



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

Capacidade difusora de estruturas de cristais sónicos

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

Autor

Tony Teixeira de Almeida

Orientadores

Luís Manuel Cortesão Godinho

Paulo Jorge Rodrigues Amado Mendes

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

Coimbra, Julho, 2015

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar dirijo um agradecimento especial aos meus professores e orientadores deste trabalho, Professor Doutor Luís Manuel Cortesão Godinho e Professor Doutor Paulo Jorge Rodrigues Amado Mendes, pela partilha de conhecimentos, ajuda, orientação e disponibilidade ao longo destes meses.

Agradecer também ao Engenheiro Pedro Gil pelo apoio prestado na parte laboratorial e também pelas dicas que me deu sobre os programas dBBATI32 e Matlab, que auxiliaram-me no tratamento de dados.

Aos amigos Diogo, Zé, Botelho e Marco que ao longo destes anos me apoiaram e ajudaram sempre que necessitei, e contribuíram para o meu sucesso neste curso.

Por fim, o maior agradecimento é dirigido aos meus pais, irmã e avós, que estiveram sempre ao meu lado e me apoiaram nos momentos menos bons. Sem vocês isto nunca teria sido possível.

RESUMO

Os metamateriais são estruturas com propriedades físicas particulares, que nos últimos anos vêm sendo estudados em comparação com os materiais convencionais.

As estruturas periódicas de cristais sônicos são um caso particular dos metamateriais. Os cristais sônicos são estruturas dispostas periodicamente de forma a apresentar um determinado comportamento ao nível acústico. Dependendo dessas disposições podem-se obter estruturas periódicas a uma, duas e três dimensões.

O objetivo deste trabalho é verificar o funcionamento dos cristais sônicos quando estão a desempenhar um papel de difusor e comparar os resultados obtidos com os de uma superfície plana. Para cumprir este objetivo é necessário executar um procedimento experimental e realizar um tratamento de dados para obter os valores do coeficiente de difusão ao longo das frequências.

ABSTRACT

The metamaterials are structures with particular physical properties, which in recent years have been studied in comparison with conventional materials.

The periodic structures of sonic crystals are a particular case of metamaterials. The sonic crystals are periodically arranged structures in order to present a certain behavior to acoustic level. Depending on these provisions may obtain periodic structures with one, two and three dimensions.

The objective of this work is to verify the functioning of sonic crystals when they are to play a role of diffuser and compare the results with those from a flat surface. To achieve this objective it is necessary to perform an experimental procedure and perform a data processing to obtain values of the diffusion coefficient along the frequencies.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objectivos.....	2
1.3 Estrutura da tese.....	3
2. METAMATERIAIS.....	4
2.1 Cristais sônicos.....	5
2.2 “Bandgaps”.....	6
2.3 “Cloaking”.....	7
2.4 Barreiras acústicas.....	8
3. DIFUSORES.....	10
3.1 Difusor.....	10
3.2 Princípio de Huygens.....	12
3.3 Difusor de Schroeder.....	14
3.4 Notas finais.....	15
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	16
4.1 Introdução.....	16
4.2 Instalação laboratorial e equipamentos.....	16
4.3 Procedimento de ensaio.....	17
4.4 Tratamento de dados.....	19
4.5 Obtenção de parâmetros caracterizadores.....	22
4.5.1 Diagramas polares.....	22
4.5.2 Coeficiente de difusão.....	23
5. RESULTADOS.....	24
5.1 Configuração dos provetes a ensaiar.....	24
5.2 Apresentação dos resultados dos provetes com afastamento 2xd.....	25
5.2.1 Configuração retangular com afastamento 2xd.....	25
5.2.2 Configuração triangular com afastamento 2xd.....	28
5.3 Apresentação dos resultados dos provetes com afastamento 3xd.....	30
5.3.1 Configuração retangular com afastamento 3xd.....	30
5.3.2 Configuração triangular com afastamento 3xd.....	32
5.4 Comparação entre os provetes com afastamentos 2xd vs 3xd.....	34
5.4.1 Comparação entre os provetes retangulares com afastamentos 2xd vs 3xd.....	34

