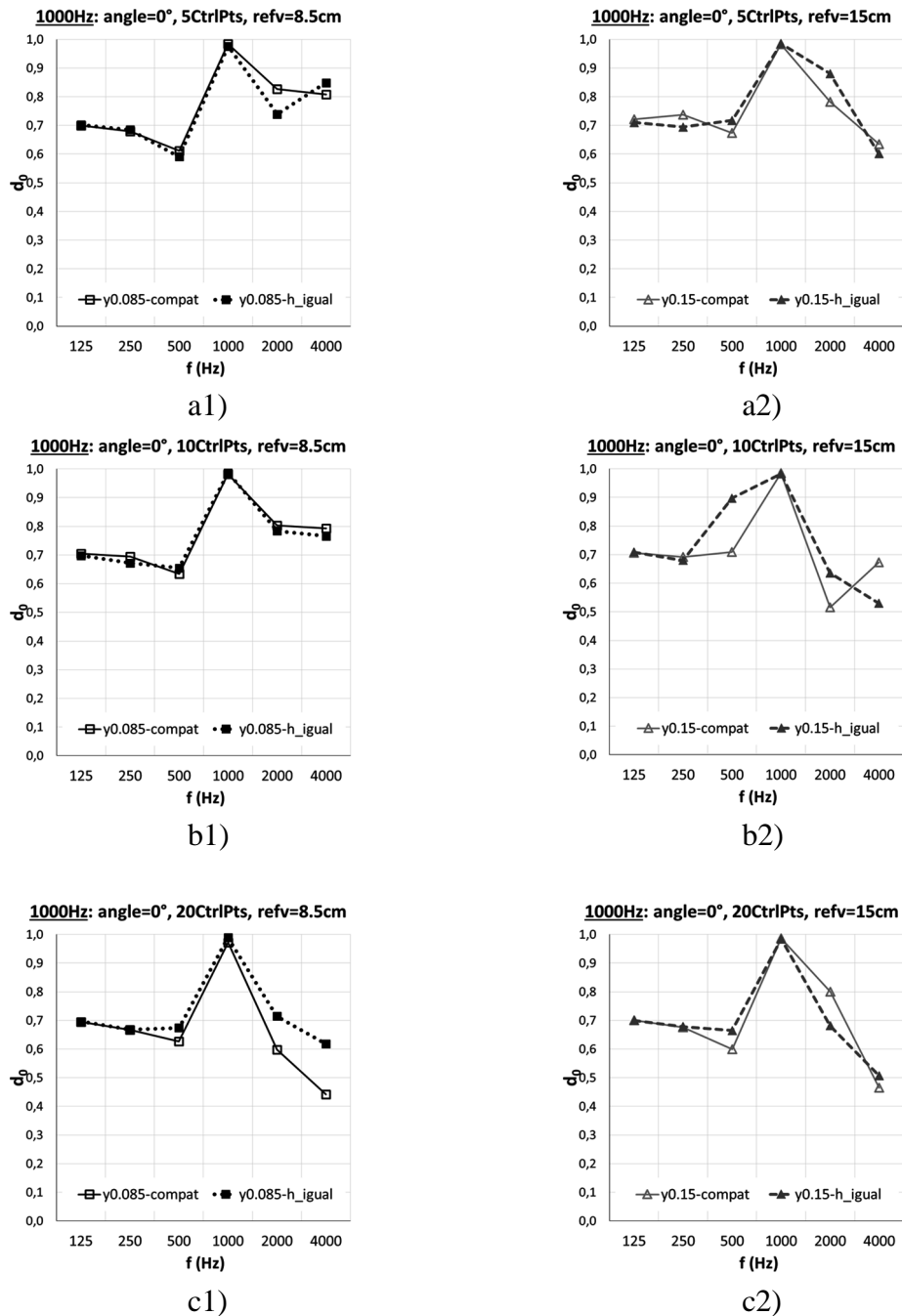


Figura 6.34 – Coeficiente de difusão, para incidência normal, para os difusores das figuras 6.27 a 6.32. a#) 5 pontos de controlo; b#) 10 pontos de controlo; c#) 20 pontos de controlo. #1) $refv = 8.5\text{cm}$; #2) $refv = 15\text{cm}$.

Como se pode observar na Figura 6.34, não se detecta nenhum comportamento comum em todos os casos que possa conduzir a uma conclusão relativa à influência dos constrangimentos. Desse modo, o que se pode concluir é que a utilização do constrangimento “compatíveis” não acarreta diminuição do desempenho do difusor.

A Figura 6.35 apresenta o coeficiente de difusão dos diferentes difusores em função do número de pontos de controlo. Pode-se observar que os casos com 20 pontos de controlo têm, genericamente, pior desempenho que os restantes casos. Em vários gráficos dos apresentados nessa figura, os casos com apenas 5 pontos de controlo apresentam melhor desempenho. Se também se tiver em atenção que estas curvas são mais suaves e, portanto, mais simples para uma hipotética fabricação, pode-se concluir que não é necessário utilizar muitos pontos de controlo para se obter soluções optimizadas – acresce a isto também a vantagem que a dispersão relativa de vários “runs” é menor e que a convergência é mais rápida.

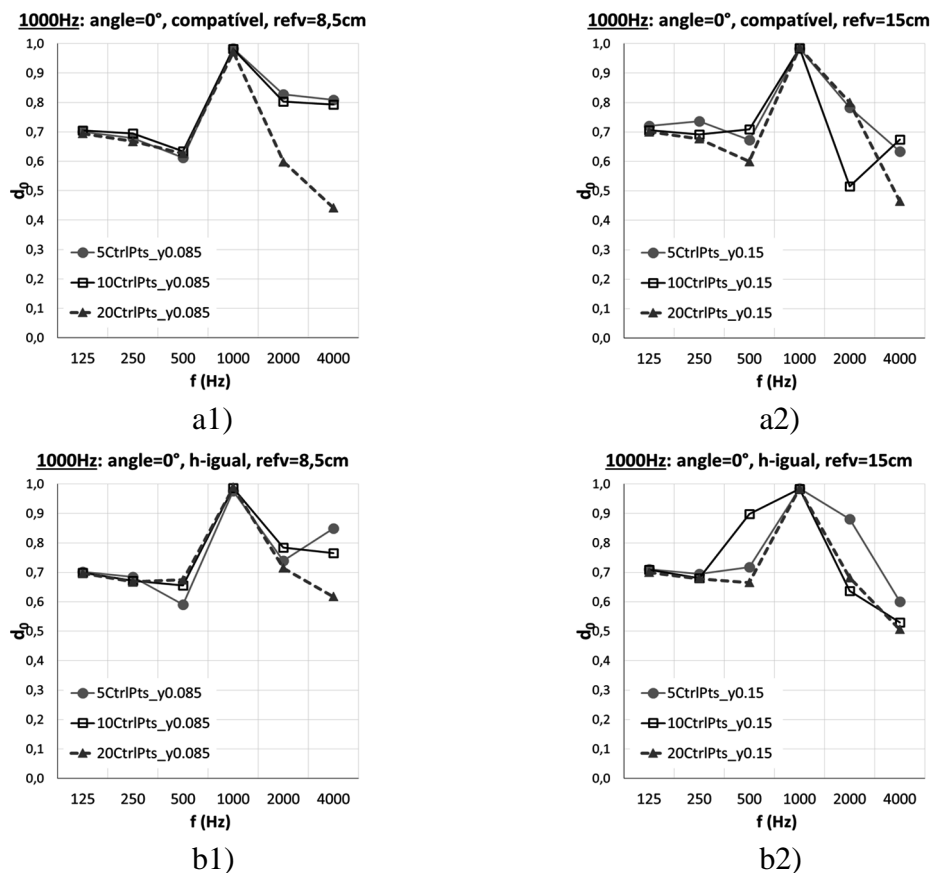


Figura 6.35 – Coeficiente de difusão, para incidência normal, em função do número de pontos de controlo dos difusores das figuras 6.27 a 6.32. a#) Constrangimento “compatível”; b#) Constrangimento “Altura igual”. #1) $refv = 8.5cm$; #2) $refv = 15cm$.

A Figura 6.36 analisa o comportamento dos difusores quando são utilizados 3 módulos idênticos usados lado a lado. Como era expectável, o coeficiente de difusão diminui com o aumento do número de módulos e, genericamente, a banda de frequências para o qual o conjunto é mais eficiente passou para a banda dos 2000 Hz.

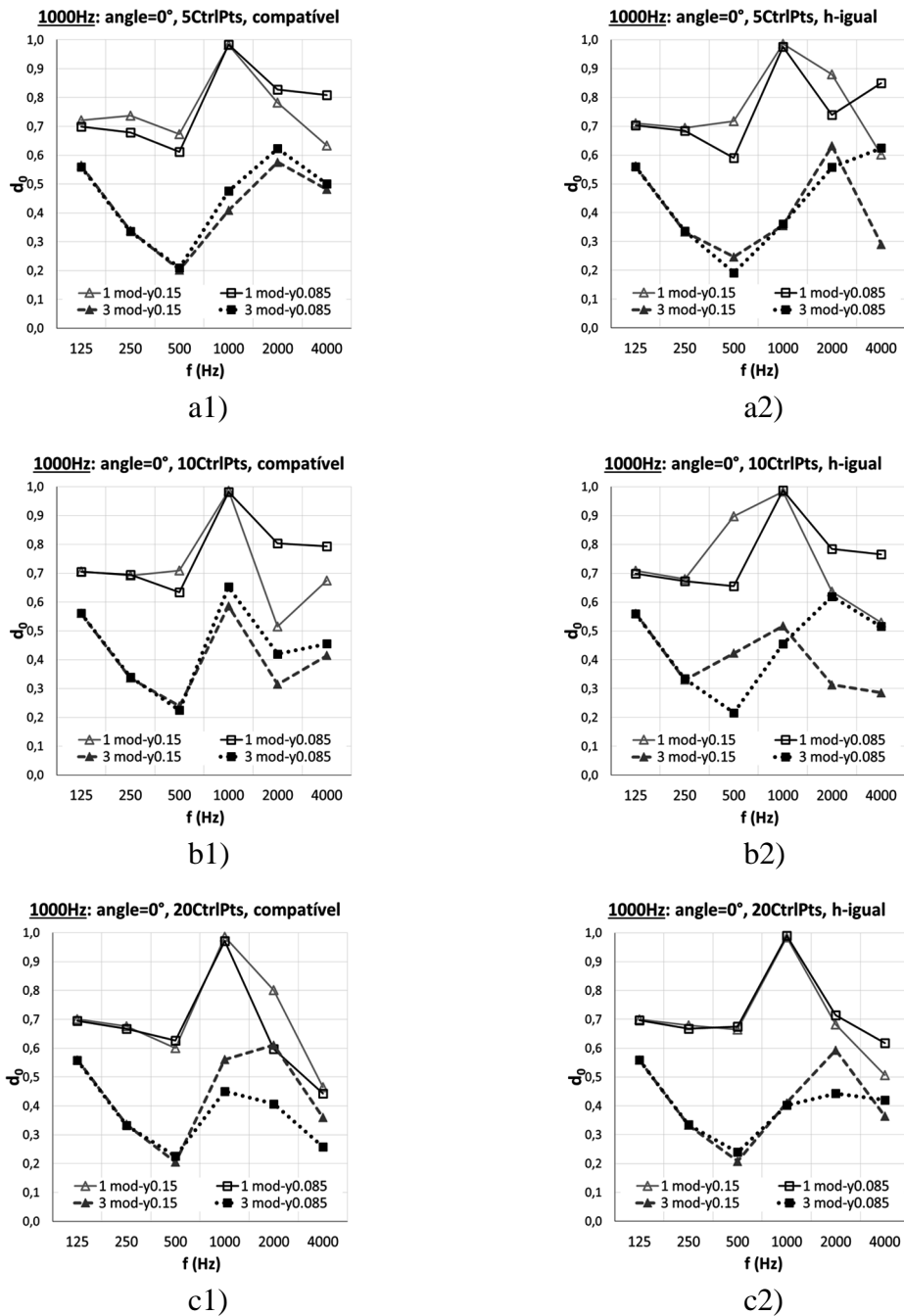


Figura 6.36 – Coeficiente de difusão (incidência normal) para 1 módulo e para 3 módulos para os difusores das figuras 6.27 a 6.32. a#) 5 pontos de controlo; b#) 10 pontos de controlo; c#) 20 pontos de controlo. #1) Constrangimento “compatível; #2) Constrangimento “Altura igual”.

Este facto torna bastante pertinente que a optimização possa ser feita para “n” módulos – à frente, na Secção 6.5, apresentar-se-ão alguns casos.

6.4. INFLUÊNCIA DA ALTURA MÁXIMA DOS PONTOS DE CONTROLO, $refv$

Como foi demonstrado ao longo das secções anteriores, a utilização de 3 bits para codificar a alturas possíveis para os pontos de controlo conduz a difusores com elevado desempenho. Por outro lado, também se verificou que a utilização do constrangimento geométrico “compatíveis” não acarreta uma diminuição significativa do desempenho dos difusores obtidos. Assim, nesta secção, pretende-se determinar qual a altura máxima dos pontos de controlo, $refv$, que conduz aos melhores difusores assim definidos. Para tal, fez-se um estudo paramétrico, para incidência normal, cujos resultados se apresentam de seguida.

Para este estudo, consideraram-se difusores definidos por 5, 10 e 20 pontos de controlo, com uma largura de $L = 0.60\text{ m}$, e optimizaram-se para três bandas de oitava cujas frequências centrais foram: $f = 500\text{ Hz}$, $f = 1000\text{ Hz}$ e $f = 2000\text{ Hz}$.

Foi definido o número de 100 iterações como o critério de paragem do ciclo iterativo de optimização (embora se tenha visto nas secções anteriores que não era necessário um tão elevado número de iterações). Para cada caso (isto é, para cada conjunto de número de pontos de controlo, frequência de optimização e $refv$) fizeram-se 7 “runs” de optimização consecutivos, sempre com a população inicial definida como superfícies planas. Para todos os “runs”, a população era constituída por 22 indivíduos (difusores), que é, como se referiu anteriormente, o número de processadores da máquina utilizada neste estudo – o algoritmo de optimização foi implementado (em matlab) de modo a tirar partido da paralelização do cálculo.

Dos resultados obtidos, calculou-se a média dos valores finais e determinou-se o maior valor do coeficiente de difusão (ou seja, o melhor difusor obtido para cada caso). Os resultados obtidos são apresentados nas figuras seguintes.

A Figura 6.37 apresenta os resultados relativos aos valores médios por número de pontos de controlo e a Figura 6.38 apresenta os mesmos resultados mas organizados por bandas de frequência. As marcas com maior dimensão indicam onde os valores máximos (da média) ocorrem.

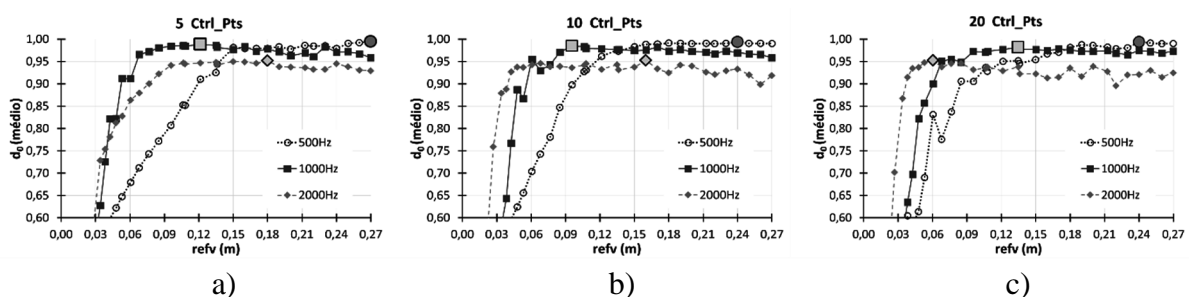


Figura 6.37 – Coeficiente de difusão médio para cada uma das bandas de oitava de frequência em função de $refv$ para: a) 5 pontos de controlo; b) 10 pontos de controlo; c) 20 pontos de controlo.

Da observação das referidas figuras, a primeira conclusão que se pode retirar é que quanto maior for a frequência de optimização menor é o valor máximo médio do coeficiente de difusão que se obtém. Outra conclusão que se pode retirar é que para a banda de frequência dos 500 Hz, só se obtém valores elevados a partir de $refv > 0.12\text{ m}$, enquanto para as bandas de frequência mais elevadas, começa-se a obter valor médios elevados para alturas $refv$ menores.

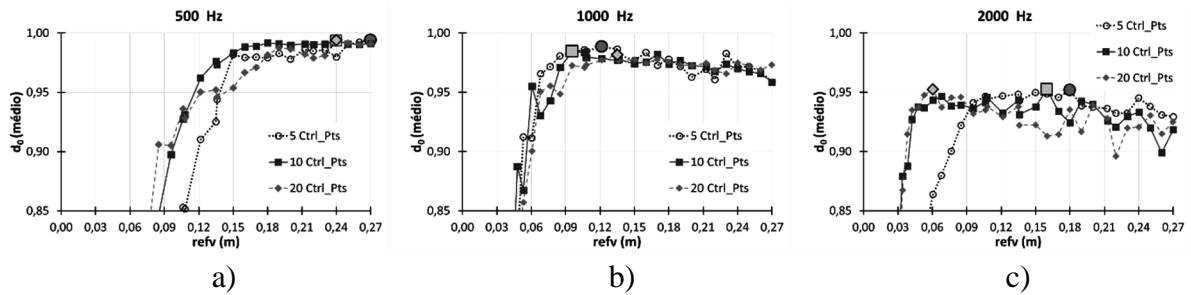


Figura 6.38 – Coeficiente de difusão médio para cada número de pontos de controlo em função de $refv$ para as bandas de oitava centradas na frequência: a) 500 Hz; b) 1000 Hz; c) 2000 Hz.

O Quadro 6.5 regista os valores para os quais ocorrem os coeficientes de difusão médios máximos (referentes à média dos valores finais dos 7 “runs” executados para caso em estudo). Da sua observação, verifica-se que, para cada banda de frequência, o valor médio do coeficiente de difusão mantém-se praticamente constante com o número de pontos de controlo – a excepção é na banda de frequência dos 1000 Hz, mas mesmo nesta a variação é muito pequena (inferior a 1%). Também se verifica (como era expectável e que também foi observado nas figuras anteriores) que os maiores valores médios para a banda dos 500 Hz são obtidos para valores elevados de $refv$, para a banda dos 1000 Hz são valores médios e para a banda dos 2000 Hz ocorrem quer em valores baixos quer em valores médios-altos. Pode até parecer estranho, contudo, o valor de $refv$ pode ser elevado mas os pontos de controlo podem não tomar o valor mais alto – aliás, isso será notado e referido mais à frente.

Quadro 6.5 – Valor máximo do coeficiente de difusão da média dos vários “runs”.

		d_0 médio	$refv d_{médio}$ (m)
500Hz	5 Ctrl_Pts	0,994	0,270
	10 Ctrl_Pts	0,993	0,240
	20 Ctrl_Pts	0,994	0,240
1000Hz	5 Ctrl_Pts	0,989	0,121
	10 Ctrl_Pts	0,984	0,096
	20 Ctrl_Pts	0,982	0,135
2000Hz	5 Ctrl_Pts	0,952	0,180
	10 Ctrl_Pts	0,952	0,160
	20 Ctrl_Pts	0,952	0,061

Como o que se pretende obter são soluções optimizadas, o que se procura então são os difusores com o maior coeficiente de difusão. Deste modo, dos 7 “runs” executados para cada conjunto

de parâmetros (n° de pontos de controlo, frequência de optimização e $refv$), determinou-se aqueles cujo valor do coeficiente de difusão foi máximo. As Figuras 6.39 e 6.40 apresentam a evolução do valor máximo do coeficiente de difusão em função de $refv$.

O Quadro 6.6 resume a informação contida nas referidas figuras, apresentando os valores máximos e para quais valores de $refv$ é que ocorreram.

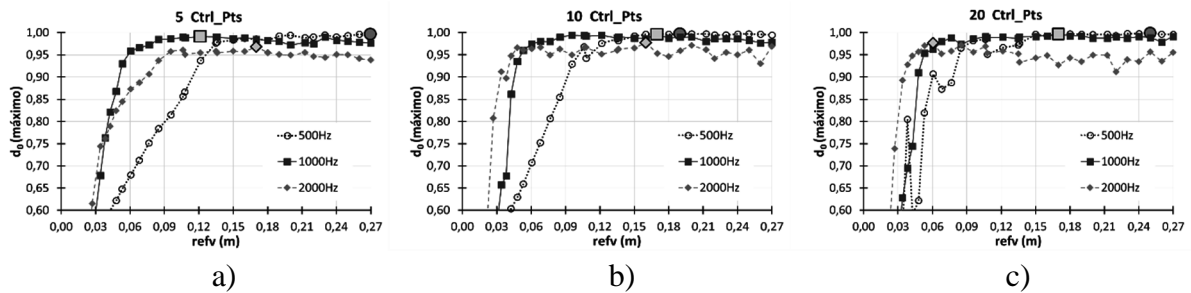


Figura 6.39 – Coeficiente de difusão máximo para cada uma das bandas de oitava de frequência em função de $refv$ para: a) 5 pontos de controlo; b) 10 pontos de controlo; c) 20 pontos de controlo.

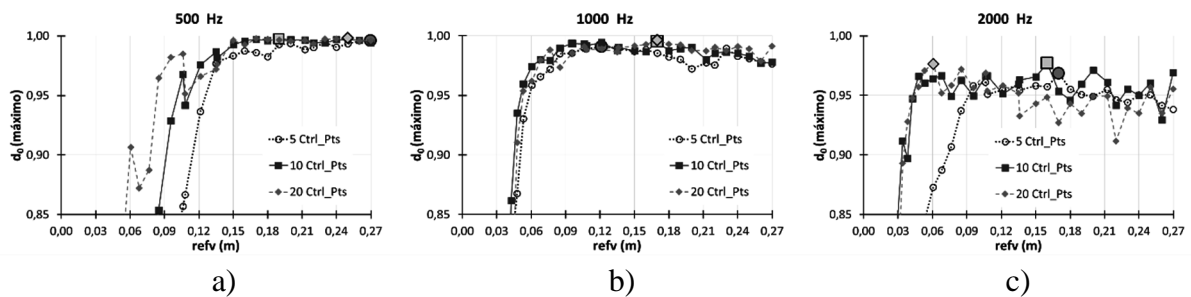


Figura 6.40 – Coeficiente de difusão máximo para cada número de pontos de controlo em função de $refv$ para as bandas de oitava centradas na frequência: a) 500 Hz; b) 1000 Hz; c) 2000 Hz.

Quadro 6.6 – Valor máximo do coeficiente de difusão dos vários “runs”.

		d_0 Máximo	$refv d_{Max}$ (m)	$y_{max} d_{Max}$ (m)	Δy (m)
500Hz	5 Ctrl_Pts	0,996	0,270	0,270	0,275
	10 Ctrl_Pts	0,997	0,190	0,190	0,215
	20 Ctrl_Pts	0,998	0,250	0,250	0,334
1000Hz	5 Ctrl_Pts	0,991	0,121	0,121	0,110
	10 Ctrl_Pts	0,995	0,170	0,121	0,133
	20 Ctrl_Pts	0,996	0,170	0,146	0,172
2000Hz	5 Ctrl_Pts	0,968	0,170	0,146	0,147
	10 Ctrl_Pts	0,977	0,160	0,114	0,146
	20 Ctrl_Pts	0,977	0,061	0,061	0,078

Tal como os valores médios, também os valores máximos são maiores quanto menor for a frequência de optimização. Para cada banda de frequência, os valores do coeficiente de difusão

são praticamente constantes com o aumento dos pontos de controlo, crescem muito ligeiramente (inferior a 1%).

Também se constata que os valores de $refv$ para os quais ocorrem os valores máximos do coeficiente de difusão não ocorrem nos mesmos onde os valores médios são mais elevados – as excepções estão assinaladas no Quadro 6.6 em “*itálico*”.

Este quadro tem ainda a informação da altura máxima que algum dos pontos de controlo atinge ($y_{Max} | d_{Max}$) e o desnível da respectiva RBF, que é diferença entre a altura do ponto da RBF mais elevado e a do menos elevado ($\Delta y = y_{Max} - y_{min}$). Como se pode observar, em 4 casos a altura máxima dos pontos de controlo não atinge o valor $refv$, são eles $f = 1000 \text{ Hz}$, para 10 e 20 pontos de controlo e para $f = 2000 \text{ Hz}$ para 5 e 10 pontos de controlo. Nestas situações, o desnível da superfície frontal do difusor é inferior ao valor $refv$. Este desnível (ou “profundidade” do difusor), em média, diminui com o aumento da frequência, o que faz sentido pois quanto maior o desnível maior deverá ser o comprimento de onda do som incidente.

As figuras seguintes apresentam os 9 difusores cujos coeficientes de difusão foram máximos. Essas figuras apresentam, para além da curva resultante do processo de otimização, o coeficiente de difusão normalizado (para incidência normal) de 1 módulo, 3 módulos e 5 módulos, permitindo assim perceber o desempenho acústico da solução quando vários módulos forem utilizados em conjunto.

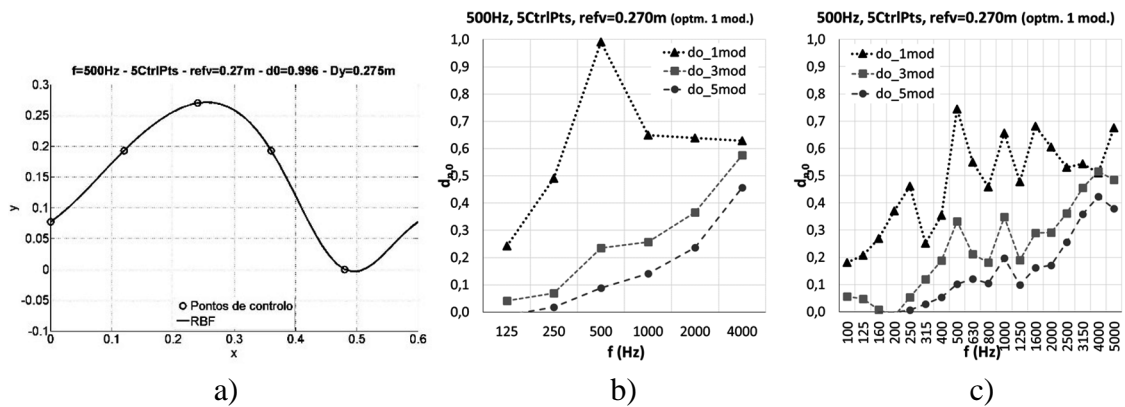


Figura 6.41 – Difusor otimizado para a banda de oitava centrada em $f = 500 \text{ Hz}$ definido por 5 pontos de controlo e $refv = 0.27m$. a) Forma geométrica; Coeficiente de difusão normalizado em: b) Bandas de oitava; c) Bandas de 1/3 de oitava.

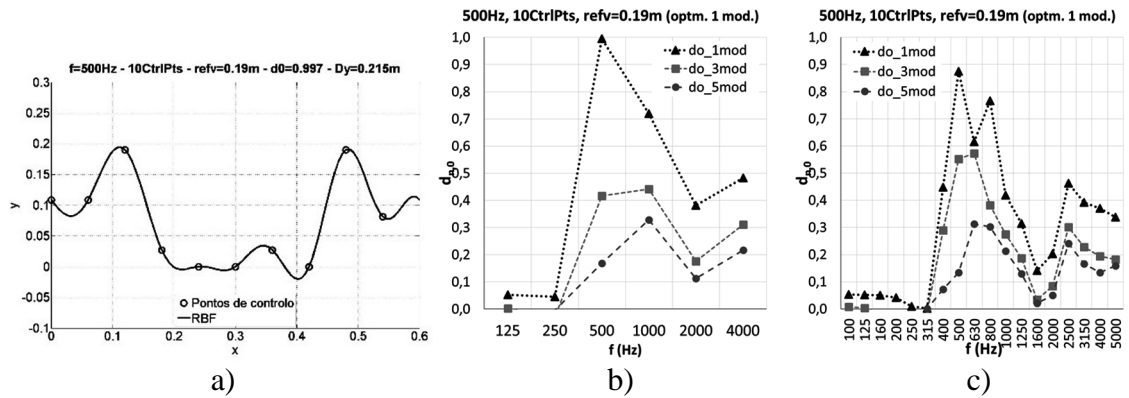


Figura 6.42 – Difusor otimizado para a banda de oitava centrada em $f = 500\text{ Hz}$ definido por 10 pontos de controlo e $refv = 0.19m$. a) Forma geométrica; Coeficiente de difusão normalizado em: b) Bandas de oitava; c) Bandas de 1/3 de oitava.

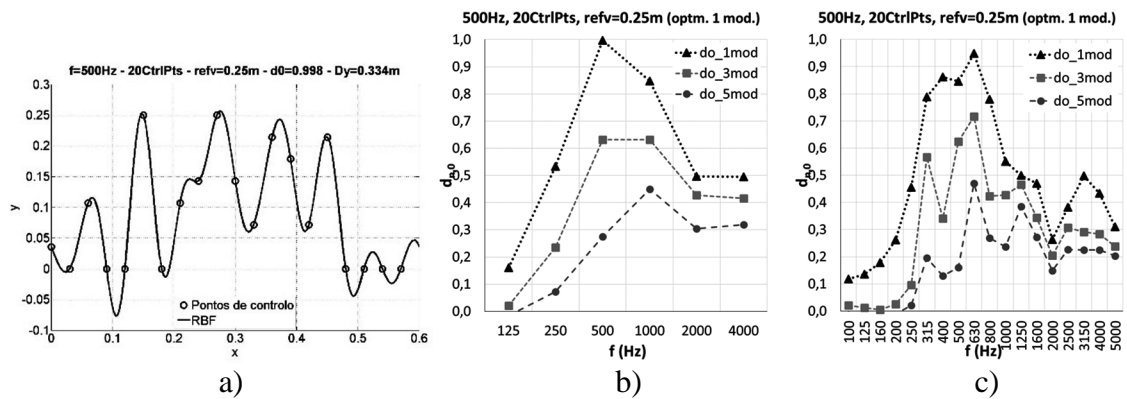


Figura 6.43 – Difusor otimizado para a banda de oitava centrada em $f = 500\text{ Hz}$ definido por 20 pontos de controlo e $refv = 0.25m$. a) Forma geométrica; Coeficiente de difusão normalizado em: b) Bandas de oitava; c) Bandas de 1/3 de oitava.

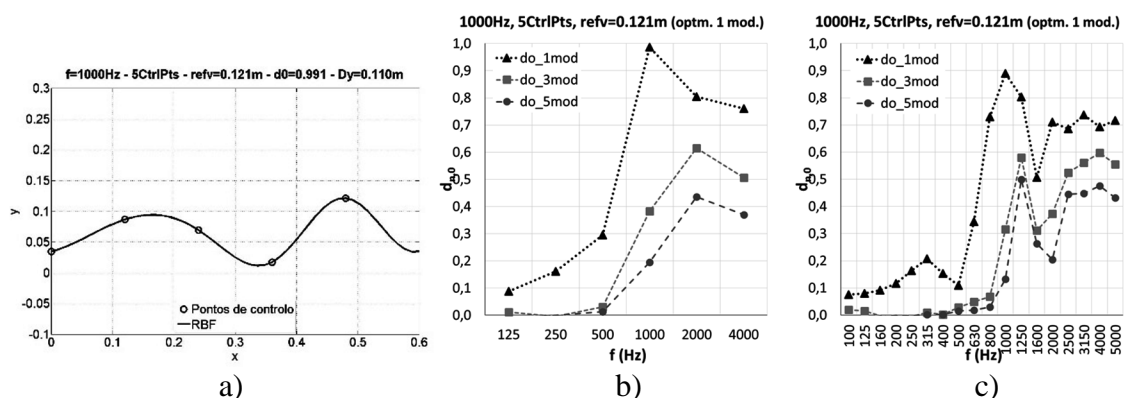


Figura 6.44 – Difusor otimizado para a banda de oitava centrada em $f = 1000\text{ Hz}$ definido por 5 pontos de controlo e $refv = 0.121m$. a) Forma geométrica; Coeficiente de difusão normalizado em: b) Bandas de oitava; c) Bandas de 1/3 de oitava.

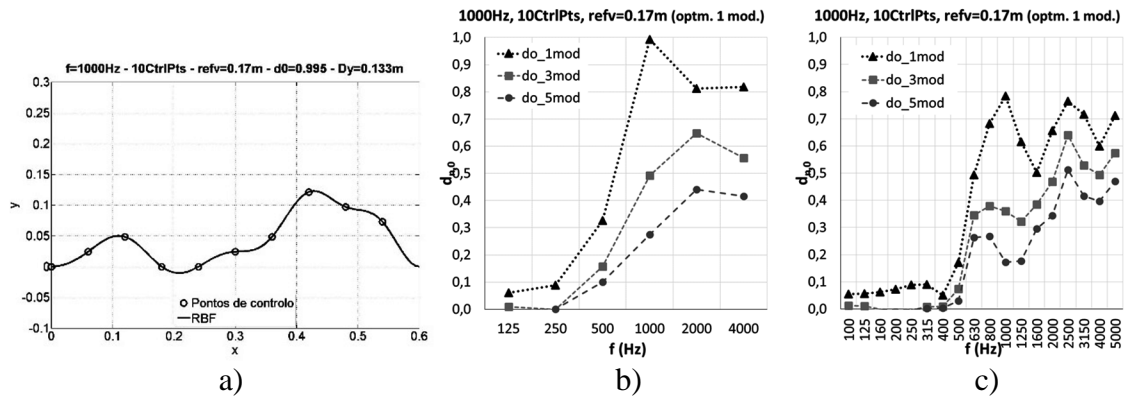


Figura 6.45 – Difusor otimizado para a banda de oitava centrada em $f = 1000 \text{ Hz}$ definido por 10 pontos de controlo e $\text{refv} = 0.17\text{m}$. a) Forma geométrica; Coeficiente de difusão normalizado em: b) Bandas de oitava; c) Bandas de 1/3 de oitava.

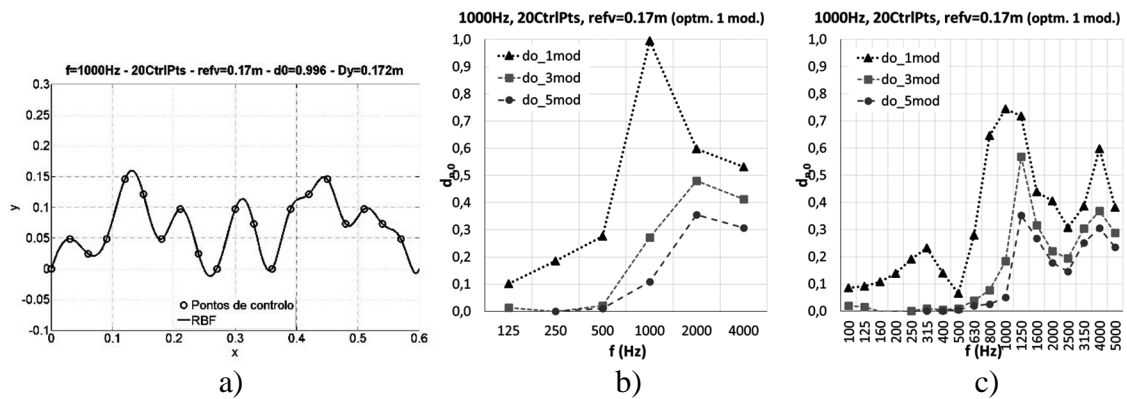


Figura 6.46 – Difusor otimizado para a banda de oitava centrada em $f = 1000 \text{ Hz}$ definido por 20 pontos de controlo e $\text{refv} = 0.17\text{m}$. a) Forma geométrica; Coeficiente de difusão normalizado em: b) Bandas de oitava; c) Bandas de 1/3 de oitava.

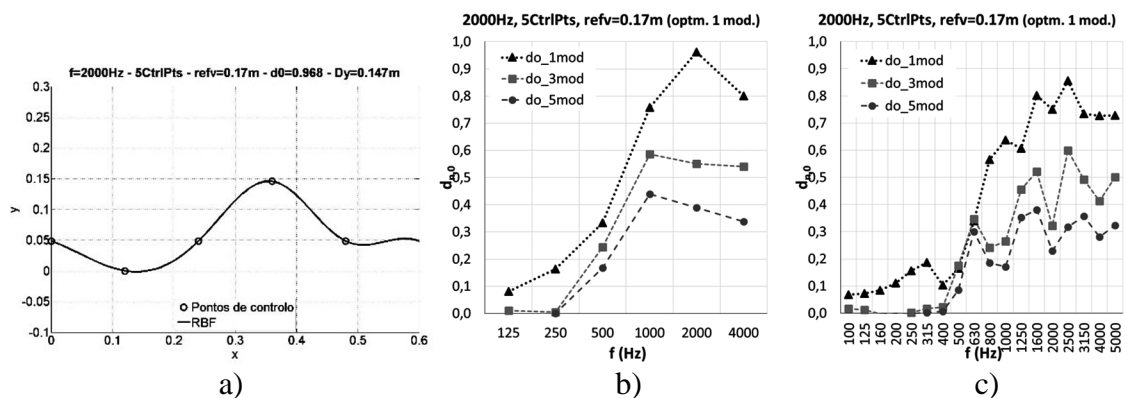


Figura 6.47 – Difusor otimizado para a banda de oitava centrada em $f = 2000 \text{ Hz}$ definido por 5 pontos de controlo e $\text{refv} = 0.17\text{m}$. a) Forma geométrica; Coeficiente de difusão normalizado em: b) Bandas de oitava; c) Bandas de 1/3 de oitava.

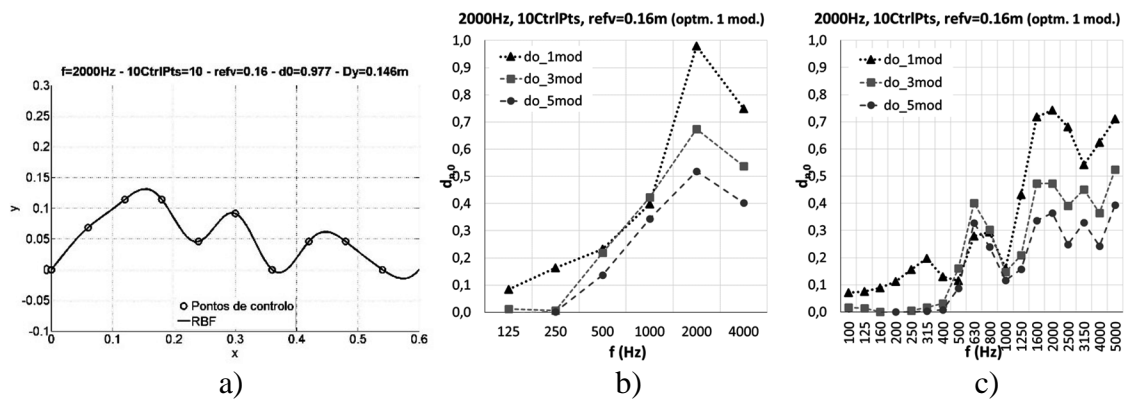


Figura 6.48 – Difusor optimizado para a banda de oitava centrada em $f = 2000 \text{ Hz}$ definido por 10 pontos de controlo e $refv = 0.16m$. a) Forma geométrica; Coeficiente de difusão normalizado em: b) Bandas de oitava; c) Bandas de 1/3 de oitava.

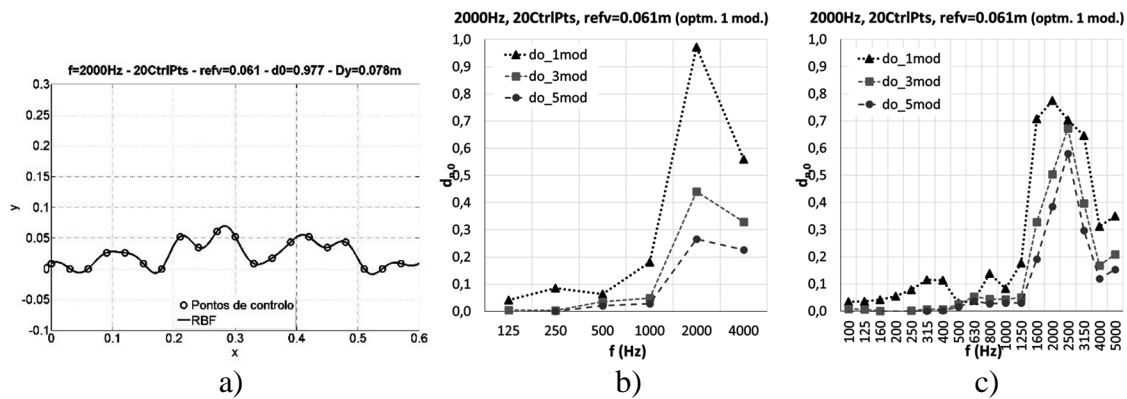


Figura 6.49 – Difusor optimizado para a banda de oitava centrada em $f = 2000 \text{ Hz}$ definido por 20 pontos de controlo e $refv = 0.061m$. a) Forma geométrica; Coeficiente de difusão normalizado em: b) Bandas de oitava; c) Bandas de 1/3 de oitava.

Como se pode observar nas figuras acima, todos os difusores têm desempenhos elevados para as bandas de frequência (de oitava) para os quais foram optimizados. Pode-se, desta forma concluir que o método proposto neste trabalho atingiu os objectivos a que se propôs.

Pode-se ainda observar que a performance dos difusores diminui quando se utilizam mais do que um módulo em conjunto. De facto, não só diminuem os valores do coeficiente de difusão como a banda de frequência para as quais ocorre o valor máximo é, na generalidade dos casos, diferente da banda de frequência de optimização, na maioria das vezes a banda de frequência de maior desempenho aumenta.

Normalmente, o que se pretende é desenvolver um difusor que tenha um elevado desempenho numa dada banda de frequências. Já se observou que é possível atingir desempenhos semelhantes utilizando diferentes números de pontos de controlo. Assim, do ponto de vista estritamente de acústica, o número de pontos de controlo não é um requisito “acústico” mas sim geométrico, com influência clara na forma final do difusor com consequências directas na

exequibilidade construtiva do mesmo e nos constrangimentos arquitectónicos que se possa estar sujeito (profundidade máxima do difusor). Assim, para se analisar os resultados obtidos e comparar soluções, é conveniente agrupá-las por banda de frequências. Por outro lado, como a optimização é realizada por bandas de oitava, opta-se que essa comparação seja feita analisando os resultados obtidos apenas por bandas de frequências de oitava. As próximas figuras agrupam os resultados atrás apresentados da Figura 6.41 à Figura 6.49.

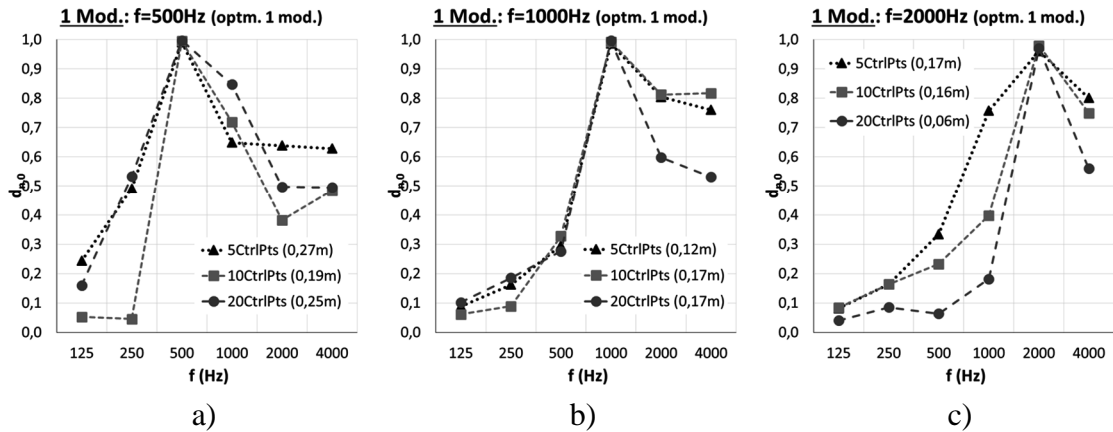


Figura 6.50 – Coeficiente de difusão normalizado (para incidência normal) de 1 módulo dos difusores das Figuras 6.41 a 6.49 para as bandas de oitava: a) $f = 500 \text{ Hz}$; b) $f = 1000 \text{ Hz}$; c) $f = 2000 \text{ Hz}$.

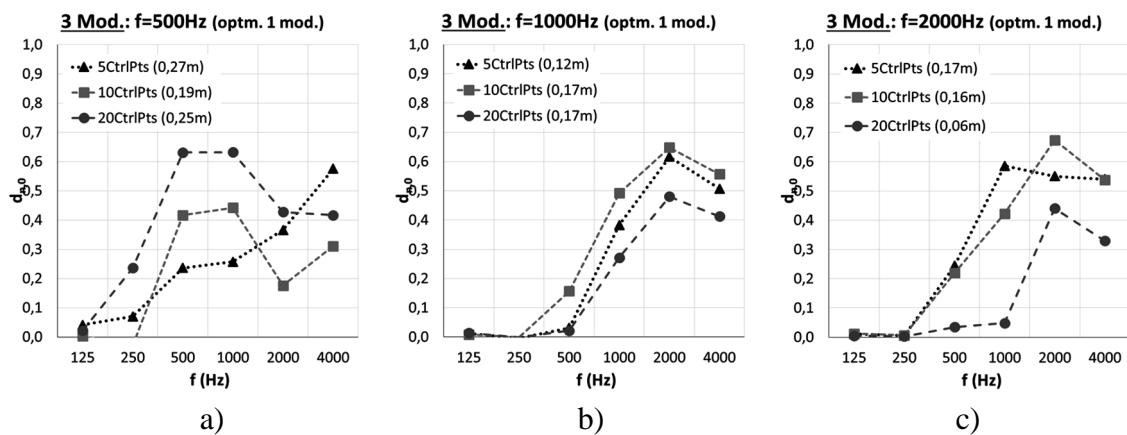


Figura 6.51 – Coeficiente de difusão normalizado (para incidência normal) de 3 módulos dos difusores das Figuras 6.41 a 6.49 para as bandas de oitava: a) $f = 500 \text{ Hz}$; b) $f = 1000 \text{ Hz}$; c) $f = 2000 \text{ Hz}$.

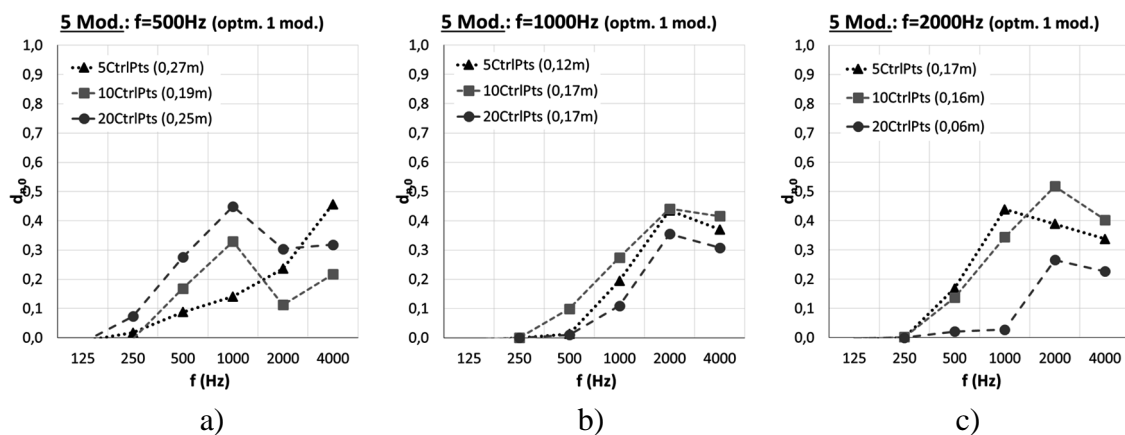


Figura 6.52 – Coeficiente de difusão normalizado (para incidência normal) de 5 módulos dos difusores das Figuras 6.41 a 6.49 para as bandas de oitava: a) $f = 500 \text{ Hz}$; b) $f = 1000 \text{ Hz}$; c) $f = 2000 \text{ Hz}$.

Se se analisar apenas o desempenho de um único difusor, Figura 6.50, observa-se que, conforme for a banda de frequência em questão, a melhor opção em termos de número de pontos de controlo varia: para $f = 500 \text{ Hz}$, poderia ser a utilização de 5 pontos de controlo, se se desejasse também mais difusão em frequências mais altas; para $f = 1000 \text{ Hz}$, a melhor opção será a utilização do difusor definido por 10 pontos de controlo; $f = 2000 \text{ Hz}$, a melhor opção parece recair sobre o difusor definido por 5 pontos de controlo (esta solução tem uma maior “largura de banda “ de eficiência).

Contudo, em utilizações práticas, em muito poucas situações se utilizará apenas um difusor (com a dimensão de 0.6 m). Assim, convém observar qual o desempenho dos difusores quando se utilizam mais módulos, posicionados lado a lado. A título de exemplo, considerou-se a utilização de 3 módulos (Figura 6.51) e 5 módulos (Figura 6.52). Analisando novamente por bandas de frequência, pode-se observar que, para a banda de frequência de $f = 500 \text{ Hz}$, a melhor opção é a proporcionada pelo difusor definido por 20 pontos de controlo, pois é a que tem melhor desempenho na banda de interesse (e nas adjacentes). Para a banda de frequência de $f = 1000 \text{ Hz}$, a melhor opção, pelas mesmas razões, é o difusor definido por 10 pontos de controlo. Na banda de frequência de $f = 2000 \text{ Hz}$, é também a opção proporcionada pela utilização de 10 pontos de controlo – a que tem melhor desempenho na banda de frequência em questão.

De qualquer forma, qualquer das soluções apresentadas tem substancialmente menos difusão quando se utilizam mais módulos, e a banda de frequências para a qual ocorre melhor desempenho, nem sempre coincide com a frequência de optimização. Assim, é pertinente ajustar o algoritmo de optimização para esta situação. A secção seguinte apresentará os resultados obtidos pela metodologia proposta mas adaptada à utilização de mais do que um módulo.

6.5. OPTIMIZAÇÃO DE N MÓDULOS

Na secção anterior verificou-se a necessidade de otimizar difusores que cobrissem uma maior área de modo a terem impacto na qualidade acústica das salas. A primeira solução, e mais óbvia, é proceder à optimização de difusores com maior dimensão (largura) do que a explorada nas secções anteriores. Contudo, pensando-se numa hipotética produção industrializada, fabricar em massa difusores com grandes dimensões não é, em termos de negócio, muito atraente. Será preferível produzir módulos idênticos, mas cuja utilização conjunta está optimizada.

Nesta secção serão apresentados exemplos de casos optimizados, para incidência normal, tendo em vista a utilização conjunta de 3 módulos idênticos.

As alterações a introduzir foram extremamente simples uma vez que os difusores têm os extremos constrangidos geometricamente de modo a haver continuidade na curva definida pelo conjunto de n módulos. Basicamente, para 3 módulos, obrigou-se a que os pontos de controlo homólogos dos dois difusores “adicionados” tivessem a mesma altura do difusor de “controlo”. Deste modo, o aumento do número de difusores não aumentou o número de pontos de controlo (ou seja, não aumentou o universo de soluções). Contudo, a dimensão (geométrica) do problema aumentou e, como se tem de garantir no mínimo 10 elementos fronteira por cada comprimento de onda, o tempo de optimização aumentou proporcionalmente ao número de módulos em análise.

Relativamente ao processo de optimização, procedeu-se de modo idêntico à secção anterior: executaram-se 7 “runs” de 100 iterações cada e escolheram-se os melhores. Como se pretende comparar as soluções optimizadas para um único módulo obtidos na secção anterior com os difusores optimizados para serem utilizados conjuntamente, os parâmetros de entrada (frequência de optimização, número de pontos de controlo e $refv$) para as optimizações são idênticas às homólogas. Os difusores obtidos são apresentados nas Figuras 6.53 à 6.61.

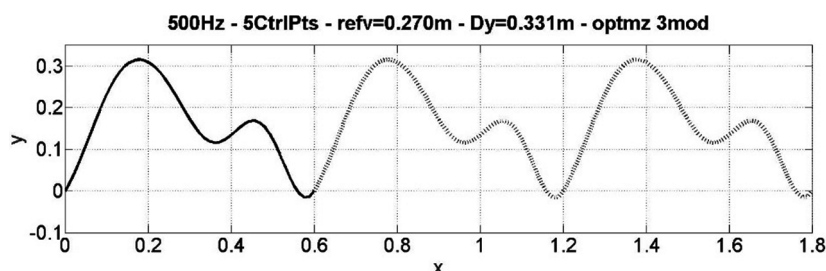


Figura 6.53 – Configuração geométrica de 3 módulos do difusor optimizado para uma utilização conjunta de 3 módulos. Dados: $f = 500 \text{ Hz}$, 5 *CtrlPts*, $refv = 0.27m$.

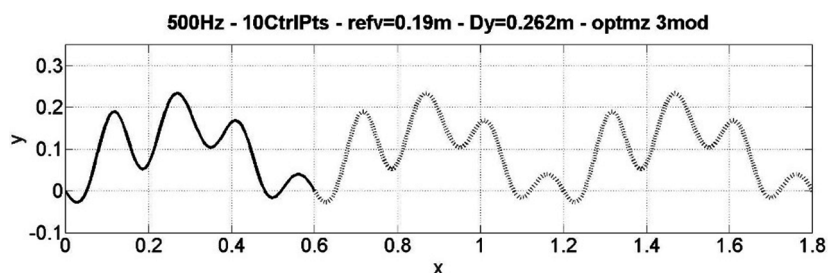


Figura 6.54 – Configuração geométrica de 3 módulos do difusor otimizado para uma utilização conjunta de 3 módulos. Dados: $f = 500 \text{ Hz}$, 10 *CtrlPts*, $refv = 0.19m$.

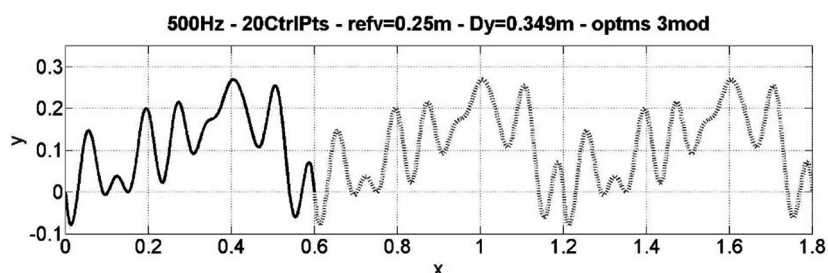


Figura 6.55 – Configuração geométrica de 3 módulos do difusor otimizado para uma utilização conjunta de 3 módulos. Dados: $f = 500 \text{ Hz}$, 20 *CtrlPts*, $refv = 0.25m$.

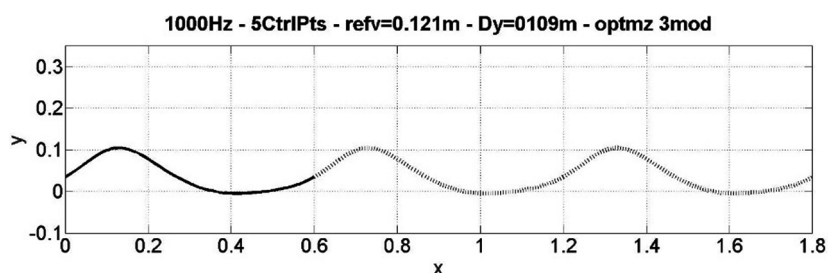


Figura 6.56 – Configuração geométrica de 3 módulos do difusor otimizado para uma utilização conjunta de 3 módulos. Dados: $f = 1000 \text{ Hz}$, 5 *CtrlPts*, $refv = 0.121m$.

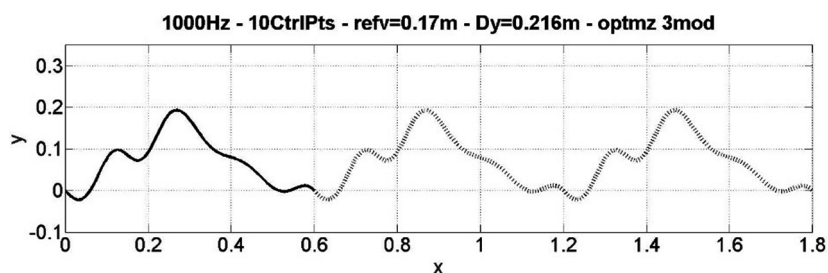


Figura 6.57 – Configuração geométrica de 3 módulos do difusor otimizado para uma utilização conjunta de 3 módulos. Dados: $f = 1000 \text{ Hz}$, 10 *CtrlPts*, $refv = 0.17m$.

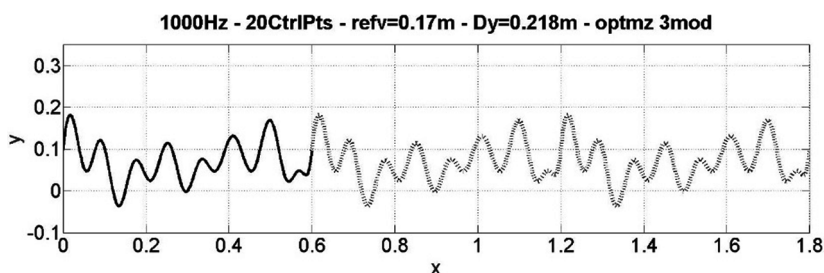


Figura 6.58 – Configuração geométrica de 3 módulos do difusor otimizado para uma utilização conjunta de 3 módulos. Dados: $f = 1000 \text{ Hz}$, 20 CtrlPts , $refv = 0.17m$.

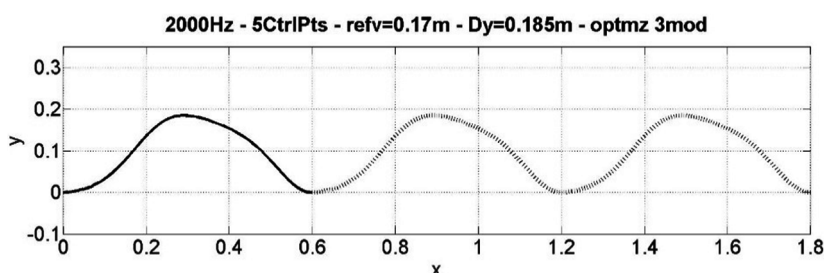


Figura 6.59 – Configuração geométrica de 3 módulos do difusor otimizado para uma utilização conjunta de 3 módulos. Dados: $f = 2000 \text{ Hz}$, 5 CtrlPts , $refv = 0.17m$.

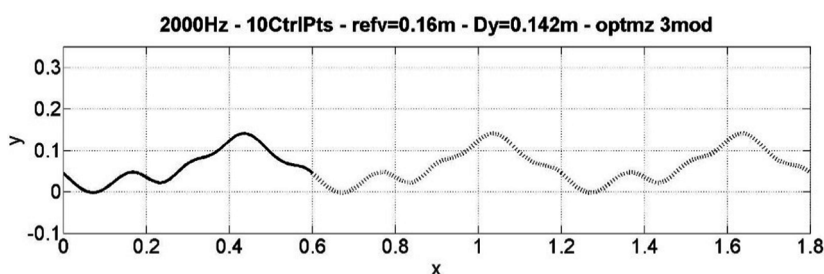


Figura 6.60 – Configuração geométrica de 3 módulos do difusor otimizado para uma utilização conjunta de 3 módulos. Dados: $f = 2000 \text{ Hz}$, 10 CtrlPts , $refv = 0.16m$.

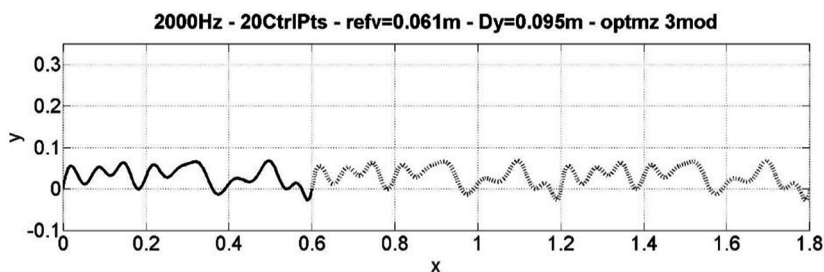


Figura 6.61 – Configuração geométrica de 3 módulos do difusor otimizado para uma utilização conjunta de 3 módulos. Dados: $f = 2000 \text{ Hz}$, 20 CtrlPts , $refv = 0.061m$.

Para se comparar com estes difusores, também se otimizaram difusores com uma largura $L = 3.0 \text{ m}$, equivalente a 5 módulos de dimensão standard, para os mesmos parâmetros de entrada.

Deste modo, pode-se comparar os três tipos de otimizações numa situação em que se pretende revestir uma grande área: otimização de 1 módulo com $L = 0.6 m$; otimização de 3 módulos idênticos com $L = 0.6 m$; otimização de um único módulo com $L = 3.0 m$.

De modo a manter o mesmo afastamento entre os pontos de controlo, o número de pontos de controlo foi multiplicado por 5. Assim, otimizaram-se difusores com $L = 3.0 m$ para 25, 50 e 100 pontos de controlo. As alturas máximas dos pontos de controlo, $refv$, são idênticas às utilizadas nos casos homólogos. As configurações geométricas obtidas para estes difusores grande comprimento são apresentados nas Figuras 6.62 à 6.70.

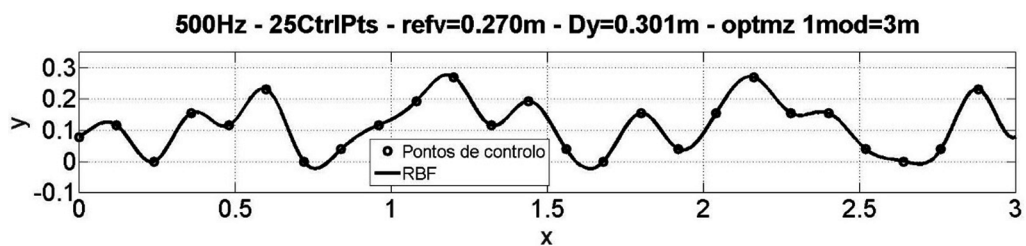


Figura 6.62 – Configuração geométrica de 1 módulo do difusor otimizado com $L = 3.0 m$.
Dados: $f = 500 Hz$, 25 CtrlPts, $refv = 0.27m$.

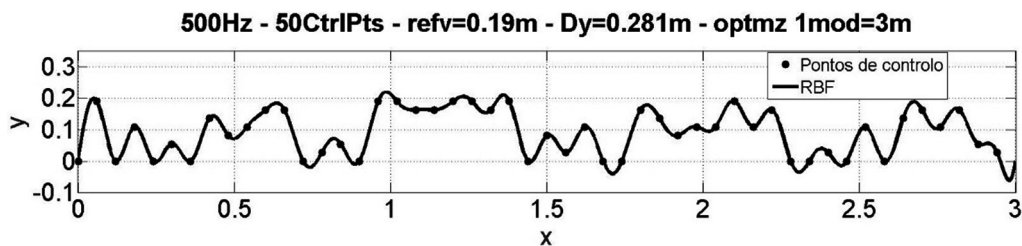


Figura 6.63 – Configuração geométrica de 1 módulo do difusor otimizado com $L = 3.0 m$.
Dados: $f = 500 Hz$, 50 CtrlPts, $refv = 0.19m$.

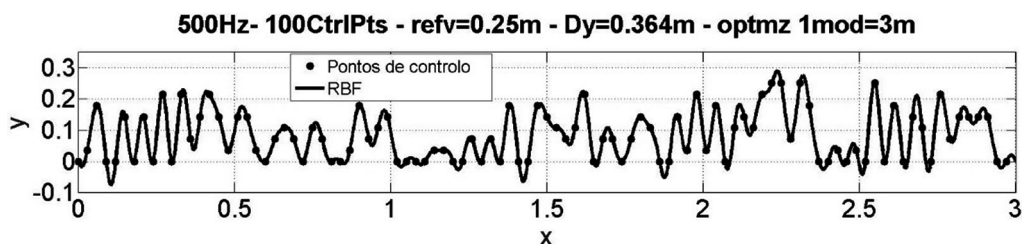


Figura 6.64 – Configuração geométrica de 1 módulo do difusor otimizado com $L = 3.0 m$.
Dados: $f = 500 Hz$, 100 CtrlPts, $refv = 0.25m$.

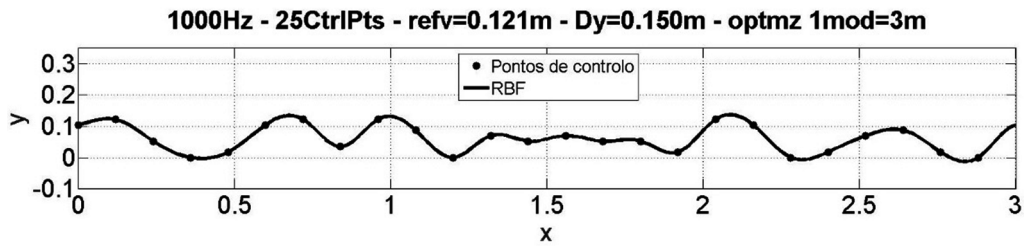


Figura 6.65 – Configuração geométrica de 1 módulo do difusor otimizado com $L = 3.0 m$.
Dados: $f = 1000 Hz$, 25 CtrlPts, $refv = 0.121m$.

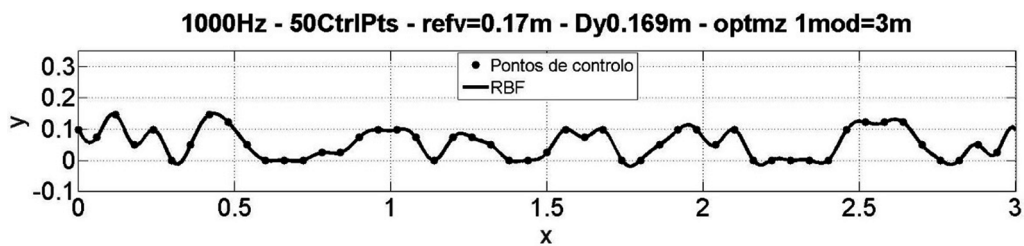


Figura 6.66 – Configuração geométrica de 1 módulo do difusor otimizado com $L = 3.0 m$.
Dados: $f = 1000 Hz$, 50 CtrlPts, $refv = 0.17m$.

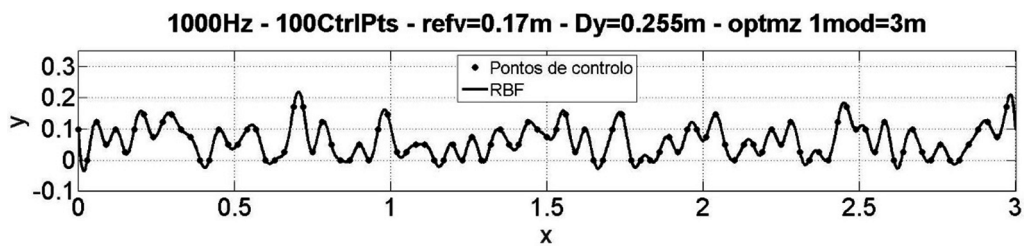


Figura 6.67 – Configuração geométrica de 1 módulo do difusor otimizado com $L = 3.0 m$.
Dados: $f = 1000 Hz$, 100 CtrlPts, $refv = 0.17m$.

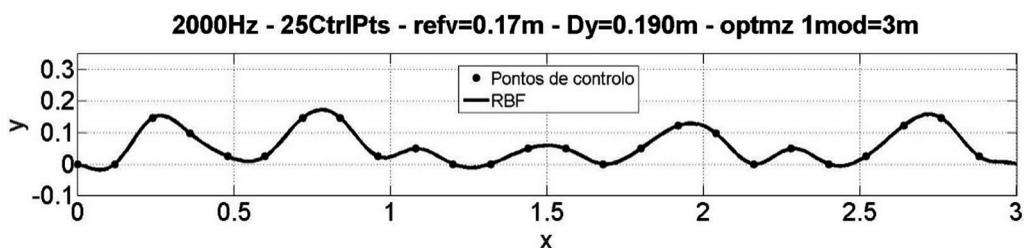


Figura 6.68 – Configuração geométrica de 1 módulo do difusor otimizado com $L = 3.0 m$.
Dados: $f = 2000 Hz$, 25 CtrlPts, $refv = 0.17m$.

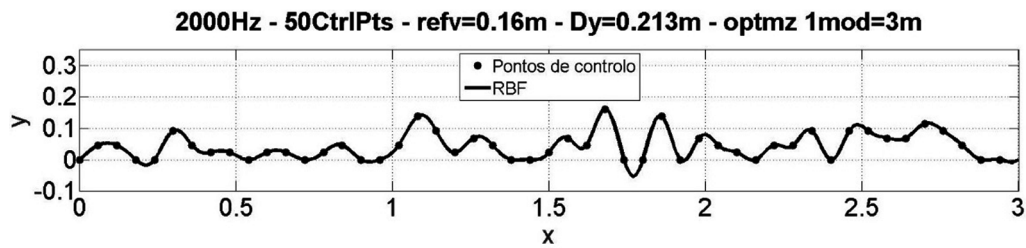


Figura 6.69 – Configuração geométrica de 1 módulo do difusor otimizado com $L = 3.0\text{ m}$.
 Dados: $f = 2000\text{ Hz}$, 50 *CtrlPts*, $refv = 0.16\text{ m}$.

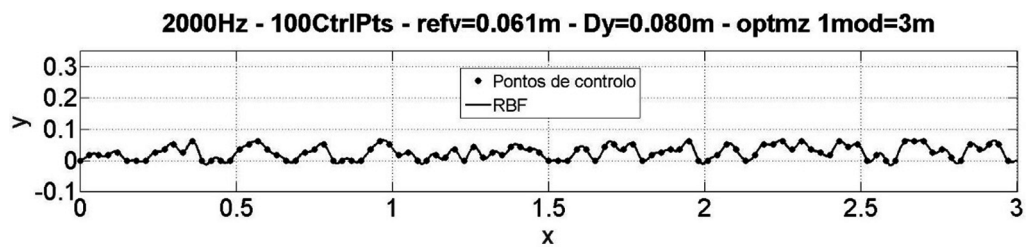


Figura 6.70 – Configuração geométrica de 1 módulo do difusor otimizado com $L = 3.0\text{ m}$.
 Dados: $f = 2000\text{ Hz}$, 100 *CtrlPts*, $refv = 0.061\text{ m}$.

De seguida apresentam-se os resultados obtidos. Uma vez mais, como as otimizações foram realizadas para bandas de frequência de oitava, opta-se por apresentar o coeficiente de difusão dessa forma.

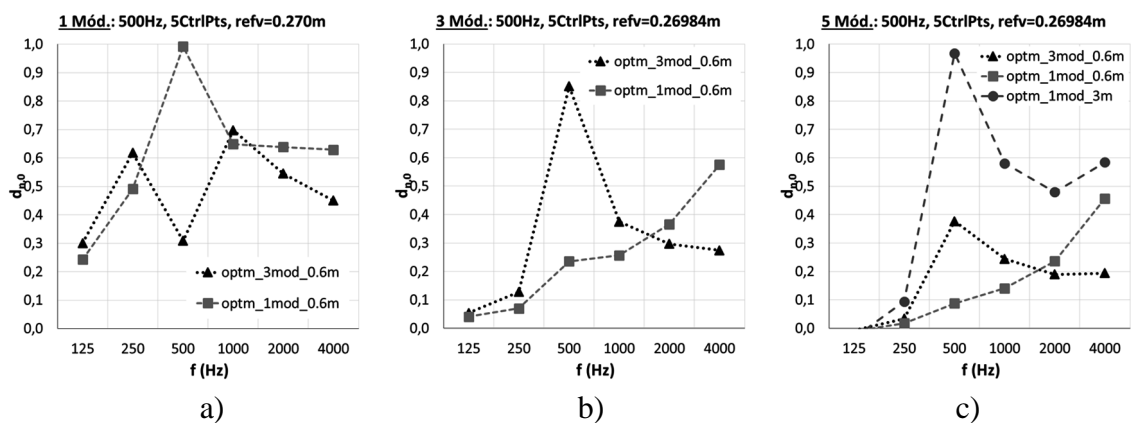


Figura 6.71 – Coeficiente de difusão normalizado (para incidência normal) em bandas de oitava dos difusores otimizados para 1 módulo (Figura 6.41), 3 módulos (Figura 6.53) e um difusor com 3 m de largura (Figura 6.62), para $f = 500\text{ Hz}$, 5 *CtrlPts* e $refv = 0.27\text{ m}$.
 Análise de: a) 1 módulo; b) 3 módulos; c) 5 módulos.

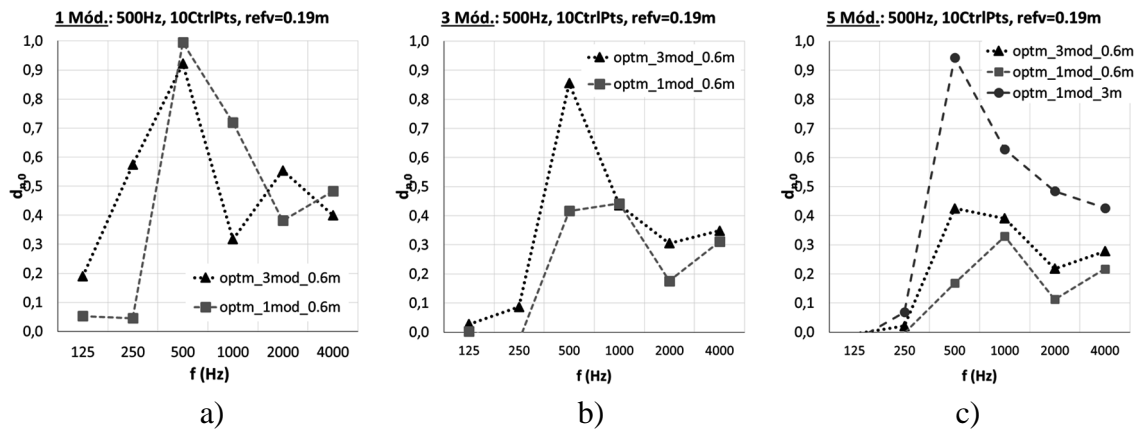


Figura 6.72 – Coeficiente de difusão normalizado (para incidência normal) em bandas de oitava dos difusores otimizados para 1 módulo (Figura 6.42), 3 módulos (Figura 6.54) e um difusor com 3 m de largura (Figura 6.63), para $f = 500 \text{ Hz}$, 10 *CtrlPts* e $refv = 0.19 \text{ m}$.
Análise de: a) 1 módulo; b) 3 módulos; c) 5 módulos.

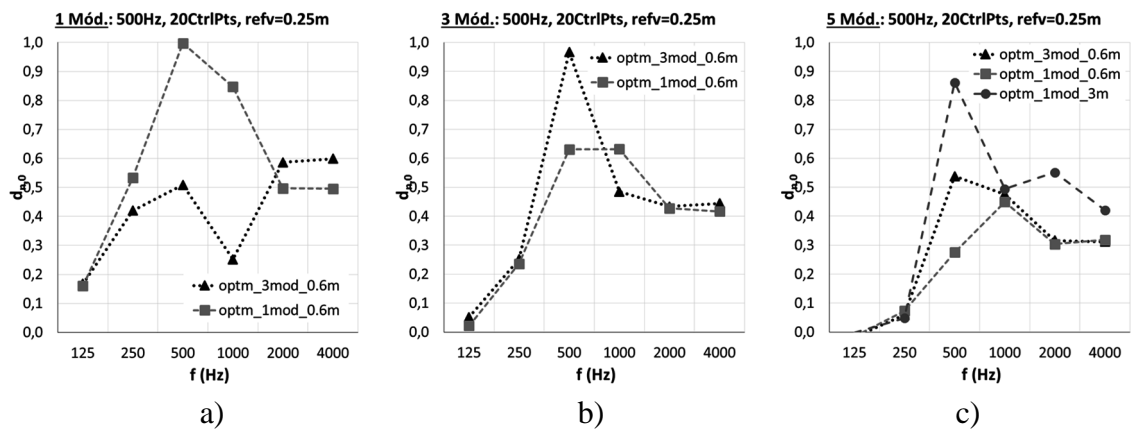


Figura 6.73 – Coeficiente de difusão normalizado (para incidência normal) em bandas de oitava dos difusores otimizados para 1 módulo (Figura 6.43), 3 módulos (Figura 6.55) e um difusor com 3 m de largura (Figura 6.64), para $f = 500 \text{ Hz}$, 20 *CtrlPts* e $refv = 0.25 \text{ m}$.
Análise de: a) 1 módulo; b) 3 módulos; c) 5 módulos.

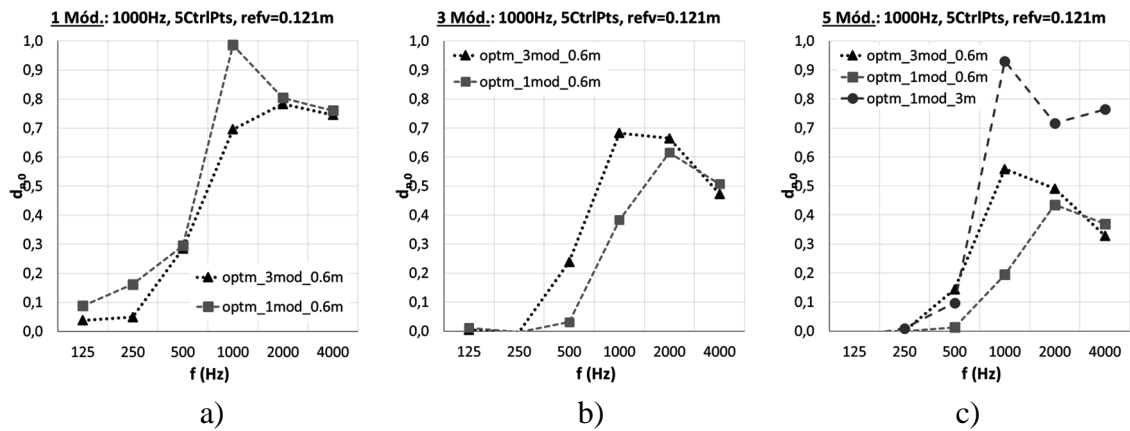


Figura 6.74 – Coeficiente de difusão normalizado (para incidência normal) em bandas de oitava dos difusores otimizados para 1 módulo (Figura 6.44), 3 módulos (Figura 6.56) e um difusor com 3 m de largura (Figura 6.65), para $f = 1000\text{ Hz}$, 5 CtrlPts e $refv = 0.121\text{ m}$.
 Análise de: a) 1 módulo; b) 3 módulos; c) 5 módulos.

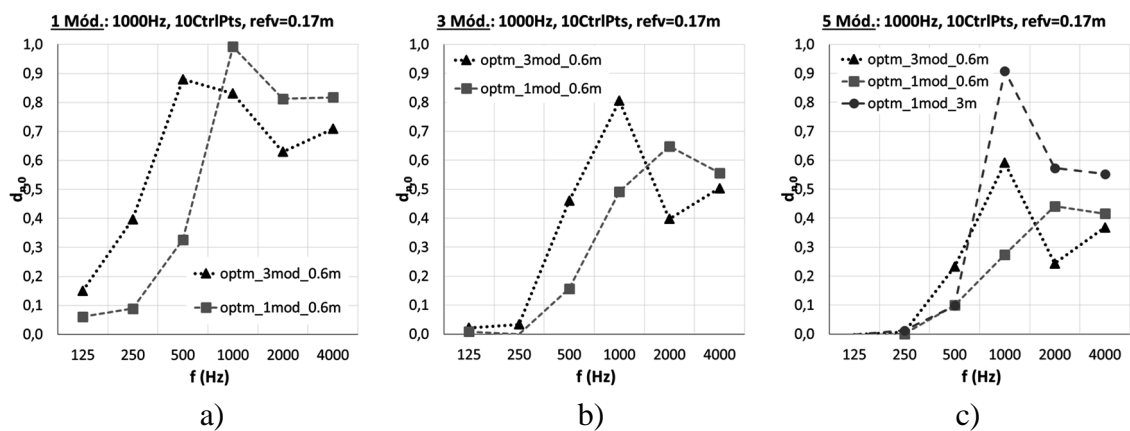


Figura 6.75 – Coeficiente de difusão normalizado (para incidência normal) em bandas de oitava dos difusores otimizados para 1 módulo (Figura 6.45), 3 módulos (Figura 6.57) e um difusor com 3 m de largura (Figura 6.66), para $f = 1000\text{ Hz}$, 10 CtrlPts e $refv = 0.17\text{ m}$.
 Análise de: a) 1 módulo; b) 3 módulos; c) 5 módulos.

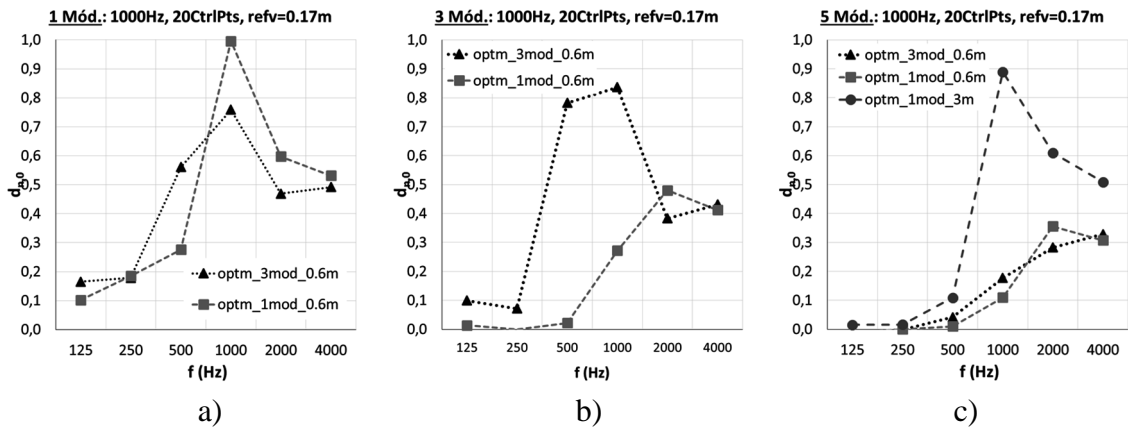


Figura 6.76 – Coeficiente de difusão normalizado (para incidência normal) em bandas de oitava dos difusores otimizados para 1 módulo (Figura 6.46), 3 módulos (Figura 6.58) e um difusor com 3 m de largura (Figura 6.67), para $f = 1000 \text{ Hz}$, 20 *CtrlPts* e $refv = 0.17 \text{ m}$.
Análise de: a) 1 módulo; b) 3 módulos; c) 5 módulos.

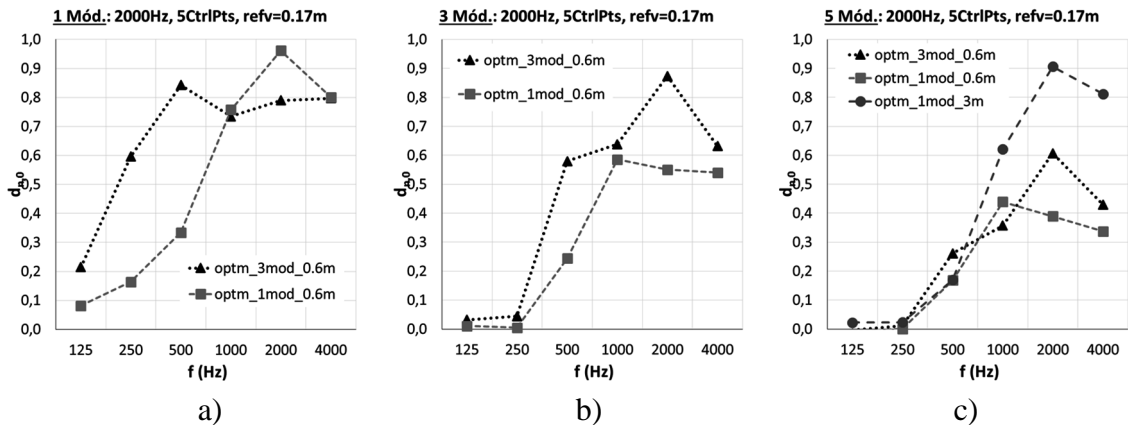


Figura 6.77 – Coeficiente de difusão normalizado (para incidência normal) em bandas de oitava dos difusores otimizados para 1 módulo (Figura 6.47), 3 módulos (Figura 6.59) e um difusor com 3 m de largura (Figura 6.68), para $f = 2000 \text{ Hz}$, 5 *CtrlPts* e $refv = 0.17 \text{ m}$.
Análise de: a) 1 módulo; b) 3 módulos; c) 5 módulos.

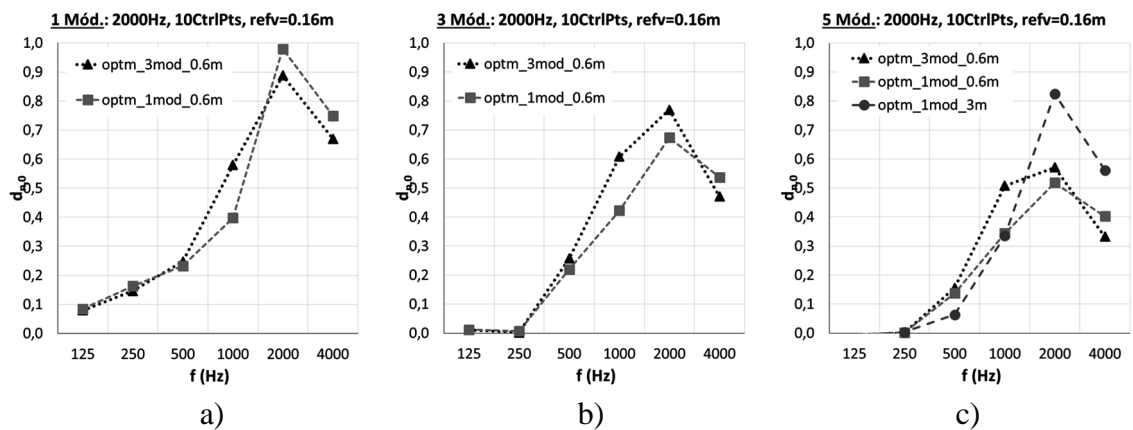


Figura 6.78 – Coeficiente de difusão normalizado (para incidência normal) em bandas de oitava dos difusores otimizados para 1 módulo (Figura 6.48), 3 módulos (Figura 6.60) e um difusor com 3 m de largura (Figura 6.69), para $f = 2000 \text{ Hz}$, 10 *CtrlPts* e $refv = 0.16 \text{ m}$.
 Análise de: a) 1 módulo; b) 3 módulos; c) 5 módulos.

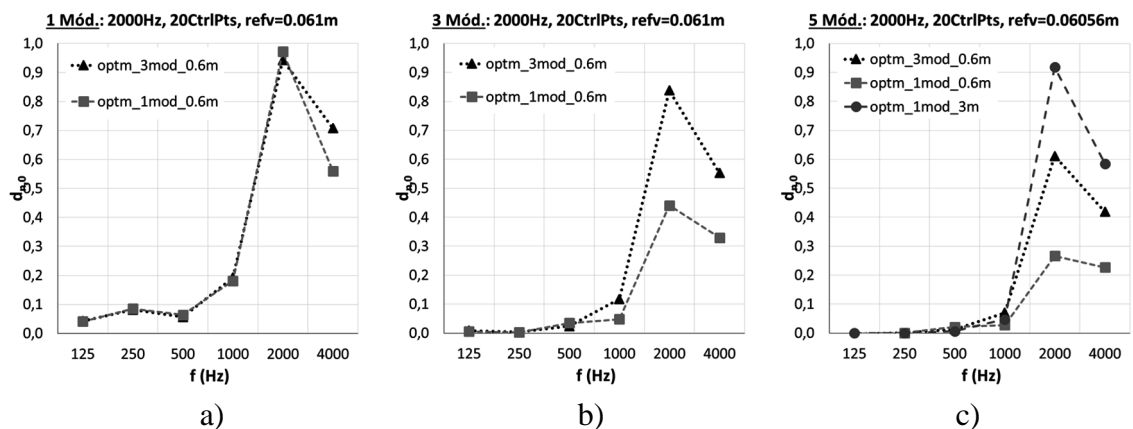


Figura 6.79 – Coeficiente de difusão normalizado (para incidência normal) em bandas de oitava dos difusores otimizados para 1 módulo (Figura 6.48), 3 módulos (Figura 6.61) e um difusor com 3 m de largura (Figura 6.70), para $f = 2000 \text{ Hz}$, 20 *CtrlPts* e $refv = 0.061 \text{ m}$.
 Análise de: a) 1 módulo; b) 3 módulos; c) 5 módulos.

Da observação das figuras acima, constata-se que cada tipo de optimização (para 1 módulo de 0.6m, para 3 módulos de 0.6 m cada e para 1 módulo de 3.0 m) é mais eficiente para o objectivo a que cada um se propõe. Também se verifica que o difusor optimizado para ser utilizado com 3 módulos é mais eficiente que o difusor optimizado para 1 módulo quando se utiliza 5 módulos.

Estes resultados demonstram que o método de optimização proposto pode ser utilizado de uma forma customizada, desenvolvendo e optimizando difusores à medida da parede que se pretende revestir, ou, pensado numa lógica de produção industrial, pode ser utilizada para desenvolver difusores idênticos mas optimizados para serem utilizados em conjunto.

De forma a visualizar como é que os difusores estão a reflectir o som incidente, abaixo apresentam-se as polares de reflexão para 3 dos difusores (para $f = 500 \text{ Hz}$, 5 *CtrlPts* e

$refv = 0.27\text{ m}$; para $f = 1000\text{ Hz}$, 10 *CtrlPts* e $refv = 0.17\text{ m}$ e para $f = 2000\text{ Hz}$, 5 *CtrlPts* e $refv = 0.17\text{ m}$) otimizados quer para 1 módulo quer para 3 módulos.

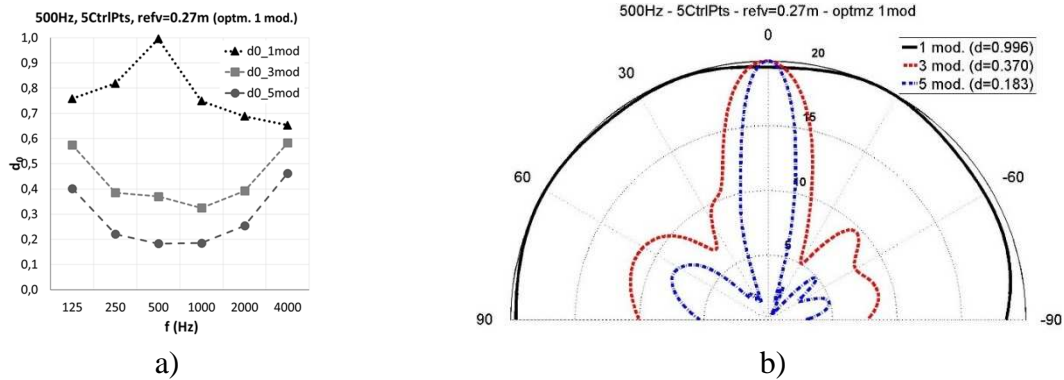


Figura 6.80 – Análise de 1, 3 e 5 módulos do difusor otimizado para 1 módulo para $f = 500\text{ Hz}$, 5 *CtrlPts* e $refv = 0.27\text{ m}$ (Figura 6.41a). a) Coeficiente de difusão para incidência normal (não normalizado) em bandas de oitava; b) Polares para $f = 500\text{ Hz}$.

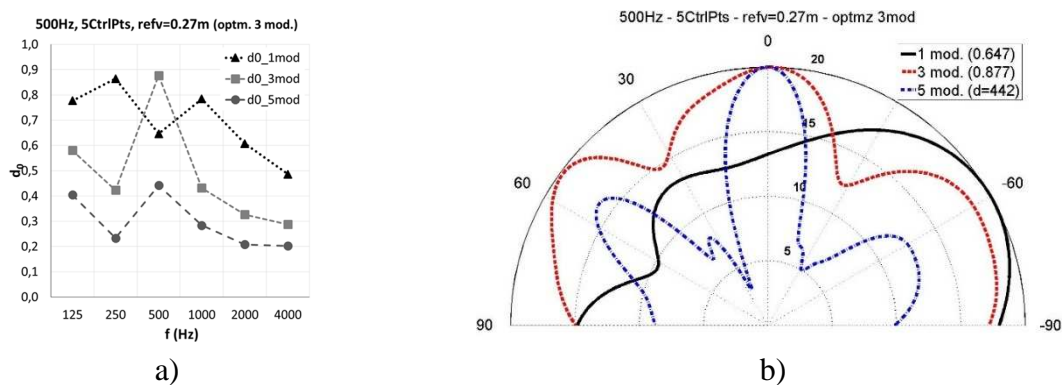


Figura 6.81 – Análise de 1, 3 e 5 módulos do difusor otimizado para 3 módulos para $f = 500\text{ Hz}$, 5 *CtrlPts* e $refv = 0.27\text{ m}$ (Figura 6.53). a) Coeficiente de difusão para incidência normal (não normalizado) em bandas de oitava; b) Polares para $f = 500\text{ Hz}$.

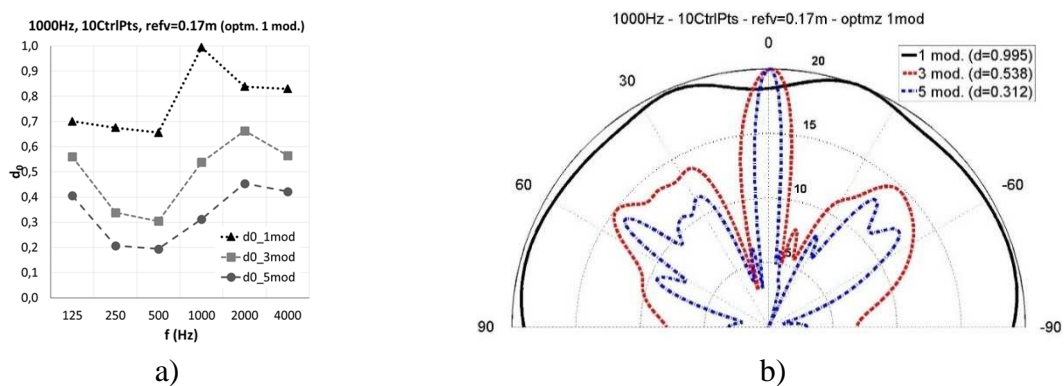


Figura 6.82 – Análise de 1, 3 e 5 módulos do difusor otimizado para 1 módulo para $f = 1000\text{ Hz}$, 10 *CtrlPts* e $refv = 0.17\text{ m}$ (Figura 6.45a). a) Coeficiente de difusão para incidência normal (não normalizado) em bandas de oitava; b) Polares para $f = 1000\text{ Hz}$.

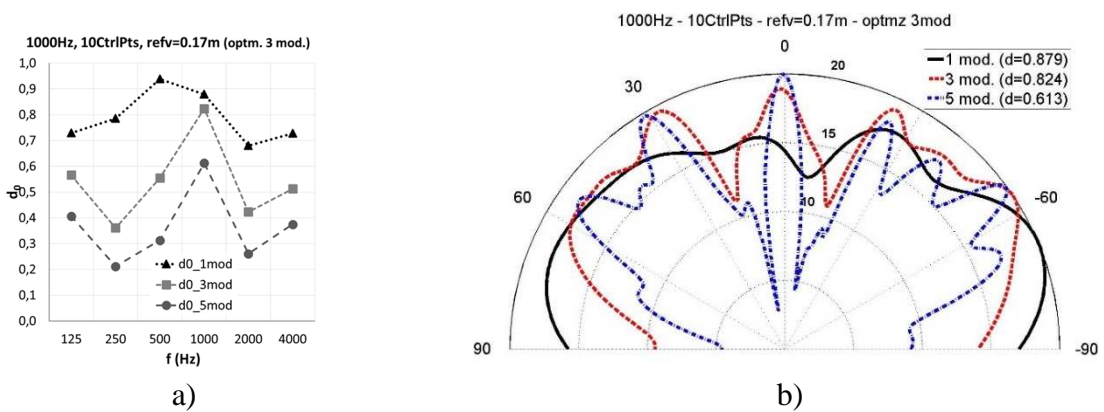


Figura 6.83 – Análise de 1, 3 e 5 módulos do difusor otimizado para 3 módulos para $f = 1000$ Hz, 10 *CtrlPts* e $refv = 0.17$ m (Figura 6.57). a) Coeficiente de difusão para incidência normal (não normalizado) em bandas de oitava; b) Polares para $f = 1000$ Hz.

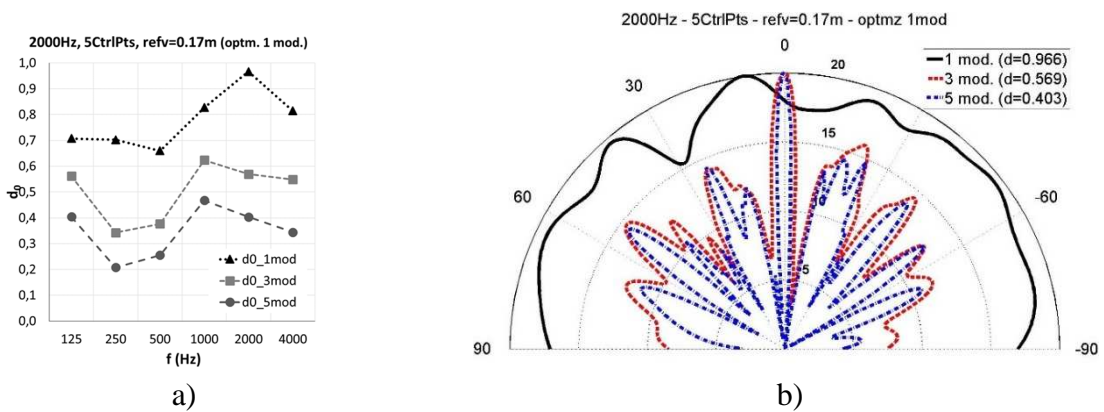


Figura 6.84 – Análise de 1, 3 e 5 módulos do difusor otimizado para 1 módulo para $f = 2000$ Hz, 5 *CtrlPts* e $refv = 0.17$ m (Figura 6.47a). a) Coeficiente de difusão para incidência normal (não normalizado) em bandas de oitava; b) Polares para $f = 2000$ Hz.

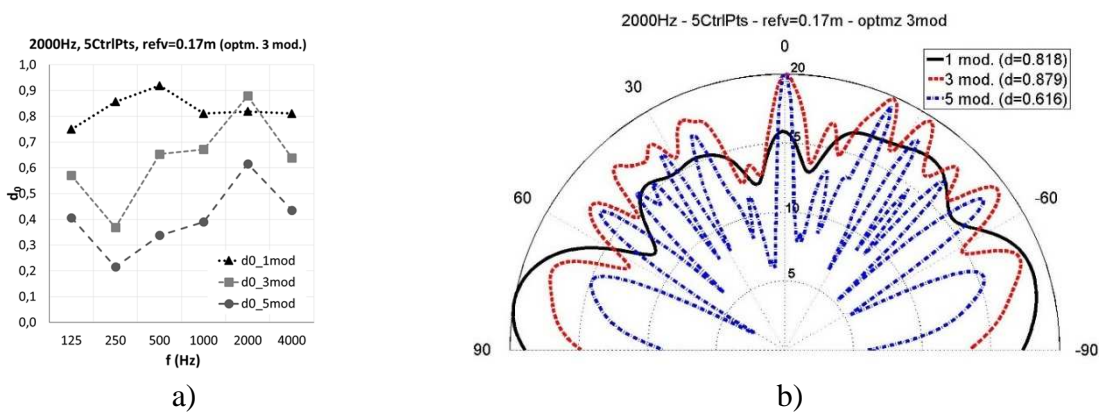


Figura 6.85 – Análise de 1, 3 e 5 módulos do difusor otimizado para 3 módulos para $f = 2000$ Hz, 5 *CtrlPts* e $refv = 0.17$ m (Figura 6.59). a) Coeficiente de difusão para incidência normal (não normalizado) em bandas de oitava; b) Polares para $f = 2000$ Hz.

De modo a avaliar quais das soluções optimizadas para 3 módulos poderão ser as melhores para cada uma das bandas de frequências, as figuras seguintes comparam os resultados para os diferentes números de pontos de controlo.

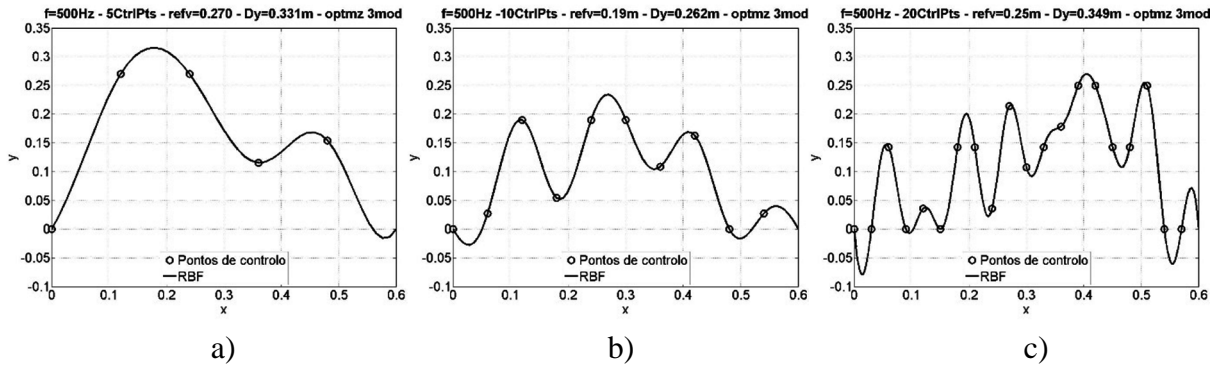


Figura 6.86 – Difusores resultantes da optimização de 3 módulos para $f = 500\text{ Hz}$, definidos por: a) 5 *CtrlPts*; b) 10 *CtrlPts*; c) 20 *CtrlPts*.