5.4.2	Comparação entre os provetes triangulares com afastamentos 2xd vs 3xd.....	35
5.5	Comparação entre os provetes de configuração rectangular e triangular.....	37
5.5.1	Comparação entre os provetes retangulares e triangulares afastados 2xd.....	37
5.5.2	Comparação entre os provetes retangulares e triangulares afastados 3xd.....	38
5.6	Comparação dos provetes em função das diferentes posições da fonte sonora.....	40
5.6.1	Comparação entre as estruturas com afastamento de 2xd.....	40
5.6.2	Comparação entre as estruturas com afastamento de 3xd.....	42
6.	CONCLUSÃO.....	45
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47
	Outra bibliografia consultada.....	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Metamaterial em Cubo (in Capa da revista Physics Today, junho 2004).....	4
Figura 2.2 – Escultura de Eusébio Sempere em Madrid (in Martínez-Sala et al, 1995).....	5
Figura 2.3 – Nível de atenuação sonora ao longo das diferentes frequências (in Martínez-Sala et al, 1995).....	6
Figura 2.4 – Presença de uma band gap (imagem adaptada de Garcia, 2010).....	7
Figura 2.5 – Pressão acústica, à esquerda sem o cilindro, ao meio com cilindro original, e à direita com o cilindro envolto no manto de camuflagem (in Cummer et Schurig, 2007).....	8
Figura 2.6 – À esquerda uma barreira acústica de cristais sónicos (in Garcia, 2010), à direita uma barreira acústica de betão (in portefólio empresa Jopires).....	9
Figura 3.1 – Cine Teatro da Cidade de Catamarca, Argentina (in catamarcactual.com).....	11
Figura 3.2 – À esquerda resposta polar de difusor 1D e à direita resposta polar de um difusor 2D (in Silva, 2013).....	11
Figura 3.3 – Princípio de Huygens aplicado numa superfície plana com incidência de uma onda normal a esta (in Cox e D`Antonio, 2004).....	12
Figura 3.4 – Princípio de Huygens aplicado numa superfície com reentrâncias de diferentes profundidades (in Cox e D`Antonio, 2004).....	13
Figura 3.5 – Princípio de Huygens aplicado numa superfície curva (in Cox e D`Antonio, 2004).....	13
Figura 3.6 – Difusor de Schroeder (in portefólio da empresa Ajasom).....	14
Figura 4.1 – Equipamentos utilizados no ensaio experimental, em cima o amplificador, à esquerda o analisador portátil, ao meio o microfone e pré-amplificador e à direita a fonte sonora.....	17
Figura 4.2 – Posições do microfone na zona especular.....	18
Figura 4.3 – Esquema da sala em condições semi-anecóicas, fonte sonora central a 0 graus, fonte sonora à esquerda a 35 graus e a fonte sonora à direita a -35 graus	18
Figura 4.4 – Esquema resumo do método para obtenção do coeficiente de difusão para uma amostra plana (imagem adaptada da norma AES-4id).....	21
Figura 4.5 – Exemplo de um diagrama polar de uma superfície plana aos 1000 Hz.....	22
Figura 4.6 – Exemplo de um gráfico de linhas comparando provetes de diferentes tipologias.....	23

Figura 5.1 – Configurações retangulares e triangulares com afastamento $2xd$ e $3xd$, no plano.....	24
Figura 5.2 – Em cima à esquerda cristal sónico retangular $2xd$, à direita em cima cristal sónico triangular $2xd$, em baixo à esquerda cristal sónico retangular $3xd$ e à direita em baixo cristal sónico triangular $3xd$	25
Figura 5.3 – Gráfico do coeficiente de difusão com a fonte a 0 graus, do cristal sónico retangular $2xd$	26
Figura 5.4 – Gráfico do coeficiente de difusão com a fonte a 35 graus, do cristal sónico retangular $2xd$	27
Figura 5.5 – Gráfico do coeficiente de difusão com a fonte a -35 graus, do cristal sónico retangular $2xd$	27
Figura 5.6 – Gráfico do coeficiente de difusão com a fonte a 0 graus, do cristal sónico triangular $2xd$	28
Figura 5.7 – Gráfico do coeficiente de difusão com a fonte a 35 graus do cristal sónico triangular $2xd$	29
Figura 5.8 – Gráfico do coeficiente de difusão com a fonte a -35 graus do cristal sónico triangular $2xd$	29
Figura 5.9 – Gráfico do coeficiente de difusão com a fonte a 0 graus do cristal sónico retangular $3xd$	30
Figura 5.10 – Gráfico do coeficiente de difusão com a fonte a 35 graus na imagem acima e abaixo a -35 graus, do cristal sónico retangular $3xd$	31
Figura 5.11 – Gráfico do coeficiente de difusão com a fonte a 0 graus, do cristal sónico triangular $3xd$	32
Figura 5.12 – Gráfico do coeficiente de difusão com a fonte a 35 graus, do cristal sónico triangular $3xd$	33
Figura 5.13 – Gráfico do coeficiente de difusão com a fonte a -35 graus, do cristal sónico triangular $3xd$	33
Figura 5.14 – À esquerda o gráfico do coeficiente de difusão para as estruturas de 1 fila, ao meio as estruturas de 2 filas e à direita as estruturas de 3 filas, todas com a fonte a 0 graus.....	34
Figura 5.15 – À esquerda o gráfico do coeficiente de difusão para as estruturas de 1 fila, ao meio as estruturas de 2 filas e à direita as estruturas de 3 filas, todas com a fonte a “35” graus.....	35
Figura 5.16 – À esquerda o gráfico do coeficiente de difusão para as estruturas de 1 fila, ao meio as estruturas de 2 filas e à direita as estruturas de 3 filas, todas com a fonte a 0 graus.....	36