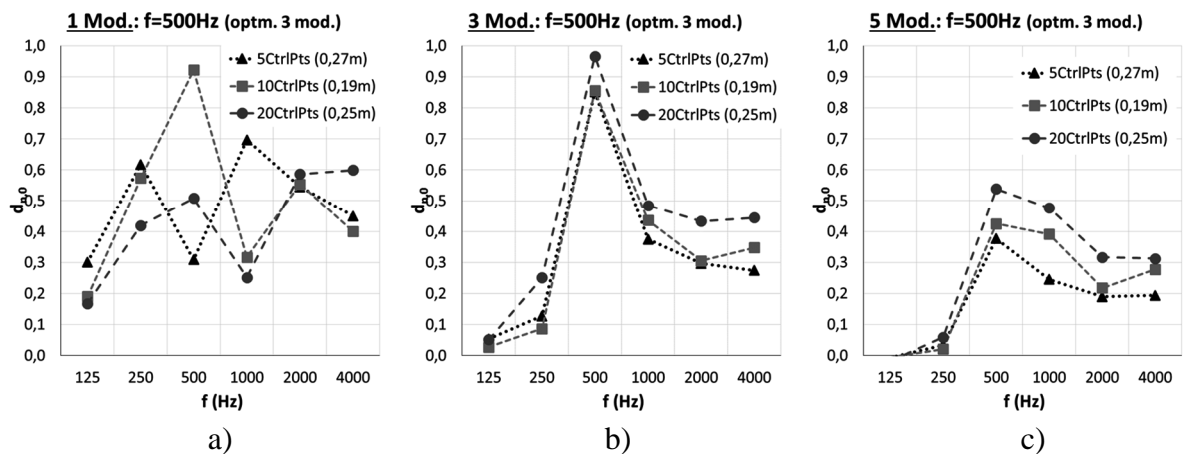


Figura 6.87 – Coeficiente de difusão normalizado (para incidência normal) em bandas de oitava dos difusores da Figura 6.86. Análise de: a) 1 módulo; b) 3 módulos; c) 5 módulos.

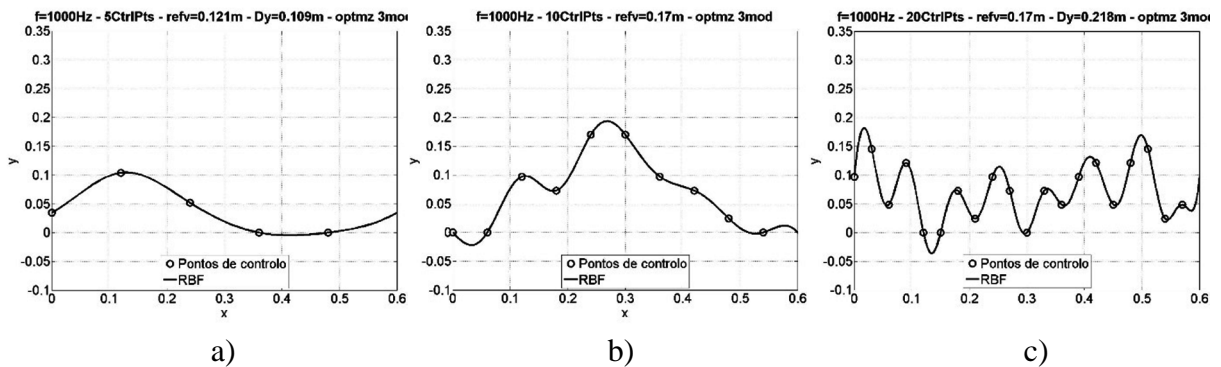


Figura 6.88 – Difusores resultantes da optimização de 3 módulos para $f = 1000\text{ Hz}$, definidos por: a) 5 *CtrlPts*; b) 10 *CtrlPts*; c) 20 *CtrlPts*.

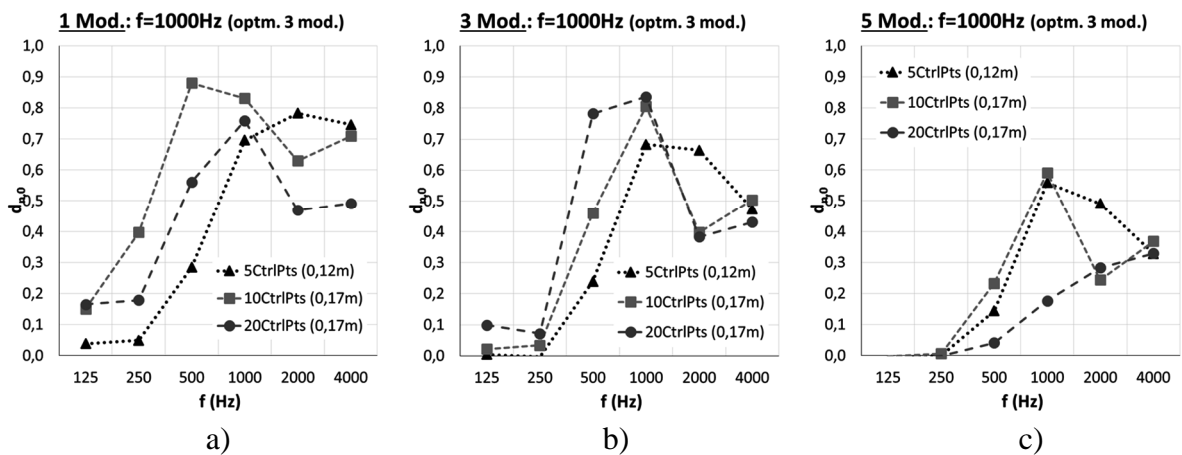


Figura 6.89 – Coeficiente de difusão normalizado (para incidência normal) em bandas de oitava dos difusores da Figura 6.88. Análise de: a) 1 módulo; b) 3 módulos; c) 5 módulos.

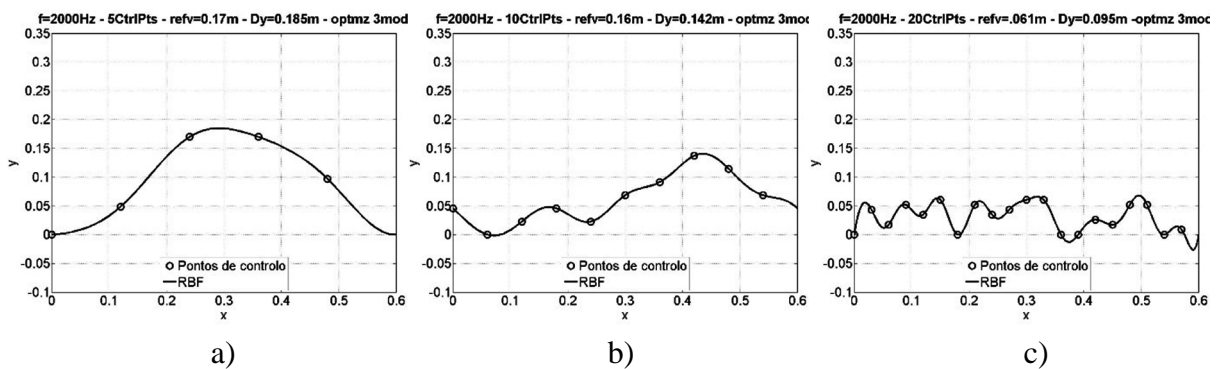


Figura 6.90 – Difusores resultantes da otimização de 3 módulos para $f = 2000 \text{ Hz}$, definidos por: a) 5 *CtrlPts*; b) 10 *CtrlPts*; c) 20 *CtrlPts*.

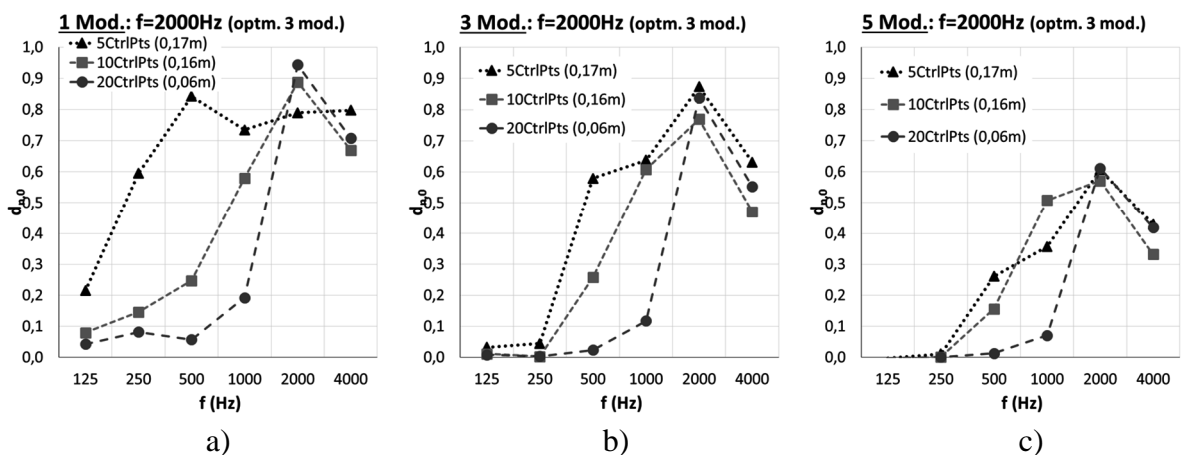


Figura 6.91 – Coeficiente de difusão normalizado (para incidência normal) em bandas de oitava dos difusores da Figura 6.90. Análise de: a) 1 módulo; b) 3 módulos; c) 5 módulos.

Do ponto de vista estrito do desempenho acústico, para a banda de frequências centrada em 500 Hz, o difusor que tem melhor desempenho é o definido por 20 pontos de controle. Para a

banda de frequências centrada nos 1000 Hz, a solução definida por 10 pontos de controlo parece ser a mais equilibrada para os 3 casos analisados. Para a banda dos 2000 Hz, o difusor definido por 5 pontos de controlo poderá ser a melhor escolha. Contudo, refira-se que outros requisitos poderão ser tidos em consideração para a escolha de um difusor para além de um elevado desempenho em apenas numa banda de frequências de oitava.

Um dos requisitos para os difusores é que a sua eficiência seja a mais alargada possível. Na próxima secção apresentar-se-á como se implementaram alterações ao algoritmo de optimização de modo a estender (em frequência) a eficiência dos difusores.

6.6. OPTIMIZAÇÃO PARA N BANDAS DE FREQUÊNCIA

Um bom difusor é aquele que tem um elevado coeficiente de difusão numa gama alargada de frequências. Para tal, no algoritmo de optimização não se maximiza o coeficiente de difusão para uma banda de frequências de oitava, mas maximiza-se a média dos coeficientes de difusão em várias bandas de frequência de terço de oitava:

$$\bar{d}_{0,n} = \sum_{j=1}^m \left| \frac{(d_{0,n})_j}{m} \right| \quad (6.1)$$

onde $(d_{0,n})_j$ é o coeficiente de difusão normalizado, para incidência normal, da banda de frequências de terço de oitava j e m é o número de bandas de frequência em consideração. Como exemplo de aplicação desta metodologia, escolheram-se $m = 9$ bandas de frequência de terços de oitava pertencentes às bandas de oitava dos 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz: $f_j = \{400\text{Hz}; 500\text{Hz}; 630\text{Hz}; 800\text{Hz}; 1000\text{Hz}; 1250\text{Hz}; 1600\text{Hz}; 2000\text{Hz}; 2500\text{Hz}\}$.

O perigo, quando se utiliza a média do coeficiente de difusão como única função de custo, é que a difusão pode ser muito desigual ao longo de toda a gama de frequências que se pretende otimizar, i.e., bandas de frequências com elevada difusão podem compensar as bandas de frequências com difusão muito fraca. Para resolver este problema, sugere-se utilizar o desvio padrão, Equação 6.2, como uma função de custo adicional. Desta forma, avalia-se a variabilidade da difusão na faixa de frequência de interesse.

$$\text{Desvio Padrão} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m \left(\bar{d}_{r,n} - |(d_{r,n})_j| \right)^2}{m-1}} \quad (6.2)$$

O algoritmo de optimização passou a maximizar o coeficiente de difusão penalizado pelo respectivo desvio padrão:

$$\bar{d}_{\text{corrigido}} = \bar{d}_{0,n} - \text{Desvio Padrão} \quad (6.3)$$

Se se pretender otimizar para uma gama alargada de frequências mas dar especial relevância para algumas bandas de frequências, pode-se atribuir pesos a cada banda de frequência e calcular a média ponderada:

$$\bar{d}_{0,n} = \frac{\sum_{j=1}^m |w_j \cdot (d_{0,n})_j|}{\sum_{j=1}^m |w_j|} \quad (6.4)$$

onde w_j é o peso da banda de frequência j .

O desvio padrão associado a uma média ponderada é dado por:

$$\text{Desvio Padrão} = \sqrt{\frac{k}{k-1} \cdot \frac{\sum_{j=1}^k w_j \cdot (\bar{d}_{r,n} - d_{\theta_j,n})^2}{\sum_{j=1}^k w_j}} \quad (6.5)$$

Neste caso o parâmetro a maximizar é obtido pela substituição de (6.4) e (6.5) na Equação (6.3).

De seguida apresentam-se alguns exemplos e comparam-se com os exemplos das secções anteriores. Uma vez mais, as optimizações foram executadas como anteriormente: a população era constituída por 22 indivíduos (inicialmente eram superfícies planas) e a optimização parava quando se atingisse a 100ª iteração. Para cada caso fizeram-se 7 “runs” e os resultados que se apresentam correspondem aos que tiveram o maior valor para parâmetro a maximizar (coeficiente de difusão normalizado para incidência normal corrigido pela Equação 6.3).

O quadro seguinte resume os resultados obtidos para alguns dos exemplos e as figuras seguintes apresentam esses resultados de forma gráfica.

A primeira observação que se retira do Quadro 6.7 é que os resultados obtidos nestas simulações são mais constantes e a sua média mais elevada na gama de frequências de optimização do que os difusores optimizados apenas para uma única banda de frequências. Também se verifica que os difusores optimizados para $refv = 0.121 m$ são ligeiramente menos eficientes que os restantes e, em média, o coeficiente de difusão desce ligeiramente com o aumento do número de pontos de controlo.

Quadro 6.7 – Quadro comparativo dos resultados obtidos para otimização para 9 bandas de frequência de 1/3 oitava com os obtidos para uma banda de frequência de oitava.

			$d_{0,n}$: Banda de freq. 1/3 oitava									Média	DesvPad rel. (%)	
CtrlPts	refv (m)	Δy (m)	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500			
optmz. 9 freqs - $\Theta=0^\circ$	5	0.121	0.129	0,755	0,737	0,887	0,777	0,725	0,926	0,731	0,854	0,754	0,728	10,3
		0.17	0.157	0,909	0,936	0,771	0,743	0,856	0,829	0,874	0,806	0,843	0,841	7,4
		0.27	0.204	0,862	0,747	0,596	0,803	0,765	0,818	0,783	0,788	0,785	0,772	9,5
	10	0.121	0.148	0,096	0,386	0,906	0,862	0,705	0,773	0,711	0,797	0,767	0,667	39,0
		0.17	0.171	0,835	0,857	0,840	0,699	0,701	0,876	0,799	0,708	0,755	0,786	9,1
		0.27	0.178	0,459	0,610	0,730	0,672	0,749	0,684	0,739	0,734	0,779	0,684	14,4
	20	0.121	0.155	0,081	0,495	0,694	0,691	0,819	0,780	0,796	0,830	0,781	0,663	36,4
		0.17	0.205	0,480	0,708	0,745	0,543	0,637	0,808	0,737	0,778	0,738	0,686	16,1
		0.27	0.375	0,803	0,965	0,719	0,706	0,790	0,690	0,725	0,768	0,739	0,767	10,9
500Hz	5	0.121	0.275	0,355	0,745	0,549	0,458	0,657	0,477	0,681	0,606	0,531	0,562	21,8
	10	0.17	0.215	0,449	0,875	0,615	0,766	0,419	0,315	0,141	0,204	0,463	0,472	51,9
	20	0.27	0.334	0,862	0,846	0,948	0,779	0,550	0,499	0,470	0,264	0,382	0,622	38,9
1000Hz	5	0.121	0.11	0,153	0,109	0,344	0,729	0,889	0,803	0,507	0,711	0,686	0,548	52,1
	10	0.17	0.133	0,051	0,171	0,493	0,683	0,785	0,615	0,502	0,656	0,765	0,525	48,9
	20	0.27	0.172	0,140	0,065	0,280	0,646	0,744	0,719	0,439	0,406	0,307	0,416	59,0
2000Hz	5	0.121	0.147	0,104	0,165	0,340	0,566	0,637	0,606	0,802	0,750	0,856	0,536	51,0
	10	0.17	0.146	0,130	0,116	0,280	0,294	0,160	0,432	0,718	0,743	0,682	0,395	65,5
	20	0.27	0.078	0,113	0,030	0,038	0,138	0,084	0,177	0,708	0,776	0,704	0,308	104,1

As Figuras 6.92 a 6.98 apresentam os difusores resultantes da otimização para 5 pontos de controlo.

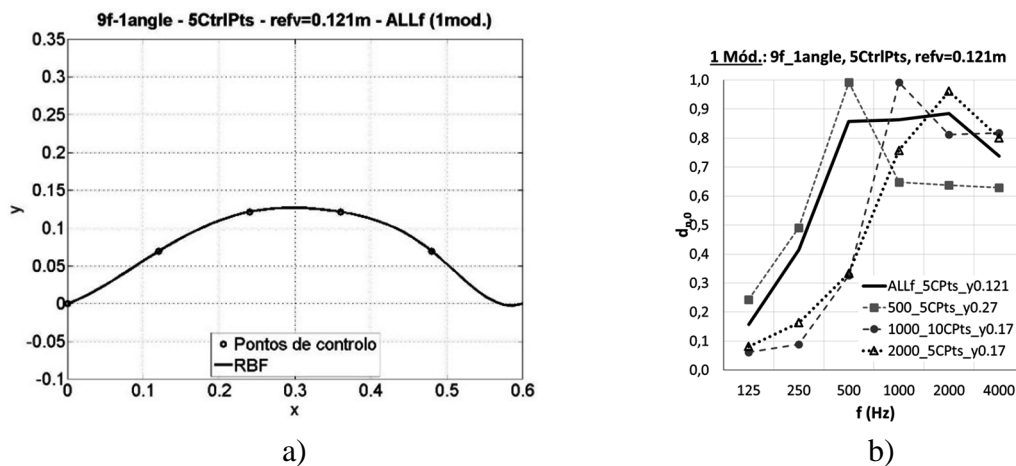


Figura 6.92 – Difusor com 5CtrlPts e $refv = 0.121 m$, otimizado (para incidência normal) para 9 bandas de frequência de 1/3 de oitava (dos 400 Hz aos 2500 Hz). a) RBF; b) Comparação entre os coeficientes de difusão normalizados dos “melhores” difusores (Quadro 6.6 e Figuras 6.41 a 6.49), em bandas de frequência de oitava.

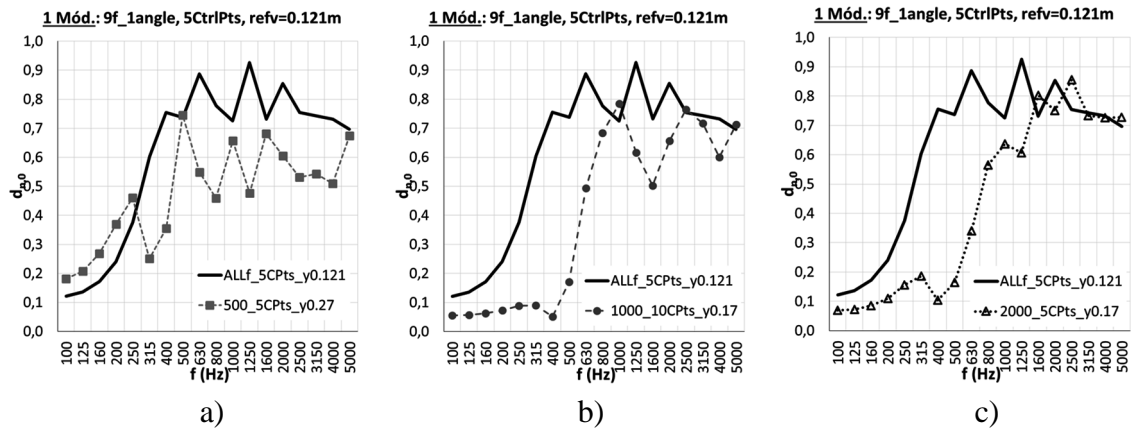


Figura 6.93 – Comparação do coeficiente de difusão normalizado (para incidência normal), em bandas de 1/3 de oitava, do difusor da figura anterior com os “melhores” otimizados para uma única banda de frequência: a) $f = 500 \text{ Hz}$; b) $f = 1000 \text{ Hz}$; c) $f = 2000 \text{ Hz}$.

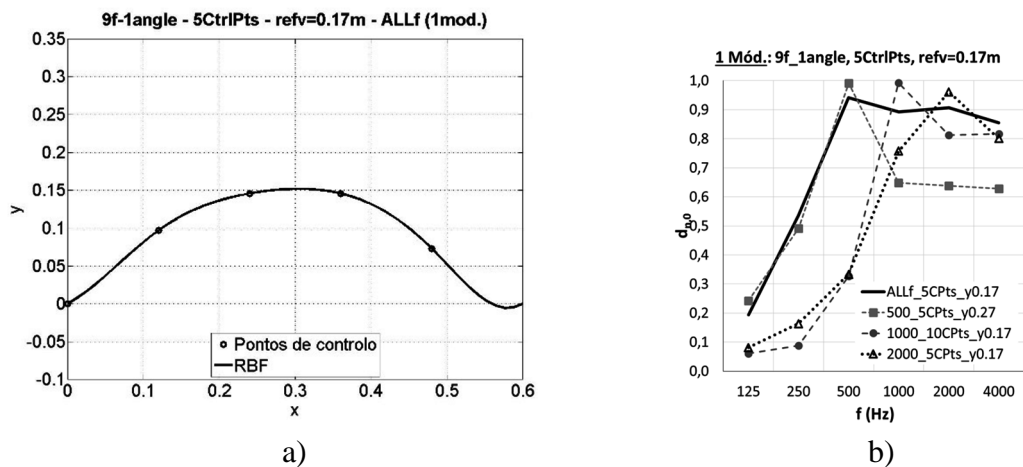


Figura 6.94 – Difusor com $5CtrlPts$ e $refv = 0.17 \text{ m}$, otimizado (para incidência normal) para 9 bandas de frequência de 1/3 de oitava (dos 400 Hz aos 2500 Hz). a) RBF; b) Comparação entre os coeficientes de difusão normalizados dos “melhores” difusores (Quadro 6.6 e Figuras 6.41 a 6.49), em bandas de frequência de oitava.

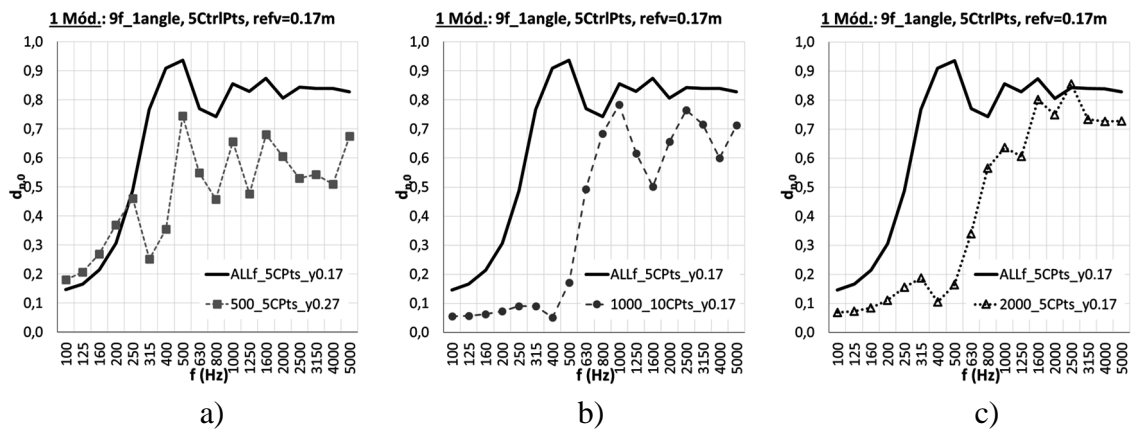


Figura 6.95 – Comparação do coeficiente de difusão normalizado (para incidência normal), em bandas de 1/3 de oitava, do difusor da figura anterior com os “melhores” otimizados para uma única banda de frequência: a) $f = 500 \text{ Hz}$; b) $f = 1000 \text{ Hz}$; c) $f = 2000 \text{ Hz}$.

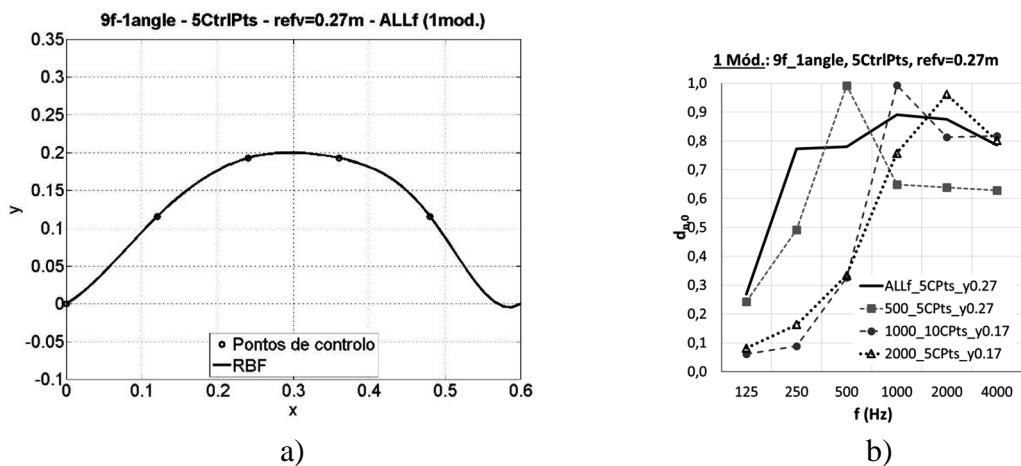


Figura 6.96 – Difusor com $5CtrlPts$ e $refv = 0.27 \text{ m}$, otimizado (para incidência normal) para 9 bandas de frequência de 1/3 de oitava (dos 400 Hz aos 2500 Hz). a) RBF; b) Comparação entre os coeficientes de difusão normalizados dos “melhores” difusores (Quadro 6.6 e Figuras 6.41 a 6.49), em bandas de frequência de oitava.

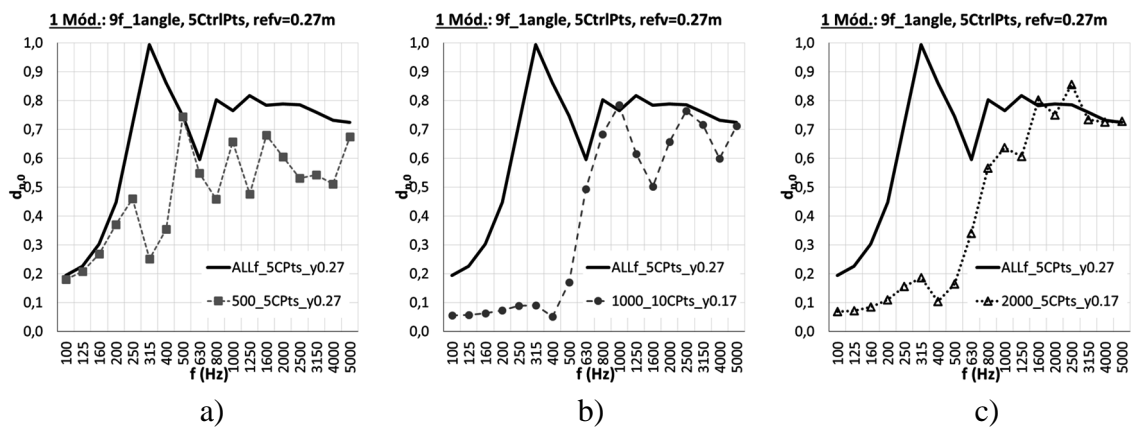


Figura 6.97 – Comparação do coeficiente de difusão normalizado (para incidência normal), em bandas de 1/3 de oitava, do difusor da figura anterior com os “melhores” otimizados para uma única banda de frequência: a) $f = 500 \text{ Hz}$; b) $f = 1000 \text{ Hz}$; c) $f = 2000 \text{ Hz}$.

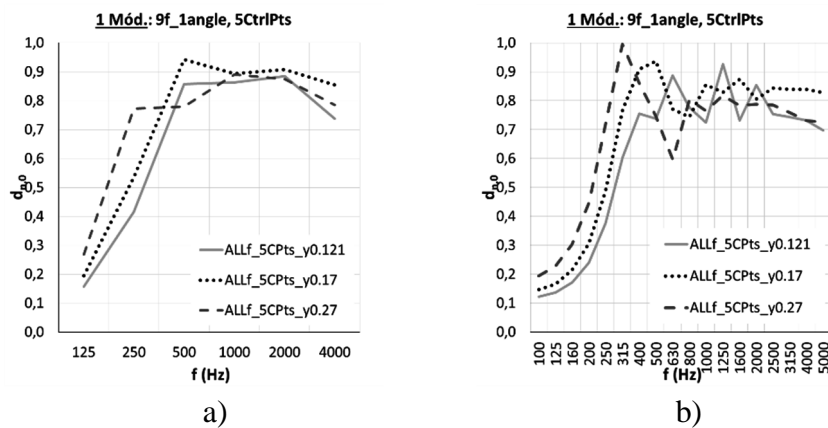


Figura 6.98 – Comparação entre os três difusores otimizados para 9 bandas de frequência com 5 *CtrlPts*. Coeficiente de difusão normalizado (para incidência normal) em: a) Bandas de oitava; b) Bandas de 1/3 de oitava.

Como se pode observar nas figuras anteriores, estes três difusores têm formas bastante semelhantes e os desempenhos são relativamente similares. Qualquer dos três tem um desempenho mais elevado numa gama mais alargada de frequências do que as soluções resultantes da optimização para uma única banda de frequências, cumprindo os objectivos da optimização.

As Figuras 6.99 a 6.105 apresentam os difusores resultantes da optimização para 10 pontos de controlo.

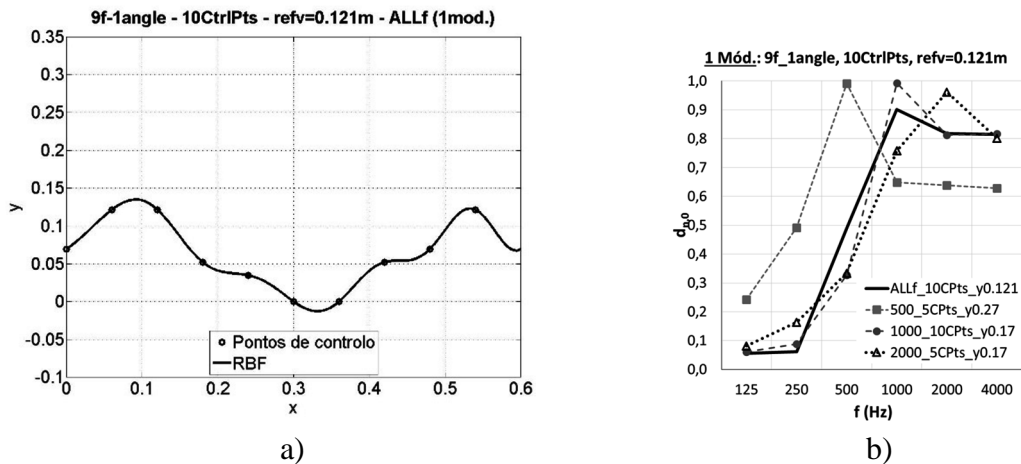


Figura 6.99 – Difusor com 10CtrlPts e $refv = 0.121\text{ m}$, otimizado (para incidência normal) para 9 bandas de frequência de 1/3 de oitava (dos 400 Hz aos 2500 Hz). a) RBF; b) Comparação entre os coeficientes de difusão normalizados dos “melhores” difusores (Quadro 6.6 e Figuras 6.41 a 6.49), em bandas de frequência de oitava.

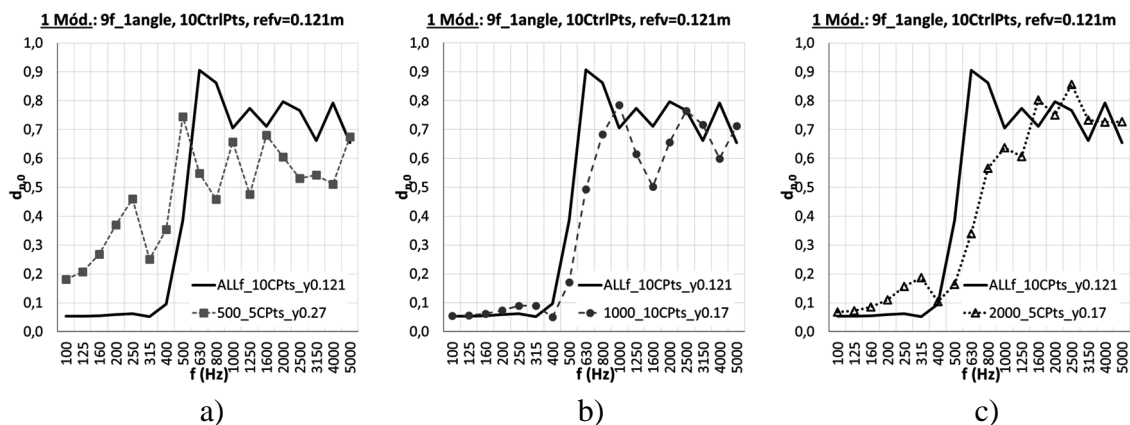


Figura 6.100 – Comparação do coeficiente de difusão normalizado (para incidência normal), em bandas de 1/3 de oitava, do difusor da figura anterior com os “melhores” otimizados para uma única banda de frequência: a) $f = 500\text{ Hz}$; b) $f = 1000\text{ Hz}$; c) $f = 2000\text{ Hz}$.

Este difusor tem também um desempenho numa gama alargada de frequências. Contudo, o seu desempenho na banda de oitava dos 500 Hz não é tão eficiente como o difusor otimizado apenas para essa banda, mas se tivermos em atenção as “profundidades” de ambos os difusores observamos que a “profundidade” deste é de apenas 0.145m e o de 500 Hz é de 0.275m.

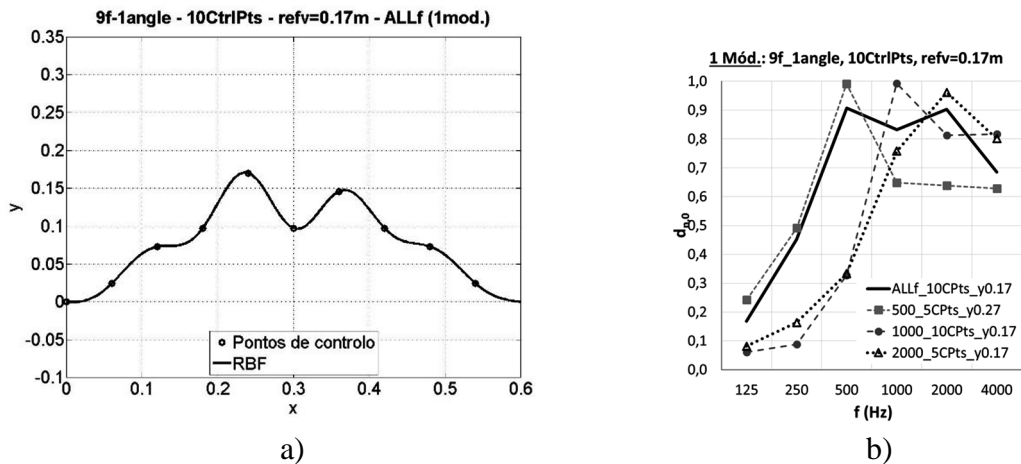


Figura 6.101 – Difusor com 10CtrlPts e $refv = 0.17 m$, otimizado (para incidência normal) para 9 bandas de frequência de 1/3 de oitava (dos 400 Hz aos 2500 Hz). a) RBF; b) Comparação entre os coeficientes de difusão normalizados dos “melhores” difusores (Quadro 6.6 e Figuras 6.41 a 6.49), em bandas de frequência de oitava.

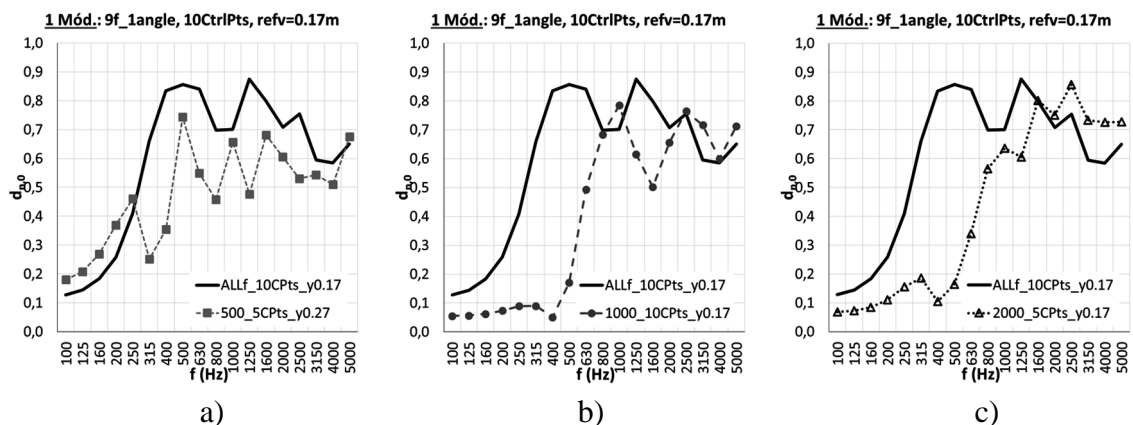


Figura 6.102 – Comparação do coeficiente de difusão normalizado (para incidência normal), em bandas de 1/3 de oitava, do difusor da figura anterior com os “melhores” otimizados para uma única banda de frequência: a) $f = 500 Hz$; b) $f = 1000 Hz$; c) $f = 2000 Hz$.

Este difusor também tem um desempenho elevado numa gama alargada de frequências. Tem uma pequena queda nas três bandas de frequência mais elevadas, mas essas também não faziam parte das 9 bandas de frequências escolhidas (400 Hz aos 2500 Hz). Mais à frente apresentam-se alguns casos em que se teve em atenção o desempenho nessas altas frequências.

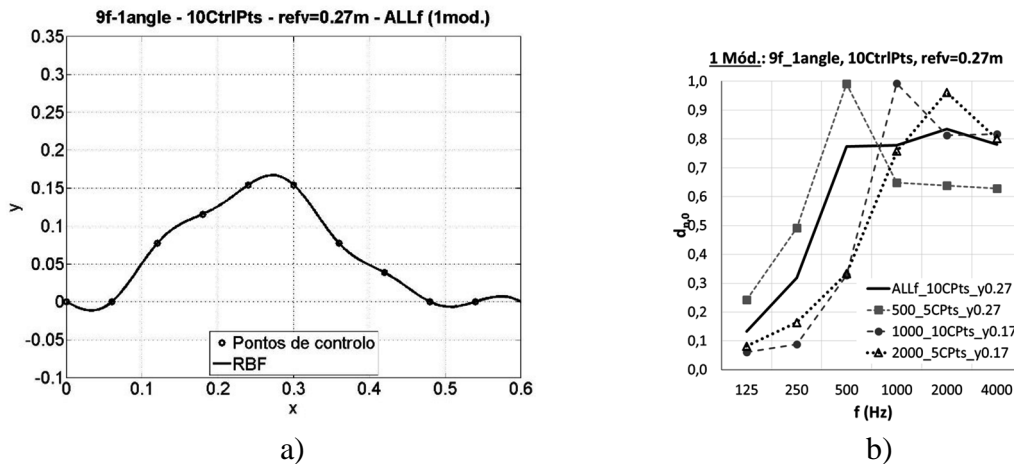


Figura 6.103 – Difusor com 10CtrlPts e $refv = 0.27 m$, otimizado (para incidência normal) para 9 bandas de frequência de 1/3 de oitava (dos 400 Hz aos 2500 Hz). a) RBF; b) Comparação entre os coeficientes de difusão normalizados dos “melhores” difusores (Quadro 6.6 e Figuras 6.41 a 6.49), em bandas de frequência de oitava.

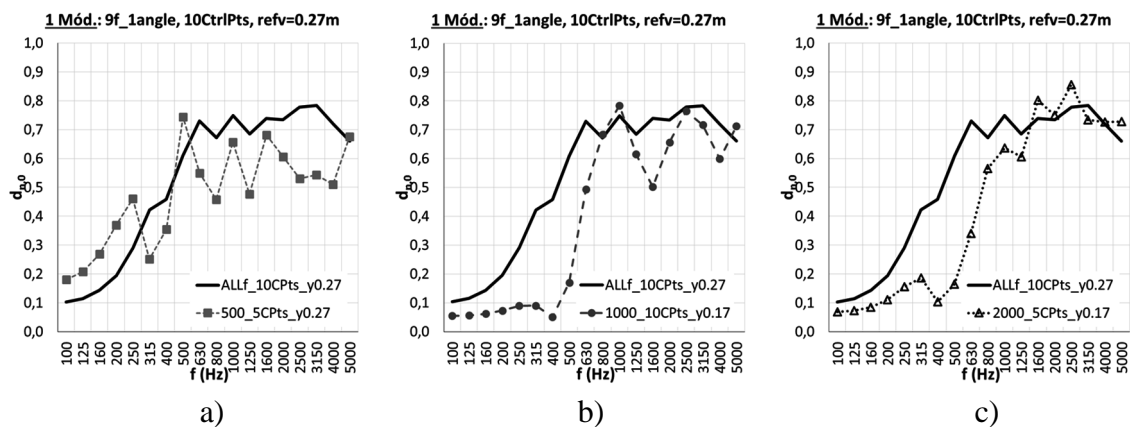


Figura 6.104 – Comparação do coeficiente de difusão normalizado (para incidência normal), em bandas de 1/3 de oitava, do difusor da figura anterior com os “melhores” otimizados para uma única banda de frequência: a) $f = 500$ Hz; b) $f = 1000$ Hz; c) $f = 2000$ Hz.

Uma vez mais, este difusor tem um desempenho elevado numa grande gama de frequências. Embora não atinja valores muito elevados, o coeficiente de difusão normalizado é relativamente constante. É de referir que o desnível da curva da RBF que define este difusor (Δy , “profundidade do difusor”) é de apenas 0.178 m quando a altura máxima possível dos pontos de controlo é $refv = 0.27 m$ – uma das consequências deste facto é o desempenho nas baixas frequências ser inferior ao esperado.

A figura seguinte apresenta a comparação entre os três difusores otimizados para 9 bandas de frequência com 10 CtrlPts.

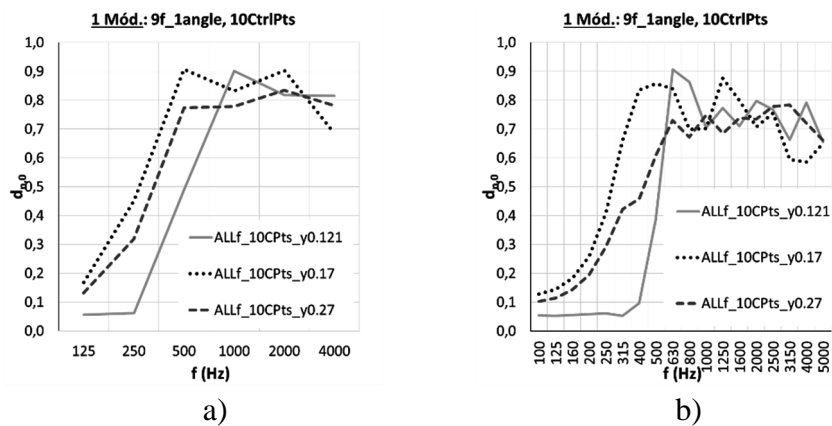


Figura 6.105 – Comparação entre os três difusores otimizados para 9 bandas de frequência com 10 *CtrlPts*. Coeficiente de difusão normalizado (para incidência normal) em: a) Bandas de oitava; b) Bandas de 1/3 de oitava.

Como se pode observar na figura anterior, o difusor com menor espessura (corresponde ao caso $refv = 0.121\text{ m}$) é o que tem pior desempenho nas baixas frequências. Surpreendentemente, o difusor com maior $refv$ não é o que tem melhor desempenho nas baixas frequências. Contudo, verifica-se que os desníveis máximos das respectivas RBF são muito próximos, $\Delta y = 0.171\text{ m}$, para $refv = 0.17\text{ m}$ e $\Delta y = 0.178\text{ m}$ para $refv = 0.27\text{ m}$.

Para melhorar o desempenho nas altas frequências, escolheram-se as 9 bandas de 1/3 de oitava de frequências mais elevadas (de 800 Hz aos 5000 Hz) e optimizou-se a situação que tinha pior desempenho nessa gama de frequências (caso com $refv = 0.17\text{ m}$). Os resultados obtidos são apresentados nas figuras seguintes.

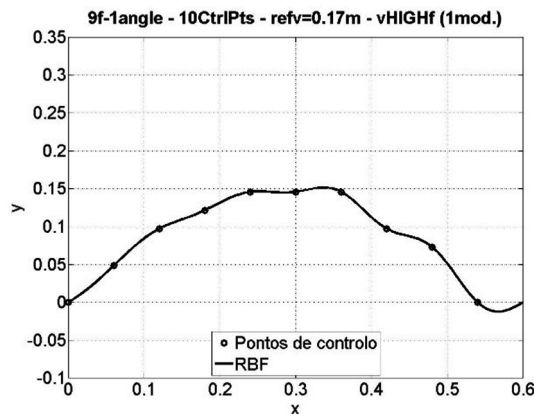


Figura 6.106 – Forma do difusor (RBF) com 10 *CtrlPts* e $refv = 0.17\text{ m}$, optimizado (para incidência normal) para 9 bandas de frequência de 1/3 de oitava (dos 800 Hz aos 5000 Hz).

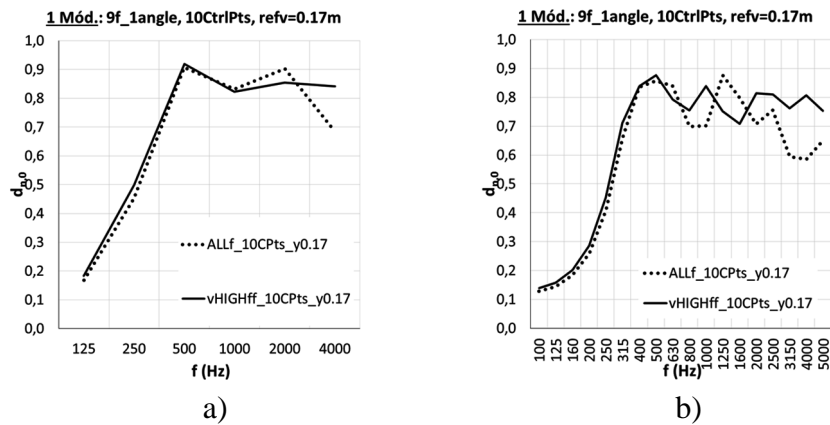


Figura 6.107 – Comparação entre os dois difusores com 10 *CtrlPts* e $refv = 0.17\text{ m}$, um otimizado para as médias frequências (Figura 6.101) e outro otimizado para altas frequências (Figura 6.106). Coeficiente de difusão normalizado (para incidência normal) em:
a) Bandas de oitava; b) Bandas de 1/3 de oitava.

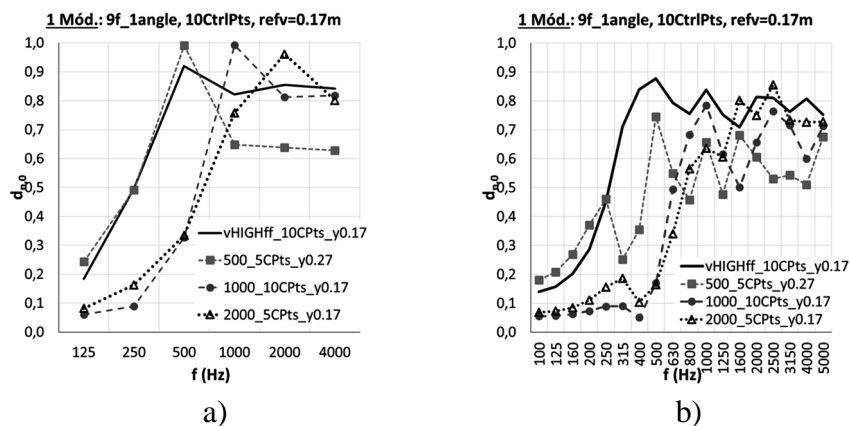


Figura 6.108 – Comparação do coeficiente de difusão normalizado (para incidência normal), otimizado para as altas frequências com os “melhores” otimizados para uma única banda de frequência: a) Em bandas de oitava; b) Em bandas de 1/3 de oitava.

Como se pode ver, o desempenho nas altas frequências foi melhorado sem se perder eficiência nas restantes gamas de frequência. Este difusor é extremamente eficiente para incidência normal, com valores acima de 0.7 a partir dos 315 Hz. Contudo, convém referir que apenas se analisa o desempenho de um único módulo. Mais à frente, apresentar-se-ão exemplos de optimização para mais do que um módulo.

É ainda interessante notar que a forma do difusor aproximou-se das configurações obtidas com 5 pontos de controlo (ver Figuras 6.92, 6.94 e 6.96).

Pode-se ainda otimizar um difusor para as altas frequência, porém, em vez de se deslocar a gama de frequências dos 400 Hz-2500 Hz para os 800 Hz-5000 Hz, mantém-se na mesma a gama de frequências (400 Hz-2500 Hz) mas, quando se faz a média dos coeficientes de difusão

nessas bandas, dão-se pesos diferentes, dando maiores pesos às frequências 1600 Hz-2500 Hz. Como exemplo de aplicação, utilizaram-se como dados de entrada 5 pontos de controlo e $refv = 0.121 m$. Os resultados obtidos são apresentados nas figuras seguintes.

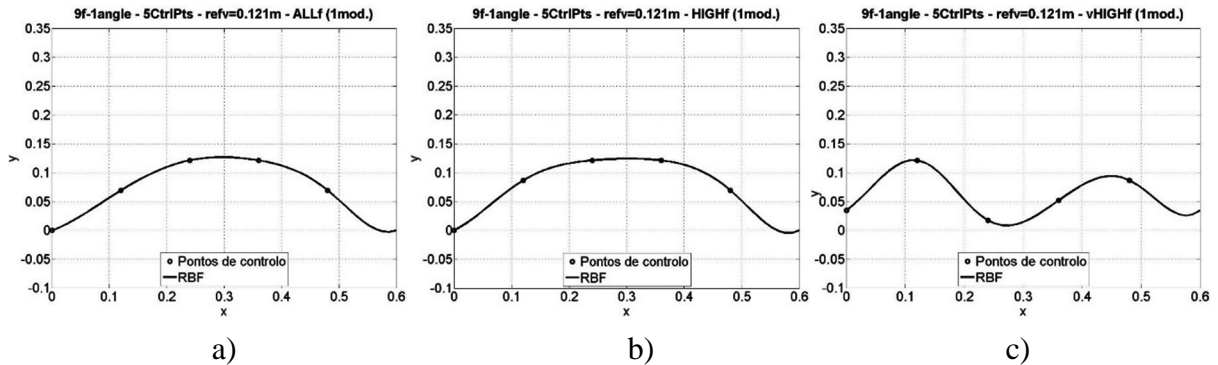


Figura 6.109 – Configurações geométricas (RBF) de difusores otimizados para 9 bandas de frequências com 5 pontos de controlo e $refv = 0.121 m$. Otimizações para: a) Médias frequências (ilustrado na Figura 6.92a); b) Altas frequências (de 400 Hz-2500 Hz, mas com ponderação maior nas frequências 1600Hz a 2500); c) “Muito” altas frequências (de 800 Hz-5000 Hz).

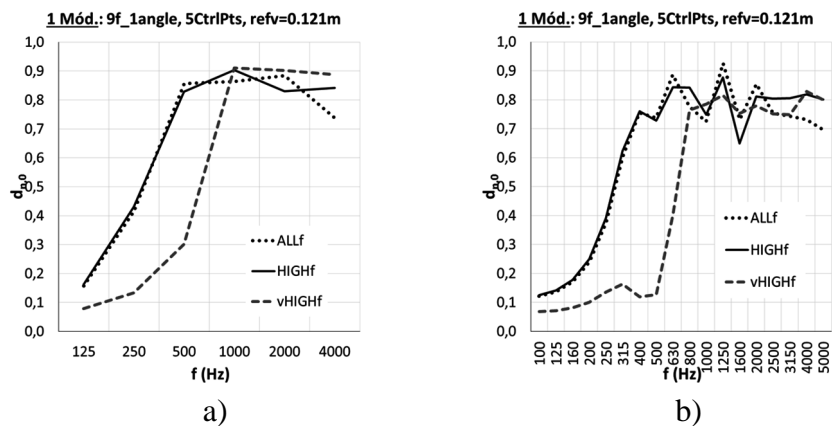


Figura 6.110 – Comparação entre os três difusores da figura anterior com 5 *CtrlPts* e $refv = 0.121 m$, um otimizado para as médias frequências, outro para altas frequências e outro ainda para “muito” altas frequências. Coeficiente de difusão normalizado (para incidência normal) em: a) Bandas de oitava; b) Bandas de 1/3 de oitava.

Como se pode observar, o difusor otimizado para a gama das frequências mais altas tem uma forma muito semelhante ao difusor otimizado para as médias frequências. O seu desempenho é semelhante, porém, embora não seja mais eficiente nas frequências de 1600 Hz a 2500 Hz, nas frequências acima dessas é ligeiramente mais eficiente. O difusor otimizado para “muito” altas frequências tem uma forma diferente, sendo bastante menos eficiente nas baixas frequências (contudo, é nas bandas de frequência abaixo dos 800 Hz, limite inferior da gama de otimização), mas é o mais eficiente na gama das frequências mais elevadas.

Nas figuras seguintes apresentam-se os últimos exemplos de aplicação contidos no Quadro 6.7 que são os referentes aos casos da otimização de difusores definidos por 20 pontos de controlo.

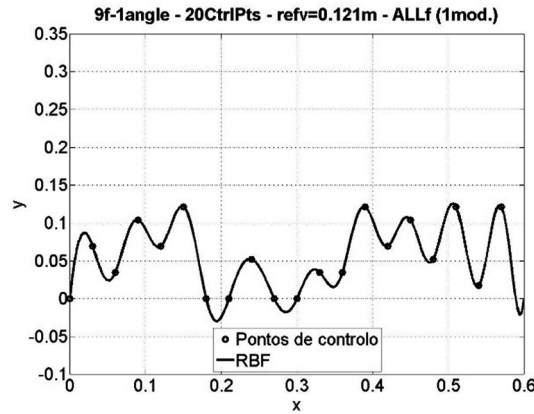


Figura 6.111 – Forma do difusor (RBF) com 20CtrlPts e $refv = 0.121\text{ m}$, otimizado (para incidência normal) para 9 bandas de frequência de 1/3 de oitava (dos 400 Hz aos 2500 Hz).

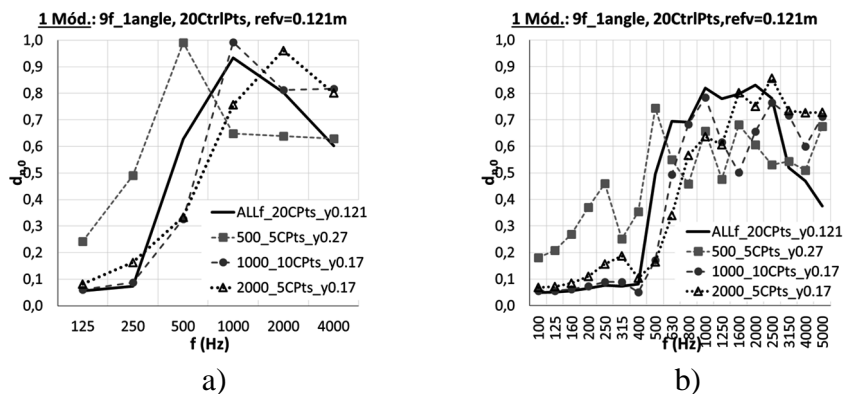


Figura 6.112 – Comparação do coeficiente de difusão normalizado do difusor da figura anterior com os “melhores” otimizados para uma única banda de frequência: a) Em bandas de oitava; b) Em bandas de 1/3 de oitava.

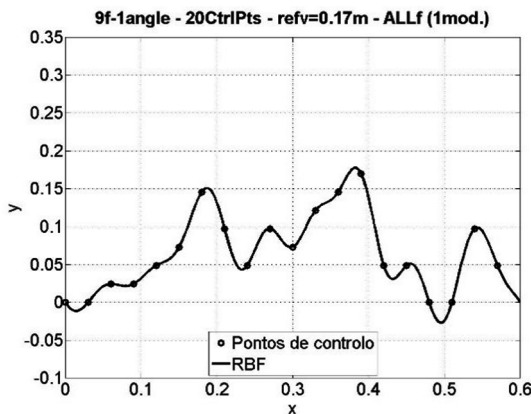


Figura 6.113 – Forma do difusor (RBF) com 20CtrlPts e $refv = 0.17\text{ m}$, otimizado (para incidência normal) para 9 bandas de frequência de 1/3 de oitava (dos 400 Hz aos 2500 Hz).

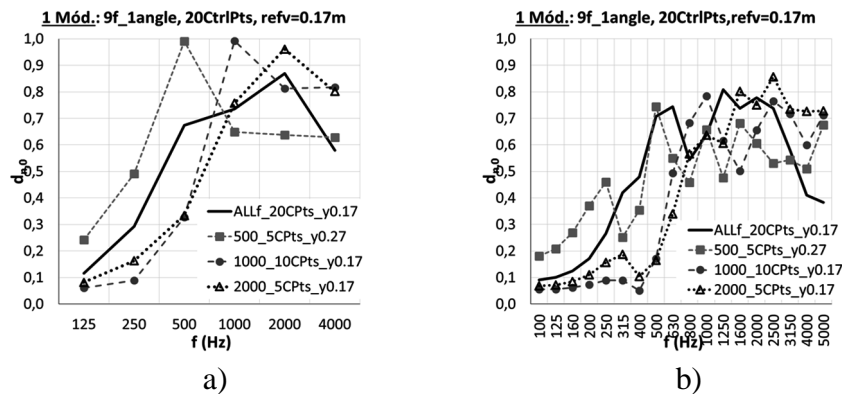


Figura 6.114 – Comparação do coeficiente de difusão normalizado do difusor da figura anterior com os “melhores” otimizados para uma única banda de frequência: a) Em bandas de oitava; b) Em bandas de 1/3 de oitava.

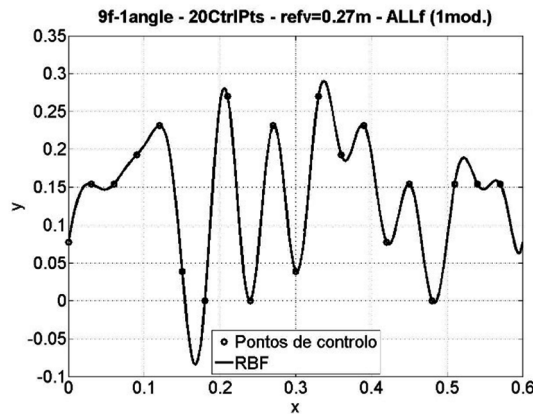


Figura 6.115 – Forma do difusor (RBF) com 20CtrlPts e $refv = 0.27\text{ m}$, otimizado (para incidência normal) para 9 bandas de frequência de 1/3 de oitava (dos 400 Hz aos 2500 Hz).

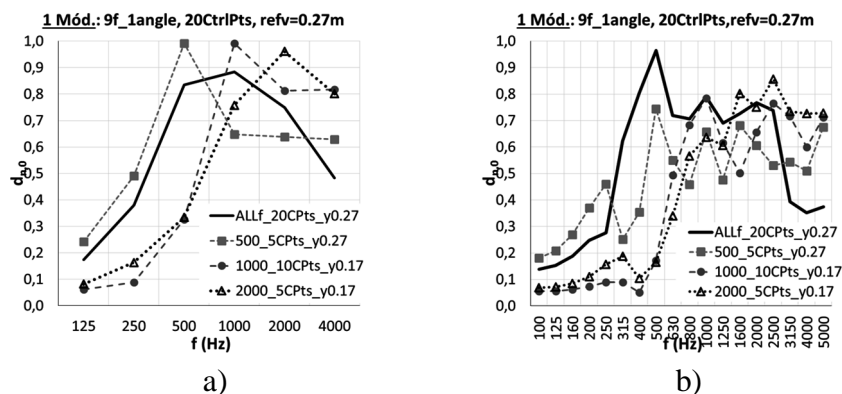


Figura 6.116 – Comparação do coeficiente de difusão normalizado do difusor da figura anterior com os “melhores” otimizados para uma única banda de frequência: a) Em bandas de oitava; b) Em bandas de 1/3 de oitava.

Analisando os resultados ilustrados nas figuras atrás, verifica-se que estes difusores têm uma difusão mais irregular (basta reparar no Quadro 6.7 que os respectivos desvios padrão relativos às médias são bastante elevados). Por outro lado, o seu desempenho nas mais altas frequências é relativamente fraco, mesmo tendo em atenção que essas bandas de frequência (entre os 3150 Hz e os 5000 Hz) estão fora das bandas de frequência consideradas na otimização. Como se viu, para obviar este problema, poder-se-á proceder como exemplificado anteriormente relativamente aos casos com 5 e 10 pontos de controlo e $refv = 0.17 m$.

Pelas razões anteriormente apresentadas, uma vez mais, vai-se estender a otimização para “n” módulos idênticos, considerando igualmente a média dos coeficientes de difusão normalizada (para incidência normal) de 9 bandas de 1/3 de oitava, compreendidas entre os 400 Hz e os 2500 Hz. Apresentam-se dois exemplos, um para 5 pontos de controlo e $refv = 0.17 m$ outro para 10 pontos de controlo e $refv = 0.121 m$.

Os resultados obtidos são apresentados nas figuras seguintes.

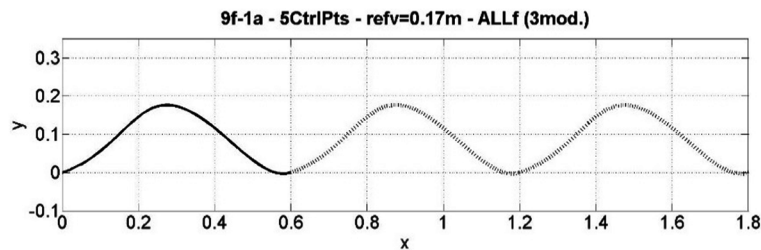


Figura 6.117 – Forma de 3 módulos idênticos do difusor (RBF) com 5CtrlPts e $refv = 0.17 m$, otimizado (para incidência normal) para uma utilização conjunta, considerando 9 bandas de frequência de 1/3 de oitava (dos 400 Hz aos 2500 Hz).

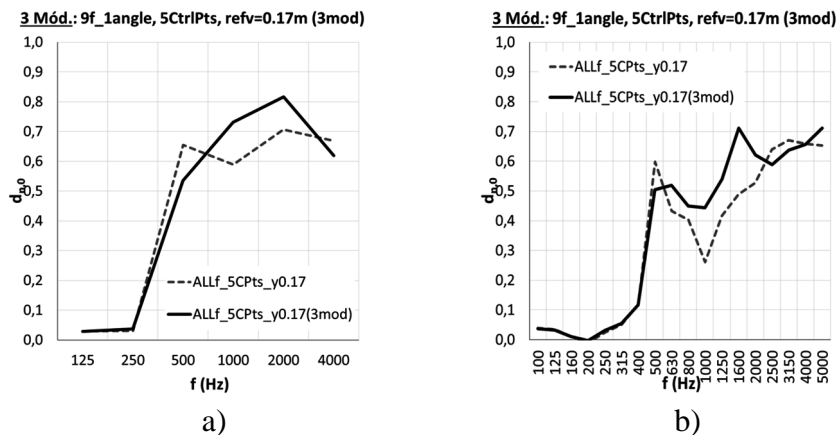


Figura 6.118 – Comparação do coeficiente de difusão normalizado do difusor da figura anterior (otimizado para uma utilização de três módulos) com o difusor homólogo otimizado para um módulo (Figura 6.91a). Resultados da análise de 3 módulos em: a) Bandas de oitava; b) Bandas de 1/3 de oitava.

Como se pode observar, o desempenho do difusor otimizado para 3 módulos é ligeiramente melhor do que o difusor otimizado para 1 módulo, embora na banda dos 500 Hz não o seja.

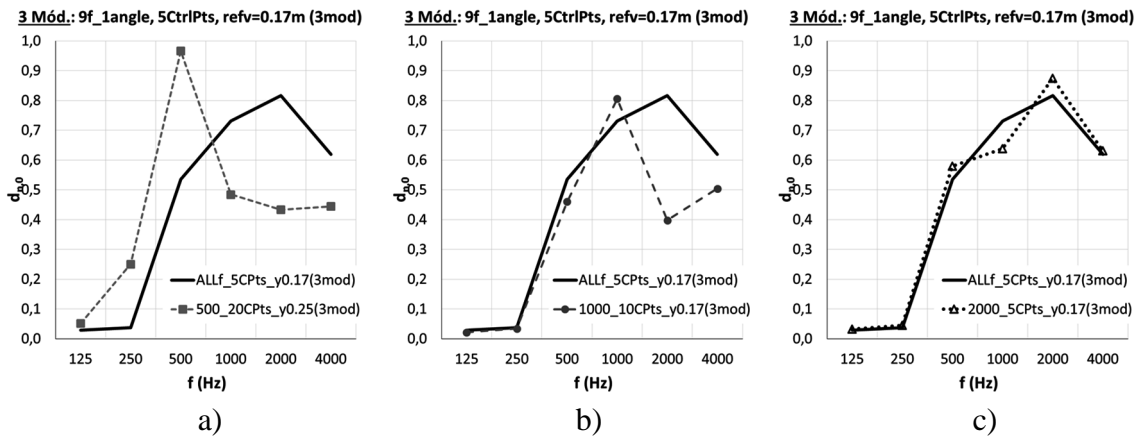


Figura 6.119 – Comparação do coeficiente de difusão normalizado do difusor da Figura 6.117 (otimizado para uma utilização de três módulos) com os difusores otimizados também para 3 módulos mas apenas para uma banda de frequências de oitava. Resultados da análise de 3 módulos em bandas de oitava. Comparação com o difusor otimizado para a frequência: a) $f = 500$ Hz (Figura 6.55); b) $f = 1000$ Hz (Figura 6.57); c) $f = 2000$ Hz (Figura 6.59).

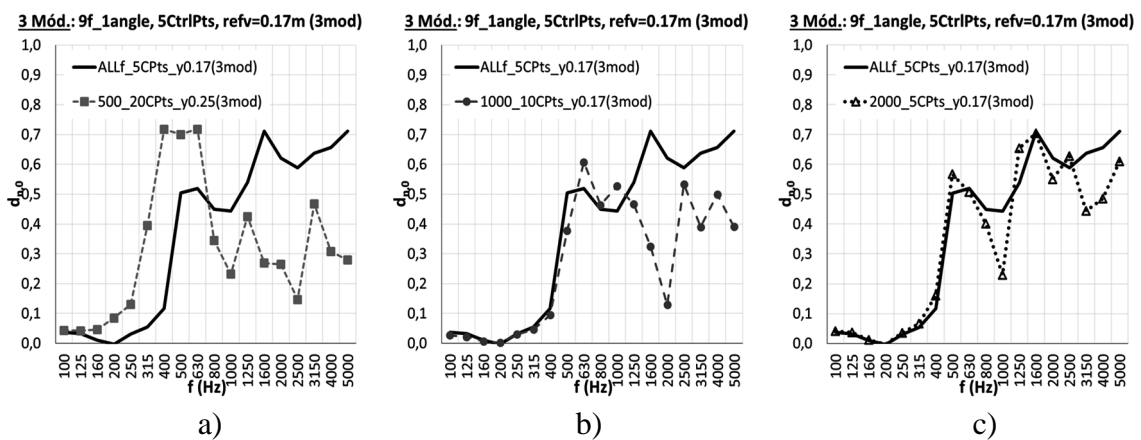


Figura 6.120 – Comparação do coeficiente de difusão normalizado do difusor da Figura 6.117 (otimizado para uma utilização de três módulos) com os difusores otimizados também para 3 módulos mas apenas para uma banda de frequências de oitava. Resultados da análise de 3 módulos em bandas de 1/3 de oitava. Comparação com o difusor otimizado para a frequência: a) $f = 500$ Hz (Figura 6.55); b) $f = 1000$ Hz (Figura 6.57); c) $f = 2000$ Hz (Figura 6.59).

Comparativamente com os difusores otimizados apenas para uma banda de frequências, como se pode observar nas figuras anteriores, este difusor é menos eficiente na banda dos 500 Hz que

o otimizado para essa frequência, embora seja mais eficiente que os restantes, tendo ainda a vantagem de o coeficiente de difusão, apesar de tudo, ser mais constante.

O difusor otimizado para 3 módulos idênticos considerando a média dos coeficientes de difusão normalizada (para incidência normal) de 9 bandas de 1/3 de oitava ($9f - \theta=0^\circ$) com 10 pontos de controlo e $refv = 0.121\text{ m}$ é apresentado na Figura 6.121 e a comparação de resultados com o difusor homólogo otimizado para um módulo é mostrada na Figura 6.122.

Como se pode observar, neste caso não há diferenças significativas entre os dois difusores.

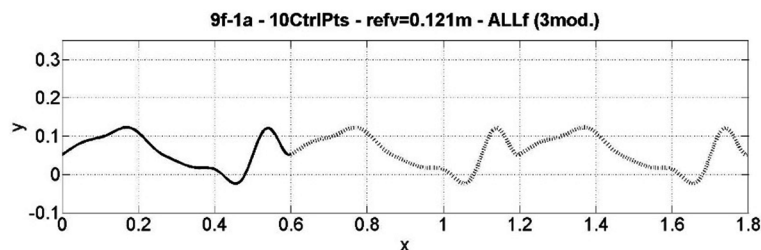


Figura 6.121 – Forma de 3 módulos idênticos do difusor (RBF) com 10CtrlPts e $refv = 0.121\text{ m}$, otimizado (para incidência normal) para uma utilização conjunta, considerando 9 bandas de frequência de 1/3 de oitava (dos 400 Hz aos 2500 Hz).

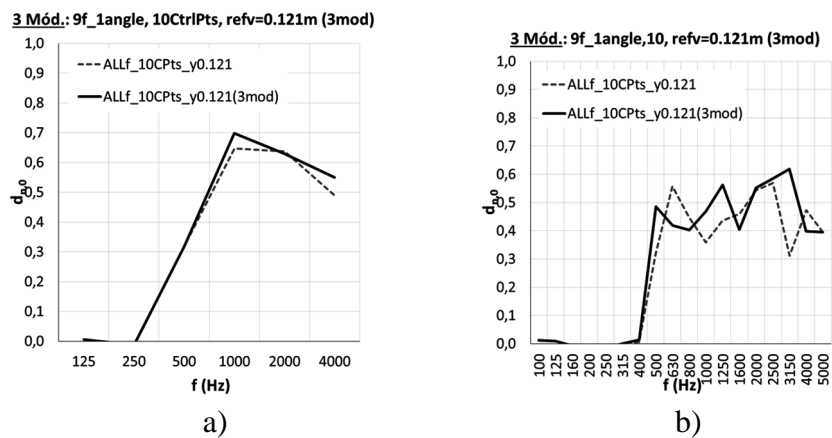


Figura 6.122 – Comparação do coeficiente de difusão normalizado do difusor da figura anterior (otimizado para uma utilização de três módulos) com o difusor homólogo otimizado para um módulo (Figura 6.99a). Resultados da análise de 3 módulos em: a) Bandas de oitava; b) Bandas de 1/3 de oitava.

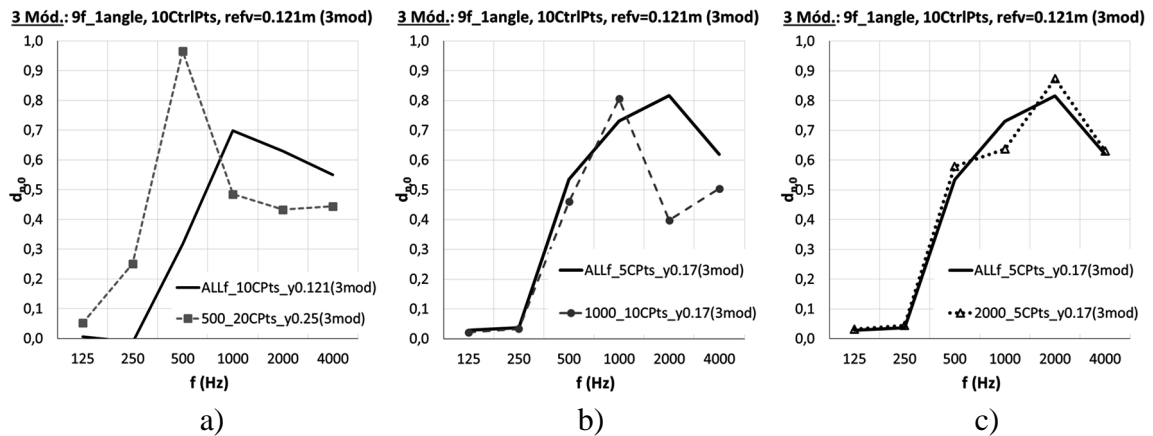


Figura 6.123 – Comparação do coeficiente de difusão normalizado do difusor da Figura 6.121 (otimizado para uma utilização de três módulos) com os difusores otimizados também para 3 módulos mas apenas para uma banda de frequências de oitava. Resultados da análise de 3 módulos em bandas de oitava. Comparação com o difusor otimizado para a frequência: a) $f = 500$ Hz (Figura 6.55); b) $f = 1000$ Hz (Figura 6.57); c) $f = 2000$ Hz (Figura 6.59).

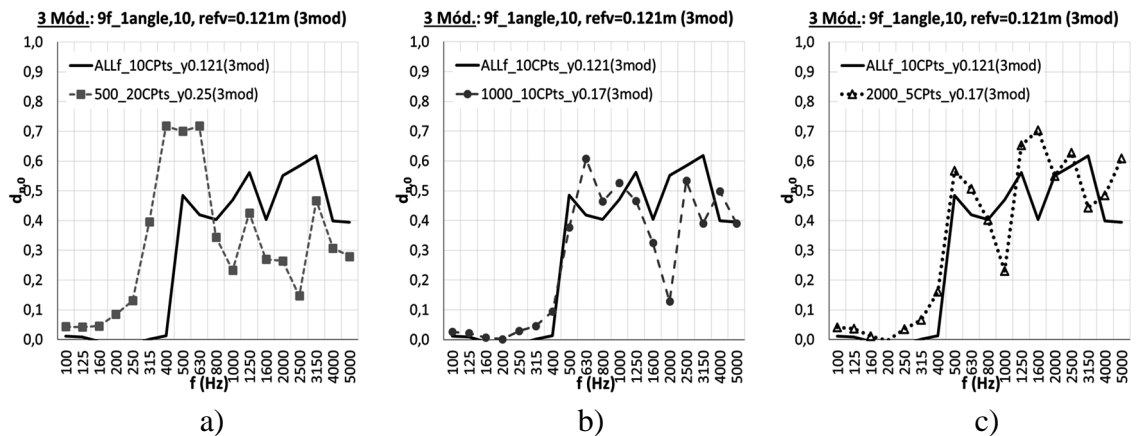


Figura 6.124 – Comparação do coeficiente de difusão normalizado do difusor da Figura 6.121 (otimizado para uma utilização de três módulos) com os difusores otimizados também para 3 módulos mas apenas para uma banda de frequências de oitava. Resultados da análise de 3 módulos em bandas de 1/3 oitava. Comparação com o difusor otimizado para a frequência: a) $f = 500$ Hz (Figura 6.55); b) $f = 1000$ Hz (Figura 6.57); c) $f = 2000$ Hz (Figura 6.59).

Uma vez mais, o difusor em análise, otimizado para 3 módulos, não tem tão boa eficiência nas baixas frequências como o otimizado especificamente para a banda dos 500 Hz. Relativamente à comparação com os outros dois difusores não é substancialmente mais eficiente, embora tenha um desempenho mais regular ao longo do espectro de frequências em análise e esse era um pré-requisito da otimização.

6.7. OPTIMIZAÇÃO PARA 5 ÂNGULOS DE INCIDÊNCIA, COEFICIENTE DE DIFUSÃO PARA INCIDÊNCIA ALEATÓRIA, $d_{r,n}$

Um bom difusor não deve ter apenas um elevado coeficiente de difusão para dada incidência (até ao momento apenas se tem apresentado casos para incidência normal, mas poderia ser qualquer outro ângulo de incidência), porque na maioria das aplicações não existe apenas uma fonte sonora ou, havendo uma, pode não estar fixa no espaço. Por outro lado, sendo produtos que são aplicados no interior das salas, as reflexões (que poderão ser intensas) poderão vir de várias direcções. Deste modo, os difusores devem ser optimizados para incidência aleatória. No caso dos difusores, cujas polares são bidimensionais, a norma AES-4id-2001 [38] e a norma ISO 17497-2: 2012 [39] indicam que este coeficiente é calculado fazendo a média ponderada dos coeficientes de difusão direccionais, cujo peso da direcção normal é de “1” e nas restantes 4 posições angulares da fonte sonora (definidas pelas supracitadas normas como: $\pm 30^\circ$ e $\pm 60^\circ$) a ponderação é de “3”:

$$d_{r,n} = \frac{\sum_{j=1}^m |w_j \cdot (d_{\theta,n})_j|}{\sum_{j=1}^m |w_j|} \quad (6.6)$$

onde m é o número de posições da fonte sonora ($m = 5$), $(d_{\theta,n})_j$ é o coeficiente de difusão direccional normalizado para a incidência $\theta_j = \{-60^\circ; -30^\circ; 0^\circ; +30^\circ; +60^\circ\}$ e w_j são os pesos para posição angular da fonte, $w_j = \{3; 3; 1; 3; 3\}$.

Nesta secção apresentar-se-ão casos de optimizações para uma banda de frequências de oitava. Também aqui o que se pretende é que estes difusores tenham o coeficiente de difusão para incidência aleatória maximizado. Contudo, se se pretender que as soluções sejam uniformemente eficientes para todas as direcções (i.e., que não tenham uma ou mais direcções onde sejam extremamente eficientes e depois nas restantes serem pouco eficientes), sugere-se também corrigir o $d_{r,n}$ com o desvio padrão ponderado dado pela Equação 6.5:

$$d_{\text{corrigido}} = d_{r,n} - \text{Desvio Padrão} \quad (6.7)$$

Uma vez mais, as optimizações foram executadas como anteriormente: a população era constituída por 22 indivíduos (inicialmente eram superfícies planas) e a optimização parava quando se atingisse a 100ª iteração. Para cada caso, fizeram-se 7 “runs” e os resultados que se apresentam correspondem aos que tiveram o maior resultado para o parâmetro a maximizar

(coeficiente de difusão normalizado para incidência aleatória ou, em alguns casos, este valor corrigido pelo desvio padrão, Equação 6.7).

Os parâmetros de entrada (*CtrlPts* e *refv*) são os mesmos para os quais se obtiveram os difusores resultante da optimização, para incidência normal, numa banda de frequências de oitava ($f = 5000\text{ Hz}$, $f = 1000\text{ Hz}$ e $f = 2000\text{ Hz}$).

Uma vez que as optimizações foram feitas para bandas de frequência de oitava, os resultados também serão apresentados dessa forma. Estes serão comparados com os difusores optimizados para incidência normal apresentados no Quadro 6.6 da secção 6.4 (ilustrados da Figura 6.41 à 6.49). O quadro seguinte apresenta os resultados obtidos quantificados para alguns dos exemplos e as figuras seguintes apresentam esses resultados de forma gráfica.

Quadro 6.8 – Comparação entre optimização para 5 ângulos e para incidência normal.

	refv (m)	CtrlPts	Δy (m)	d_random	Desv.Padr	d_corg	tipo	d-60	d-30	d0	d+30	d+60
500	0,27	5	0,160	0,966	0,0229	0,943	Optmz. 5 angl	0,938	0,987	0,992	0,978	0,951
			0,275	0,800	0,0947	0,705	Optmz. $\Theta=0^\circ$	0,776	0,860	0,996	0,815	0,682
	0,190	10	0,204	0,905	0,0239	0,881	Optmz. 5 angl	0,903	0,888	0,941	0,884	0,934
			0,215	0,694	0,0986	0,595	Optmz. $\Theta=0^\circ$	0,657	0,664	0,997	0,683	0,669
	0,250	20	0,246	0,922	0,0560	0,866	Optmz. 5 angl	0,833	0,939	0,929	0,942	0,970
			0,334	0,910	0,0442	0,866	Optmz. $\Theta=0^\circ$	0,849	0,914	0,999	0,931	0,916
1000	0,12142	5	0,129	0,907	0,0368	0,871	Optmz. 5 angl	0,869	0,954	0,858	0,901	0,923
			0,110	0,775	0,1209	0,654	Optmz. $\Theta=0^\circ$	0,649	0,696	0,783	0,813	0,940
	0,170	10	0,141	0,928	0,0183	0,910	Optmz. 5 angl	0,935	0,913	0,960	0,944	0,910
			0,133	0,826	0,0643	0,762	Optmz. $\Theta=0^\circ$	0,785	0,866	0,995	0,807	0,792
	0,170	20	0,174	0,919	0,0247	0,894	Optmz. 5 angl	0,944	0,883	0,945	0,918	0,920
			0,172	0,847	0,0631	0,784	Optmz. $\Theta=0^\circ$	0,882	0,778	0,997	0,849	0,829
2000	0,17	5	0,135	0,853	0,0239	0,829	Optmz. 5 angl	0,830	0,834	0,862	0,862	0,884
			0,147	0,726	0,1187	0,607	Optmz. $\Theta=0^\circ$	0,697	0,760	0,966	0,794	0,574
	0,160	10	0,171	0,857	0,0638	0,793	Optmz. 5 angl	0,921	0,826	0,783	0,793	0,913
			0,146	0,651	0,1221	0,529	Optmz. $\Theta=0^\circ$	0,653	0,690	0,982	0,609	0,542
	0,061	20	0,073	0,885	0,0502	0,835	Optmz. 5 angl	0,905	0,860	0,756	0,931	0,887
			0,078	0,667	0,1044	0,563	Optmz. $\Theta=0^\circ$	0,663	0,627	0,975	0,676	0,601

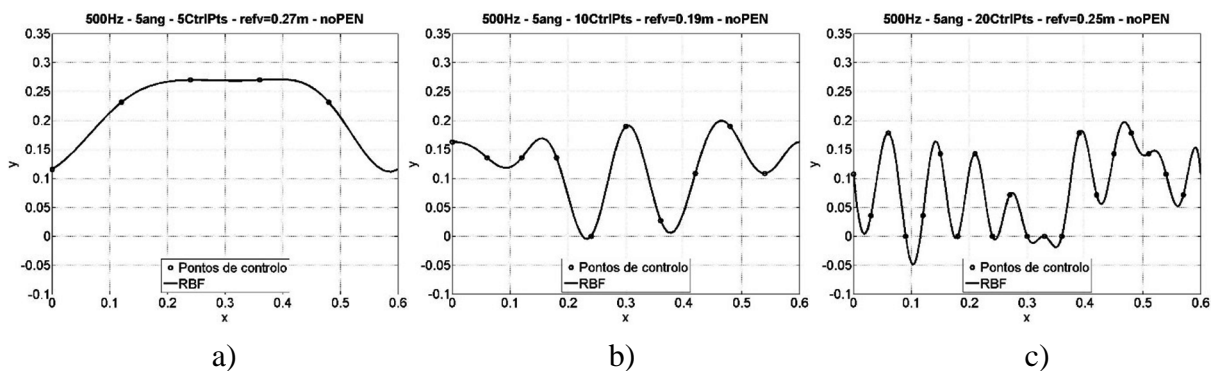


Figura 6.125 – Formas geométricas (RBF) dos difusores resultantes da optimização para 5 ângulos (sem a penalização do desvio padrão) para a $f = 500\text{ Hz}$. a) 5 *CtrlPts* e $refv = 0.27\text{ m}$; b) 10 *CtrlPts* e $refv = 0.19\text{ m}$; c) 20 *CtrlPts* e $refv = 0.25\text{ m}$.

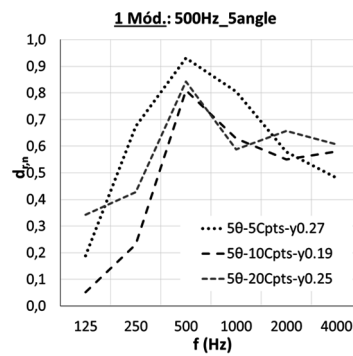


Figura 6.126 – Comparação dos coeficientes de difusão para incidência aleatória normalizados dos difusores apresentados na figura anterior.

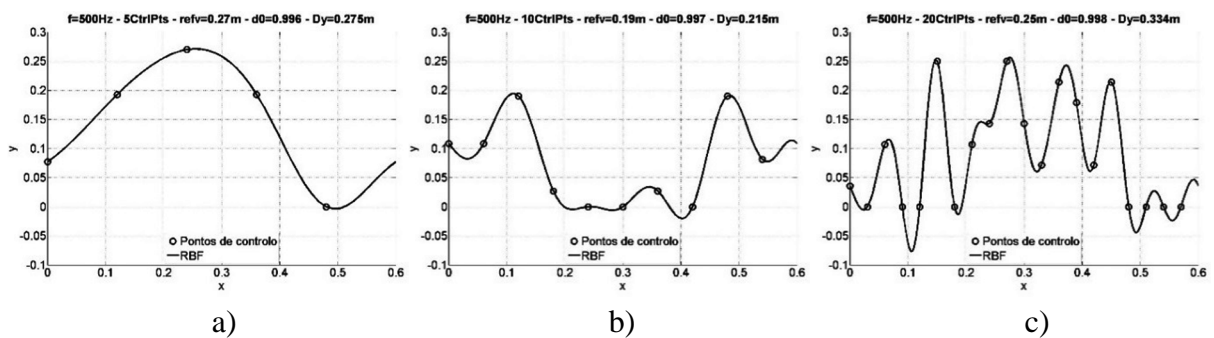


Figura 6.127 – Formas geométricas (RBF) dos difusores otimizados para $f = 500 \text{ Hz}$ e para incidência normal. a) 5 *CtrlPts* e $refv = 0.27m$ (ilustrado na Figura 6.41a); b) 10 *CtrlPts* e $refv = 0.19m$ (ilustrado na Figura 6.42a); c) 20 *CtrlPts* e $refv = 0.25m$ (ilustrado na Figura 6.43a).

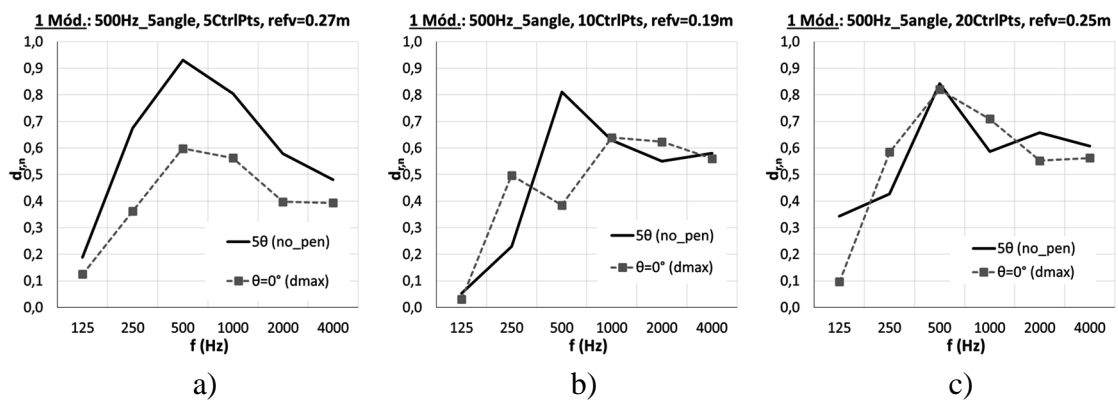


Figura 6.128 – Comparação dos coeficientes de difusão para incidência aleatória normalizados, $d_{r,n}$, dos difusores apresentados na Figura 6.125 (otimizados para 5 ângulos) com os difusores apresentados na Figura 6.127 (otimizados para $\theta=0^\circ$). a) 5 *CtrlPts* e $refv = 0.27m$; b) 10 *CtrlPts* e $refv = 0.19m$; c) 20 *CtrlPts* e $refv = 0.25m$.

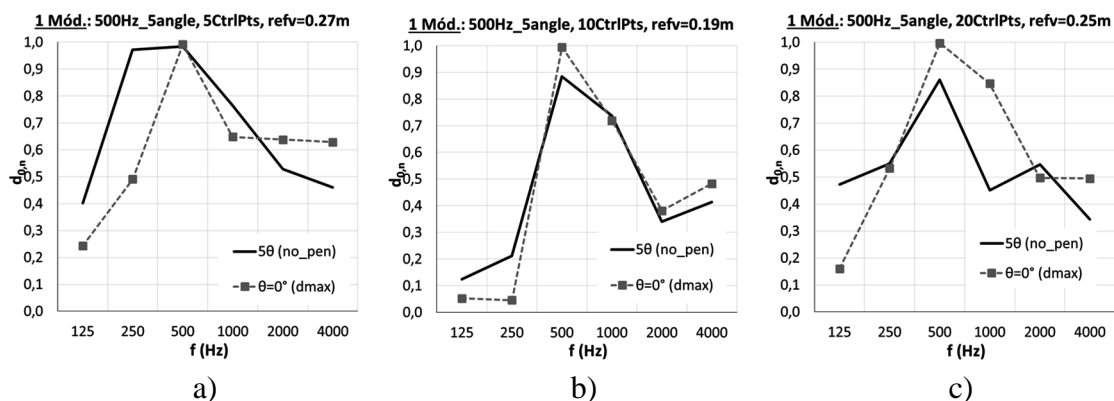


Figura 6.129 – Comparação dos coeficientes de difusão para incidência normal normalizados, $d_{0,n}$, dos difusores apresentados na Figura 6.125 (optimizados para 5 ângulos) com os difusores apresentados na Figura 6.127 (optimizados para $\theta=0^\circ$). a) 5 *CtrlPts* e *refv* = 0.27m; b) 10 *CtrlPts* e *refv* = 0.19m; c) 20 *CtrlPts* e *refv* = 0.25m.

Pela observação das figuras anteriores, pode-se verificar que os difusores optimizados para a média dos 5 ângulos de incidência (5θ) são, de facto, mais eficientes do que os difusores optimizados para incidência normal ($\theta=0^\circ$). Contudo, são ligeiramente menos eficientes quando se considera apenas a incidência normal (ver Figura 6.129).

De modo a avaliar quais as consequências de maximizar o coeficiente de difusão aleatório corrigido pelo respectivo desvio padrão (expresso pelas Equações 6.5 e 6.7), analisaram-se a dois exemplos para 5 *CtrlPts* e para 10 *CtrlPts*, respectivamente, para valores de *refv* = 0.27m e *refv* = 0.19m e cujos resultados se apresentam nas duas figuras seguintes. Para avaliar melhor as consequências desta correcção, apresentam-se ainda os desvios padrão dos 5 valores dos coeficientes de difusão direccionais ($d_{\theta,n}$); no cálculo do respectivo coeficiente de difusão aleatório $d_{r,n}$ para cada banda de frequência.

Como se pode observar na Figura 6.130, a forma do difusor “corrigido” é muito semelhante à do difusor não “corrigido”. Ou seja, a maximização do coeficiente de difusão aleatório normalizado corrigido não conduziu a significativas alterações. De facto, a ligeira diminuição do valor do coeficiente de difusão aleatório normalizado na banda de optimização (Figura 6.130c) conduziu a uma muito ligeira diminuição do desvio padrão nessa banda de frequências (Figura 6.130d). Porém, o desempenho do difusor “corrigido” até melhorou nas bandas de frequências mais elevadas mas, como também se pode observar, o desvio padrão aumentou nessas bandas de frequências, indiciando que o difusor “corrigido” terá uma “resposta” mais irregular com a posição da fonte sonora.

Relativamente ao difusor “corrigido” para 10 pontos de controlo e *refv* = 0.19m, apresentado na Figura 6.131b, pode-se observar que houve uma ligeira alteração da forma do difusor, alteram-se as “profundidades” das concavidades. Contudo, essas alterações geométricas não

influenciaram os resultados na banda de frequências de otimização, mas sim nas bandas seguintes: piorou o seu desempenho na banda de frequências centrada nos 1000 Hz (e com a agravante do desvio padrão ter aumentado), mas melhorou na banda dos 2000 Hz.

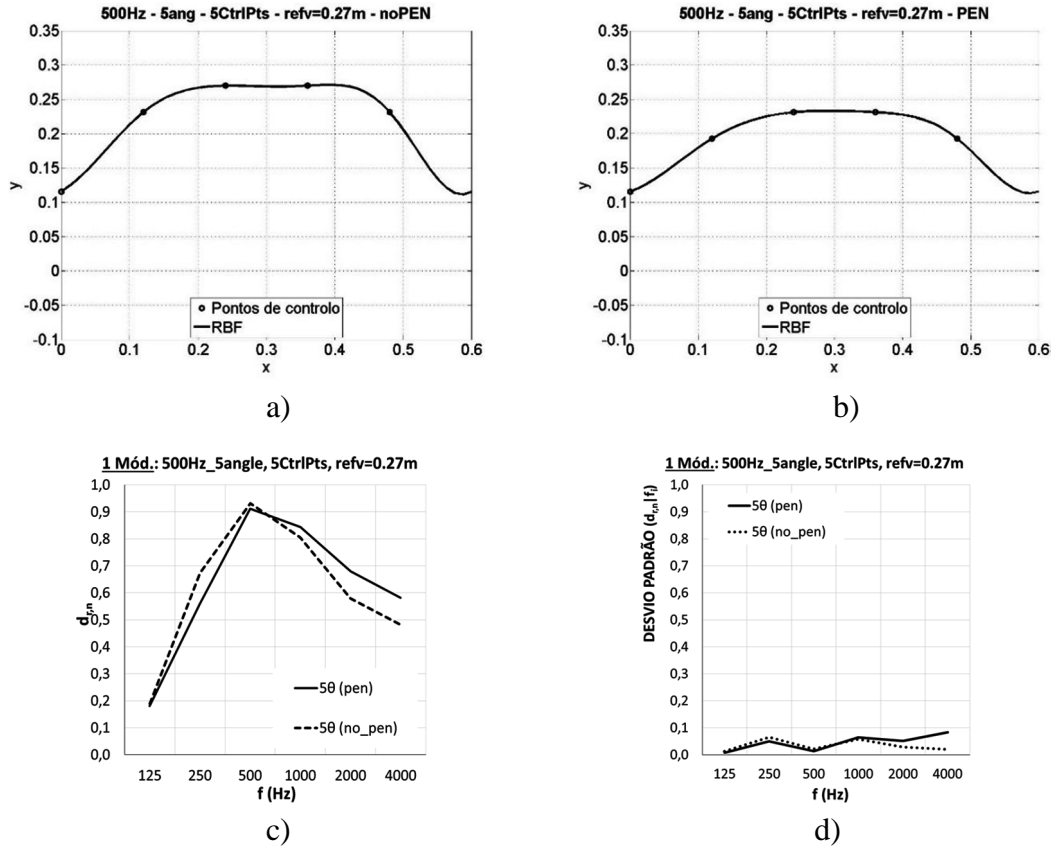
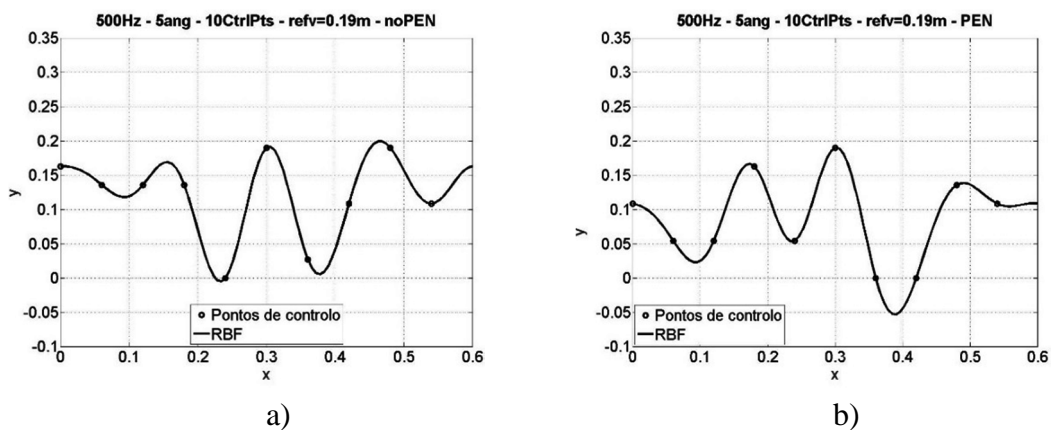


Figura 6.130 – Comparação do desempenho do difusor otimizado com coeficiente de difusão aleatório normalizado corrigido pelo desvio padrão (“pen”) com o caso não corrigido, (“no_pen”), para $f = 500 \text{ Hz}$ e $refv = 0.27 \text{ m}$. a) RBF do difusor não “corrigido” (ilustrada na Figura 6.125a); b) RBF do difusor “corrigido”; c) Coeficientes de difusão $d_{r,n}$; d) Desvios padrão “angulares” relativos aos $(d_{\theta,n})_j$.



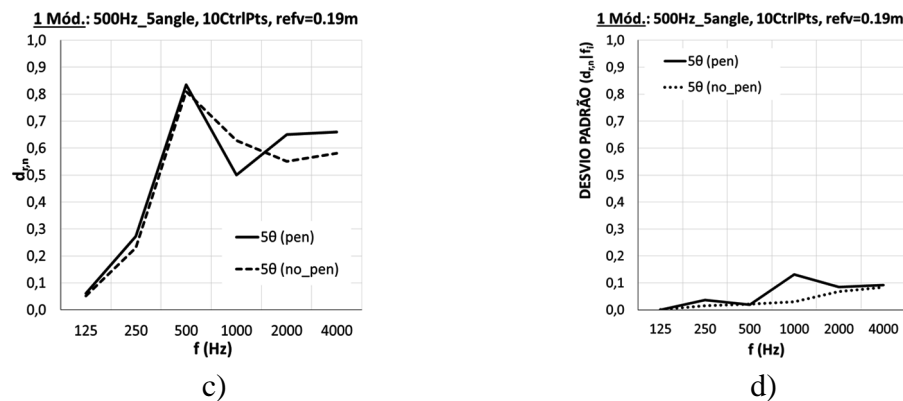


Figura 6.131 – Comparação do desempenho do difusor otimizado com coeficiente de difusão aleatório normalizado corrigido pelo desvio padrão (“*pen*”) com o caso não corrigido, (“*no_pen*”), para $f = 500 \text{ Hz}$ e $refv = 0.19m$. a) RBF do difusor não “corrigido” (ilustrada na Figura 6.125b); b) RBF do difusor “corrigido”; c) Coeficientes de difusão $d_{r,n}$; d) Desvios padrão “angulares” relativos aos $(d_{\theta,n})_j$.

Apresenta-se, em seguida, a análise dos resultados obtidos para as otimizações para a banda de frequências de oitava centrada em $f = 1000 \text{ Hz}$.

De modo a facilitar a comparação das formas dos difusores otimizados para 5 ângulos de incidência com os difusores otimizados para incidência normal, a Figura 6.134 apresenta novamente as curvas RBF desses difusores.

Pela observação das Figuras 6.135 e 6.136, pode-se verificar que os difusores otimizados para a média dos 5 ângulos de incidência (5θ) são, de facto, mais eficientes do que os difusores otimizados para incidência normal ($\theta=0^\circ$) na banda de frequências de otimização ($f = 1000 \text{ Hz}$), pois têm um coeficiente de difusão aleatório mais elevado. Contudo, são menos eficientes se se considerar apenas a incidência normal.

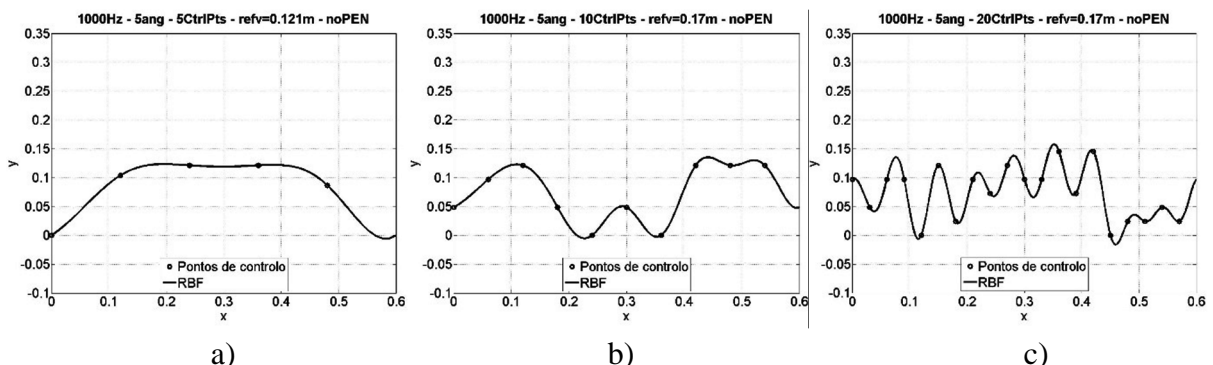


Figura 6.132 – Formas geométricas (RBF) dos difusores resultantes da otimização para 5 ângulos (sem a penalização do desvio padrão) para a $f = 1000 \text{ Hz}$. a) 5 *CtrlPts* e $refv = 0.121m$; b) 10 *CtrlPts* e $refv = 0.17m$; c) 20 *CtrlPts* e $refv = 0.17m$.

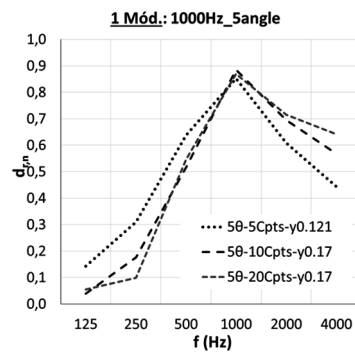


Figura 6.133 – Comparação dos coeficientes de difusão para incidência aleatória normalizados dos difusores apresentados na figura anterior.