Figura 5.17 – À esquerda o gráfico do coeficiente de difusão para as estruturas de 1 fila, ao meio as estruturas de 2 filas e à direita as estruturas de 3 filas, todas com a fonte a “35” graus.....	36
Figura 5.18 – À esquerda o gráfico do coeficiente de difusão para as estruturas de 2 filas, e à direita as estruturas de 3 filas, ambas com a fonte a 0 graus.....	37
Figura 5.19 – À esquerda o gráfico do coeficiente de difusão para as estruturas de 2 filas, e à direita as estruturas de 3 filas, ambas com a fonte a -35 graus.....	38
Figura 5.20 – À esquerda o gráfico do coeficiente de difusão para as estruturas de 2 filas, e à direita as estruturas de 3 filas, ambas com a fonte a 0 graus.....	39
Figura 5.21 – À esquerda o gráfico do coeficiente de difusão para as estruturas de 2 filas, e à direita as estruturas de 3 filas, ambas com a fonte a -35 graus.....	40
Figura 5.22 – Gráfico do coeficiente de difusão para as estruturas retangular/triangular 2xd com 1 fila.....	41
Figura 5.23 – À esquerda o gráfico do coeficiente de difusão para a estrutura retangular 2xd e à direita para a estrutura triangular 2xd ambas com 2 filas.....	41
Figura 5.24 – À esquerda o gráfico do coeficiente de difusão para a estrutura retangular 2xd e à direita para a estrutura triangular 2xd ambas com 3 filas.....	42
Figura 5.25 – À esquerda o gráfico do coeficiente de difusão para a estrutura retangular 3xd e à direita para a estrutura triangular 3xd ambas com 1 fila.....	43
Figura 5.26 – À esquerda o gráfico do coeficiente de difusão para a estrutura retangular 3xd e à direita para a estrutura triangular 3xd ambas com 2 filas.....	44
Figura 5.27 – À esquerda o gráfico do coeficiente de difusão para a estrutura retangular 3xd e à direita para a estrutura triangular 3xd ambas com 3 filas.....	44

SIMBOLOGIA

dB – Decibel

Hz –Hertz

L – Pressão sonora

d – diâmetro dos cilindros

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

O ruído pode ser definido como um som indesejado para o recetor, ou seja, uma ameaça para a sua saúde e bem-estar.

Os principais efeitos negativos do ruído na população são: perturbação do sono e nível de concentração; aumento do nível de stresse e irritabilidade; aumento da probabilidade de problemas cardiovasculares; e deterioração da audição. Estes efeitos dependem de alguns fatores, primeiramente de pessoa para pessoa, e depois do tempo de exposição, do tipo de ruído e da distância ao mesmo. Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), na Europa, 1 em cada 3 pessoas durante o dia e 1 em cada 5 pessoas durante a noite têm problemas provocados pelo ruído de tráfego.

O Regulamento Geral do Ruído (R.G.R.) é o documento que limita os valores de exposição ao ruído. Para as zonas mistas o L_{den} tem o valor de 65 dB(A) e o L_n de 55 dB(A), para as zonas sensíveis o regulamento é mais rígido, o L_{den} tem o valor de 55 dB(A) e o L_n de 45 dB(A). O indicador L_{den} representa a média ponderada das 24 horas do dia, enquanto que o L_n representa o ruído médio durante o período noturno.

Existem diversos tipos de soluções para tentar mitigar este problema. Soluções ao nível da fonte, ao nível do recetor e soluções ao nível do meio de propagação que consiste na colocação de obstáculos entre a fonte e o recetor. Na maioria das vezes utiliza-se barreiras acústicas, que podem ser naturais ou artificiais. Nas naturais podem ser utilizadas árvores ou outro tipo de vegetação desde que esteja entre a fonte e o recetor com uma altura razoável; as artificiais podem ser constituídas por betão, acrílico, alumínio entre outros tipos de materiais.

A colocação de uma barreira acústica faz com que a trajetória do som seja interrompida, uma parte vai ser transmitida pela barreira, outra absorvida pelo material desta, outra pode ser difratada e uma parte vai ser refletida em direção à fonte provocando ecos.

As barreiras de cristais sónicos são estruturas periódicas que impedem a passagem do som em determinados intervalos de frequências (“bandgaps”) e que também podem funcionar como

difusores no sentido de evitar que uma parte da energia sonora retorne, refletida, em direção à fonte.

O difusor acústico é a solução apropriada para executar uma dispersão da energia sonora e garantir uma boa qualidade acústica. Pode-se considerar um difusor ideal aquele que consegue, ao receber uma onda sonora de qualquer direção, uma dispersão constante em todas as direções.

Mas nem todas as salas e outros espaços necessitam da mesma solução a nível acústico, para isso é preciso conceber vários ensaios para compreender qual o desempenho destas e depois perceber qual a melhor solução para cada situação.

No caso dos difusores trata-se exatamente do mesmo, verificar o desempenho das superfícies difusoras e averiguar se é necessário melhorar e em que aspeto isso pode acontecer.

Os difusores acústicos são normalmente utilizados em salas de teatro, cinema, estúdios musicais entre outras situações. Para que estes tipos de espaços obtenham um desempenho acústico adequado às suas necessidades é necessário que os difusores acústicos cumpram o seu papel com eficiência.

São diversos os estudos realizados nos últimos anos para verificar se os cristais sónicos apresentam um bom desempenho quando assumem o papel de difusores.

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo principal avaliar a capacidade difusora de estruturas de cristais sónicos, em várias configurações, através da realização de ensaios em laboratório.

Para a execução dos ensaios laboratoriais foi necessário construir vários provetes com diferentes configurações, para se obter o máximo de resultados possível e posteriormente analisá-los para se chegar a uma conclusão final sobre o comportamento ao nível difusor destas estruturas particulares.

Para além de avaliar o desempenho, também se irá comparar os resultados deste tipo de estruturas com os resultados de uma pedra lisa e perceber quais as principais diferenças entre elas.

1.3 Estrutura da tese

Esta dissertação encontra-se dividida em seis capítulos.

O primeiro contém a introdução que abrange o enquadramento do tema neste trabalho bem como os objetivos principais e a estruturação do mesmo.

No capítulo seguinte é apresentada a definição e algumas das utilidades dos metamateriais, no caso particular dos cristais sónicos.

No terceiro capítulo aborda-se os difusores, alguns dos conceitos mais relevantes e também o modelo mais antigo e importante.

O capítulo quatro trata o procedimento laboratorial, que consiste na caracterização e descrição da instalação laboratorial, dos equipamentos e o procedimento propriamente dito. É também uma explicação breve da forma como os dados obtidos nos ensaios são trabalhados, para ser mais tarde possível apresentar os resultados do coeficiente de difusão.

No quinto capítulo são descritas as diferentes configurações ensaiadas. São também exibidos os resultados dos ensaios das diferentes estruturas e algumas comparações mais relevantes entre as várias configurações.

A conclusão aparece no capítulo seis, onde se apresentam umas conclusões gerais, bem como algumas propostas para trabalhos a desenvolver no futuro.

2 METAMATERIAIS

Os metamateriais caracterizam-se por possuírem propriedades físicas que não se encontram na natureza, ou até existem mas são de difícil acesso. As suas propriedades não dependem apenas e só dos materiais que as constituem, mas também da sua disposição espacial, ou seja, do seu ordenamento e forma estrutural, normalmente dispostos em grelhas periódicas.

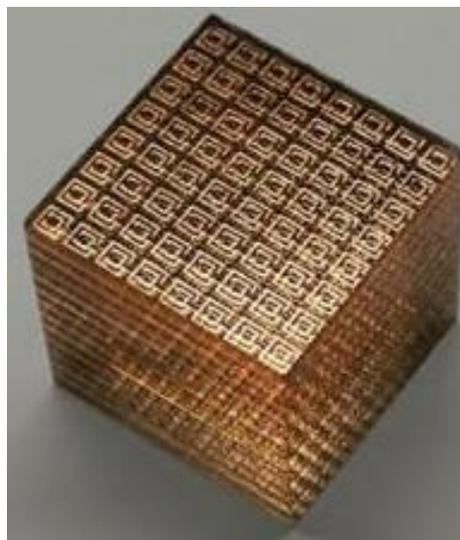


Figura 2.1 – Metamaterial em Cubo (in Capa da revista Physics Today, junho 2004)

Victor G. Veselago foi o primeiro físico, em 1968, a publicar uma análise a materiais com características que não se encontravam na natureza, isto é, materiais com alguns parâmetros constitutivos negativos (Veselago et al, 2006). Neste caso, tratou-se de materiais com permissividade magnética e permeabilidade elétrica negativas. Dá-se o fenómeno de índice de refração negativo, quando acontece simultaneamente permissividade e permeabilidade negativas.