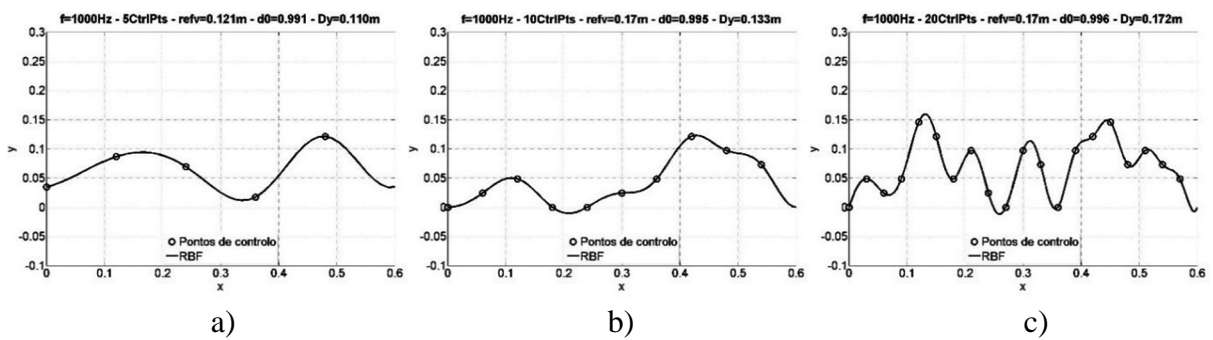


Figura 6.134 – Formas geométricas (RBF) dos difusores otimizados para $f = 1000 \text{ Hz}$ e para incidência normal. a) 5 *CtrlPts* e $refv = 0.121m$ (ilustrada na Figura 6.44a); b) 10 *CtrlPts* e $refv = 0.17m$ (ilustrada na Figura 6.45a); c) 20 *CtrlPts* e $refv = 0.17m$ (ilustrada na Figura 6.46a).

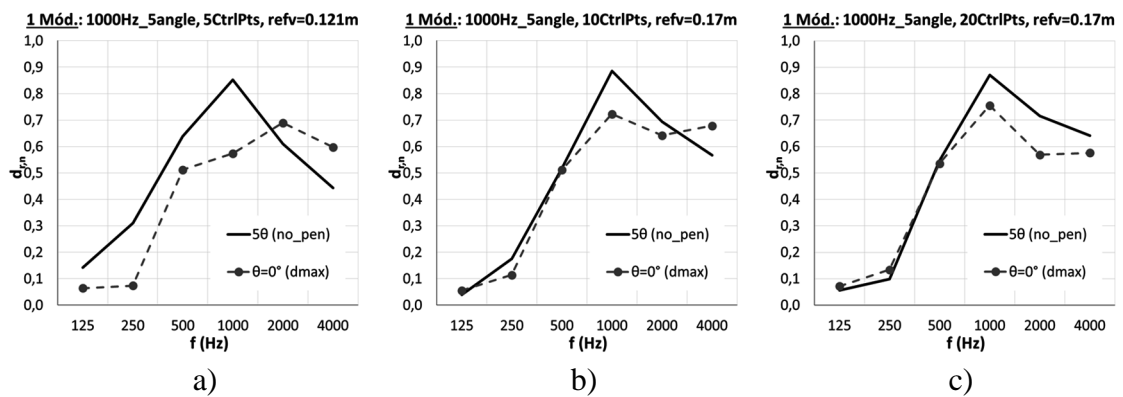


Figura 6.135 – Comparação dos coeficientes de difusão para incidência aleatória normalizados, $d_{r,n}$, dos difusores apresentados na Figura 6.132 (otimizados para 5 ângulos) com os difusores apresentados na Figura 6.134 (otimizados para $\theta=0^\circ$). a) 5 *CtrlPts* e $refv = 0.121m$; b) 10 *CtrlPts* e $refv = 0.17m$; c) 20 *CtrlPts* e $refv = 0.17m$.

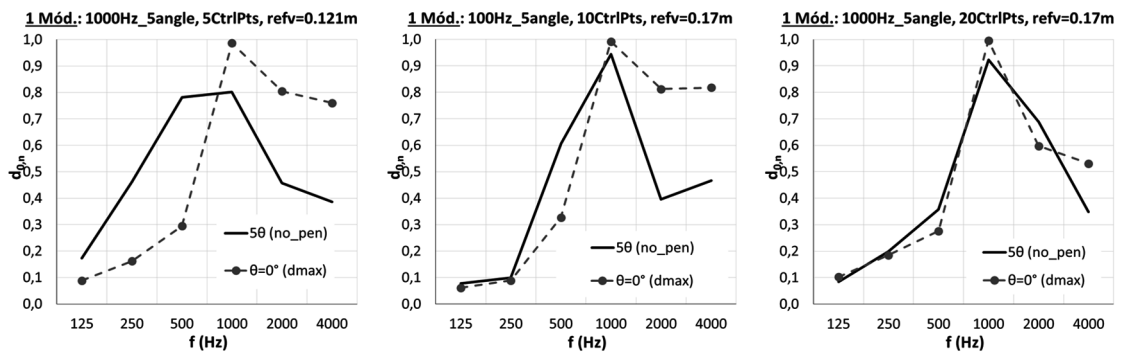
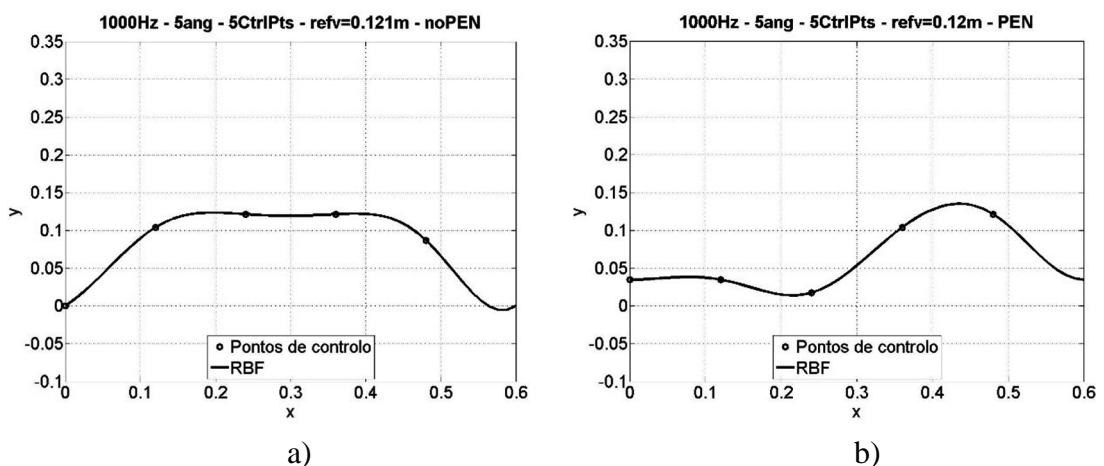


Figura 6.136 – Comparação dos coeficientes de difusão normalizados, para incidência normal, $d_{0,n}$, dos difusores apresentados na Figura 6.132 (otimizados para 5 ângulos) com os difusores apresentados na Figura 6.134 (otimizados para $\theta=0^\circ$). a) 5 *CtrlPts* e $refv = 0.121m$; b) 10 *CtrlPts* e $refv = 0.17m$; c) 20 *CtrlPts* e $refv = 0.17m$.

Também para esta banda de frequências de otimização ($f = 1000$ Hz), se avaliam as consequências de maximizar o coeficiente de difusão aleatório corrigido pelo desvio padrão ponderado (calculado através da Equação 6.5). Para tal, implementou-se esta função de mérito no algoritmo de otimização e realizaram-se 2 exemplos para 5 e 10 pontos de controlo, respectivamente, para valores de $refv = 0.121m$ e $refv = 0.17m$. As Figuras 6.137 e 6.138 apresentam a forma dos dois difusores “corrigidos”, os seus desempenhos e os desvios padrão dos 5 valores dos coeficientes de difusão direcionais $(d_{\theta,n})_j$ no cálculo do respectivo coeficiente de difusão aleatório $d_{r,n}$ para cada uma das bandas de frequência de oitava.



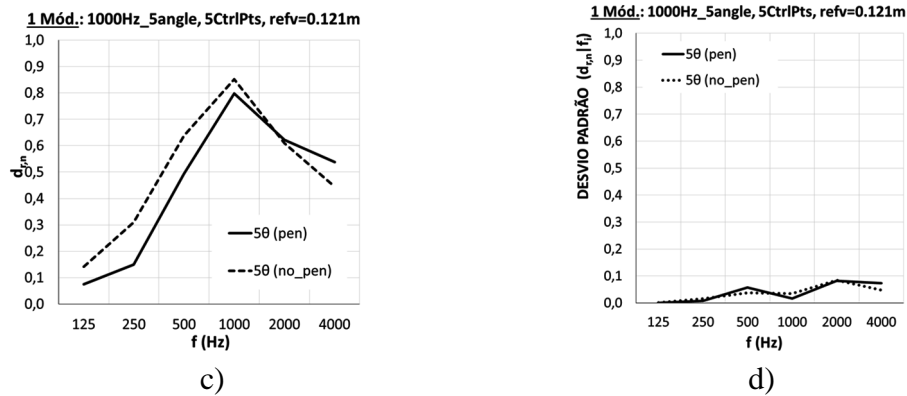


Figura 6.137 – Comparação do desempenho do difusor otimizado com coeficiente de difusão aleatório normalizado corrigido pelo desvio padrão (“*pen*”) com o caso não corrigido, (“*no_pen*”), para $f = 1000 \text{ Hz}$ e $refv = 0.121m$. a) RBF do difusor não “corrigido” (ilustrada na Figura 6.132a); b) RBF do difusor “corrigido”; c) Coeficientes de difusão $d_{r,n}$; d) Desvios padrão “angulares” relativos aos $(d_{\theta,n})_j$.

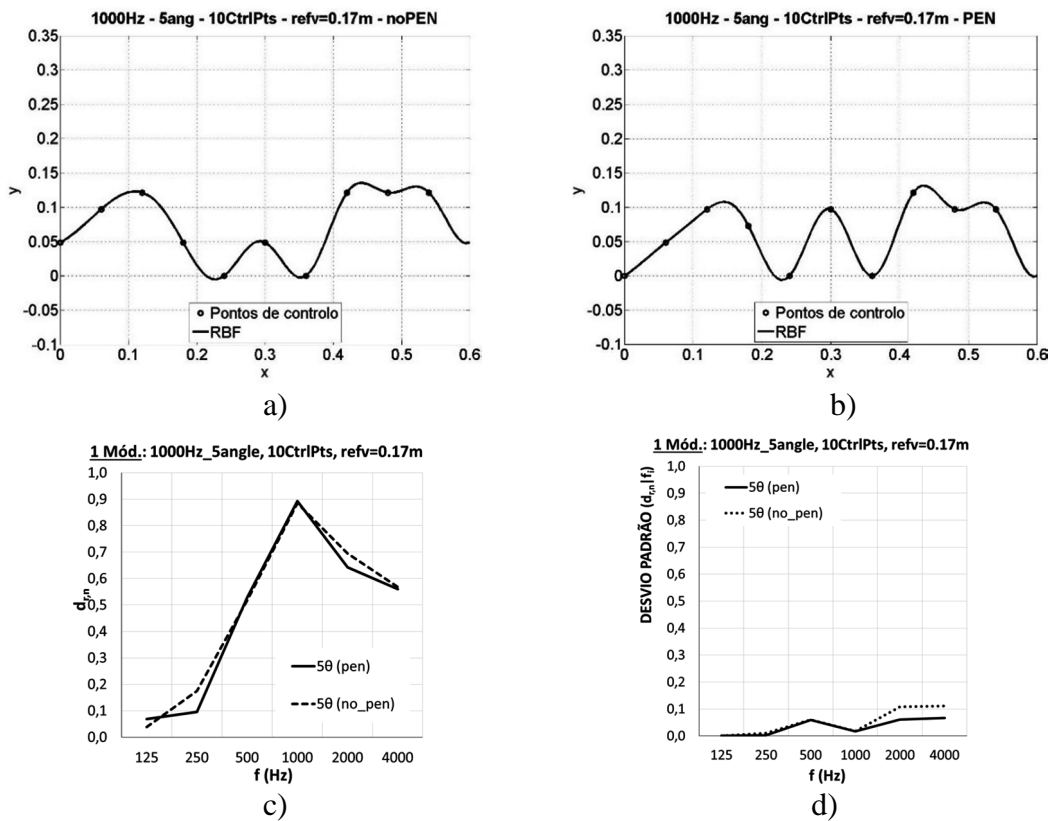


Figura 6.138 – Comparação do desempenho do difusor otimizado com coeficiente de difusão aleatório normalizado corrigido pelo desvio padrão (“*pen*”) com o caso não corrigido, (“*no_pen*”), para $f = 1000 \text{ Hz}$ e $refv = 0.17m$. a) RBF do difusor não “corrigido” (ilustrada na Figura 6.132b); b) RBF do difusor “corrigido”; c) Coeficientes de difusão $d_{r,n}$; d) Desvios padrão “angulares” relativos aos $(d_{\theta,n})_j$.

No caso apresentado na Figura 6.137, a optimização para o coeficiente de difusão aleatório “corrigido” alterou substancialmente a forma do difusor. Esta alteração não permitiu melhorar o coeficiente de difusão aleatório normalizado na banda de frequências em análise mas diminuiu o desvio padrão, uniformizando mais o comportamento do difusor para diferentes ângulos de incidência – faz-se notar que este é o objectivo da correcção introduzida ao coeficiente de difusão aleatório.

Para o caso apresentado na Figura 6.138, a alteração da forma não foi tão drástica e isso reflecte-se no desempenho do difusor: a redução do desvio padrão é praticamente nula e, conseqüentemente, o coeficiente de difusão aleatório tem sensivelmente o mesmo valor que o caso “não corrigido”.

Finalmente, apresentam-se de seguida os exemplos para a banda de frequências centrada em $f = 2000 \text{ Hz}$.

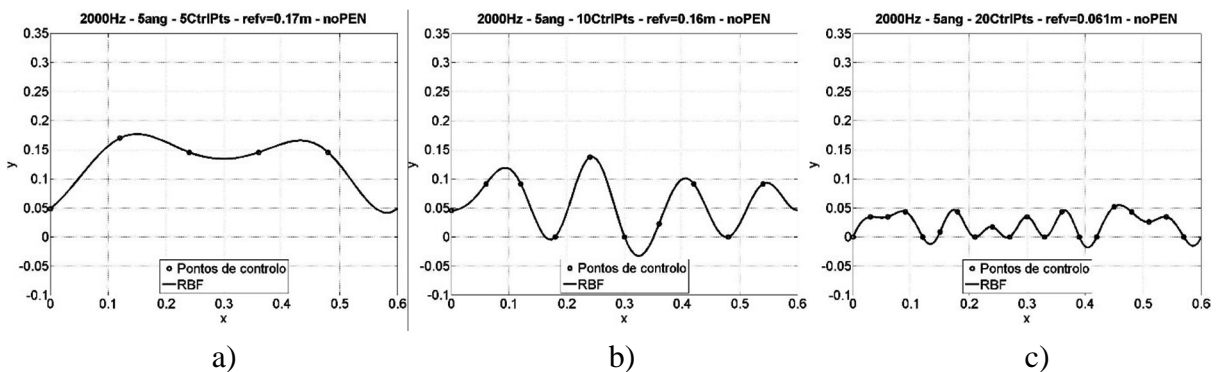


Figura 6.139 – Formas geométricas (RBF) dos difusores resultantes da optimização para 5 ângulos (sem a penalização do desvio padrão) para a $f = 2000 \text{ Hz}$. a) 5 *CtrlPts* e $refv = 0.17\text{m}$; b) 10 *CtrlPts* e $refv = 0.16\text{m}$; c) 20 *CtrlPts* e $refv = 0.061\text{m}$.

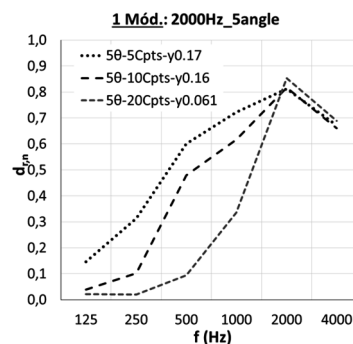


Figura 6.140 – Comparação dos coeficientes de difusão para incidência aleatória normalizados dos difusores apresentados na figura anterior.

Pode-se observar, na Figura 6.140, que a espessura do difusor tem influência no desempenho do mesmo nas frequências abaixo da frequência de optimização ($f = 2000 \text{ Hz}$), embora nesta

banda os coeficiente, de difusão aleatórios normalizados dos três difusores sejam praticamente idênticos.

De modo a se poder comparar as formas dos difusores otimizados para 5 ângulos de incidência com os difusores otimizados para incidência normal, a figura abaixo apresenta novamente as curvas RBF dos respectivos difusores. As Figuras 6.142 e 6.143 apresentam as comparações dos desempenhos dos difusores obtidos pelas duas abordagens de otimização.

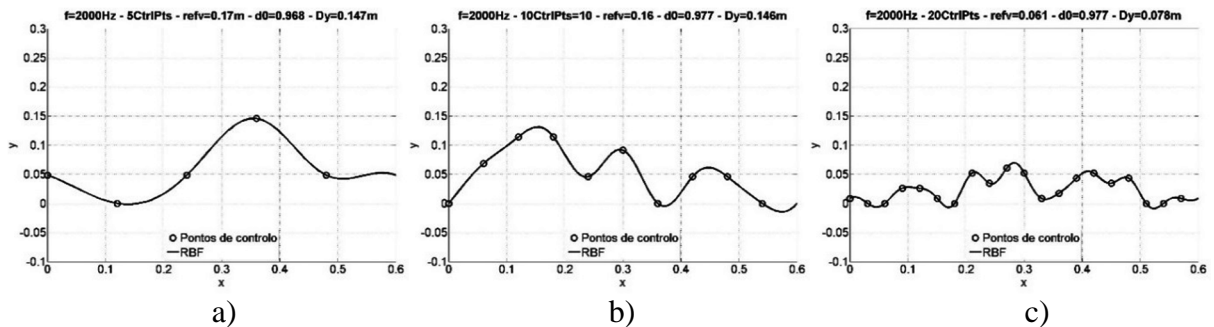


Figura 6.141 – Formas geométricas (RBF) dos difusores otimizados para $f = 2000 \text{ Hz}$ e para incidência normal. a) 5 *CtrlPts* e $refv = 0.17m$ (Figura 6.47^a); b) 10 *CtrlPts* e $refv = 0.16m$ (Figura 6.48^a); c) 20 *CtrlPts* e $refv = 0.061m$ (Figura 6.49^a).

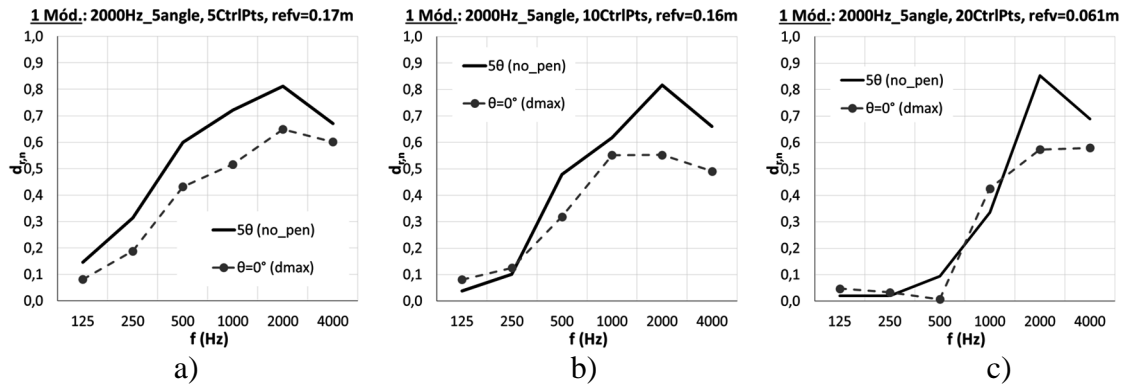


Figura 6.142 – Comparação dos coeficientes de difusão para incidência aleatória normalizados, $d_{r,n}$, dos difusores apresentados na Figura 6.139 (otimizados para 5 ângulos) com os difusores apresentados na Figura 6.141 (otimizados para $\theta=0^\circ$). a) 5 *CtrlPts* e $refv = 0.17m$; b) 10 *CtrlPts* e $refv = 0.16m$; c) 20 *CtrlPts* e $refv = 0.061m$.

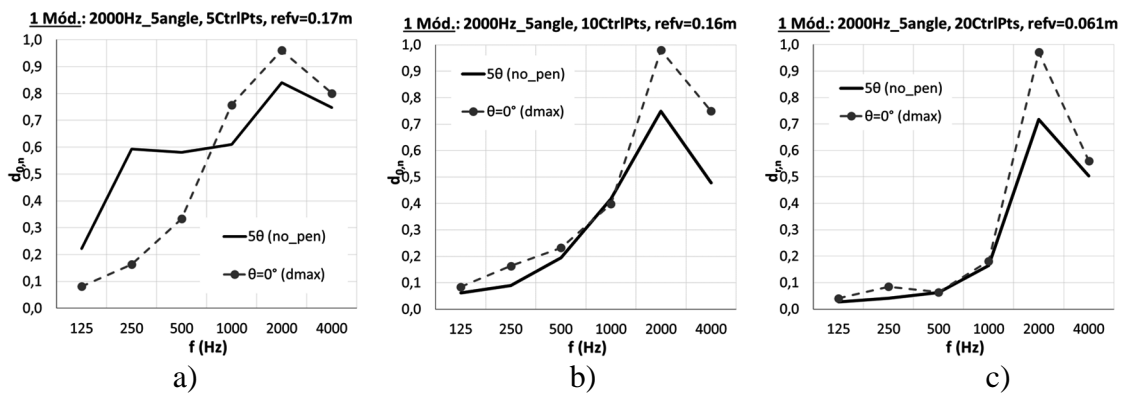


Figura 6.143 – Comparação dos coeficientes de difusão normalizados para incidência normal, $d_{0,n}$, dos difusores apresentados na Figura 6.139 (otimizados para 5 ângulos) com os difusores apresentados na Figura 6.141 (otimizados para $\theta=0^\circ$). a) 5 *CtrlPts* e *refv* = 0.17m; b) 10 *CtrlPts* e *refv* = 0.16m; c) 20 *CtrlPts* e *refv* = 0.061m.

Para esta banda de frequência de otimização ($f = 2000 \text{ Hz}$), também se procedeu à otimização tendo em vista à maximização do coeficiente de difusão aleatório corrigido pelo desvio padrão conforme expresso pela Equação 6.7. Uma vez mais, foram escolhidos os casos com 5 e 10 pontos de controlo e para os mesmos *refv*'s dos casos não “corrigidos” e apresentados na Figura 6.139. Os resultados obtidos dessas otimizações são apresentados nas figuras seguintes.

Para o caso de 5 pontos de controlo e *refv* = 0.17m apresentado na Figura 6.144, pode-se observar que, embora a forma seja sensivelmente a mesma, a espessura do difusor diminuiu. O coeficiente de difusão aleatório diminuiu ligeiramente mas não houve, como nos exemplos anteriores, uma redução do valor do desvio padrão (manteve-se sensivelmente o mesmo). Digase que, de todos os exemplos apresentados, este foi o único que não foi totalmente bem-sucedido, pois, embora não se tenha reduzido o desvio padrão, o difusor obtido é, no entanto, bastante “bom”.

Desta forma, à medida que se aumenta a complexidade do problema a otimizar, dever-se-á não só aumentar o número de otimizações (“runs”) mas também repensar como corrigir o coeficiente de difusão aleatório normalizado de modo a traduzir melhor o factor de mérito que traduza a difusão mais uniforme com a posição da fonte.

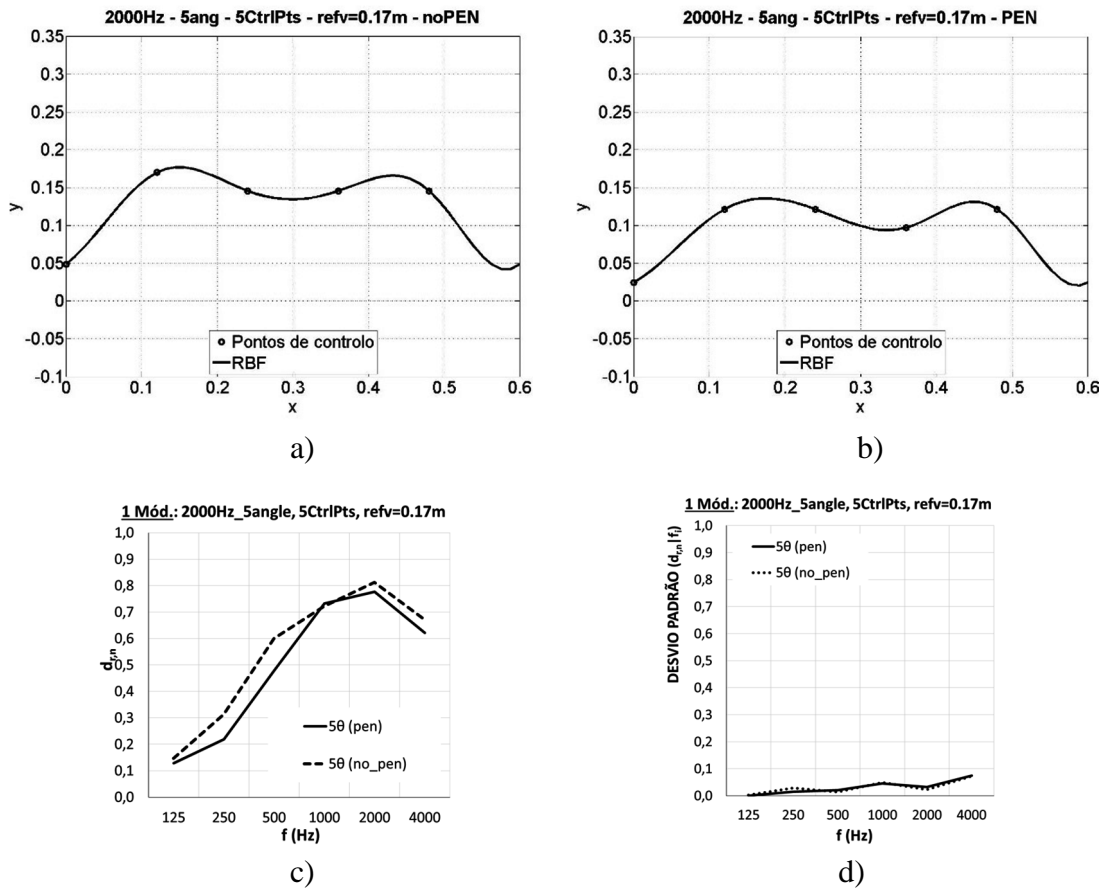
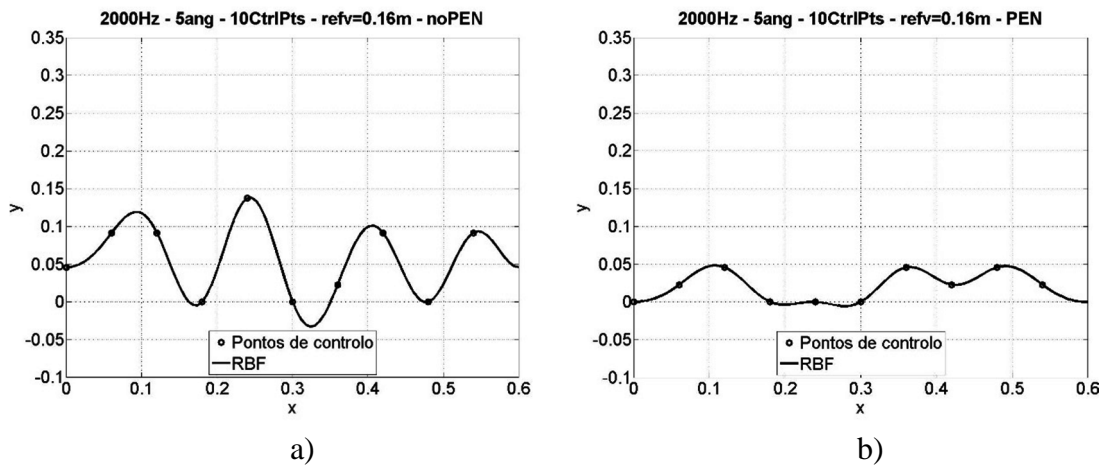


Figura 6.144 – Comparação do desempenho do difusor otimizado para o coeficiente de difusão aleatório normalizado corrigido pelo desvio padrão (“*pen*”) com o caso não corrigido, (“*no_pen*”), para $f = 2000 \text{ Hz}$ e $refv = 0.17m$. a) RBF do difusor não “corrigido” (ilustrada na Figura 6.139a); b) RBF do difusor “corrigido”; c) Coeficientes de difusão $d_{r,n}$; d) Desvios padrão “angulares” relativos aos $(d_{\theta,n})_j$.



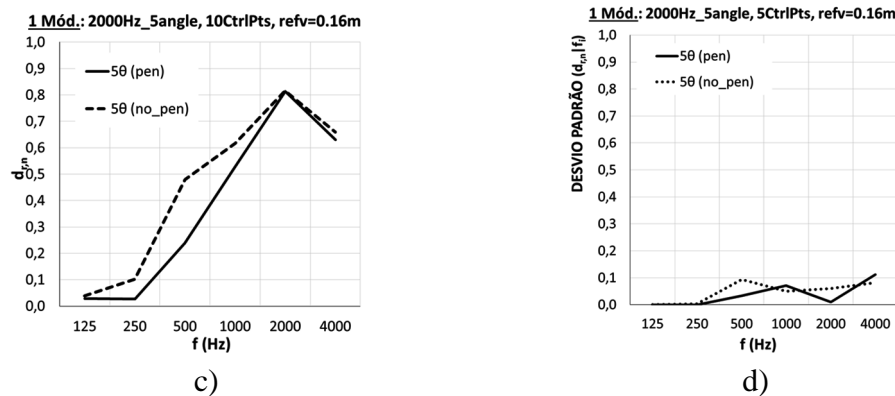


Figura 6.145 – Comparação do desempenho do difusor optimizado para o coeficiente de difusão aleatório normalizado corrigido pelo desvio padrão (“*pen*”) com o caso não corrigido, (“*no_pen*”), para $f = 2000 \text{ Hz}$ e $refv = 0.16m$. a) RBF do difusor não “corrigido” (ilustrada na Figura 6.139b); b) RBF do difusor “corrigido”; c) Coeficientes de difusão $d_{r,n}$; d) Desvios padrão “angulares” relativos aos $(d_{\theta,n})_j$.

6.8. OPTIMIZAÇÃO PARA 5 ÂNGULOS DE INCIDÊNCIA E PARA 9 BANDAS DE FREQUÊNCIAS DE 1/3 OITAVA, $\bar{d}_{r,n}$

Nas secções anteriores já se apresentaram exemplos de difusores que, para incidência normal, foram optimizados para uma banda de frequências de oitava e para 9 bandas de 1/3 de oitava. Posteriormente, foram apresentados exemplos de difusores que, para uma única banda de frequências de oitava, estavam optimizados de modo a terem o coeficiente de difusão para incidência aleatória (definido na Norma ISO 17497-2: 2012 [39]) como uma média ponderada das incidências, 0° , $\pm 30^\circ$ e $\pm 60^\circ$, com os pesos de, respectivamente, “1”, “3” e “3”) maximizado.

Nesta secção apresentar-se-ão exemplos de difusores cuja média dos coeficientes de difusão para incidência aleatória de 9 bandas de frequências de 1/3 de oitava estará maximizado. Assim, o factor de mérito será calculado da seguinte forma:

Calcula-se, para cada banda i de 1/3 de oitava, o coeficiente de difusão para incidência aleatória (por economia linguística passará a denominar-se por “coeficiente de difusão aleatório”):

$$(d_{r,n})_i = \frac{\sum_{j=1}^m |w_j \cdot (d_{\theta,n})_{j,i}|}{\sum_{j=1}^m |w_j|} \quad (6.8)$$

onde m é o número de posições da fonte sonora ($m = 5$), $(d_{\theta,n})_{j,i}$ é, para a banda de frequências i , o coeficiente de difusão direcional normalizado para as incidências $\theta_j = \{-60^\circ; -30^\circ; 0^\circ; +30^\circ; +60^\circ\}$ e cujos pesos w_j são $w_j = \{3; 3; 1; 3; 3\}$.

Determina-se o respectivo desvio padrão ponderado normalizado, para a banda de frequências i , conforme definido pela Equação 6.5. Este parâmetro será apresentado nas figuras seguintes, juntamente com o coeficiente de difusão aleatório, de modo a ilustrar, de uma forma genérica, qual o comportamento do difusor com a posição da fonte.

De modo a procurar soluções com difusão com resposta mais uniforme relativamente à localização da fonte sonora, utilizou-se, para cada banda de frequência i , o coeficiente de difusão aleatório corrigido, dado por:

$$(d_{r,n}^*)_i = (d_{r,n})_i - (\text{Desvio Padrão})_i \quad (6.9)$$

De seguida, calcula-se, para as 9 bandas de frequências de 1/3 de oitava, a média dos coeficientes de difusão aleatórios corrigidos. Esta média poderá ser a média “simples” aritmética, se todas as bandas de frequência tiverem a mesma importância (e, portanto, o mesmo peso), ou poderá ser uma média ponderada, se se pretender dar mais relevância a determinadas bandas de frequência (e, portanto, terão pesos w_i diferentes):

$$\bar{d}_{r,n} = \frac{\sum_{i=1}^m |w_i \cdot (d_{r,n}^*)_i|}{\sum_{i=1}^m |w_i|} \quad (6.10)$$

O factor de mérito que o algoritmo de optimização irá maximizar é o coeficiente de difusão aleatório médio corrigido:

$$\bar{d}_{r,n}^* = (d_{r,n})_i - \text{Desvio Padrão}_f \quad (6.11)$$

onde o Desvio Padrão_f é dado, à semelhança da Equação 6.5, por:

$$\text{Desvio Padrão}_f = \sqrt{\frac{k}{k-1} \cdot \frac{\sum_{i=1}^k w_i \cdot (\bar{d}_{r,n} - (d_{r,n}^*)_i)^2}{\sum_{i=1}^k w_i}} \quad (6.12)$$

onde k é o número de bandas de frequência em consideração (nos exemplos a apresentar será $k = 9$).

Uma vez mais, as optimizações foram executadas como anteriormente: a população era constituída por 22 indivíduos (inicialmente eram superfícies planas) e a optimização parava quando se atingisse a 100ª iteração. Para cada caso fizeram-se 7 “runs” e os resultados que se apresentam correspondem aos que tiveram o maior resultado para parâmetro a maximizar (coeficiente de difusão aleatório médio normalizado corrigido, $\bar{d}_{r,n}^*$, dado pela Equação 6.11).

As 9 bandas de frequências escolhidas para optimização são as mesmas utilizadas anteriormente, $\{400Hz; 500Hz; 630Hz; 800Hz; 1000Hz; 1250Hz; 1600Hz; 2000Hz; 2500Hz\}$.

Para optimizações para as baixas frequências utilizam-se pesos diferentes para o cálculo: $w = \{5; 4; 3; 1; 1; 1; 1; 1; 1\}$. Para optimizações para as mais altas frequências utilizam os seguintes pesos: $w = \{1; 1; 1; 1; 1; 1; 3; 4; 5\}$.

Os Quadros 6.9 e 6.10 resumem os resultados obtidos para alguns dos exemplos. As figuras subsequentes apresentam, de forma gráfica, os resultados quantificados nos dois quadros apresentados.

Quadro 6.9 – Quadro comparativo dos resultados obtidos do $\bar{d}_{r,n}$ para os casos de optimizações da média do coeficiente de difusão para incidência aleatória normalizado em 9 bandas de frequência de 1/3 oitava com os casos obtidos de optimizações do coeficiente de difusão para incidência normal.

CtrlPts	refv (m)	Δy (m)	Optmz.	$\bar{d}_{r,n}$ por banda de freq. 1/3 oitava									Média	DesvPad rel. (%)
				400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500		
5	0.121	0,129	9f-5ang	0,436	0,668	0,713	0,702	0,707	0,752	0,706	0,647	0,645	0,664	13,9
		0,129	9f- $\Theta=0^\circ$	0,457	0,683	0,676	0,580	0,601	0,660	0,636	0,565	0,530	0,599	12,4
	0.17	0,128	9f-5ang	0,529	0,720	0,794	0,817	0,758	0,791	0,693	0,618	0,582	0,700	14,7
		0,157	9f- $\Theta=0^\circ$	0,644	0,707	0,603	0,564	0,622	0,646	0,615	0,598	0,602	0,622	6,5
	0.27	0,120	9f-5ang	0,712	0,845	0,882	0,827	0,728	0,749	0,659	0,591	0,603	0,733	14,2
		0,204	9f- $\Theta=0^\circ$	0,736	0,508	0,459	0,510	0,501	0,523	0,502	0,528	0,514	0,531	14,9
10	0.121	0,085	9f-5ang	0,333	0,480	0,567	0,599	0,614	0,648	0,675	0,713	0,660	0,588	19,9
		0,148	9f- $\Theta=0^\circ$	0,318	0,456	0,431	0,560	0,639	0,372	0,328	0,423	0,458	0,443	23,6
	0.17	0,089	9f-5ang	0,307	0,447	0,568	0,625	0,627	0,722	0,692	0,708	0,756	0,606	24,1
		0,171	9f- $\Theta=0^\circ$	0,557	0,671	0,629	0,602	0,672	0,565	0,283	0,357	0,428	0,529	26,6
	0.27	0,282	9f-5ang	0,504	0,484	0,532	0,600	0,595	0,574	0,523	0,580	0,583	0,553	7,7
		0,375	9f- $\Theta=0^\circ$	0,471	0,413	0,307	0,302	0,332	0,377	0,434	0,495	0,616	0,416	24,5

Quadro 6.10 – Quadro comparativo dos desvios padrão de $d_{r,n}$ obtidos para os casos de optimizações da média do coeficiente de difusão para incidência aleatória normalizado para 9 bandas de frequência de 1/3 oitava com os casos obtidos de optimizações do coeficiente de difusão para incidência normal.

CtrlPts	refv (m)	Δy (m)	Optmz.	Desvio Padrão de $d_{r,n}$ por banda de freq. 1/3 oitava									Média	
				400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500		
5	0.121	0,129	9f-5ang	0,065	0,065	0,065	0,028	0,042	0,074	0,083	0,054	0,072	0,061	
		0,129	9f- $\theta=0^\circ$	0,056	0,071	0,100	0,041	0,042	0,076	0,075	0,115	0,134	0,079	
	0.17	0,128	9f-5ang	0,072	0,058	0,033	0,029	0,059	0,056	0,091	0,054	0,037	0,054	
		0,157	9f- $\theta=0^\circ$	0,069	0,064	0,053	0,037	0,085	0,122	0,137	0,119	0,109	0,088	
	0.27	0,120	9f-5ang	0,056	0,059	0,004	0,066	0,129	0,076	0,061	0,036	0,058	0,060	
		0,204	9f- $\theta=0^\circ$	0,077	0,042	0,021	0,061	0,078	0,104	0,109	0,112	0,112	0,080	
	10	0.121	0,085	9f-5ang	0,084	0,063	0,101	0,043	0,058	0,069	0,054	0,041	0,038	0,061
			0,148	9f- $\theta=0^\circ$	0,059	0,103	0,099	0,105	0,054	0,132	0,096	0,154	0,096	0,100
0.17		0,089	9f-5ang	0,075	0,061	0,130	0,040	0,034	0,095	0,049	0,038	0,031	0,061	
		0,171	9f- $\theta=0^\circ$	0,059	0,089	0,098	0,067	0,042	0,077	0,116	0,083	0,108	0,082	
0.27		0,282	9f-5ang	0,059	0,061	0,058	0,097	0,067	0,024	0,051	0,091	0,100	0,068	
		0,375	9f- $\theta=0^\circ$	0,055	0,101	0,114	0,099	0,121	0,162	0,144	0,102	0,086	0,109	

As primeiras conclusões que se podem retirar da observação dos dois quadros acima apresentados é que os difusores optimizados para 9 bandas de frequência têm um coeficiente de difusão para incidência aleatória médio superior aos difusores optimizados apenas para incidência normal, e que os valores desse coeficiente, em cada banda de 1/3, são em média, mais constantes (menor desvio padrão médio). Isto quer dizer que estes difusores não só são mais eficientes a dispersar o som em todas as direcções, como também são mais uniformes na forma como dispersam o som com a posição da fonte (em média, já que pontualmente há algumas situações em que isso não acontece).

De seguida, apresentam-se então os difusores optimizados agrupados por *refv* e para a situação em que todas as bandas de frequência têm o mesmo peso (“ALLf”).

Para se estabelecerem comparações com outros difusores definidos anteriormente, também se apresenta novamente a sua configuração geométrica (RBF) e incluem-se nos gráficos os seus resultados. As comparações serão feitas tendo em atenção os respectivos *refv*, pois, como já se observou, têm importância no desempenho dos difusores, em particular nas mais baixas frequências.

Estas comparações serão feitas, maioritariamente, com os difusores desenvolvidos na secção anterior, isto é, difusores optimizados para 9 bandas de frequências de 1/3 de oitava mas apenas para incidência normal (“9f- $\theta=0^\circ$ ”). Também se irá incluir os resultados obtidos para difusores optimizados apenas para uma banda de frequências de oitava mas para as 5 incidências de fonte sonora (“1f-5 θ ”).

As figuras seguintes apresentam os difusores optimizados “9f-5 θ ” definidos por 5 pontos de controlo.

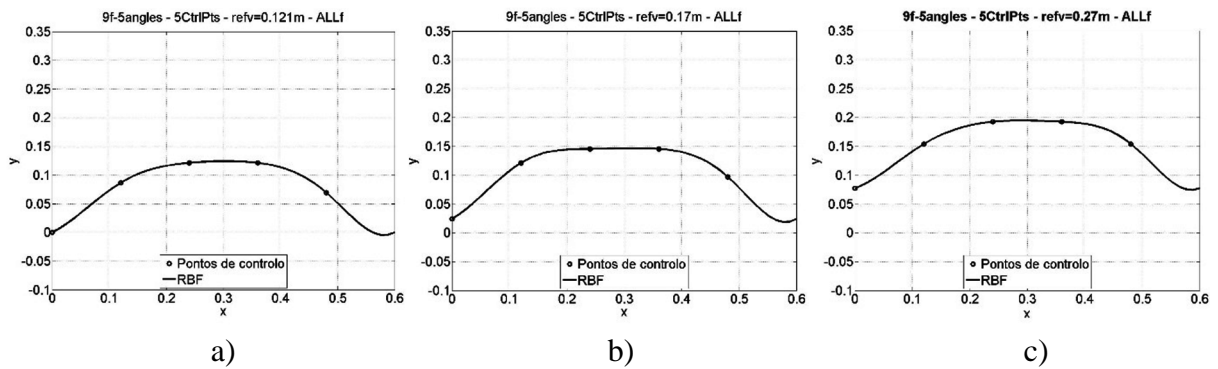


Figura 6.146 – Formas geométricas (RBF) dos difusores otimizados definidos por 5 pontos de controlo para 9 bandas de frequências e para 5 ângulos de incidência (9f-50): a) $refv = 0.121m$; b) $refv = 0.17m$; c) $refv = 0.27m$.

Como se pode observar na figura acima, os difusores resultantes da otimização têm uma forma muito semelhante, variando essencialmente a sua espessura (nem é o desnível das curvas, i.e., a diferença entre a altura máxima e mínima da RBF, pois são muito semelhantes, respectivamente, $\Delta y = 0.129m$, $\Delta y = 0.128m$ e $\Delta y = 0.120m$).

A Figura 6.147 ilustra a forma geométrica dos difusores definidos por 10 pontos de controlo. Também para este caso as curvas para $refv = 0.121m$ e $refv = 0.17m$ são muito semelhantes.

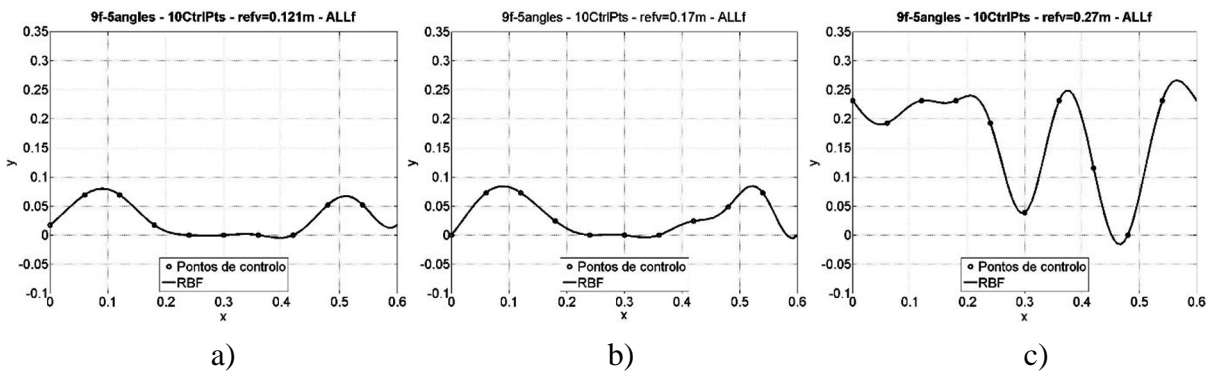


Figura 6.147 – Formas geométricas (RBF) dos difusores otimizados definidos por 10 pontos de controlo para 9 bandas de frequências e para 5 ângulos de incidência (9f-50) e: a) $refv = 0.121m$; b) $refv = 0.17m$; c) $refv = 0.27m$.

A Figura 6.148 apresenta os coeficientes de difusão aleatórios para os difusores mostrados nas duas figuras anterior, agrupados por $refv$, bem como o respectivo desvio padrão associado a cada valor de $(d_{r,n})_i$.

Para facilitar a comparação das formas dos difusores resultantes dos diferentes tipos de otimização, a Figura 6.149 apresenta novamente os difusores otimizados para incidência normal (9f- $\theta=0^\circ$) e para incidência aleatória (9f-50), definidos por 5 pontos de controlo.

Os desempenhos destes difusores é apresentado na Figura 6.150.

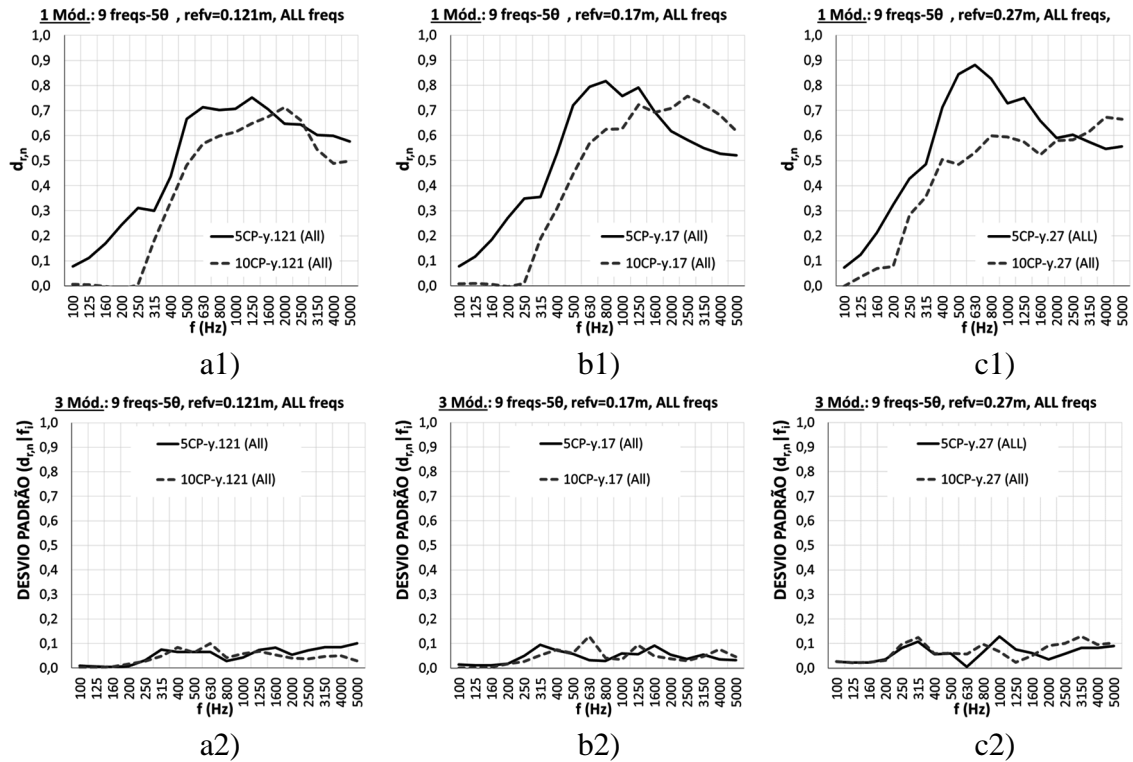
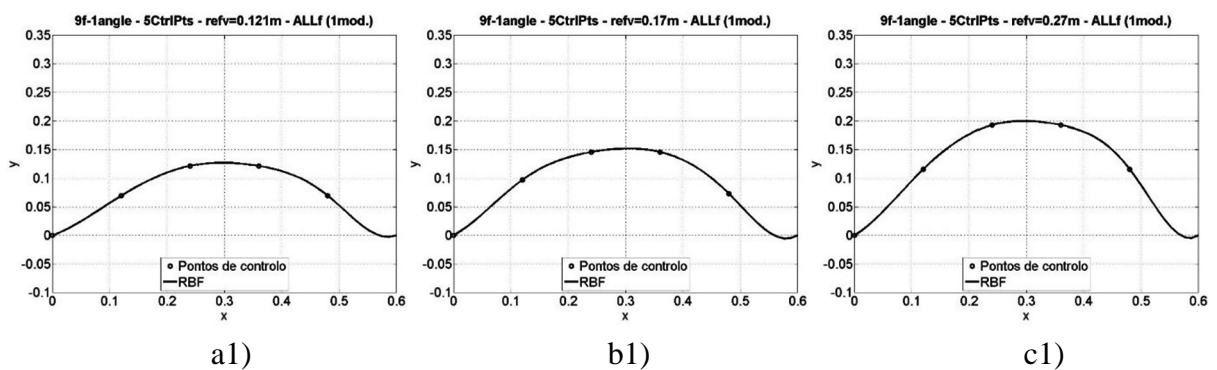


Figura 6.148 – #1) Coeficientes de difusão aleatório normalizados, $d_{r,n}$, de 1 módulo dos difusores apresentados nas Figura 6.146 6.147. #2) Desvio padrão dos coeficientes de difusão direcionais. a#) $refv = 0.121m$; b#) $refv = 0.17m$; c#) $refv = 0.27m$.



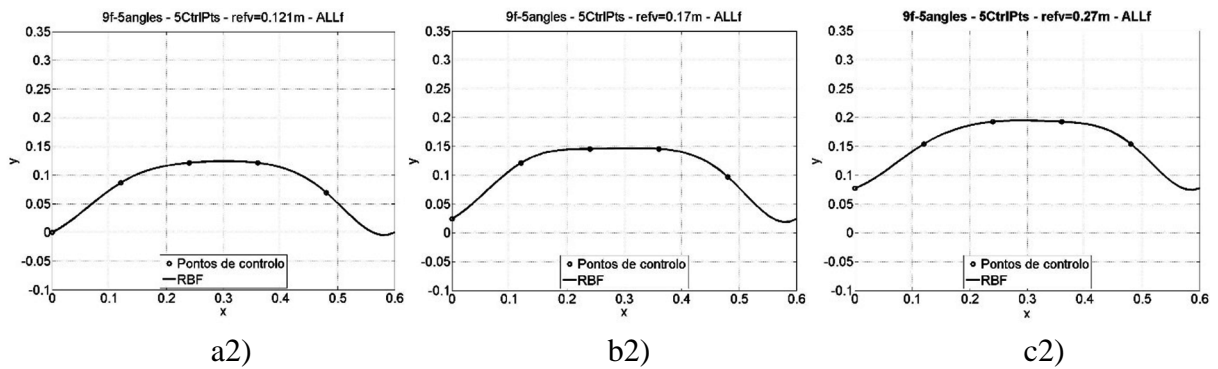


Figura 6.149 – Formas geométricas (RBF) dos difusores otimizados definidos por 5 pontos de controlo para 9 bandas de frequências: #1) para incidência normal (9f- $\theta=0^\circ$); #2) para 5 ângulos de incidência (9f-5 θ). a#) $refv = 0.121m$; b#) $refv = 0.17m$; c#) $refv = 0.27m$.