Quando a luz muda de um meio de propagação para outro, por exemplo do ar para a água, ocorre refração devido à diferença de velocidade de propagação dos dois meios. Um exemplo é quando estamos numa piscina e as nossas pernas parecem tortas e com tamanho diferente do original.

As lentes de vidro podem curvar a luz devido ao seu índice de refração ser maior que o do ar. Se refletirmos naquilo que Veselago demonstrou, a existência de índices de refração negativos, podem levar a pensar em várias utilidades, uma delas a camuflagem ou “cloaking” que vai ser abordado mais à frente.

2.1 Cristais sônicos

Os cristais sônicos são estruturas dispostas periodicamente de forma a apresentar um determinado comportamento na propagação de vários tipos de ondas. Dependendo dessas disposições podem-se obter estruturas periódicas a uma, duas e três dimensões.

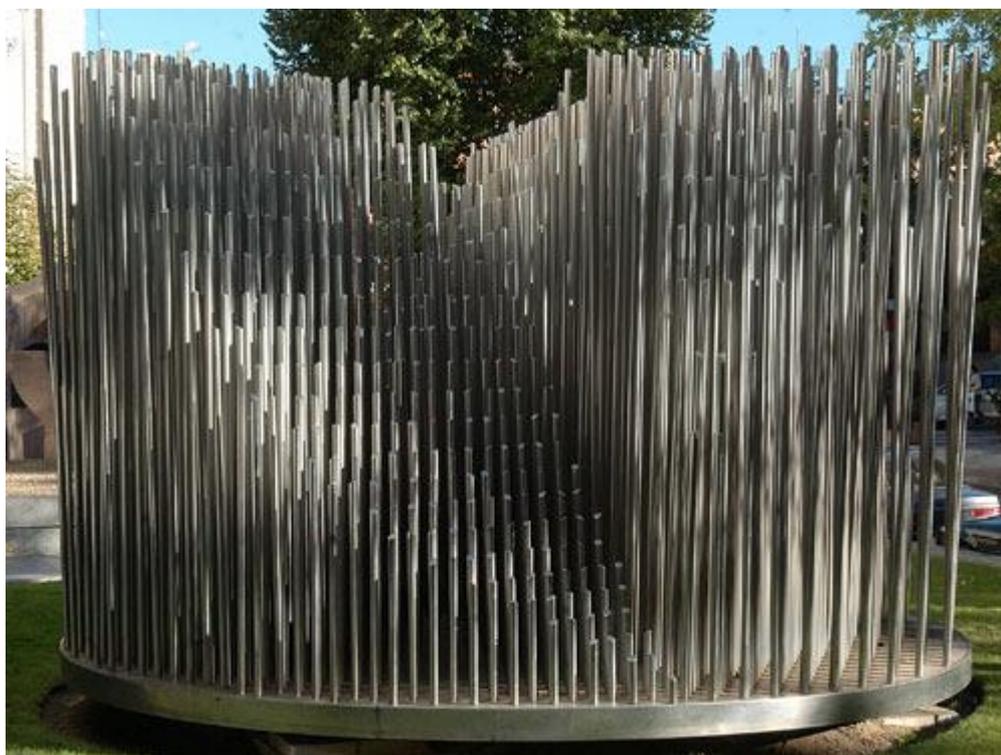


Figura 2.2 – Escultura de Eusébio Sempere em Madrid (in Martínez-Sala et al, 1995)

Martínez-Sala et al, (1995) mediram a atenuação do som provocado pela estrutura periódica da figura 2.2, e chegaram à conclusão que algumas gamas de frequência impediam a transmissão do som. Estavam na presença das “bandgaps”, que são bandas de frequência que estão impedidas nas estruturas periódicas. E também o contrário sucede, isto é, noutras bandas de frequência as ondas propagam-se livremente, designadas por guias de onda.

Na figura 2.3 encontram-se os diferentes níveis de atenuação sonora ao longo das diferentes gamas de frequência, correspondentes à estrutura da figura 2.2.