Como se pode observar, os difusores têm formas muito semelhantes, contudo os desempenhos apresentam algumas diferenças – ver Figura 6.150.

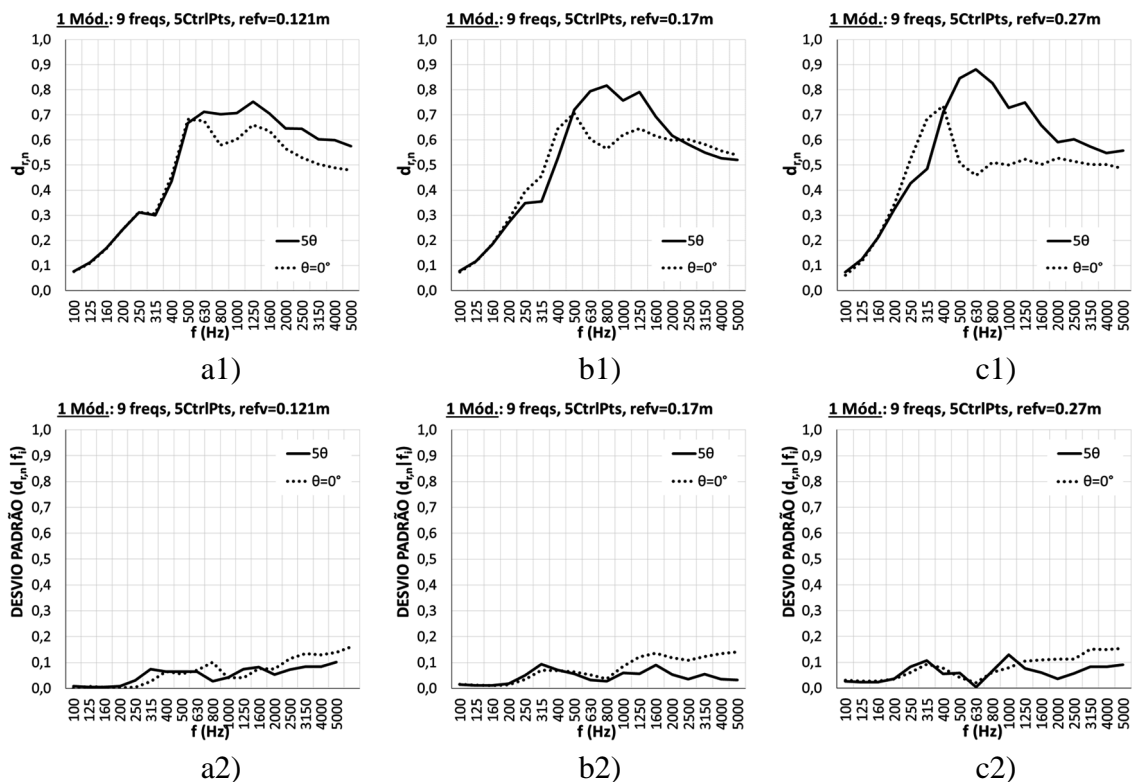


Figura 6.150 – #1) Coeficientes de difusão aleatórios normalizados, $d_{r,n}$, de 1 módulo dos difusores apresentados na Figura 6.149. #2) Desvio padrão dos coeficientes de difusão direcionais. a#) $refv = 0.121m$; b#) $refv = 0.17m$; c#) $refv = 0.27m$.

Genericamente, os difusores otimizados nesta secção (9f-5 θ) têm não só maiores coeficientes de difusão aleatórios como os respectivos desvios padrão são menores, em particular nas bandas de frequências mais altas.

Para facilitar a comparação das formas dos difusores resultantes dos diferentes tipos de otimização, a Figura 6.151 apresenta novamente os difusores otimizados para incidência normal ($9f-\theta=0^\circ$) e para incidência aleatória ($9f-5\theta$), definidos por 10 pontos de controlo. Os coeficientes de difusão aleatórios e desvios padrão destes difusores é apresentado na Figura 6.152.

Comparando as formas dos difusores definidos por 10 pontos de controlo da Figura 6.151 ($9f-5\theta$ vs. $9f-\theta=0^\circ$), verifica-se que são substancialmente diferentes. De certa forma era expectável pois com o aumento do número de pontos de controlo há um aumento do universo possível de soluções.

Analisando os resultados obtidos por ambas optimizações, apresentados na Figura 6.152, pode-se constatar que os difusores obtidos nesta secção ($9f-5\theta$) são bastante mais eficientes nas médias e altas frequências e os difusores optimizados para incidência normal são mais eficientes nas mais baixas frequências.

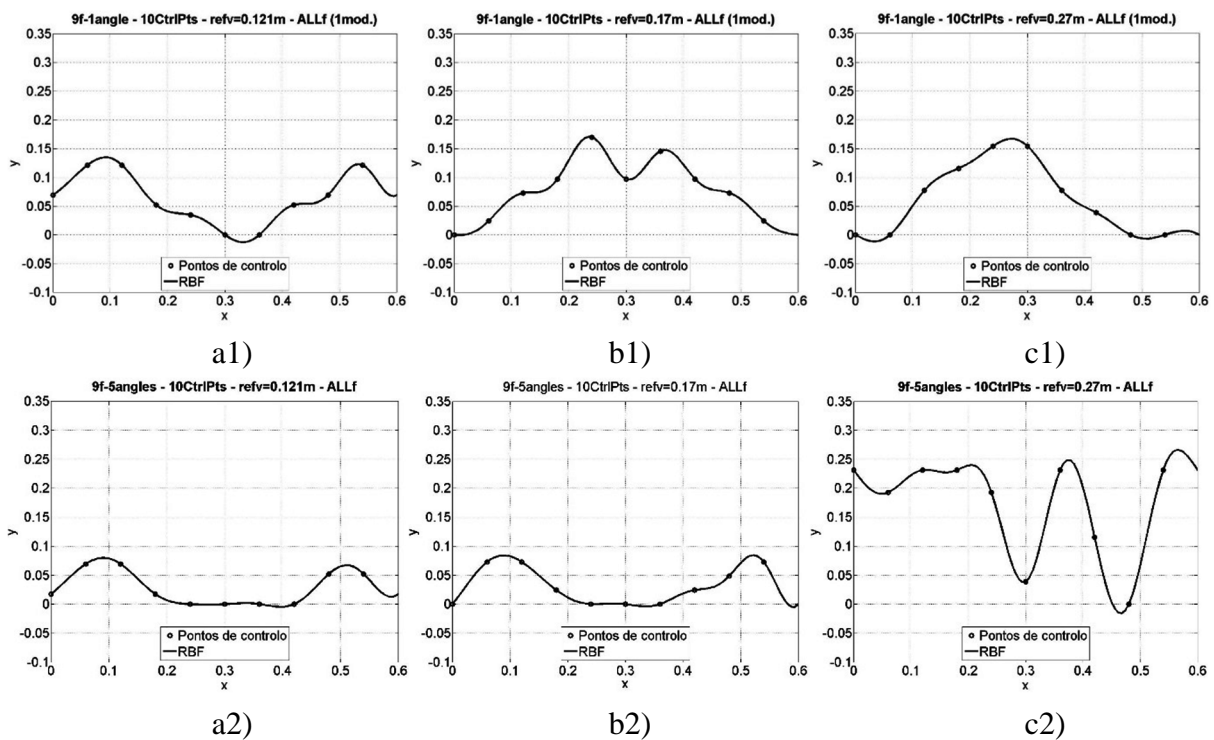


Figura 6.151 – Formas geométricas (RBF) dos difusores otimizados definidos por 10 pontos de controlo para 9 bandas de frequências: #1) para incidência normal ($9f-\theta=0^\circ$); #2) para 5 ângulos de incidência ($9f-5\theta$). a#) $refv = 0.121m$; b#) $refv = 0.17m$; c#) $refv = 0.27m$.

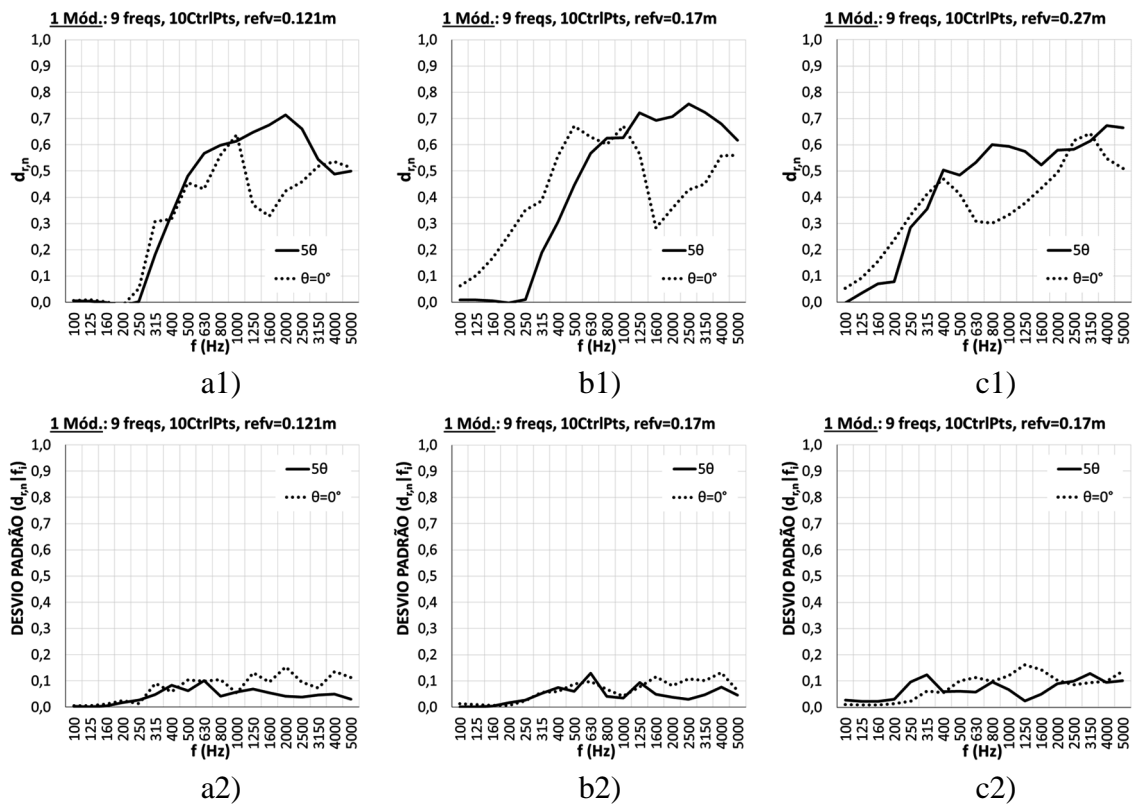


Figura 6.152 – #1) Coeficientes de difusão aleatório normalizados, $d_{r,n}$, de 1 módulo dos difusores apresentados na Figura 6.151. #2) Desvio padrão dos coeficientes de difusão direcionais. a#) $refv = 0.121m$; b#) $refv = 0.17m$; c#) $refv = 0.27m$.

De seguida, comparam-se os difusores otimizados nesta secção (9 bandas de frequências e 5 ângulos de incidência, 9f-5θ) com os difusores otimizados apenas para uma banda de frequência mas também para 5 ângulos de incidência (1f-5θ). Os difusores escolhidos são os que têm o mesmo $refv$ (ou muito próximo porque para $f = 500 Hz$, não foi realizada nenhuma otimização com $refv = 0.17m$) em detrimento do número de pontos de controlo. A Figura 6.153 apresenta as RBF destes difusores.

A Figura 6.154 apresenta a comparação entre os difusores da Figura 6.153 (1f-5θ) e o difusor otimizados nesta secção para $refv = 0.17m$ (ilustrado na Figura 6.146 b).

Como se pode observar na Figura 6.154, o difusor otimizado para 9 bandas de frequências e 5 ângulos de incidência representado na Figura 6.154a tem um desempenho superior aos difusores otimizados para as bandas dos 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz (com exceção nas frequências mais altas, mas aqui o desvio padrão é inferior, indicando que, apesar do coeficiente de difusão não ser o mais elevado, a dispersão do som é mais uniforme com o ângulo de incidência).

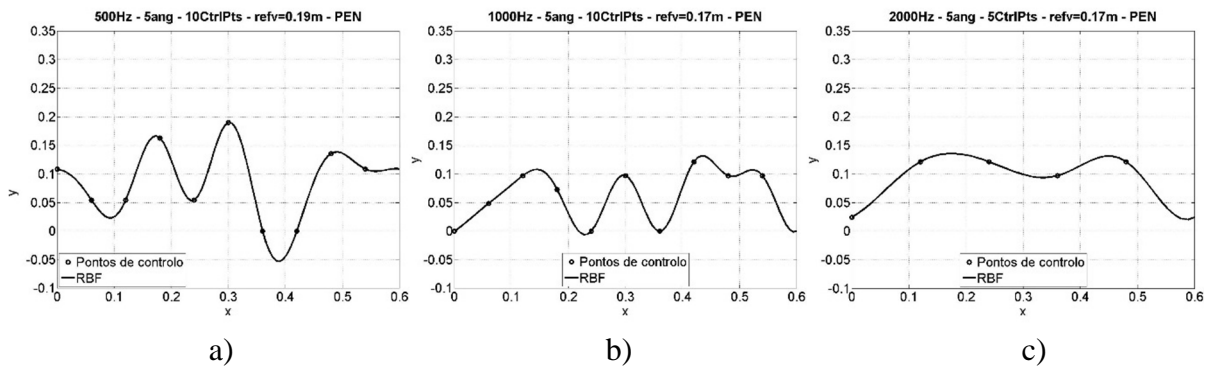


Figura 6.153 – Formas geométricas (RBF) dos difusores otimizados para 1 banda de frequências e para 5 ângulos de incidência (1f-5θ) e: a) $10CtrlPts \wedge refv = 0.19m$; b) $10CtrlPts \wedge refv = 0.17m$; c) $5CtrlPts \wedge refv = 0.17m$.

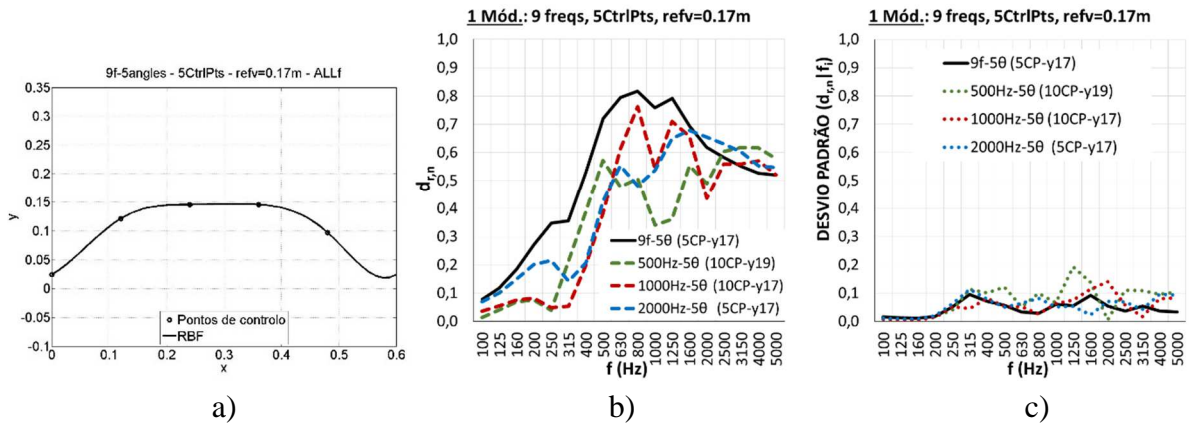


Figura 6.154 – a) Formas geométrica (RBF) do difusor “9f-5θ” desenvolvido nesta secção com $refv = 0.17m$; b) Coeficiente de difusão aleatório normalizado dos difusores “1f-5θ” da Figura 6.153; c) Desvio padrão.

De seguida, apresentam-se exemplos de difusores que foram otimizados de modo a terem um melhor desempenho numa dada gama de frequências sem, contudo, descurem a eficiência nas restantes bandas de frequência. Apresentam-se assim difusores otimizados para terem melhores desempenhos nas bandas de frequência mais baixas (dos 400 Hz aos 630 Hz) e nas mais altas (1600 Hz a 2500 Hz). Primeiro, apresentam-se exemplos de difusores definidos por 5 pontos de controlo (da Figura 6.155 à 6.157) e, de seguida, os difusores definidos por 10 pontos de controlo (da Figura 6.158 à 6.160).

A figura 6.155 mostra um difusor, definido por 5 pontos de controlo e $refv = 0.121m$, otimizado para as bandas de frequências mais altas. Mostra ainda o difusor otimizado para as 9 bandas de frequências. Como se pode observar na referida figura, o difusor otimizado para as altas frequências consegue ter um desempenho ligeiramente superior nas altas frequências e, simultaneamente, ter também um desvio padrão inferior.

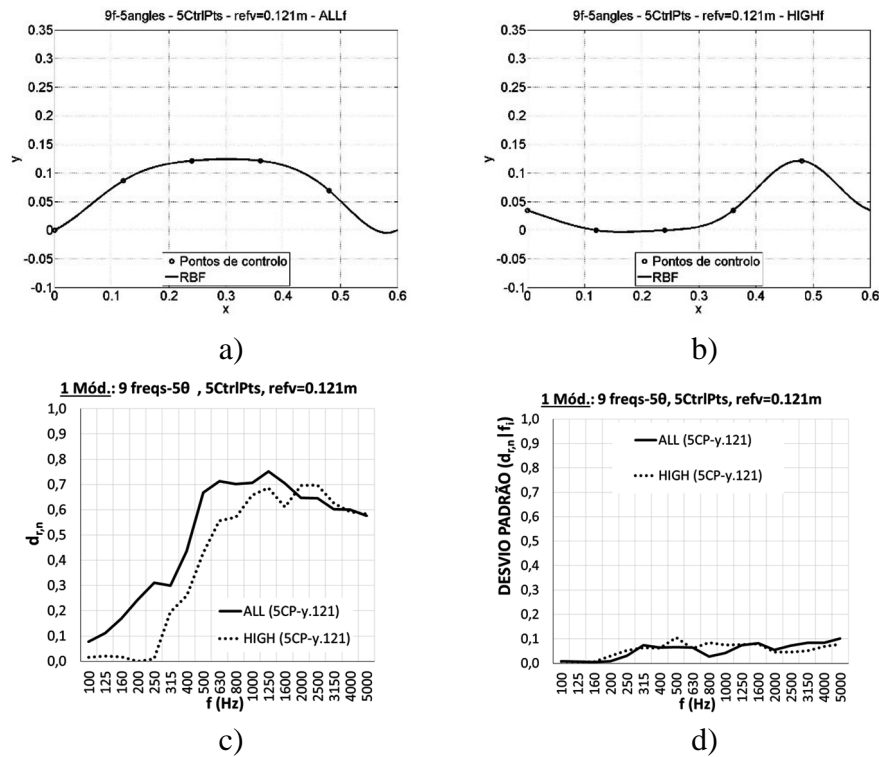
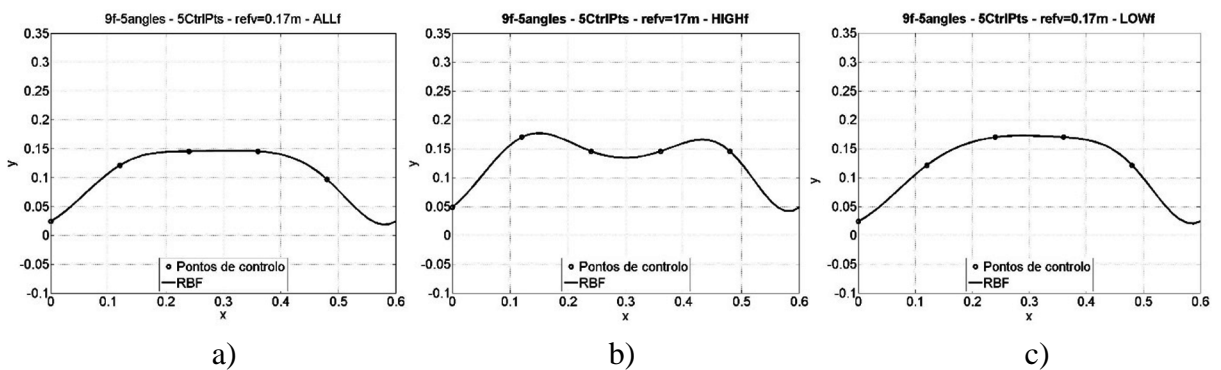


Figura 6.155 – Para $refv = 0.121m$: a) Forma geométrica (RBF) do difusor otimizado para as 9 bandas de frequências (“ALL”) (ilustrado na Figura 6.146a); b) Forma geométrica (RBF) do difusor otimizado para as bandas de frequências mais altas (“HIGH”); c) Coeficiente de difusão aleatório normalizado; d) Desvio padrão.

Observando a figura seguinte, verifica-se que os três difusores cumprem os objectivos da optimização. Contudo, o difusor optimizado para as bandas das mais altas frequência tem um desempenho bastante inferior nas restantes bandas de frequências.



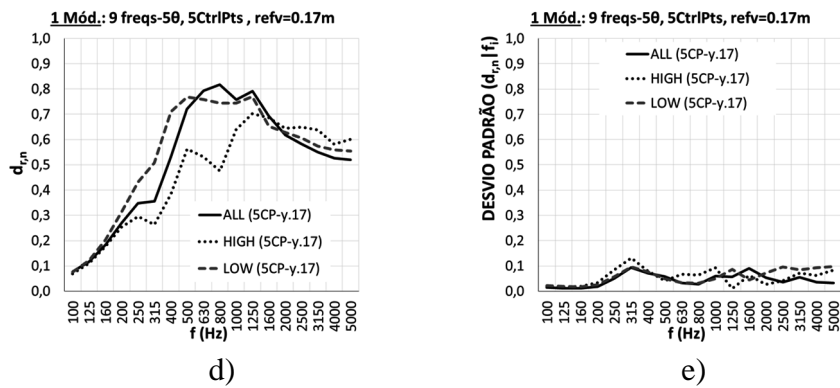


Figura 6.156 – Para $refv = 0.17m$: a) RBF do difusor otimizado para as 9 bandas de frequências (“ALL”) (ilustrada na Figura 6.146b); b) RBF do difusor otimizado para as bandas de frequências mais altas (“HIGH”); c) RBF do difusor otimizado para as bandas de frequências mais baixas (“LOW”); d) Coeficiente de difusão aleatório; e) Desvio padrão.

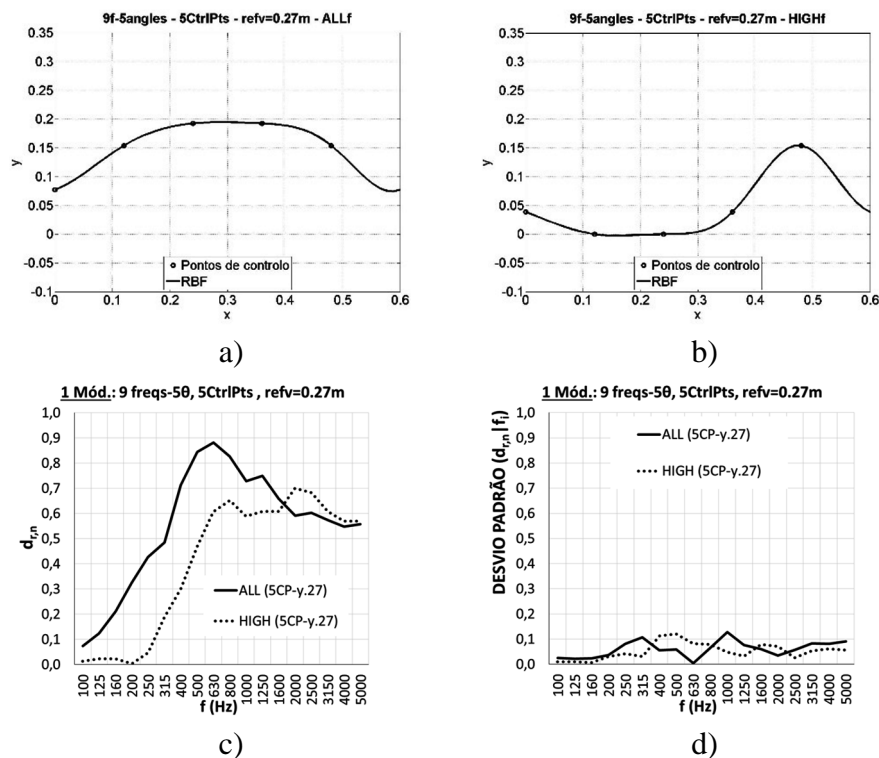


Figura 6.157 – Para $refv = 0.27m$: a) Forma geométrica (RBF) do difusor otimizado para as 9 bandas de frequências (“ALL”) (ilustrada na Figura 6.146c); b) Forma geométrica (RBF) do difusor otimizado para as bandas de frequências mais altas (“HIGH”); c) Coeficiente de difusão aleatório normalizado; d) Desvio padrão.

Observando a figura anterior, verifica-se que, de facto, o difusor otimizado para as bandas de frequências mais altas é mais eficiente, porém o seu desempenho é mais pobre na restante gama de frequências.

De seguida, apresentam-se os exemplos para os difusores definidos por 10 pontos de controlo. Primeiro para $refv = 0.121m$, depois para $refv = 0.17m$ e, finalmente, para $refv = 0.27m$.

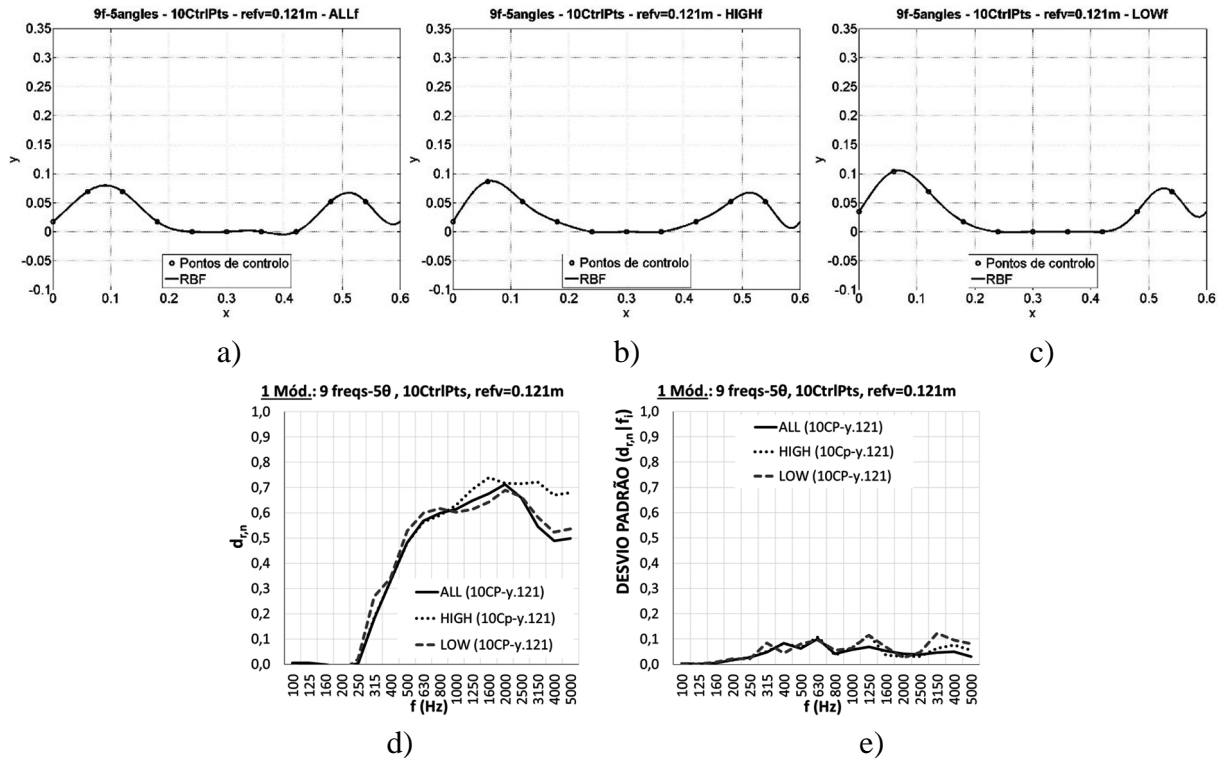


Figura 6.158 – Para $refv = 0.121m$: a) RBF do difusor otimizado para as 9 bandas de frequências (“ALL”) (ilustrada na Figura 6.147a); b) RBF do difusor otimizado para as bandas de frequências mais altas (“HIGH”); c) RBF do difusor otimizado para as bandas de frequências mais baixas (“LOW”); d) Coeficiente de difusão aleatório; e) Desvio padrão.

Como se pode observar na figura acima, as três otimizações conduziram a três difusores muito semelhantes e, como consequência, os seus desempenhos são também muito parecidos. Contudo, o difusor otimizado para as bandas de frequências mais baixas tem ligeiramente mais difusão que os restantes difusores, e o difusor otimizado para as bandas de frequências mais altas também tem melhor desempenho nessa gama de frequências.

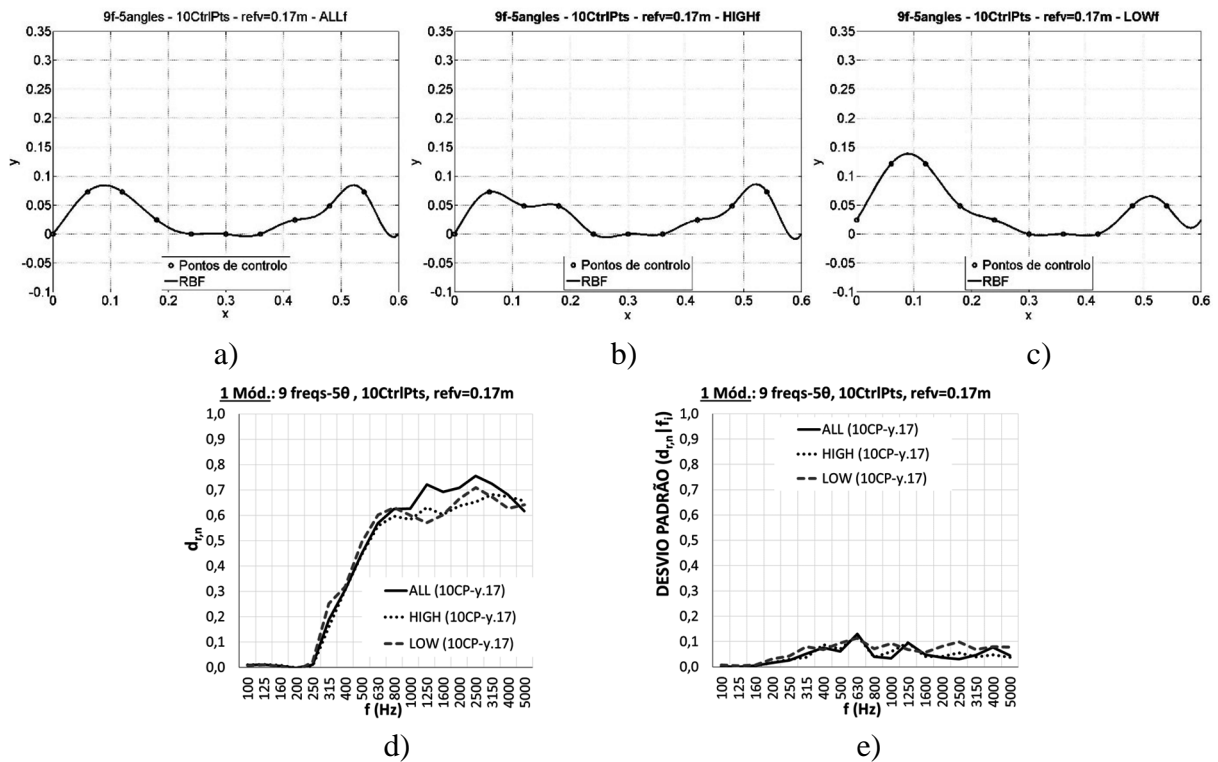
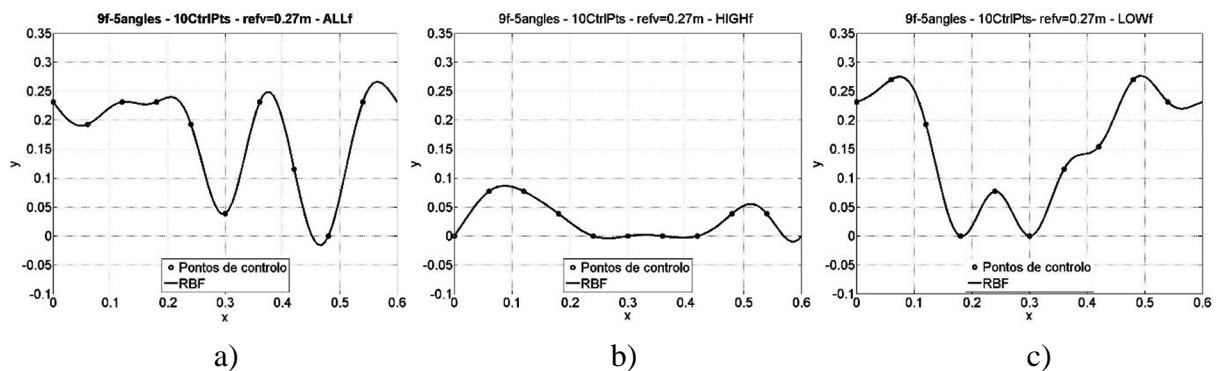


Figura 6.159 – Para $refv = 0.17m$: a) RBF do difusor otimizado para as 9 bandas de frequências (“ALL”) (ilustrada na Figura 6.147b); b) RBF do difusor otimizado para as bandas de frequências mais altas (“HIGH”); c) RBF do difusor otimizado para as bandas de frequências mais baixas (“LOW”); d) Coeficiente de difusão aleatório; e) Desvio padrão.

Como se pode observar na figura anterior, uma vez mais, as três otimizações para 10 pontos de controlo e $refv = 0.17m$ conduziram a três difusores com formas muito semelhantes, apesar se ponderar diferentemente cada uma das bandas de frequência. Pode-se concluir que, para este caso, a otimização para as bandas de frequências mais baixas e para as frequências mais altas não atingiram os objectivos. Uma forma de se contornar estes resultados é alterar as bandas de frequências escolhidas para cada um dos casos, escolhendo aquelas que são mais adequadas a cada caso.



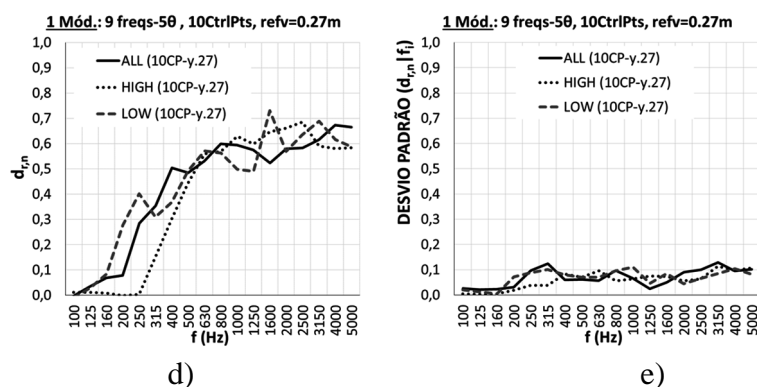


Figura 6.160 – Para $refv = 0.27m$ a) RBF do difusor optimizado para as 9 bandas de frequências (“ALL”) (ilustrada na Figura 6.147c); b) RBF do difusor optimizado para as bandas de frequências mais altas (“HIGH”); c) RBF do difusor optimizado para as bandas de frequências mais baixas (“LOW”); d) Coeficiente de difusão aleatório; e) Desvio padrão.

Observando a figura acima, verifica-se que, desta vez, o algoritmo de optimização conduziu a soluções com formas muito distintas. É de referir que o difusor optimizado para a altas frequências tem uma espessura relativamente pequena (embora o $refv = 0.27m$) e o difusor para as baixas frequências tem uma espessura grande. Contudo, os resultados não são os expectáveis.

Tendo em atenção os casos apresentados nas Figuras 6.146, 6.158 e 6.159, não deixa de ser interessante observar que, para cada caso, se fizeram 7 “runs” de 100 iterações cada e os melhores indivíduos em cada caso, aqueles cuja média nas 9 bandas de frequência do coeficiente de difusão aleatório corrigido é maior, tenderam para formas muito semelhantes. Isso pode querer indiciar que os objectivos requeridos podem não ser fisicamente atingidos.

Para avaliar a influência da penalizações introduzidas aos coeficientes de difusão no algoritmo de optimização, testaram-se dois casos, cujos resultados se apresentam nas Figuras 6.161 ($10CtrlPts \wedge refv = 0.121m$) e 6.162 ($10CtrlPts \wedge refv = 0.17m$).

No primeiro caso (Figura 6.161), a optimização sem a penalização do desvio padrão conduziu a uma solução muito semelhante à optimização com penalização. Na gama de frequências de interesse (dos 400 Hz aos 2500 Hz) o desempenho dos dois difusores é praticamente idêntico, contudo, nas frequências mais elevadas o difusor “sem penalização” é mais eficiente.

No segundo caso (Figura 6.162), o difusor resultante da optimização “sem penalização” é diferente do homólogo obtido com a penalização do desvio padrão. Apesar ter um pico nos 800 Hz, nas restantes bandas de frequência tem um desempenho inferior ao difusor obtido com a correcção do desvio padrão. Refira-se, ainda, que o coeficiente de difusão aleatório normalizado é mais irregular.

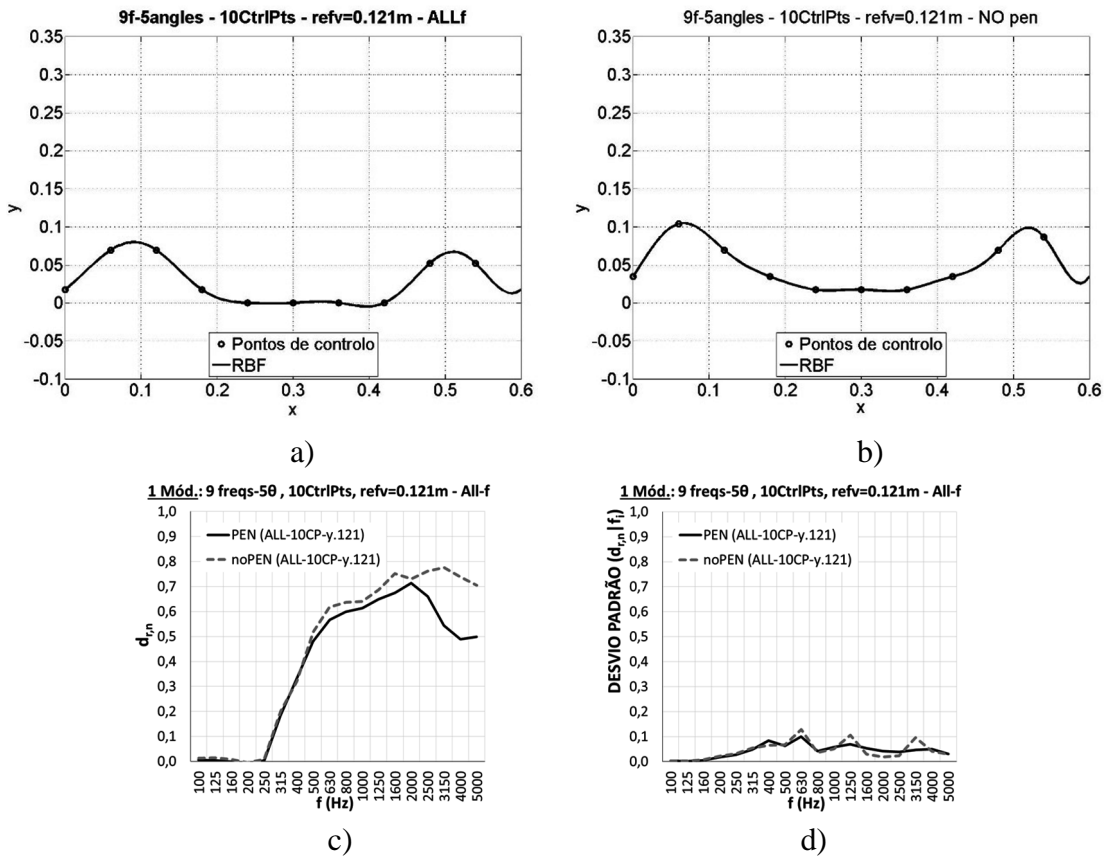
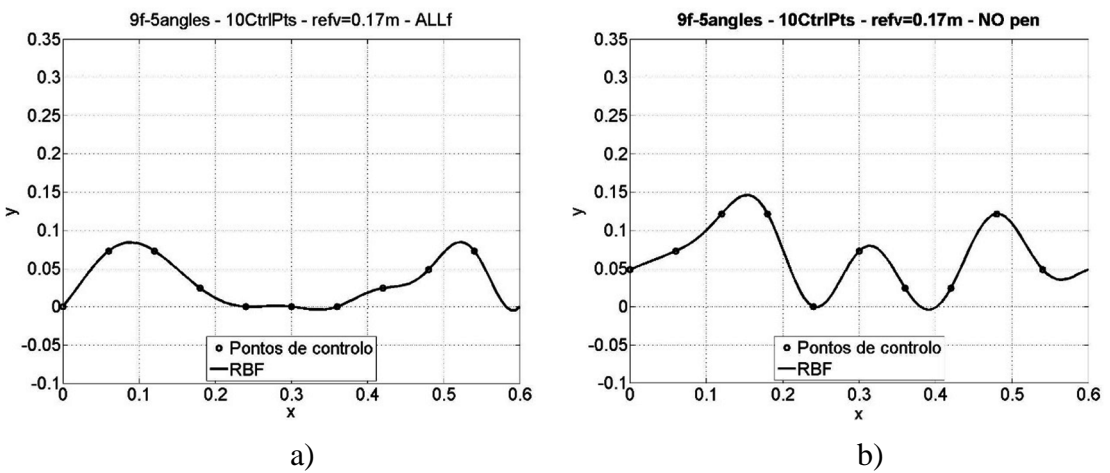


Figura 6.161 – a) RBF do difusor otimizado para as 9 bandas de frequências (“ALL”) (ilustrada na Figura 6.147a); b) RBF do difusor otimizado sem a correção do desvio padrão; c) Coeficiente de difusão aleatório; d) Desvio padrão.



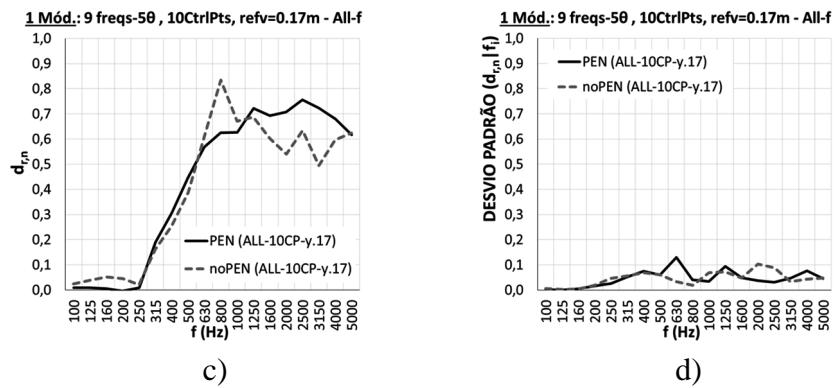
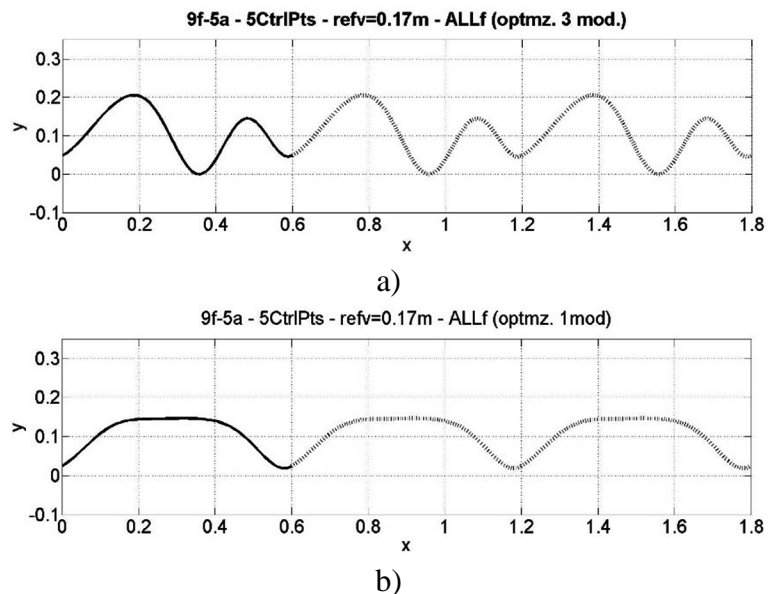


Figura 6.162 – a) RBF do difusor optimizado para as 9 bandas de frequências (“ALL”) (ilustrada na Figura 6.147b); b) RBF do difusor optimizado sem a correcção do desvio padrão; c) Coeficiente de difusão aleatório; d) Desvio padrão.

Para finalizar os casos de estudo da optimização para 9 bandas de frequências de 1/3 de oitava e para 5 ângulos de incidência, apresenta-se um exemplo de optimização para a utilização de 3 módulos idênticos cujos resultados se apresentam na Figura 164. Compara-se o difusor assim obtido com dois difusores definidos pelos mesmos parâmetros deste ($5CtrlPts \wedge refv = 0.17m$), um resultante da optimizações de apenas 1 módulo para 9 bandas de frequências e 5 ângulos de incidência (Figura 6.146b) e, outro, resultante da optimização em 9 bandas de frequências para 3 módulos e para incidência normal (Figura 6.117). Para facilitar a comparação das respectivas formas destes difusores, a Figura 6.163 apresenta conjuntamente a geometria de 3 módulos de cada um deles.



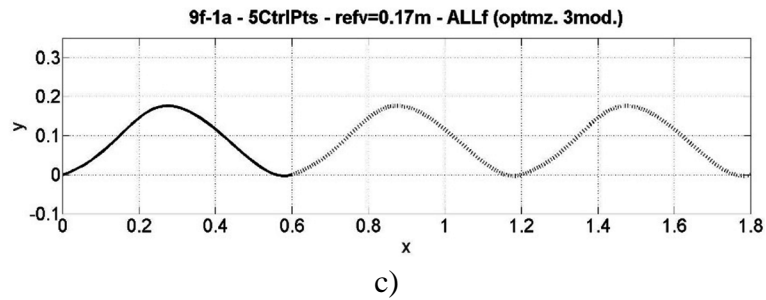


Figura 6.163 –RBF de 3 módulos do: a) Difusor otimizado para 3 módulos (9 bandas de frequências e 5 ângulos de incidência: 9f-5θ-3mod); b) Difusor otimizado para 1 módulo (9 bandas de frequências e 5 ângulos de incidência: 9f-5θ-1mod); c) Difusor otimizado para 3 módulos (1 banda de frequências e 5 ângulos de incidência: 9f-θ^o=0-3mod).

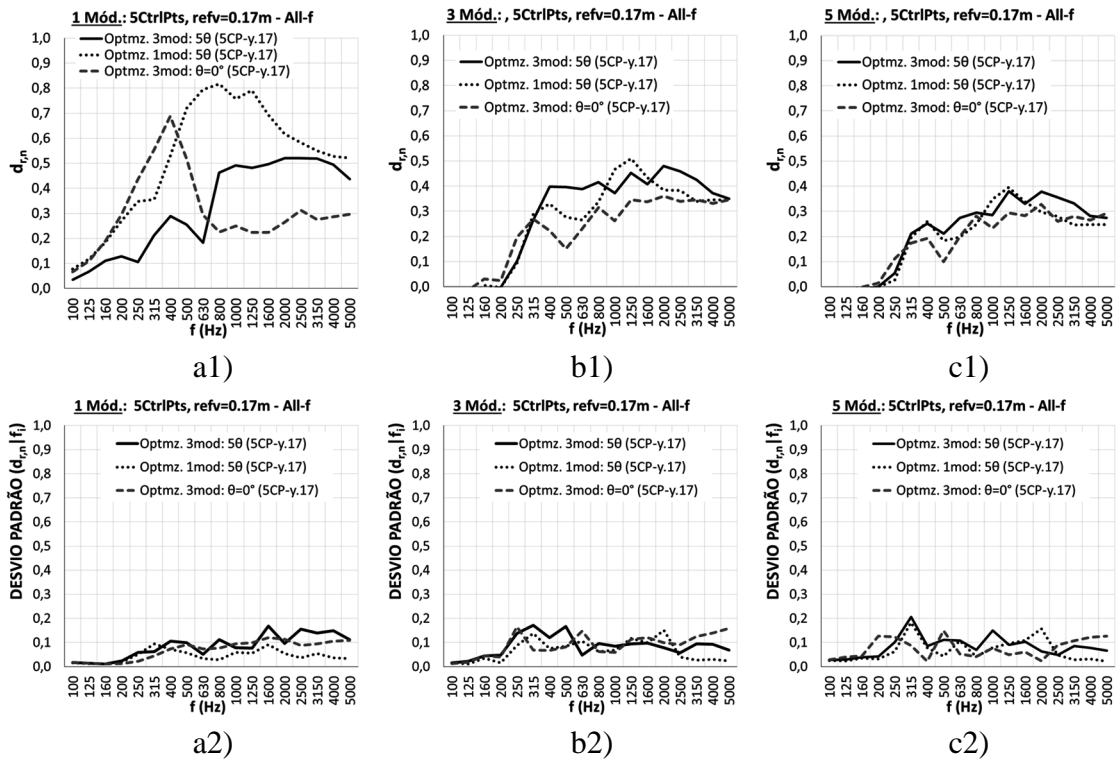


Figura 164 – #1) Coeficientes de difusão aleatório normalizados, $d_{r,n}$, dos difusores da Figura 6.163. #2) Desvio padrão dos coeficientes de difusão direcionais. a#) Avaliação de 1 módulo; b#) Avaliação de 3 módulos; c#) Avaliação de 5 módulos.

Da análise da Figura 6.164 confirma-se que, de uma forma genérica, o difusor obtido através da otimização de 3 módulos para 9 bandas de frequências e 5 ângulos de incidência (Figura 6.163a) é mais eficiente numa utilização de 3 e 5 módulos. Para além de ter valores elevados do coeficiente de difusão aleatório, este é relativamente constante.