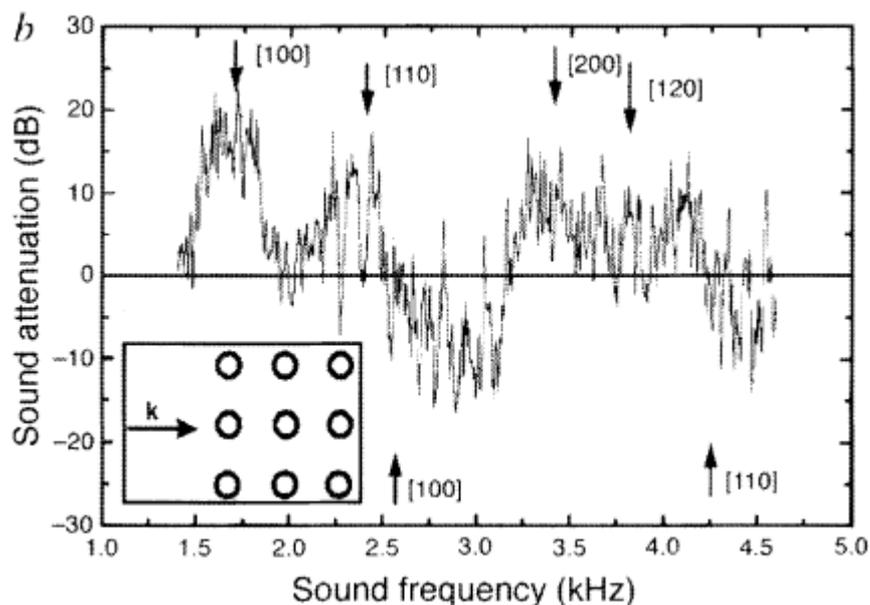


Figura 2.3 – Nível de atenuação sonora ao longo das diferentes frequências (in Martínez-Sala et al, 1995)

Os dois aspetos mais importantes, nestas estruturas periódicas, são a sua configuração geométrica e também o tipo de material que as constituem, devido às propriedades acústicas que apresentam. Adotando diferentes configurações e/ou tipos de material pode originar um grande número de soluções, escolhendo as mais adequadas consoante o tipo de necessidade.

Watts (1995) analisou o problema das reflexões entre barreiras paralelas que pode aumentar o valor do nível de ruído nas zonas mais próximas destas. Uma solução que pode ser eficaz é o uso de cristais sônicos com capacidade de absorção sonora, diminuindo as possíveis reflexões que possam ocorrer entre as barreiras.

2.2 “Bandgaps”

Numa estrutura periódica, em determinadas bandas de frequência o som não se vai transmitir, a estes intervalos de frequência dá-se o nome de “Bandgaps”. Na figura 2.4 encontra-se

representado um exemplo de “Bandgap” entre os 1000Hz e os 1750Hz, ou seja, nenhuma onda sonora está representada no gráfico neste intervalo de frequência.

As características das estruturas periódicas que mais influenciam a presença e localização das “bandgaps”, são o tamanho dos dispersores e a distância entre os centros destes.

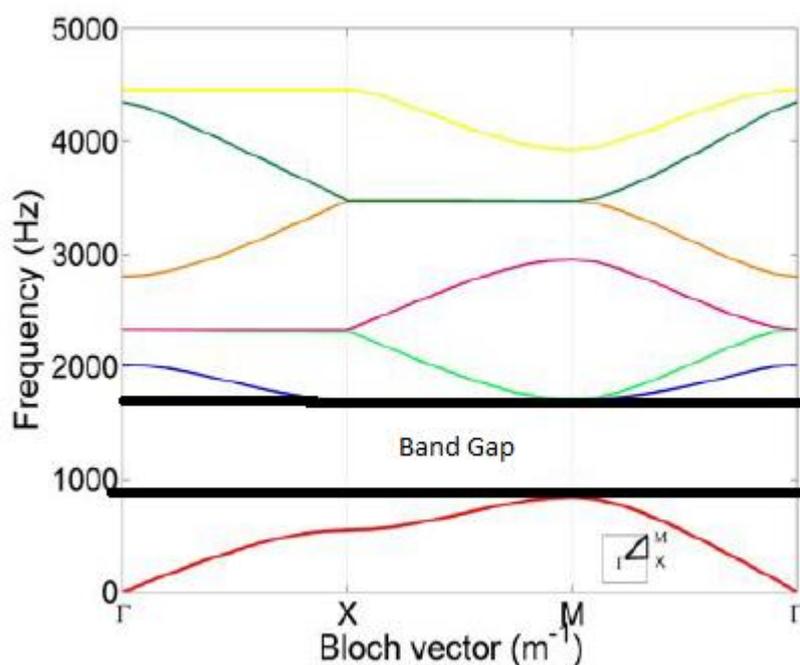


Figura 2.4 – Presença de uma band gap (imagem adaptada de Garcia, 2010)

2.3 “Cloaking”

O termo “Cloaking” traduzido para português significa disfarce. No campo da acústica é o fenómeno que permite esconder ou camuflar o movimento das ondas.