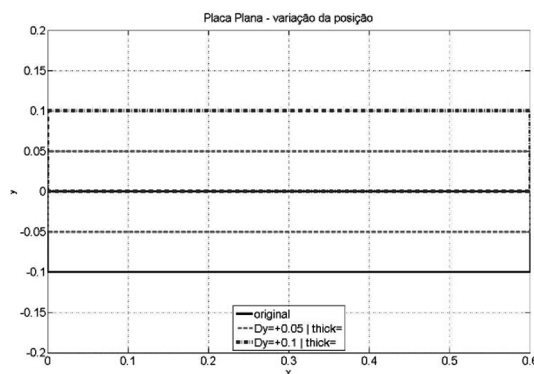
6.9. INFLUÊNCIA DA ESPESSURA E POSIÇÃO DO DIFUSOR

Por definição, os pontos de controlo podem variar, no caso de 3 bits, em 8 patamares, entre 0 e $refv$ (valor positivo definido pelo utilizador). No entanto, a parte posterior do difusor, embora definida pelo utilizador, tem sido fixa em $y = -0.1 m$. O processo de optimização faz evoluir os indivíduos da população inicial (que são superfícies planas, com a face frontal em $y = 0 m$ e uma espessura de $0.1 m$, cuja face posterior dos indivíduos está, como referido acima, em $y = -0.1 m$), alterando a apenas a altura dos pontos de controlo que definem a face frontal do difusor.

Nesta subsecção, pretende-se verificar qual a influência (no coeficiente de difusão) quer da posição da face frontal quer da posição da face posterior (costas do difusor). Assim, fizeram-se dois tipos de análise, um em que o difusor mantém a mesma “espessura” sendo sujeito a um movimento de translação vertical, outro em que apenas a posição da face posterior é translacionada na vertical, variando deste modo a espessura do difusor.

Apresenta-se, abaixo, o estudo para dois casos, o primeiro para uma placa plana, e o segundo para um difusor optimizado para $f = 1000 Hz$, 5 pontos de controlo e $refv = 15cm$, com o constrangimento “compatível” (ilustrado na Figura 6.28b).

O primeiro caso, apresentado na Figura 6.165, uma placa plana de largura de $L = 0.60 m$ e uma espessura de $h = 0.1 m$ é posicionada em três posições distintas, com incrementos de $\Delta y = 0.05 m$ relativamente à posição “original”, de modo que a face frontal fica localiza em $y = 0 m$ (posição “original”), $y = 0.05 m$ e $y = 0.10 m$. Os resultados são apresentados na Figura 6.165.



a)

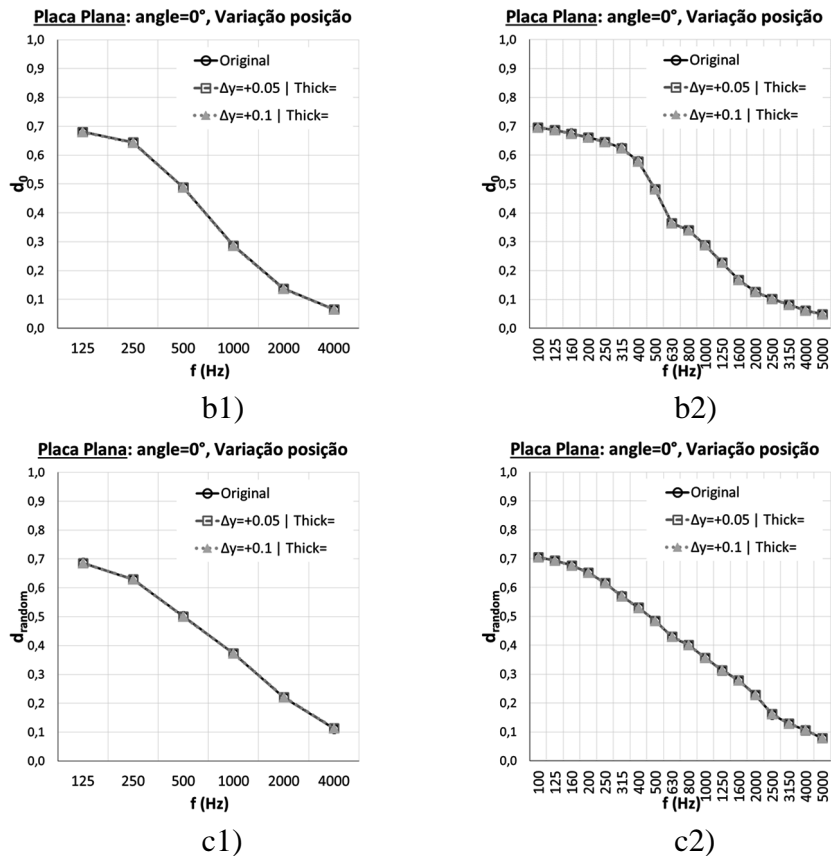
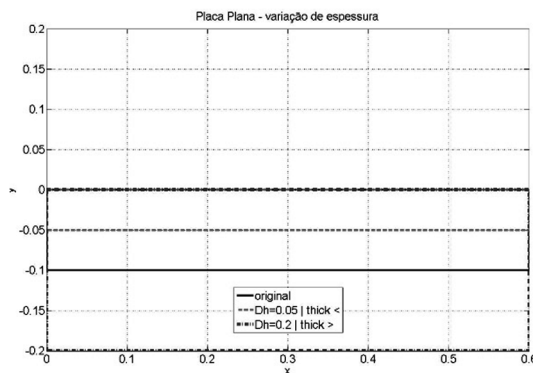


Figura 6.165 – Avaliação da influência da posição da placa plana. a) Posição da placa plana nas 3 análises; b) Coeficiente de difusão para incidência normal em bandas de: b1) oitava; b2) 1/3 oitava; c) Coeficiente de difusão aleatório em bandas de: c1) oitava; c2) 1/3 de oitava.

O segundo caso analisado corresponde a variar a espessura da placa plana, mantendo a face frontal fixa na posição $y = 0 \text{ m}$. Foram analisados os casos em que a espessura é metade da espessura original $\Delta h = 0.05 \text{ m}$, e em que a espessura é o dobro, $\Delta h = 0.2 \text{ m}$. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 6.166.



a)

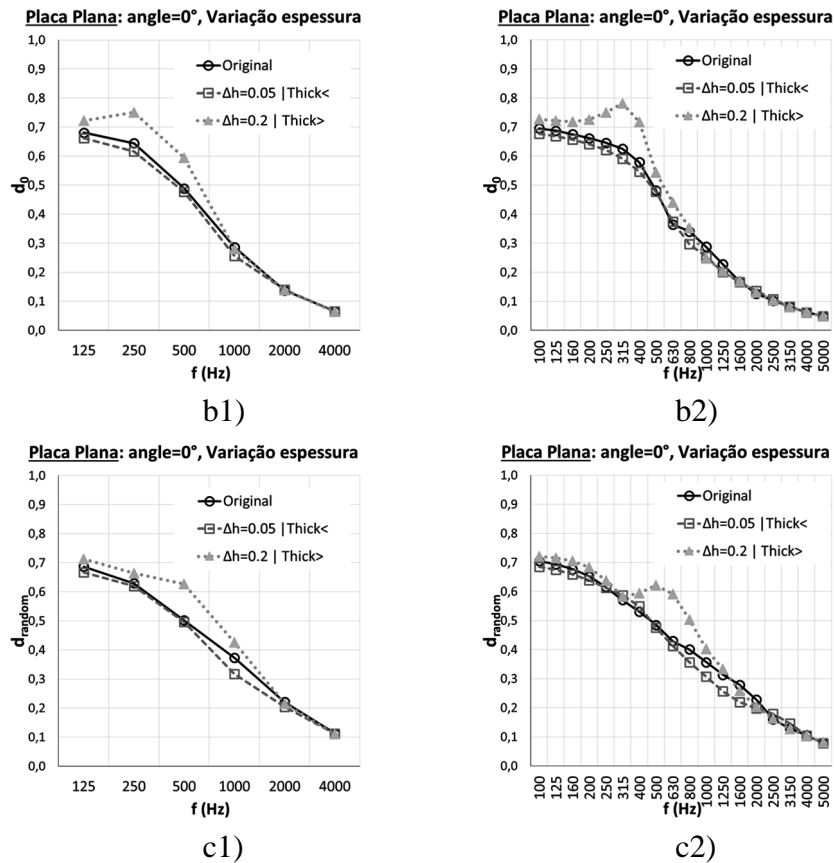


Figura 6.166 – Avaliação da influência da espessura da placa plana (de largura $L = 0.60 \text{ m}$), face frontal fixa em $y = 0 \text{ m}$. a) Posição da placa plana nas 3 análises; b) Coeficiente de difusão para incidência normal em bandas de: b1) oitava; b2) 1/3 oitava; c) Coeficiente de difusão aleatório em bandas de: c1) oitava; c2) 1/3 de oitava.

Como se pode observar na figura acima, a espessura da placa plana tem influência no coeficiente de difusão, essencialmente nas bandas de frequência dos 250 Hz e 500 Hz. Maior espessura aumenta o coeficiente de difusão nas bandas de frequências centradas nos 250 Hz e 500 Hz (nota: $h = 0.2 \text{ m} \approx \frac{\lambda_{425 \text{ Hz}}}{4}$), menor espessura diminui o coeficiente de difusão. Este fenómeno dever-se-á ao facto de haver difracção nas arestas laterais porque a placa plana não tem largura infinita. Para se avaliar a influência da largura da placa plana neste efeito, testou-se uma placa plana 5x maior, isto é, $L = 3.0 \text{ m}$. Determinou-se o coeficiente de difusão para as espessuras: $\Delta h = 0.1 \text{ m}$, $\Delta h = 0.25 \text{ m}$, $\Delta h = 0.5 \text{ m}$ e $\Delta h = 1.0 \text{ m}$ (estas três últimas garantem a mesma relação $\frac{\Delta h}{L}$ relativamente ao estudo da placa plana com largura $L = 0.60 \text{ m}$). Resultados obtidos são apresentados na Figura 6.167.

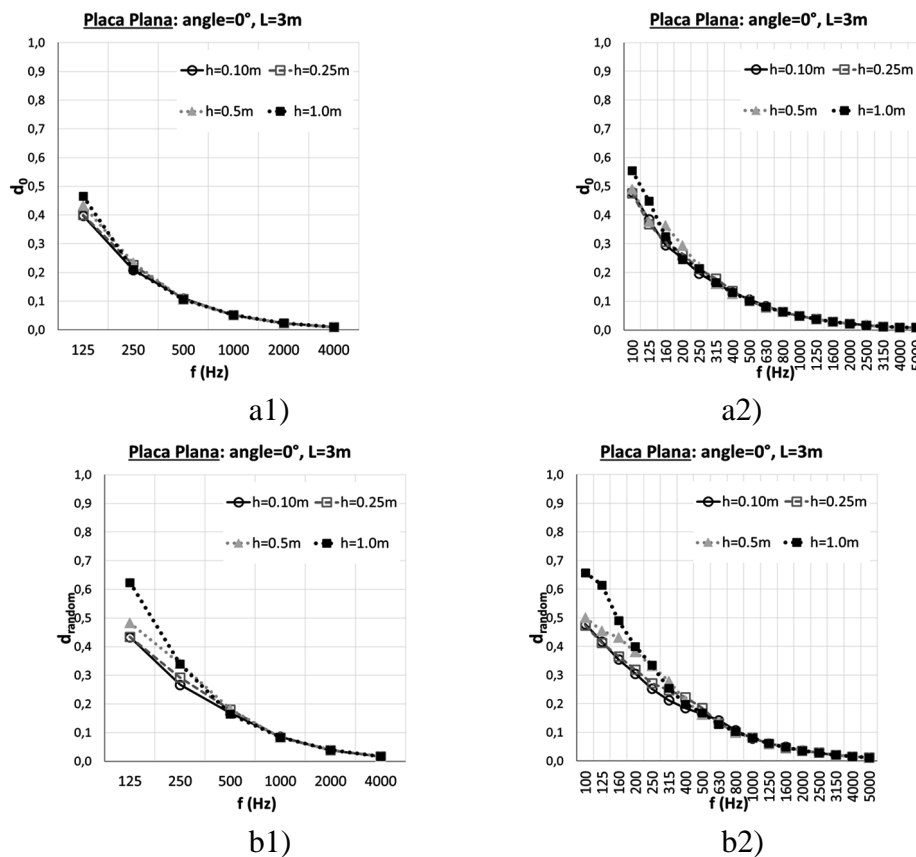


Figura 6.167 – Avaliação da influência da espessura da placa plana (de largura $L = 3.0\text{ m}$ com a face frontal fixa em $y = 0\text{ m}$). a) Coeficiente de difusão para incidência normal em bandas de: a1) oitava; a2) 1/3 oitava; b) Coeficiente de difusão aleatório em bandas de: b1) oitava; b2) 1/3 de oitava.

Como se pode observar na figura acima, a variação dos resultados com a espessura da placa plana é muito mais pequena, fazendo-se sentir nas frequências mais baixas (que correspondem, obviamente, a comprimentos mais altos) mesmo nos casos em que se manteve a relação $\frac{\Delta h}{L}$. Esses efeitos também se fazem sentir mais no coeficiente de difusão aleatório do que no coeficiente de difusão para incidência normal, como era expectável uma vez que se deve à difracção nas arestas limítrofes da placa plana.

Pretendeu-se, ainda, analisar quais os efeitos da translação e da espessura num difusor. Para tal, escolheu-se o difusor optimizado para $f = 1000\text{ Hz}$, 5 pontos de controlo e $refv = 15\text{ cm}$, com o constrangimento “compatível” (ver Figura 6.28b).

A Figura 6.168 ilustra o estudo dos efeitos da translação. Fizeram-se duas translações, uma com $\Delta y = -2.14\text{ cm}$ e outra com $\Delta y = -6.43\text{ cm}$ (de modo a que os pontos de controlo de ambas as extremidades ficassem posicionados na origem, $y = 0.0\text{ m}$). Tal como no caso da placa plana acima apresentado, também no caso do difusor, a translação não introduziu qualquer variação no coeficiente de difusão.

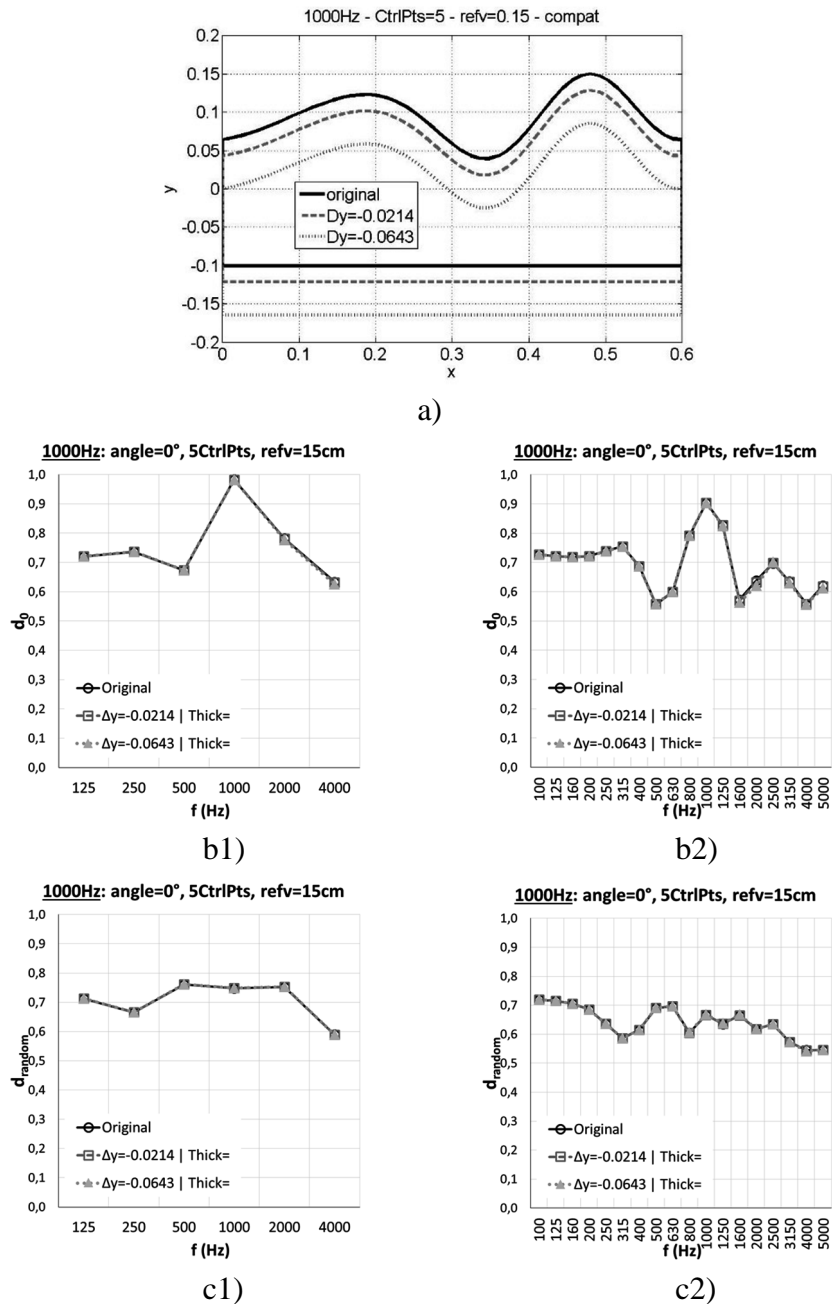


Figura 6.168 – Avaliação da influência da translação do difusor. a) Posição do difusor nas 3 análises; b) Coeficiente de difusão para incidência normal em bandas de: b1) oitava; b2) 1/3 oitava; c) Coeficiente de difusão aleatório em bandas de: c1) oitava; c2) 1/3 de oitava.

Para se analisar os efeitos da variação da espessura do difusor estudaram-se dois casos. No primeiro, a face frontal foi deslocada para as duas posições estudadas anteriormente (e a face posterior manteve-se fixa em $y = -0.1 \text{ m}$), ou seja, esta acção conduziu a duas reduções da espessura máxima do difusor – ver Figura 6.169.

No segundo caso, manteve-se a posição da face frontal fixa e a face posterior é que variou. Para este caso, estudaram-se uma em que se diminuiu em 0.05 m a espessura do difusor e outra em que se aumentou em 0.05 m a espessura do difusor. Os resultados são apresentados na Figura 6.170.

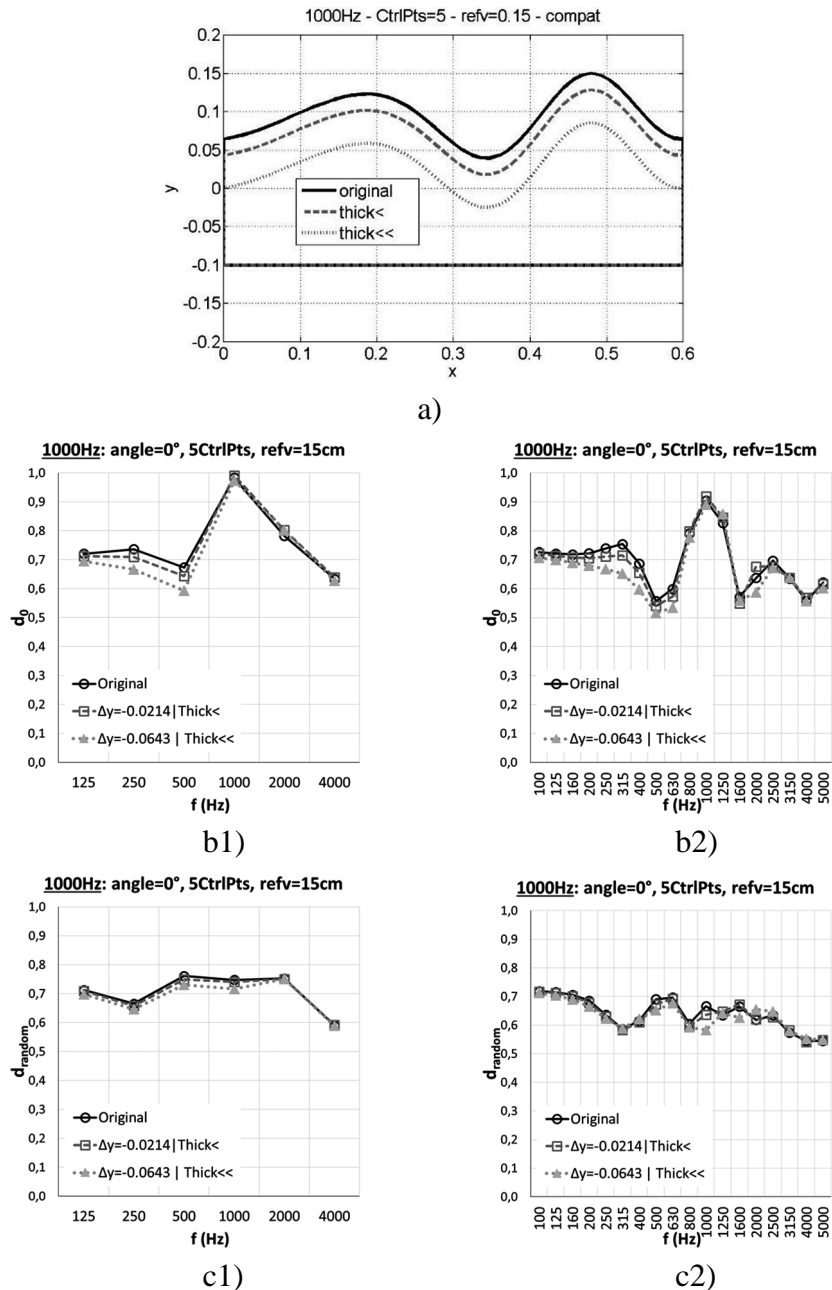


Figura 6.169 – Avaliação da influência da espessura do difusor, face posterior fixa em $y = -0.1\text{ m}$, face frontal varia de posição. a) Configuração do difusor nas 3 análises; b) Coeficiente de difusão para incidência normal em bandas de: b1) oitava; b2) 1/3 oitava; c) Coeficiente de difusão aleatório em bandas de: c1) oitava; c2) 1/3 de oitava.

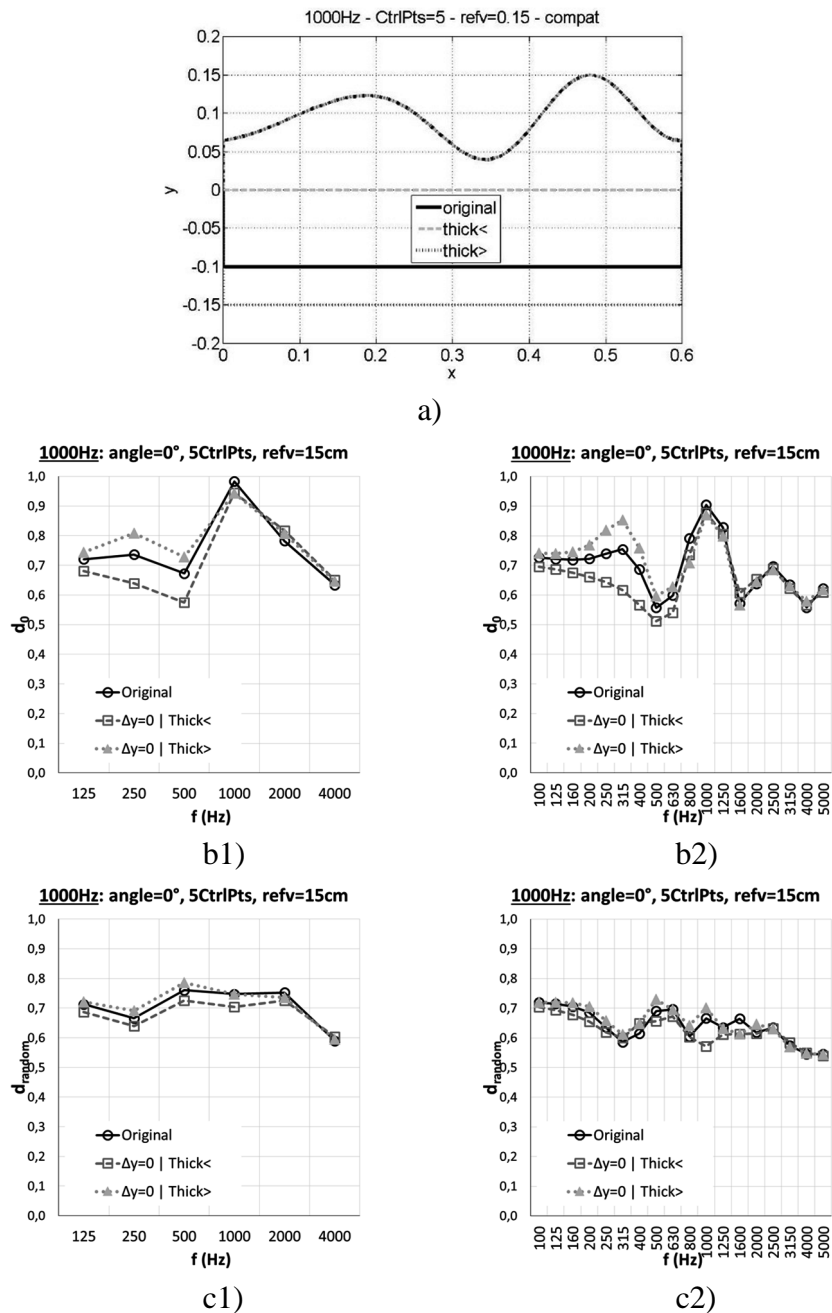


Figura 6.170 – Avaliação da influência da espessura do difusor, face posterior varia $\pm 0.05\text{ m}$, face frontal fixa na posição original. a) Configuração do difusor nas 3 análises; b) Coeficiente de difusão para incidência normal em bandas de: b1) oitava; b2) 1/3 oitava; c) Coeficiente de difusão aleatório em bandas de: c1) oitava; c2) 1/3 de oitava.

Em ambos os casos as conclusões são as mesmas que as retiradas do caso da placa plana, isto é, uma diminuição da espessura do difusor diminui o coeficiente de difusão nas bandas dos 250 Hz e 500 Hz, um aumento de espessura conduz a um aumento do coeficiente de difusão nas mesmas bandas de frequência.

6.10. CONCLUSÕES RELATIVAS AOS ESTUDOS DE CASOS

Nesta secção, foram apresentados diversos estudos de caso que pretenderam estudar o algoritmo de optimização proposto relativamente a:

- Convergência, nº de iterações e dispersão de resultados;
- Constrangimentos geométricos impostos aos pontos de controlo extremos da RBF;
- Codificação da altura dos pontos de controlo em 3 bit;
- Nº de pontos de controlo da RBF;
- Altura máxima possível dos pontos de controlo;
- Optimização para 1 banda de frequências e para um ângulo de incidência ($1f-\theta=0^\circ$): 1mod, 3mods e 1mod, com $L=3m$;
- Optimização para 9 bandas de frequências e 1 ângulo de incidência ($9f-\theta=0^\circ$): 1mod e 3mods;
- Optimização para 5 ângulos de incidências e 1 banda de frequências ($1f-5\theta$): 1mod e 3mods;
- Optimização para 9 bandas de frequências e 5 ângulos de incidência ($9f-5\theta$): 1mod e 3mods.

Verificou-se que o algoritmo de optimização converge rapidamente, em muitos casos, com 60 iterações, já se obtinha soluções com elevado desempenho. Verificou-se, ainda, que a convergência é ligeiramente mais lenta com o aumento do número de pontos de controlo e que o constrangimento geométrico “compatível” (que obriga a compatibilizar as extremidades do difusor de modo que numa utilização conjunta a curvatura definida pelo conjunto seja contínua) também é ligeiramente mais lento que o constrangimento que obriga que os pontos extremos tenham apenas a mesma altura.

Relativamente à dispersão de resultados, pois o algoritmo genético não conduz a soluções únicas mas sub-óptimas, foi verificado que é bastante baixa, aumentando, como era expectável, com o número de pontos de controlo. No pior dos casos, atingiu o valor de cerca de 6% relativamente à média dos vários “runs” executados com os mesmos parâmetros de entrada.

A restrição geométrica “compatível” (descrita uma vez mais acima), não influencia negativamente as optimizações – as diferenças, quer em termos de convergência, dispersão de valores e valor máximo do coeficiente de difusão não são significativas quando comparadas com o benefício em termos de uma futura produção industrial e aplicação em casos reais.

A possibilidade de permitir aos pontos de controlo tomarem várias alturas, em patamares, mostrou ser uma grande vantagem. Os casos apresentados foram referentes à possibilidade de tomarem 8 patamares (codificada em 3 bit, 2^3), entre $y = 0$ e $y = refv$, sendo que $refv$ é definida pelo utilizador. Isso permitiu que o valor final do coeficiente de difusão fosse ainda

mais elevado. Este valor é bastante alto, independentemente do nº de pontos de controlo. No entanto, quanto maior for a frequência de projecto (ou banda de frequências) menor é o valor do coeficiente de difusão, devido, essencialmente, à relação entre o comprimento de onda e a dimensão das curvas do difusor.

Um parâmetro que tem muita influência no desempenho, é, como era expectável, $refv$. Nitidamente, para a banda de frequências dos 500 Hz, só se começa a ter valores significativos para o coeficiente de difusão para $refv > 0.12 m$. Para as outras bandas de frequências analisadas (1000 Hz e 2000 Hz) começa-se a ter coeficientes de difusão elevados para valores de $refv$ inferiores.

Observou-se que é possível atingir desempenhos semelhantes utilizando diferentes números de pontos de controlo, mas com diferentes valores de $refv$. Assim, do ponto de vista estritamente de comportamento acústico, o número de pontos de controlo e $refv$ não são um requisito propriamente “acústico” mas sim geométrico, com influência clara na forma final do difusor, com consequências directas na exequibilidade construtiva do mesmo e nos constrangimentos arquitectónicos a que se possa estar sujeito (profundidade máxima do difusor), pois pode-se obter soluções com coeficientes de difusão muito semelhantes com conjugações de diferentes pares destes parâmetros.

Como numa situação prática real a utilização de um único difusor não será muito usual, a utilização de vários módulos reduz drasticamente o coeficiente de difusão do conjunto, assim como também muda a gama de frequências onde eles são mais eficientes. Para obviar este facto, mostrou-se que é possível otimizar um módulo individual tendo em consideração a utilização conjunta de n módulos. Mostrou-se ainda que é possível também otimizar difusores com grande dimensão (largura), customizados em função do espaço definido em arquitectura. Se esta última abordagem mostrou ser a mais eficiente do ponto de vista acústico, a primeira tem a grande vantagem de permitir, numa hipotética fabricação industrial, desenvolver um único modelo com elevado desempenho quando utilizado em conjunto.

De modo a estender a eficiência de um difusor em frequência, mostrou-se que é possível alongar o alto desempenho a várias bandas de frequência de 1/3 de oitava. Foram obtidos elevados coeficientes de difusão desde a banda dos 400 Hz aos 4000 Hz. Uma vez mais, também se demonstrou que é possível obter difusores otimizados para uma gama alargada de frequências, pensados para uma utilização conjunta. No entanto, para que estas soluções sejam eficientes nas baixas frequências, o valor de $refv$ deverá ser adequado (i.e., elevado).

Até ao momento, as observações feitas, são referentes à optimização para incidência normal. Contudo, numa utilização corrente e real, embora possa existir uma orientação preferencial, o desempenho de um difusor deverá ser igualmente elevado, independentemente da posição da fonte sonora. Assim, é conveniente otimizar os difusores relativamente ao coeficiente de difusão para incidência aleatória, conforme descrita na Norma ISO 17497-2: 2012 [39]. Foram realizadas várias optimizações quer para uma única banda de oitava quer para n bandas de

oitava. De facto, mostrou-se que é possível obter difusores com elevado desempenho, independentemente da posição da fonte e numa extensa gama de frequências.

Observa-se, ainda, que difusores optimizados para uma utilização conjunta de 3 módulos são, em regra, menos eficientes quando é utilizado apenas 1 módulo. Também se observou que um difusor optimizado com respeito a maximizar o coeficiente de difusão aleatório tem, genericamente, pior desempenho em incidência normal.

7. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL EM PROVETES TRIDIMENSIONAIS

7.1. INTRODUÇÃO

Dos diversos estudos de caso apresentados no capítulo anterior, foram escolhidos três difusores para serem produzidos provetes a testar laboratorialmente, na câmara semi-aneecóica do DEC/FCTUC, de acordo com a norma ISO 17497-2: 2012 [39]. O critério subjacente à escolha foi o que permitisse avaliar os objectivos da optimização – daí serem difusores que foram optimizados para serem utilizados individualmente (optimização de 1 módulo) e apenas para incidência normal (e não para 3 módulos e 5 ângulos de incidência como é referido na Norma ISO 17497-2:2012).

Por outro lado, como se pretende que estes protótipos sirvam para avaliar a capacidade de fabricar futuros produtos comerciais, optou-se por escolher difusores optimizados cujos pontos extremos tenham a mesma altura e que o declive da curva seja igual, de modo a permitir uma utilização conjunta de diversos módulos sem haver descontinuidades na curvatura conjunta assim definida.

7.2. ESCOLHA DOS PROVETES A TESTAR

O primeiro difusor a ser escolhido foi um que tivesse sido optimizado apenas para uma banda de oitava (e para incidência normal) e cuja espessura máxima não fosse muito elevada. Deste modo, foi escolhido um difusor optimizado (para incidência normal) para a banda de oitava centrada nos 1000 Hz e cuja altura máxima possível para os pontos de controlo é $refv=0.121$ m. Lembra-se que, no processo de optimização para uma banda de oitava, para o cálculo do coeficiente de difusão, apenas são tomadas em consideração 5 frequências discretas, igualmente espaçadas no interior da banda. O valor obtido para este parâmetro de optimização foi $d_0=0,991$. Na figura seguinte, apresenta-se a curva RBF e modelização 3D do provete a fabricar – as dimensões “x” e “y” estão em metro.

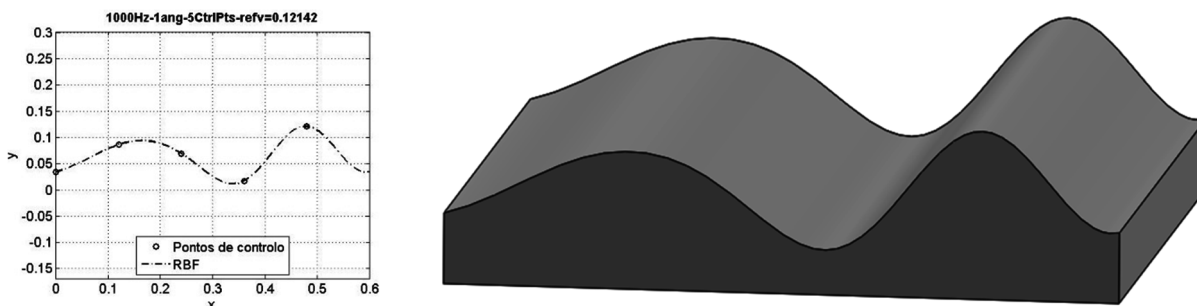


Figura 7.1 - Provete optimizado, para incidência normal, apenas para uma banda de frequência de oitava centrada em $f=1000$ Hz (5 pontos de controlo e $refv=0.121$ m).

O segundo difusor escolhido foi um que, para incidência normal, estava optimizado para 9 bandas de terço de oitava nas médias frequências, da banda dos 400 Hz à banda dos 2500 Hz. Escolheu-se, também, um difusor que é definido, tal como o anterior, por 5 pontos de controlo, cuja altura máxima é $refv=0.121$ m. Relembra-se que esta optimização, para várias bandas de terço de oitava, corresponde à maximização da média aritmética do valor do coeficiente de difusão em cada uma das bandas (que é obtido utilizando 5 frequências discretas igualmente espaçadas no interior da respectiva banda), à qual se subtrai o desvio padrão de modo a valorizar difusores com uma média (dos coeficientes de difusão) elevada, porém com valores mais constantes (menor desvio padrão). O valor obtido para este parâmetro de optimização foi $d_{average_corrig}=0.797$. A Figura 7.2 apresenta a forma optimizada (curva RBF) e modelização 3D do provete a fabricar para optimização nas médias frequências (400 Hz aos 2500 Hz).

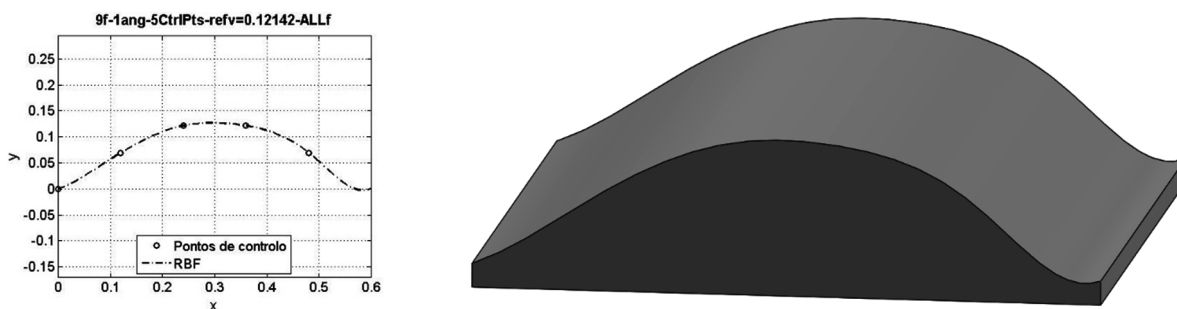


Figura 7.2 - Provete optimizado, para incidência normal, maximizando a média aritmética para 9 bandas de terço de oitava nas médias frequências, de 400 Hz aos 2500 Hz (5 pontos de controlo e $refv=0.121$ m).

O terceiro provete produzido resulta da optimização de um difusor para as altas frequências. Foi obtido pela maximização da média ponderada dos coeficientes de difusão em 9 bandas de terço de oitava, centradas dos 800 Hz aos 5000 Hz, cujos pesos nas bandas dos 3150Hz, 4000Hz e 5000Hz eram, respectivamente, “6”, ”7” e “8”, e “1” nas restantes 6 bandas. A esta média ponderada foi subtraído o valor do desvio padrão ponderado com o objectivo de não só se obter difusores com valores elevados nas altas frequências, como estes sejam constantes. O valor obtido para este parâmetro de optimização foi $d_{average_corrig}=0.781$. Esta optimização também foi

realizada apenas para incidência normal e para difusores definidos por 5 pontos de controle e com $refv=0.121$ m.

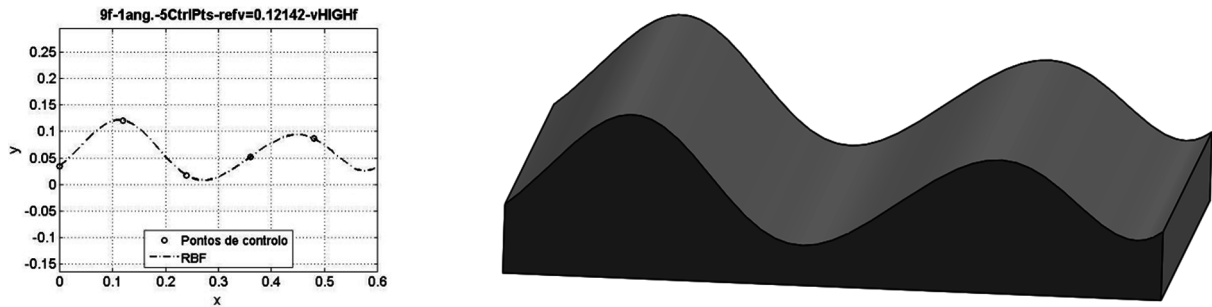


Figura 7.3 - Provette otimizado, para incidência normal, maximizando a média ponderada para 9 bandas de terço de oitava nas altas frequências, de 800 Hz aos 5000 Hz (5 pontos de controle e $refv=0.121$ m).

O Quadro 7.1 apresenta os parâmetros de entrada utilizados no processo de otimização dos três difusores atrás apresentados e o Quadro 7.2 apresenta os resultados obtidos para cada um deles – as variáveis apresentadas têm o mesmo significado referido no Capítulo 6. Para mais informações sobre o processo de otimização deverá ser consultado o Capítulo 6.

Quadro 7.1 – Parâmetros para a otimização.

#	Tipo Otimização	n_control_points	refv (m)	refh (m)	npop	nfreqbands	numsteps_gen
1	f=1000 Hz	5	0,121	0,12	22	5 (Oit.)	100
2	9f-ALLf	5	0,121	0,12	22	5 (1/3 Oit.)	100
3	9f-vHIGHf	5	0,121	0,12	22	5 (1/3 Oit.)	100

Quadro 7.2 – Resultados obtidos da otimização.

#	Tipo Otimização	$y_{max}-y_{min}$ (m)	Parâmetro de Otimização	Pontos de controle - y (m)				
1	f=1000 Hz	0,110	$d_0=0,991$	0,0347	0,0867	0,0694	0,0173	0,1214
2	9f-ALLf	0,129	$d_{av}^*=0,797$	0,0000	0,0694	0,1214	0,1214	0,0694
3	9f-vHIGHf	0,113	$d_{av}^{**}=0,781$	0,0347	0,1214	0,0173	0,0520	0,0867

Os resultados numéricos obtidos para os três difusores são apresentados nas figuras seguintes. Na figura 7.4, apresentam-se os resultados em bandas de frequência de oitava e na figura 7.5 apresentam-se os resultados para bandas de frequência de terços de oitava. Nestas figuras, apresentam-se não só o coeficiente de difusão normalizado (para incidência normal) de apenas um difusor, como também para 3 módulos e 5 módulos - embora em laboratório só se tenha avaliado o desempenho de um módulo.

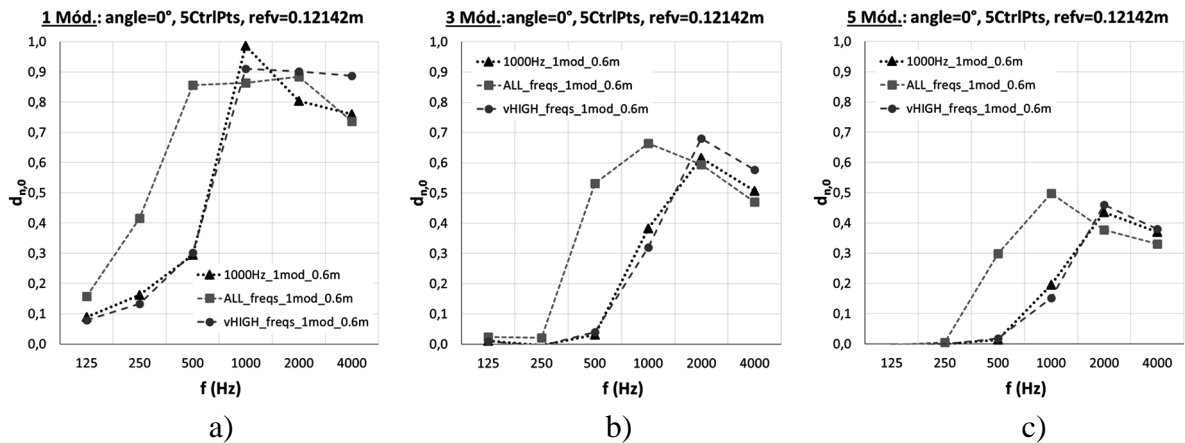


Figura 7.4 – Resultados numéricos: coeficiente de difusão normalizado para incidência normal, em bandas de oitava. Avaliação de: a) 1 módulo; b) 3 módulos; c) 5 módulos.

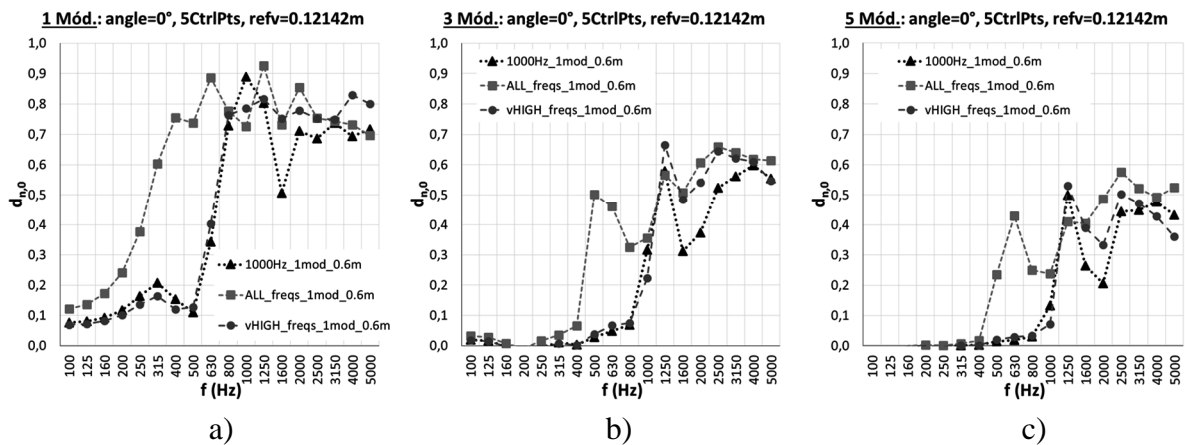


Figura 7.5 – Resultados numéricos: coeficiente de difusão normalizado para incidência normal, em bandas de terço de oitava. Avaliação de: a) 1 módulo; b) 3 módulos; c) 5 módulos.

Analisando-se os resultados obtidos por bandas de oitava (Figura 7.4a), verifica-se claramente que os pressupostos das respectivas optimizações foram atingidos: O difusor optimizado apenas para a banda de oitava centrada nos 1000 Hz é bastante eficaz nessa frequência, melhor que os restantes; o difusor que foi optimizado para ter valores elevados nas bandas de terço de oitavas nas médias frequências (que correspondem às bandas constituintes das bandas de oitava dos 500 Hz aos 2000 Hz), tendo em atenção não só o seu valor elevado como a menor dispersão dos seus valores, tem valores elevados e que são praticamente constantes; O difusor que foi optimizado para ter valores elevados e constantes nas bandas de terço de oitava nas altas frequências também cumpre os seus objectivos, sendo o difusor mais eficiente na banda de oitava centrada nos 5000 Hz, tendo, contudo, valores elevados desde a banda dos 1000 Hz (cumprindo os seus objectivos pois 800 Hz é a primeira banda de terço de oitava que constitui a banda de oitava dos 1000 Hz).

Para analisar os resultados em bandas de terço de oitava, separaram-se as três curvas de cada um dos difusores em análise da Figura 7.5a) em três gráficos distintos, e apresentam-se na Figura 7.6.

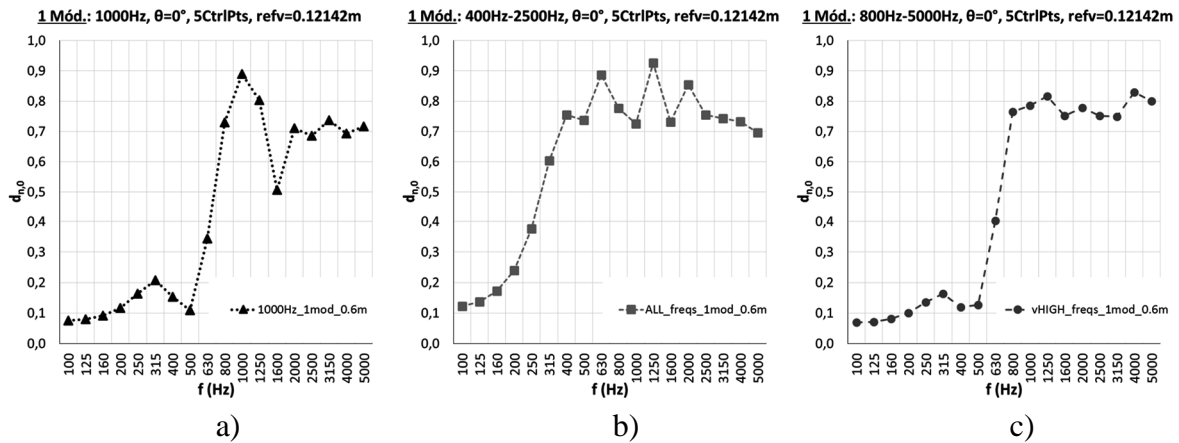


Figura 7.6 – Resultados numéricos do coeficiente de difusão normalizado para incidência normal, em bandas de terço de oitava constantes na Figura 7.5a) (avaliação de 1 módulo). Otimização para: a) Banda de oitava de 1000 Hz; b) Para a média aritmética de 9 bandas de terço de oitava nas médias frequências (400 Hz – 2500 Hz); c) Para a média ponderada de 9 bandas de terço de oitava nas altas frequências (800 Hz – 5000 Hz).

As conclusões que se pode retirar da observação da Figura 7.6 não são muito diferentes da análise dos resultados em bandas de oitava. Contudo, ressaltam-se os seguintes resultados: o difusor otimizado apenas para a banda de oitava dos 1000 Hz (Figura 7.6a) é claramente mais eficiente nas três bandas de terço de oitava que constituem a banda de oitava dos 1000 Hz; o difusor otimizado para as médias frequências (Figura 7.6b), dos 400Hz aos 2500Hz, tem elevada eficiência mas não é particularmente constante, porém os valores mínimos não baixam dos 0,7 (o desvio padrão relativo à média entre os 400 Hz e os 2500 Hz é de 8,9%); o difusor otimizado para as altas frequências não só tem valores elevados como é bastante constante desde dos 800 Hz aos 5000 Hz (o desvio padrão relativo à média é de apenas 3,6%), sendo particularmente mais eficiente nas bandas dos 4000 Hz e 5000 Hz, para os quais a otimização ponderou de forma mais elevada que as restantes bandas de otimização.

7.3. PROVETES CONSTRUÍDOS

Foram construídos 3 provetes em madeira que foi curvada de acordo com as curvas obtidas na otimização numérica. As faces frontais têm a dimensão de 0.6 m x 0.6 m. As 3 próximas figuras mostram os provetes construídos, apresentando a superfície frontal (a) e as costas dos mesmos (b).



Figura 7.7 - Provete otimizado, para incidência normal, apenas para uma banda de frequência de oitava centrada em $f=1000$ Hz. a) Superfície frontal; b) Tardoz.



Figura 7.8 - Provete otimizado, para incidência normal, maximizando a média aritmética para 9 bandas de terço de oitava nas médias frequências, de 400 Hz aos 2500 Hz. a) Superfície frontal; b) Tardoz.



Figura 7.9 - Provete otimizado, para incidência normal, maximizando a média ponderada para 9 bandas de terço de oitava nas altas frequências, de 800 Hz aos 5000 Hz. a) Superfície frontal; b) Tardoz.

Embora mantendo-se o mais fiel possível as curvas definidas numericamente (estas estão sempre sujeitas a pequenos erros de construção), estas foram deslocadas de modo a que, relativamente à base ($y=0.0$ m) o ponto mais alto tivesse uma ordenada de $y=0.15$ m, de modo que a espessura total de cada um dos provetes fosse 0.15 m. A Figura 7.10 ilustra este facto.



Figura 7.10 – Os três provetes utilizados para a validação experimental, com altura máxima idêntica de 0.15 m.

7.4. ENSAIOS LABORATORIAIS

Os ensaios laboratoriais foram realizados para se obter o coeficiente de difusão, para incidência normal, de acordo com a norma ISO 17497-2: 2012 [39] e cujo procedimento já foi abordado no Capítulo 3. Os ensaios foram realizados na câmara semi-aneecóica do DEC-FCTUC, que também já foi apresentada no Capítulo 4. Neste capítulo, apenas se apresentam os resultados obtidos e se comparam com os resultados numéricos.

De uma forma rápida, relembra-se a configuração do ensaio (5.5b): a fonte sonora encontra-se alinhada com o ponto central do difusor (incidência normal), situada a 3.0 m de distância. Os microfones são colocados numa semicircunferência centrada no ponto central do difusor cujo raio é $r=1.9$ m. Foram realizadas medições com uma discretização angular de 10° , correspondendo a 19 receptores (“19R” nas legendas dos gráficos dos resultados). Contudo, também foram realizados alguns ensaios com uma maior discretização, 5° , correspondendo a 37 receptores (“37R” nas legendas dos gráficos seguintes), de modo a comparar com os resultados obtidos em ambas discretizações.