Cummer e Schurig (2007) foram os primeiros a estudar experimentalmente este fenómeno, utilizando um cilindro envolvido num revestimento com características especiais. Esse revestimento tem a capacidade de fazer com que qualquer onda incidente no cilindro se envolva à volta deste, como é facilmente visível na imagem à direita da figura 2.5.

A razão principal para a ocorrência da camuflagem é a anisotropia do material, ou seja, apresenta uma certa propriedade física que varia com a direção. Uma forma muito simples de

simular este tipo de material é através da utilização de dois materiais isotrópicos de forma intercalada.

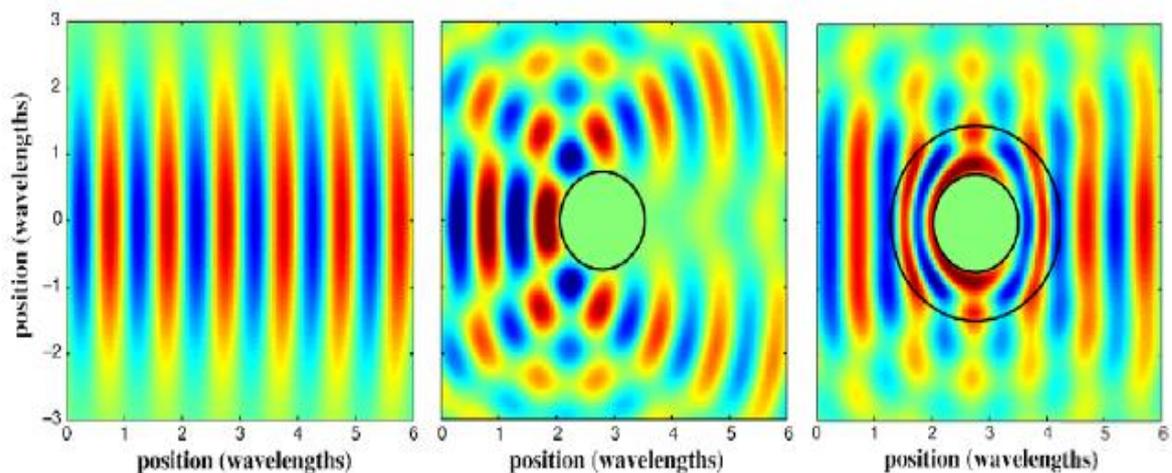


Figura 2.5 – Pressão acústica, à esquerda sem o cilindro, ao meio com cilindro original, e à direita com o cilindro envolto no manto de camuflagem (in Cummer e Schurig, 2007)

2.4 Barreiras acústicas

As barreiras acústicas são estruturas que servem para atenuar o ruído, através da presença física desta entre a fonte e o recetor. Normalmente são utilizadas para atenuar o ruído de tráfego, que possa causar algum incómodo à população que vive nas proximidades.

O nível de atenuação sonora originado pelas barreiras depende essencialmente de três aspectos: as propriedades do material que a forma, as suas dimensões e a distância à fonte. Quando se pretende elevar o nível de desempenho das barreiras o mais usual é aumentar o tamanho destas, o que em certos casos não é muito viável. Nem sempre é possível construir estes tipos de estruturas quando ostentam uma massa elevada. Outro aspeto que também não favorece o aumento da geometria das barreiras é a impressão de mau estar que a população mais próxima pode sentir.

Para combater os aspetos negativos assinalados anteriormente foram estudados outros tipos de barreiras que apresentam algumas vantagens em relação às barreiras acústicas mais convencionais. Entre os vários tipos analisados, o mais importante a realçar neste trabalho são as barreiras acústicas formadas por cristais sónicos. Estas estruturas periódicas, compostas por

cilindros verticais, apresentam como vantagens, em relação às barreiras usuais, o menor peso da estrutura, a maior facilidade de construção, a menor resistência ao vento e a capacidade de funcionamento como difusor provocando desde logo uma diminuição dos ecos entre a fonte e a barreira.

Vários foram os estudos efetuados para descobrir qual o nível de eficiência que os cristais sônicos possuem na atenuação do ruído. Sánchez-Pérez et al (2002) ensaiaram uma estrutura que continha tubos de PVC com 3 metros de comprimento e 16 centímetros de diâmetro numa configuração triangular com afastamento de 22 centímetros entre os centros dos tubos, numa plataforma de 7,2 metros de comprimento e 1,1 metros de largura. Chegaram à conclusão que, para certas frequências, estas estruturas, exibiam valores, para o nível de atenuação do ruído, bastante semelhante aos das barreiras mais convencionais, tendo ainda a vantagem de poder ajustar a banda de atenuação sonora ao alterar a geometria dos cilindros na plataforma.