Conforme foi referido no Capítulo 4, esta configuração, para difusores com uma largura de 600 mm, permite ter mais de 80% dos receptores fora da região especular, tal como é requerido na supracitada norma.

Os três provetes utilizados para a validação experimental, têm, como se referiu atrás, uma altura máxima idêntica de 0.15 m.

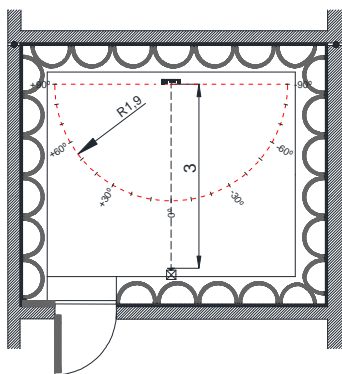


Figura 7.11 – Lay-out da câmara semi-aneecóica do DEC-FCTUC (repetição da Figura 4.5b).

De modo a se obter o coeficiente de difusão normalizado também se ensaiou uma placa plana com as mesmas dimensões dos difusores (600 mm x 600 mm), que se pode observar na Figura 7.12d).

Nos vários trabalhos realizados no âmbito desta Tese (e apresentados no Capítulo 4) foram várias as vezes em que se ensaiaram placas planas com a dimensão de 600 mm x 600 mm. Na Figura 7.13a) apresentam-se alguns resultados obtidos com uma discretização angular de 10° (corresponde a 19 receptores – “19R”).

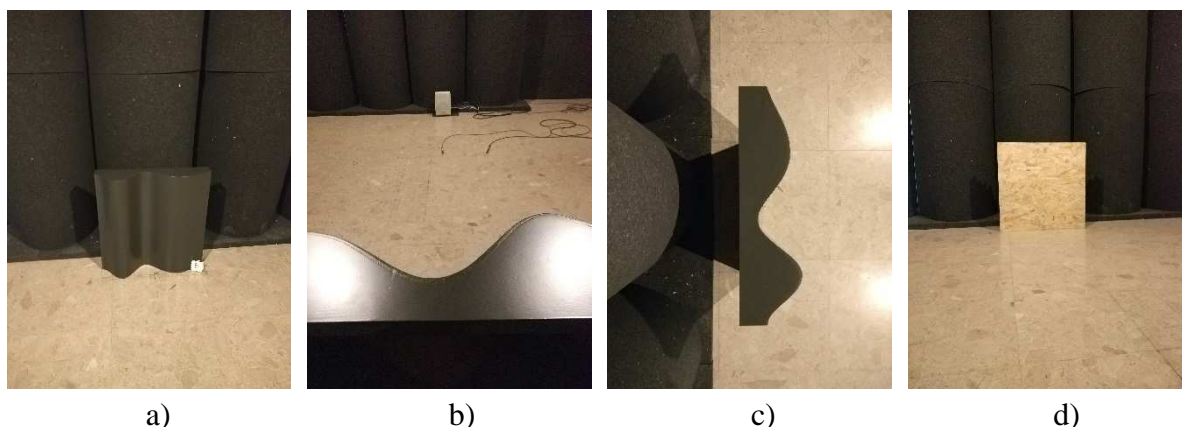


Figura 7.12 – Imagens dos ensaios na sala semi-anequica do DEC-FCTUC. a) Localização do difusor em avaliação; b) Posição da fonte sonora; c) Vista do perfil do difusor; d) Placa plana ensaiada.

Como se pode observar na referida figura, os resultados são semelhantes, tendo em conta que alguns foram obtidos em condições higr-térmicas distintas e com eventuais erros experimentais de set-up. Contudo, para a análise dos resultados destes ensaios em particular, resolveu-se utilizar a média dos resultados obtidos nesta “campanha” de ensaios, de modo a garantir uma menor influência da variabilidade das condições higr-térmicas.

Os resultados obtidos são bastante satisfatórios e demonstram uma certa reprodutibilidade. Pode-se observar, na Figura 7.13c, alguns desvios: nas bandas das mais altas frequências os resultados experimentais são superiores aos teóricos. O mesmo acontece nas bandas dos 400Hz e 500Hz. Por outro lado, nas bandas dos 250Hz e 315Hz, os resultados experimentais são, de uma forma geral, inferiores aos numéricos.

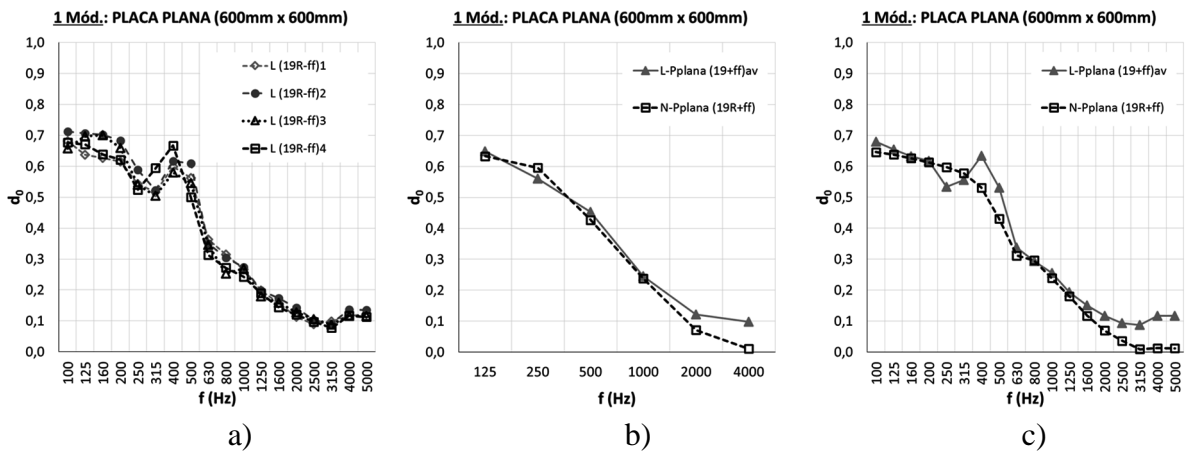


Figura 7.13 – Coeficiente de difusão (para incidência normal) de uma placa plana. a) Resultados obtidos em diversos ensaios laboratoriais; b) Comparação entre a média e o resultado numérico em bandas de frequência de oitava; c) Comparação entre a média e o resultado numérico em bandas de frequência de terço de oitava.

Conforme foi referido no Capítulo 3, para se obter o coeficiente de difusão “laboratorial” é necessário realizar uma FFT à diferença entre as respostas impulsivas “com” e “sem” o difusor (após a utilização de uma janela temporal que permita remover reflexões residuais que não sejam oriundas do difusor em análise). Com os parâmetros utilizados nos ensaios para a obtenção das respostas impulsivas permitiu garantir uma discretização “fina” em frequência (ver Capítulo 4: as respostas impulsivas foram obtidas através da técnica de MLS, com o máximo de sequências definidas por $2^{14} - 1 = 16383$, com uma duração de 1.2794 s, que corresponde a uma frequência de amostragem de 12806 Hz e uma discretização em frequência inferior a 1 Hz, $\Delta f = 1.2794^{-1} \text{ Hz}$). Para se comparar os resultados obtidos em laboratório (“L” nas legendas das figuras seguintes) com os resultados numéricos (“N” nas legendas das próximas figuras), teve de se recalculer o coeficiente de difusão numérico, tendo em consideração também uma discretização fina em frequência (“ff” nas legendas das figuras) em vez de se utilizar apenas 5 frequências discretas (“5f” nas legendas das figuras), como foi feito anteriormente no âmbito da otimização.

A Figura 7.14 apresenta os resultados numéricos obtidos para uma placa plana, da dimensão dos difusores em análise, e a Figura 7.15 os resultados para os 3 difusores, tendo em consideração não só a discretização em frequência como também a discretização angular, isto é, o número de receptores utilizado para o cálculo do coeficiente de difusão. As legendas das figuras têm o seguinte significado: “180R” corresponde a uma discretização angular de 1° , “37R” corresponde a uma discretização angular de 5° e “19R” corresponde a uma discretização angular de 10° .

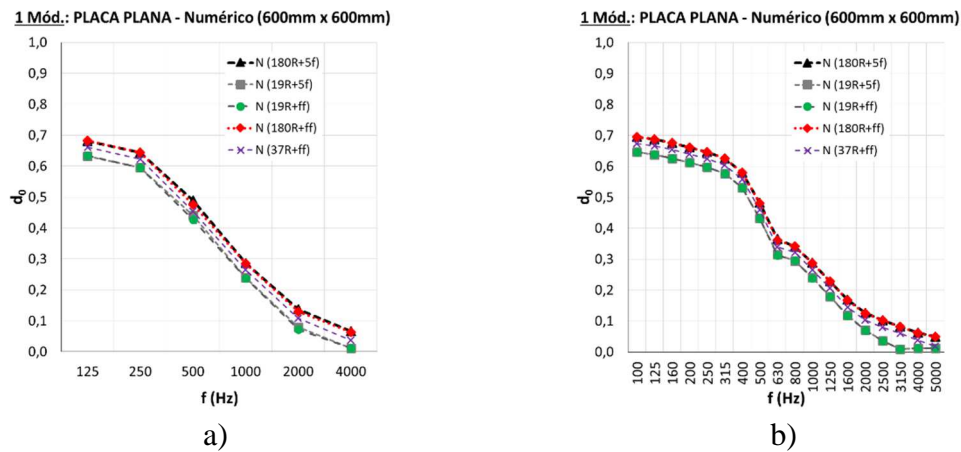


Figura 7.14 – Resultados numéricos obtidos para o coeficiente de difusão (incidência normal) para uma placa plana de igual dimensão dos difusores para diferentes número de receptores e de frequências discretas. a) Em bandas de frequência de oitava; b) Em bandas de frequência de terços de oitava.

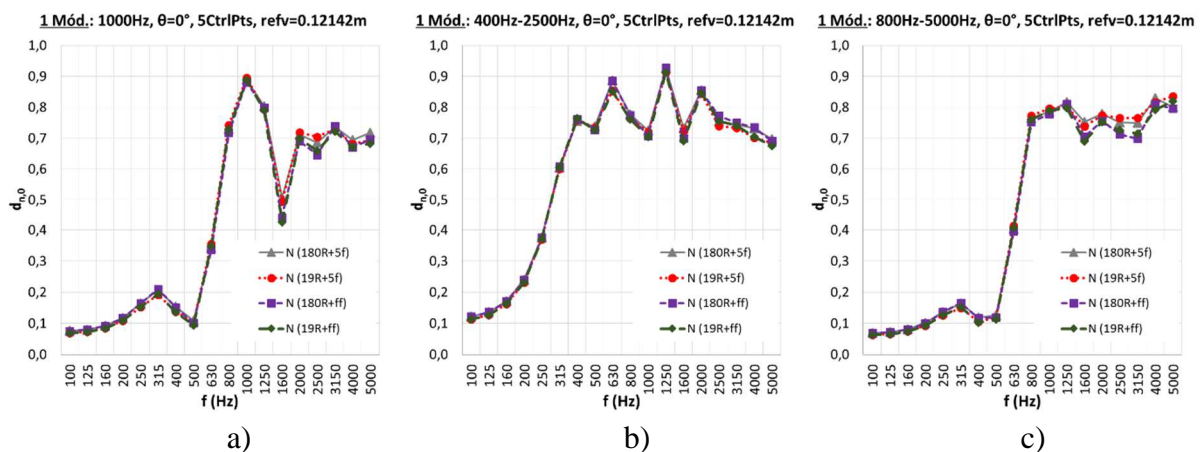


Figura 7.15 – Resultados numéricos do coeficiente de difusão normalizado para incidência normal, em bandas de terço de oitava (avaliação de 1 módulo). Otimização para: a) Banda de oitava de 1000 Hz; b) Para a média aritmética de 9 bandas de terço de oitava nas médias frequências (400 Hz – 2500 Hz); c) Para a média ponderada de 9 bandas de terço de oitava nas altas frequências (800 Hz – 5000 Hz).

Pode-se observar que o número de receptores tem uma maior influência nos resultados do que o número de frequências discretas pertencentes a uma banda de frequência que são utilizadas para o cálculo dos níveis de pressão sonora em cada um dos receptores e, conseqüentemente, no coeficiente de difusão. Essa influência já não é tão clara quando se analisa os resultados numéricos do coeficiente de difusão normalizado dos três difusores apresentados na Figura 7.15.

Para se avaliar a influência do número de receptores foram realizados alguns ensaios com uma discretização angular de 5° (corresponde a 37 receptores, “37R”) dos quais se pode retirar os

resultados considerando apenas uma discretização angular de 10° (corresponde a 19 receptores, “19R”). Os resultados obtidos são apresentados nas figuras 7.16 a 7.19.

Da observação dessas figuras pode-se concluir que, embora haja algumas diferenças, essas são suficientemente pequenas para se afirmar que, embora a norma ISO 17497-2: 2012 [39] indique uma discretização angular de 5° , uma discretização de 10° é suficientemente precisa e tem a vantagem de demorar metade do tempo a realizar-se. Assim, foram realizados mais ensaios (3 ao todo) apenas com 19 receptores e, para a comparação com os resultados numéricos, optou-se por utilizar as médias desses ensaios.

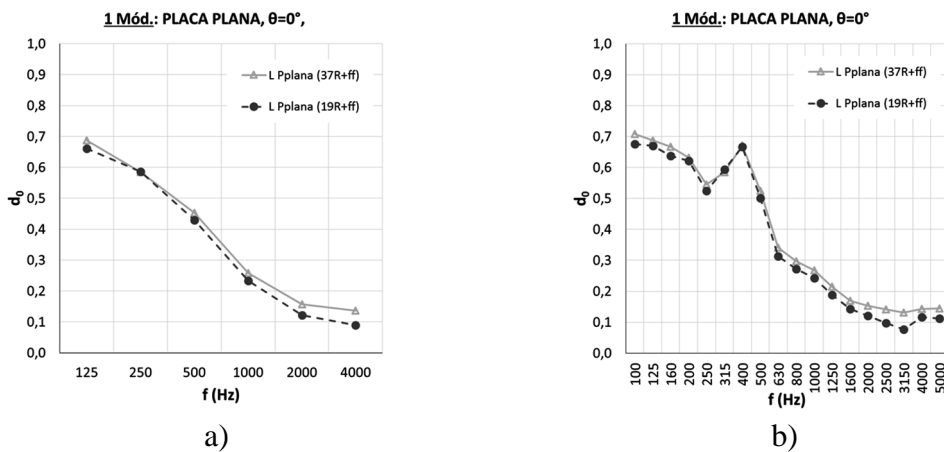


Figura 7.16 – Resultados experimentais obtidos para o coeficiente de difusão (incidência normal) para uma placa plana de igual dimensão dos difusores para diferentes número de receptores. a) Em bandas de frequência de oitava; b) Em bandas de frequência de terços de oitava.

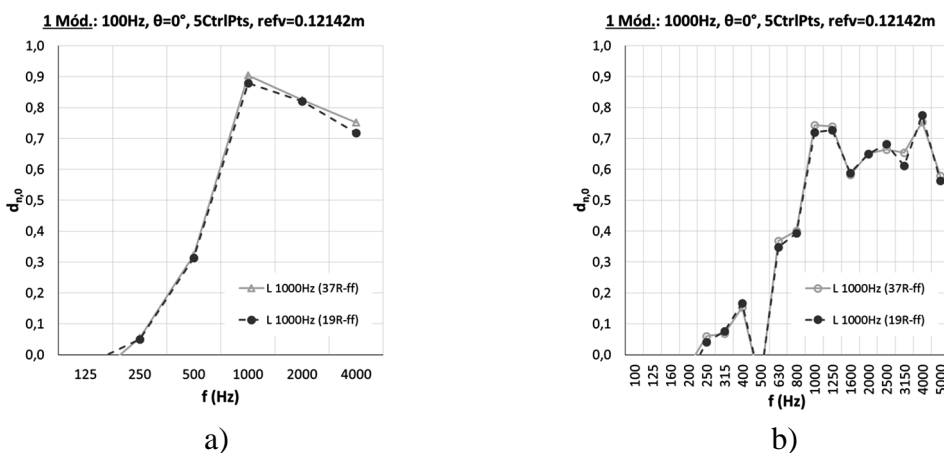


Figura 7.17 – Resultados experimentais obtidos para o coeficiente de difusão normalizado (incidência normal) para um difusor otimizado, para incidência normal, apenas para uma banda de frequência de oitava centrada em $f=1000$ Hz para diferentes número de receptores. a) Em bandas de frequência de oitava; b) Em bandas de frequência de terços de oitava.

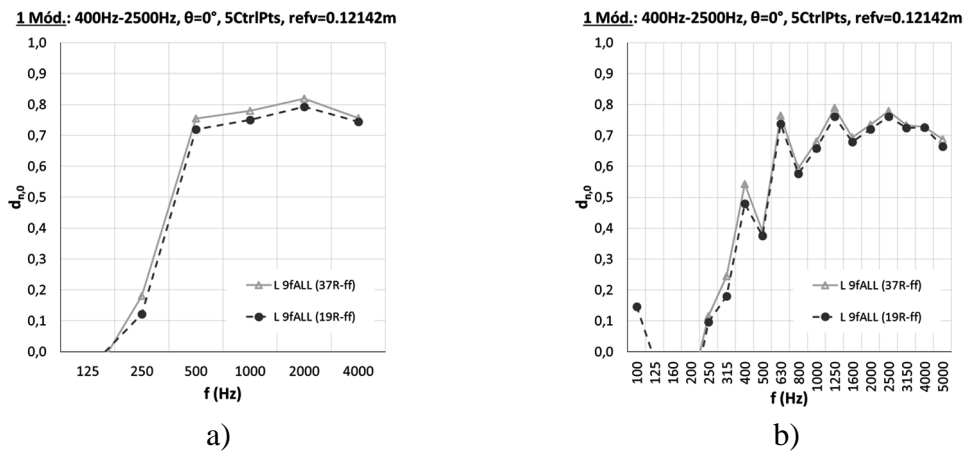


Figura 7.18 – Resultados experimentais obtidos para o coeficiente de difusão normalizado (incidência normal) para um difusor optimizado, para incidência normal, maximizando a média aritmética para 9 bandas de terço de oitava nas médias frequências, de 400 Hz aos 2500 Hz para diferentes número de receptores. a) Em bandas de frequência de oitava; b) Em bandas de frequência de terços de oitava.

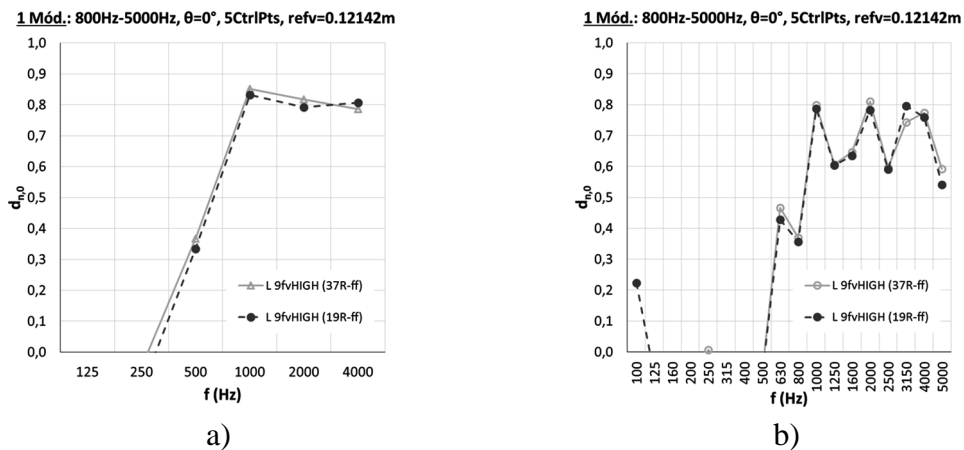


Figura 7.19 – Resultados experimentais obtidos para o coeficiente de difusão normalizado (incidência normal) para um difusor optimizado maximizando a média ponderada para 9 bandas de terço de oitava nas altas frequências, de 800 Hz aos 5000 Hz. a) Em bandas de frequência de oitava; b) Em bandas de frequência de terços de oitava.

Para esta comparação, os resultados numéricos (“N”) foram recalculados para o mesmo número de receptores (e, como se referiu atrás, foi utilizada uma discretização fina em frequência, 1 Hz - “ff” nas legendas das figuras). Os resultados são apresentados nas Figuras 7.20 e 7.21.

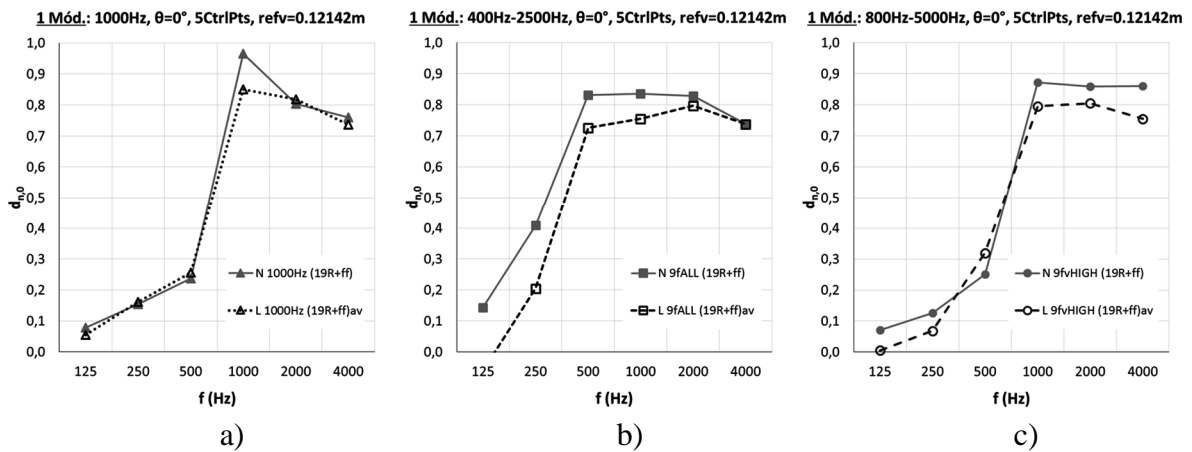


Figura 7.20 – Comparação entre resultados numéricos (“N”) e laboratoriais (“L”) do coeficiente de difusão normalizado para incidência normal, em bandas de frequência de oitava (avaliação de 1 módulo). Otimização para: a) Banda de oitava de 1000 Hz; b) Para a média aritmética de 9 bandas de terço de oitava nas médias frequências (400 Hz – 2500 Hz); c) Para a média ponderada de 9 bandas de terço de oitava nas altas frequências (800 Hz – 5000 Hz).

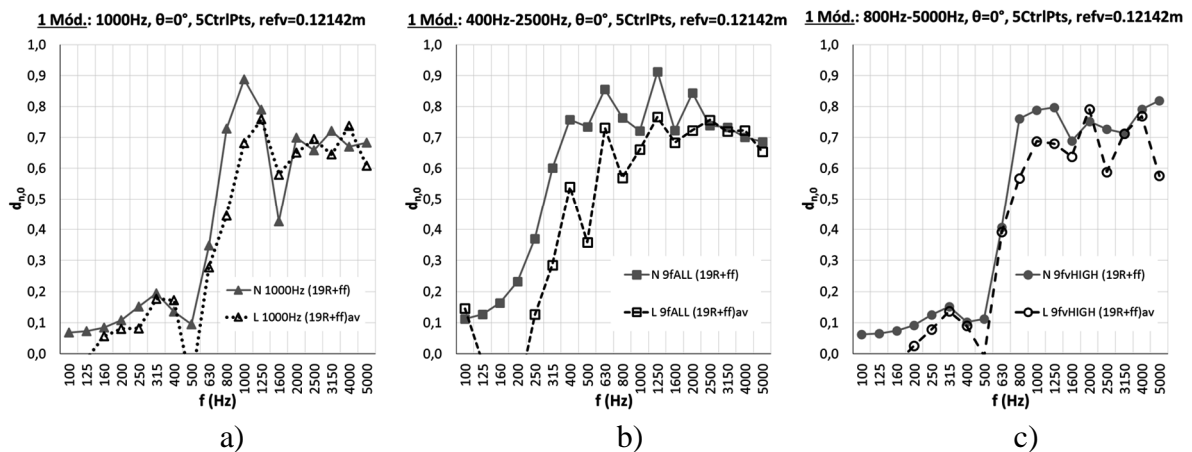


Figura 7.21 – Comparação entre resultados numéricos (“N”) e laboratoriais (“L”) do coeficiente de difusão normalizado para incidência normal, em bandas de terço de oitava (avaliação de 1 módulo). Otimização para: a) Banda de oitava de 1000 Hz; b) Para a média aritmética de 9 bandas de terço de oitava nas médias frequências (400 Hz – 2500 Hz); c) Para a média ponderada de 9 bandas de terço de oitava nas altas frequências (800 Hz – 5000 Hz).

Da observação das Figuras 7.20 e 7.21 pode-se concluir que existe uma boa concordância entre os resultados numéricos e os resultados experimentais. De uma forma geral, os resultados experimentais são inferiores, contudo, seguem a “tendência” dos resultados numéricos. Ou seja, pode-se dizer que, embora não haja uma concordância (absoluta) em termos quantitativos, há uma concordância em termos qualitativos.

Desta forma, pode-se considerar que estes ensaios validam de forma inequívoca o processo de optimização proposto neste trabalho e as conclusões dele retiradas, nomeadamente, as tecidas ao longo do capítulo anterior.

8. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

8.1. CONCLUSÕES

Os difusores acústicos são correntemente utilizados no condicionamento acústico de espaços com maiores exigências acústicas (estúdios, salas de espectáculos, etc.), servindo, sobretudo, para garantir uma acústica adequada, sem absorções excessivas e espalhando o som mais uniformemente pela sala, eliminando ao mesmo tempo defeitos acústicos como ecos ou zonas sombra. Constituem uma ferramenta fundamental na acústica de salas sendo, portanto, um produto importante para o projecto, construção e reabilitação de espaços onde a qualidade do som percebido seja determinante.

Neste trabalho, apresentou-se, de forma breve, os conceitos associados ao desenvolvimento e utilização de difusores, bem como o princípio de funcionamento de algumas soluções mais “tradicionais” baseadas nos trabalhos desenvolvidos por Schröder (Capítulo 2). No Capítulo 3, foram apresentadas as técnicas experimentais actualmente aceites para caracterizar e quantificar o desempenho dos difusores e, no Capítulo 4, apresentou-se a implementação da técnica experimental baseada na norma ISO 17497-2 [39], que permite obter o coeficiente de difusão, e estudos que pretenderam perceber a influência de parâmetros construtivos (como espessuras, tipo de materiais, densidade, etc.) no desempenho de superfícies híbridas e difusores do tipo QRD, dados importantes para a futura definição de novos produtos.

No Capítulo 5, foi apresentado o algoritmo de optimização, bem como os diversos elementos necessários para o seu funcionamento: o método numérico que permite calcular o coeficiente de difusão (BEM), as funções matemáticas que descrevem a superfície dos difusores (RBF) e o algoritmo genético que permite fazer evoluir uma dada população de difusores para soluções optimizadas.

No Capítulo 6, são apresentados vários casos de aplicação do algoritmo proposto e, no capítulo seguinte, é avaliado experimentalmente o desempenho de alguns protótipos resultantes do processo de optimização proposto, de forma a validar os resultados obtidos.

Dado tratar-se de uma tese de Doutoramento desenvolvida no âmbito de uma Bolsa de Doutoramento em Empresas (BDE), no seio de uma empresa de produção de soluções em madeira e derivados, pretendeu-se contribuir para o desenvolvimento de produtos de grande

inovação e de alto desempenho nesta área da acústica. Como tal, era necessário prestar particular atenção à viabilidade de utilizar painéis de madeira com forma orgânica como difusores acústicos, que possam integrar os revestimentos de paredes e tectos, definidos em projecto de arquitectura, com tripla funcionalidade: revestimento, estética e acústica. Por isso, o objectivo último deste trabalho era chegar a configurações geométricas passíveis de gerar uma mais-valia tecnológica na empresa e de permitir a esta a realização de produtos de grande inovação, únicos no mercado. Esta foi a principal motivação para este trabalho e, obviamente, condicionou algumas opções durante o desenvolvimento do mesmo.

Do ponto de vista científico, o presente trabalho teve como objectivo principal identificar um conjunto de estratégias e métodos que permitiram o estudo acústico e optimização do desempenho de difusores acústicos. Para tal, era fundamental desenvolver um modelo numérico para a análise de problemas de dispersão acústica bi-dimensionais. O trabalho que agora se apresenta permite concluir que o método dos elementos de fronteira, BEM, é muito adequado para o fim pretendido, sendo de aplicação geral e que permite obter resultados com elevado rigor.

Procurou-se, ainda, propor uma abordagem simples, para um processo de optimização da geometria, tendo em vista a maximização do desempenho acústico. Assim, com o suporte do modelo numérico definido e do processo de optimização baseado num algoritmo genético, definiram-se geometrias optimizadas do ponto de vista da difusão/dispersão acústica de difusores com formas curvilíneas e orgânicas, representáveis com funções de base radial (RBF).

Finalmente, era importante validar experimentalmente, usando protótipos, as previsões numéricas obtidas pelos modelos desenvolvidos e confirmar a sua eficiência como difusores.

Assim, por aquilo que atrás se enunciou e avaliando os resultados obtidos nos Capítulos 6 e 7, pode-se afirmar que a metodologia proposta e implementada para este trabalho constitui uma poderosa ferramenta de desenvolvimento de difusores acústicos.

O algoritmo de optimização proposto e implementado mostrou que converge rapidamente para soluções sub-óptimas. Embora a dispersão destes valores seja bastante pequena, na verdade, o sistema só converge para um único valor se o universo de soluções for pequeno (essencialmente, se o número de pontos de controlo for pequeno e se o número de bits utilizado para codificar a altura de cada um deles for também pequeno).

O algoritmo de optimização implementado permite obter soluções com elevado coeficiente de difusão para uma gama alargada de frequências e de ângulos de incidência, podendo ambos ser previamente definidos pelo utilizador.

A forma final dos difusores, resultante de uma combinação de RBFs, após o processo de optimização, depende da conjugação do número de pontos de controlo das RBFs e da altura máxima possível, sendo ambos parâmetros de entrada definidos pelo utilizador. Foi mostrado que se pode obter desempenhos igualmente elevados com diferentes conjugações. Assim,

podem-se apresentar à arquitectura diferentes soluções visuais sendo igualmente eficientes do ponto de vista acústico.

Por outro lado, o facto das formas dos difusores serem definidas por funções de base radial (RBF) controladas apenas pelo número e posições dos pontos de controlo permite implementar facilmente constrangimentos geométricos derivados de requisitos da arquitectura.

Outra grande funcionalidade da metodologia desenvolvida é que permite a optimização de um módulo tendo em atenção a utilização conjunta de n módulos, permitindo uma futura industrialização da produção.

Um exemplo desta funcionalidade do algoritmo de optimização é a possibilidade de optimizar difusores para aplicações específicas, quer em termos dimensionais quer em termos de funcionalidade (serem optimizados, por exemplo, tendo em atenção o posicionamento predominante das fontes sonoras).

A Figura 8.1 apresenta um difusor optimizado para revestir as paredes laterais de uma sala de espectáculos ainda em fase de projecto. O difusor apresentado nessa figura foi optimizado para ter a média para 5 ângulos de incidência (25° , 35° , 45° , 55° e 65°) do coeficiente de difusão maximizado. A gama de frequências de optimização foi de 9 bandas de 1/3 de oitava, dos 400 Hz aos 2500 Hz.

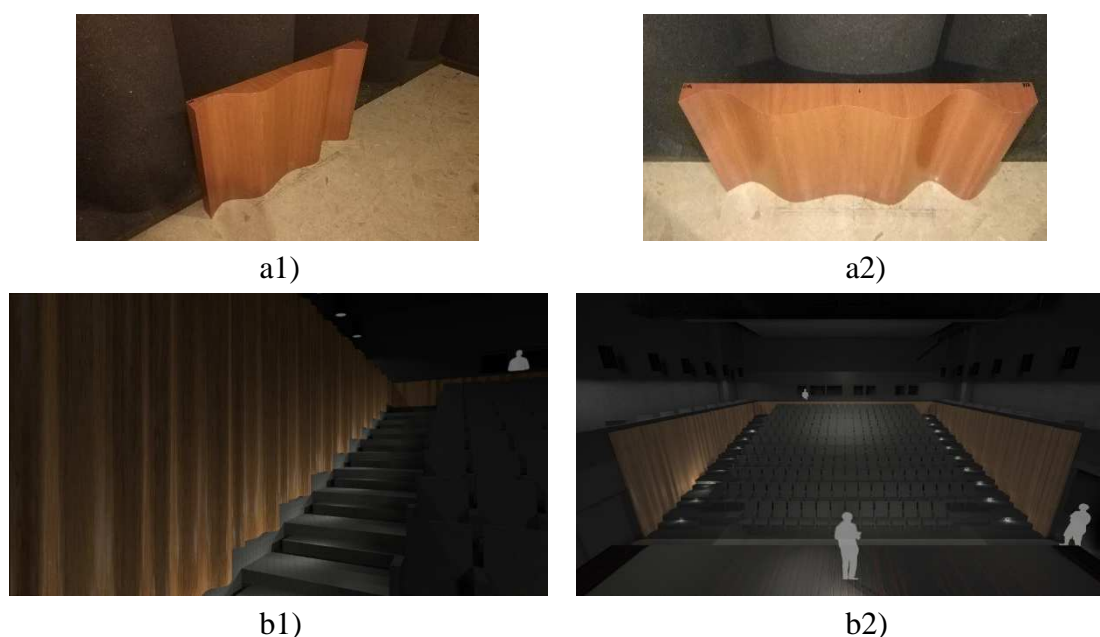


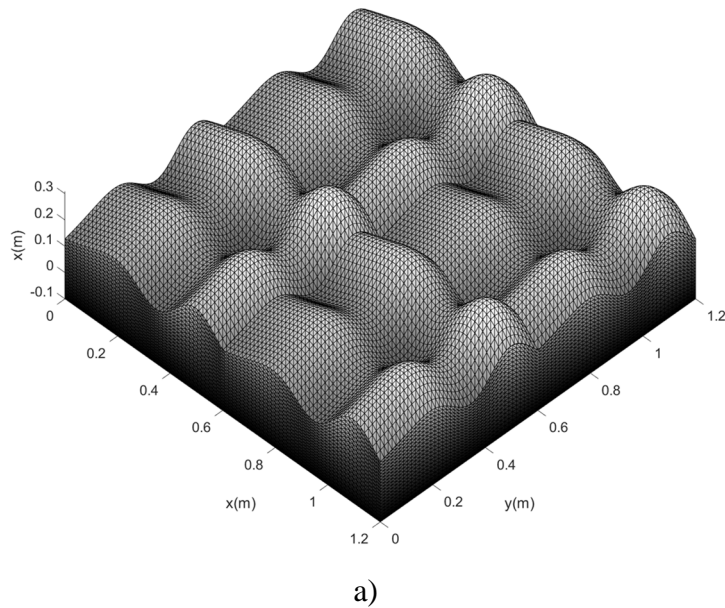
Figura 8.1 – a) Protótipo testado na sala semi-anecóica do DEC/FCTUC; b) Renders do auditório.

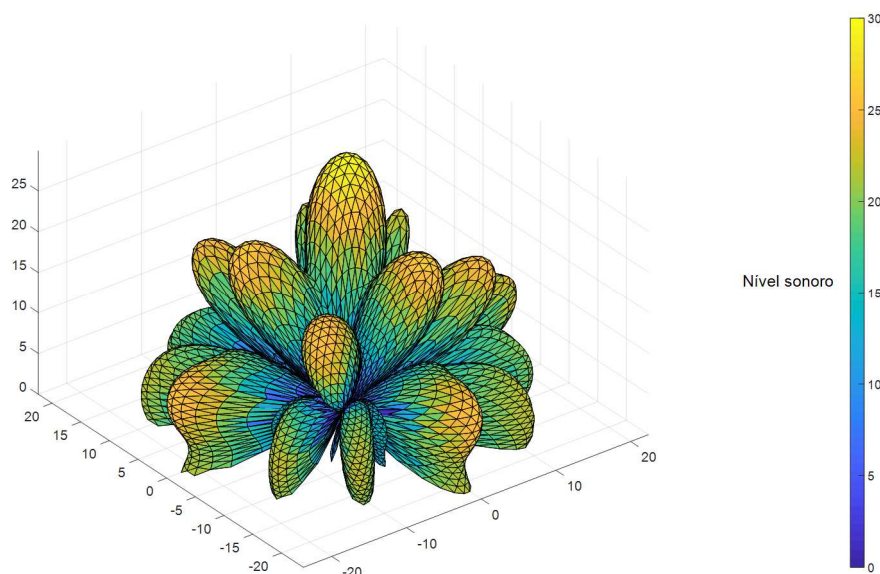
A escolha dos difusores não poderá ser apenas tomada em função do seu desempenho acústico. Há outros factores que, embora não estejam no âmbito do presente trabalho, não podem ser excluídos. Questões construtivas deverão ser tomadas em conta, tais como a espessura total do difusor, pois podem estar condicionada em termos arquitecturais. O tipo de materiais em que

poderão ser fabricados, o processo de fabrico e o respectivo custo também condicionam a escolha. E, finalmente, a questão estética, que pode agradar mais ou menos ao potencial cliente. Porém, a “ferramenta” de desenvolvimento e otimização que se propõe neste trabalho é suficientemente versátil para tomar em consideração outros factores e apresentar várias soluções optimizadas.

8.2. TRABALHOS A DESENVOLVER NO FUTURO

Do que aqui foi exposto e, excluindo os constrangimentos impostos por uma futura fabricação revestida a madeira, considera-se que o algoritmo geral proposto poderá servir de base a todo o processo, sendo de aplicação simples e geral, facilmente aplicável (com alguns custos computacionais, é certo) a problemas verdadeiramente tridimensionais. Tal trabalho já está a ser posto em prática, embora ainda numa fase embrionária. A Figura 8.2a apresenta a imagem malha para o cálculo da difusão hemisférica de um difusor que resulta, não propriamente de uma optimização 3D, mas de uma modulação de dois difusores optimizados como apresentado no Capítulo 6. A Figura 8.2b apresenta o respectivo diagrama polar.





b)

Figura 8.2 – Exemplo de aplicação do BEM em 3D para estudo da dispersão do som. a) Malha BEM de um difusor resultante da modulação de dois difusores; b) Diagrama polar tridimensional obtido para uma frequência de 1250 Hz. Apresenta-se a escala de cores à direita.

Por outro lado, ainda no âmbito do desenvolvimento de difusores que possam ser produzidos por revestimento de madeira, pode-se ir longe nos resultados obtidos, tendo em atenção o potencial interesse na produção industrial de difusores. Por exemplo, pode-se implementar constrangimentos geométricos tais que permitam otimizar-se pares de difusores (para trabalharem em conjunto) mas que se complementem geometricamente, encaixando-se um no outro, de modo a poupar espaço no armazenamento e no transporte dos mesmos – dois factores muito importantes para as indústrias produtora e distribuidora.

O passo seguinte, que na realidade actualmente também já está a ser dado, é estender a optimização a vários parâmetros em simultâneo. De facto, da forma como está implementado o algoritmo de optimização facilmente pode incorporar um algoritmo evolucionário multi-objectivo, tal como o apresentado em [31] e [57]: *ev-MOGA*.

Ainda sob a perspectiva de uma produção industrial, esta análise multi-objectivo poderá avaliar a sensibilidade dos difusores a pequenos erros construtivos, isto é, tendo-se várias soluções com elevado desempenho, verificar quais são as que são menos sensíveis a pequenas variações da forma devido a erros construtivos.

Por outro lado, poderão ser implementadas funções de mérito que traduzam a maior ou menor facilidade de construção de um difusor (por exemplo, avaliando pontos de inflexão nas curvas, distância entre máximos consecutivos, etc...), o peso (algo muito importante para quem tem de fazer chegar um produto a um destino para aplicação), etc.

Em salas pequenas é bastante importante que os difusores sejam capazes de provocar, para além de dispersão espacial, dispersão temporal, de modo a reduzirem os efeitos nefastos da interacção entre o som directo e o som reflectido. Deste modo, parece pertinente criar uma métrica que avalie a dispersão temporal proporcionada por um difusor e que seja incluída numa optimização multi-paramétrica. Redondo et al em [29, 30] propõe obter as respostas temporais do som reflectido de um impulso de Ricker através da integração inversa do integral de Schröder, obtendo assim um “tempo de reverberação”. Contudo, isso obriga a obter a resposta de um difusor no domínio do tempo e, portanto, poderá ser eventualmente necessário implementar a técnica de modelação numérica das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD) ou realizar um cálculo com o BEM para um conjunto muito alargado de frequências (e, posteriormente, converter esse resultado para o domínio do tempo) para obter essa resposta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Cox, T. J., and D'Antonio, P., "Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application," 2nd Ed., London, Taylor & Francis, 2009.
- [2]. Kuttruff H., "Room Acoustics", 4th ed. Spon, London, pp. 55–58, 2000.
- [3]. D'Antonio P. and Cox T.J., "Two Decades of Sound Diffusor Design and Development, Part 1: Applications and Design," J. Audio Eng. Soc., vol. 46, no. 11, pp. 955-976, November 1998.
- [4]. Schröder, M. R., "Binaural Dissimilarity and Optimum Ceilings for Concert Halls: More Lateral Sound Diffusion," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 65(4), pp. 958-63, 1979.
- [5]. Cox, T. J., and Lam, Y. W., "Prediction and Evaluation of the Scattering from Quadratic Residue Diffusers," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 95(1), pp. 297-305, 1994.
- [6]. Cox T. J., "Predicting the scattering from reflectors and diffusers using two-dimensional boundary element methods," J. Acoust. Soc. Am. 96, pp. 874–878, 1994.
- [7]. D'Antonio, P. and Cox, T.J., "Two Decades of Sound Diffusor Design and Development, Part 2: Prediction, Measurement, and Characterization," J. Audio Eng. Soc., vol. 46, no. 12, pp. 1075-1091, December 1998.
- [8]. Redondo, J., Pico, B., Roig, B., and Avis, M.R., "Time domain simulation of sound diffusers using finite-difference schemes," Acta Acustica with Acustica, vol. 93, no. 4, pp. 611-22, 2007.
- [9]. Sabine, W. C., "Collected Papers on Acoustics", Harvard University Press, 1922; republished, Acoustical Society of America, 1993.
- [10]. Schröder, M. R., "Diffuse sound reflection by maximum-length sequences", J. Acoust. Soc. Am., 57(1), pp. 149–50, 1975.
- [11]. A. H. Marshall and J. R. Hyde, "Some practical considerations in the use of quadratic residue diffusing surfaces," proc. 10th ICA, Sydney, paper E7.3, 1980.

- [12]. A. H. Marshall, J. R. Hyde and M. F. E. Barron, “The acoustical design of Wellington Town Hall: design development, implementation and modelling results,” proc. IoA (UK), Edinburgh, 1982.
- [13]. D’Antonio, P. and Konnert, J. H., “The Reflection Phase Grating Diffusor: Design Theory and Application”, J. Audio Eng. Soc., pp. 32(4), 1984.
- [14]. D’Antonio, P. and Konnert, J. H., “The RFZ/RPG approach to control room monitoring”, proc. Audio Eng. Soc., Preprint 2157 (I-6), Oct. 1984.
- [15]. David, D. and Davis, C., “The LEDE concept for the control of acoustic and psychoacoustic parameters in recording control rooms”, J. Audio Eng. Soc., 28, pp. 585-595, 1980.
- [16]. T. Yokota, S. Sakamoto and H. Tachibana, “Visualization of sound propagation and scattering in rooms”, Acoust. Sci. & Tech. 23, 1, 2002.
- [17]. D’Antonio, P., Cox, T.J., “Diffuser application in rooms”. Applied Acoustics, 60 (2): p. 113-142, 2000.
- [18]. Rathsam, J., Wang, L.M., “A Review of Diffuse Reflections in Architectural Acoustics”. Architectural Engineering - Faculty Publications. University of Nebraska, Lincoln, 2006.
- [19]. Prieto-Gajardo, C., Godinho, L., Amado Mendes, P., Barrigón-Morillas, J., “Numerical analysis of acoustic barriers with a diffusive surface using a 2.5d boundary element model”. Journal of Computational Acoustics, 1550009, 2015.
- [20]. D’Antonio, P., Cox, T.J., “Technical bulletin on the application of diffusion in critical listening rooms”, RPG Diffusor Systems, Inc, Upper Marlboro, MD, January 2003.
- [21]. Hargreaves, T.J., Cox, T.J., Lam, Y.W. and D’Antonio, P., “Surface diffusion coefficients for room acoustics: free field measures”, J. Acoust. Soc. Am., 108(4), pp. 1710-1720, 2000.
- [22]. Souza, Léa Cristina de; Almeida, Manuela; Bragança, Luis; Nascimento, Luiz Renato do, “Bê-á-bá da Acústica Arquitetônica: ouvindo a Arquitetura” Editora EDUFSCar, 2003.

- [23]. Patraquim, R.; Gil, P.; Godinho, L.; Amado-Mendes, P.; Mateus, D.; Pereira, A., “Behaviour of mixed absorptive-diffusive panels based in pseudo-random sequences”, 22nd International Congress on Sound and Vibration, 12-16 of June, Florence, Italy, 2015.
- [24]. Patraquim, R.; Gil, P.; Godinho, L.; Amado-Mendes, P.; Mateus, D.. “Estudo da influência do material constituinte no desempenho de difusores QRD”. Tecniacústica 2015, 21-23 de Outubro, Valência, Espanha, 2015.
- [25]. Carrión, Antoni, “Diseño acústico de espacios arquitectónicos”, Edicions UPC, 1998.
- [26]. Website: <http://www.subwoofer-builder.com/qrdude.htm>
- [27]. Cox, T.J., "The optimization of profiled diffusers," J. Acoust. Soc. Am., vol. 97, no. 5, pp. 2928-36, 1995.
- [28]. Perry, T., “The lean optimization of acoustic diffusers: design by artificial evolution, time domain simulation and fractals”, ELEC 498–Honours Thesis, University of Victoria, 2011.
- [29]. Zhu, Y., Fan X., Liang, B., Cheng, J., Jing, Y., “Ultra-thin Acoustic Metasurface-Based Schröder Diffuser”. 10.1103/PhysRevX.7.021034, 2017.
- [30] Jiménez, N., Cox, T., Romero-García, V., Groby, J.-P., “Metadiffusers: Deep-subwavelength sound diffusers”. Scientific reports, 7(1), 2017.
- [31]. Redondo, J., Sánchez-Morcillo, V., & Picó, R., “The potential for sonic sound diffusers (PSD)”. Building Acoustics, 18(1-2), 37-46, 2011.
- [32]. Redondo, J., Picó, R., Sánchez-Morcillo, V. J. & Woszczyk, W., “Sound diffusers based on sonic crystals”. The Journal of the Acoustical Society of America 134, 4412–4417, 2013.
- [33]. Redondo, J., Sánchez-Pérez, J., Blasco, X., Herrero, J. & Vorländer, M., “Optimized sound diffusers based on sonic crystals using a multiobjective evolutionary algorithm”. The Journal of the Acoustical Society of America 139, 2807–2814, 2016.
- [34]. Cox, T.J.; Dalenback, B.L.; D’Antonio, P.; Embrechts, J.J.; Jeon, J.Y. ; Mommertz, E.; Vorländer, M., “A tutorial on scattering and diffusion coefficients for room acoustic surfaces”. Acta Acustica united with Acustica, Vol.92, pp. 1-15, 2006.
- [35]. Mommertz, E., “Determination of scattering coefficients from the reflection directivity of architectural surfaces”. Applied Acoustics Vol. 60, pp. 201–203, 2000.

- [36]. RPG, “Tech Topic 08092013 Scattering versus Diffusion Coefficients”, 2013.
- [37]. Godinho, L.; Mateus, D.; Amado Mendes, P.; Pereira, A., “Difusores acústicos – Apontamentos de apoio”, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, 2015.
- [38]. AES Standards (2001), “AES Information Document for room acoustics and sound reinforcement systems – Characterization and measurement of surface scattering uniformity”. AES-4id-2001 (r2007), Audio Engineering Society, New York.
- [39]. ISO 17497-2: 2012. “Acoustics. Sound-scattering properties of surfaces. Part 2: Measurement of the directional diffusion coefficient in a free field”.
- [40]. ISO 17497-1: 2004. “Acoustics. Sound scattering properties of surfaces. Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room”.
- [41]. Vorländer, M.; Mommertz, E., “Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients”. *Applied Acoustics*: p. 60, 2000.
- [42]. Silva, Leandro, “Desenvolvimento de difusores acústicos”, Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil 2012/2013, especialização em construções, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Setembro 2013.
- [43]. Pereira, A.; Gonçalves, H.; Mateus, D.; Godinho, L.; Branco, F., “Assesment of diffusion coefficient provided by wooden panels”. *Forum Acusticum*, 7-12 of September, Kraków, Poland, 2014.
- [44]. NP EN 354: 2007, “Medição da absorção sonora em câmara reverberante”.
- [45]. Mateus, D.; Gonçalves, H.; Pereira, A.; Godinho, L.; Branco, F., “Avaliação do coeficiente de difusão proporcionado por diferentes tipos de superfície”. *Tecniacústica 2014*, 29-31 de Outubro, Múrcia, Espanha, 2014.
- [46] Y. Cao, Z. Hou, Y. Liu, “Finite difference time domain method for band-structure calculations of two-dimensional phononic crystals”, *Solid State Communications*, 132, 539-543, 2004.
- [47] J. Redondo, R. Picó, B. Roig, M.R. Avis, “Time domain simulation of sound diffusers using finite-difference schemes”, *Acta Acustica united with Acustica*, 93, 611–622, 2007.

- [48]. Wu, T., “Boundary element acoustics: fundamentals and computer codes”, WIT Press, 2000.
- [49]. A. Tadeu, J. António, “Use of Constant, linear, and Quadratic Boundary Elements in 3D Wave Diffraction Analysis”, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 24, 131-144, 2000.
- [50]. Marburg, S. “Six Boundary Elements per Wavelength. Is that Enough?”, *J. Comput. Acoust.*, 11, 25-51, 2002.
- [51]. von Estorff, O. (ed), “Boundary Element in Acoustics Advances and Applications”, WIT Press, Southampton, 2000.
- [52]. Godinho, L., António, J., Tadeu, A., “3D sound scattering by rigid barriers in the vicinity of tall buildings”, *Applied Acoustics*, 62, 11, 1229-1248, 2001.
- [53]. Hardy, R. L. “Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces”. *Journal of geophysical research*, 76(8), 1905-1915, 1971.
- [54]. Franke, R. “A critical comparison of some methods for interpolation of scattered data” (No. NPS53-79-003). Naval postgraduate School Monterey CA., 1979.
- [55]. Sarra, S. A., Kansa, E. J. “Multiquadric radial basis function approximation methods for the numerical solution of partial differential equations”. *Adv Comput Mech*, 2, 2009.
- [56]. Patraquim, R.; Gil, P.; Godinho, L.; Amado-Mendes, “RBF-based shapes optimized with genetic algorithms for sound diffusion”. *ICA 2016*, 5-9 of September, 2016, Buenos Aires, Argentina, 2016.
- [57]. Herrero, J., Blasco, X., Sánchez-Pérez, J., Redondo, J., “Design of sound phase diffusers by means of multiobjective optimization approach using ev-MOGA evolutionary algorithm”. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. DOI:10.1007/s00158-015-1367-0., 2015.