Figura 2.6 – À esquerda uma barreira acústica de cristais sônicos (in Garcia, 2010), à direita uma barreira acústica de betão (in portefólio empresa Jopires)

3 DIFUSORES

3.1 Difusor

Um difusor é uma superfície que serve essencialmente para refletir, espalhar e distribuir a energia sonora de modo a contribuir, com eficácia, para um bom desempenho acústico de um determinado espaço. É também importante distinguir difusores de absorsores; o difusor não tem como finalidade absorver as ondas sonoras, um absorsores acústico tem exatamente essa função.

No estudo de acústica de edifícios existem três tipos de situações a estudar: propagação do som através de materiais sólidos, que consiste basicamente nos sons/ruídos de percussão; propagação de som entre dois espaços fisicamente separados, que serve para avaliar os isolamentos acústicos; e por fim a propagação do som em espaços fechados sendo neste último que encaixam os difusores, entre outros sistemas de correção acústica.

Os difusores são utilizados essencialmente em auditórios, teatros e estúdios para corrigir alguns problemas acústicos. Uma das principais dificuldades são os ecos, estes são causados por reflexões que chegam ao ouvinte depois do som direto. Quando este problema é corrigido de forma eficaz o ouvinte recebe o som apenas numa única vez e terá a sensação de que este chega de todas as direções.

Outro problema que também é importante solucionar são as sombras acústicas, ou seja são as zonas em que o som não chega ao ouvinte devido à presença de um obstáculo entre estes. Por exemplo um auditório, com o objetivo de ter uma maior lotação, que apresente um balcão com uma profundidade excessiva, vai fazer com que algumas zonas sob este não recebam qualquer som ou então de modo defeituoso.

Maristany et al (2002) na sua proposta de reabilitação do Cine Teatro de Catamarca deparam-se com este problema, entre muitos outros. Uma das soluções foi a modificação do teto falso na zona que estava por baixo do balcão, para que este assumisse um papel de difusor e fizesse com que o som chegasse a todos os ouvintes dessa área.



Figura 3.1 – Cine Teatro da Cidade de Catamarca, Argentina (in catamarcaactual.com)

A difusão sonora é o fenómeno em que a energia sonora incidente é uniformemente dispersada, de forma a provocar uma distribuição regular e também, por consequência, a eliminação das reflexões. Numa sala musical ideal, todos os pontos onde estariam recetores deveriam receber o som ao mesmo tempo e com a mesma intensidade. Mas uma sala com estas condições ideais é difícil encontrar, embora com o passar dos anos tenha havido uma evolução significativa no tratamento e correção nestes tipos de espaços.

De forma geral os difusores devem colocar-se nos sítios onde ocorrem as primeiras reflexões sonoras, num campo próximo da fonte sonora, fazendo uma espécie de condução para as ondas sonoras, fazendo com que todas cheguem ao mesmo tempo ao recetor. Também nas paredes de fundo é usual colocar superfícies difusoras para evitar os ecos.

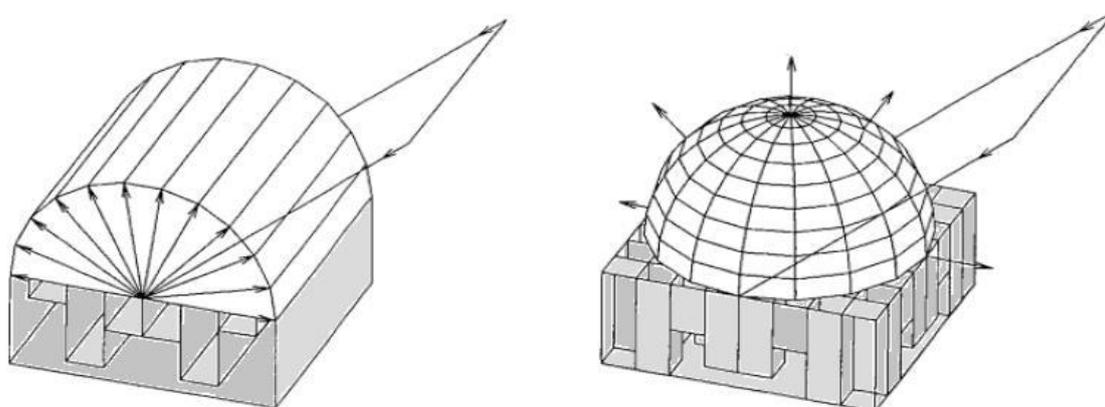


Figura 3.2 – À esquerda resposta polar de difusor 1D e à direita resposta polar de um difusor 2D (in Silva, 2013)

A figura 3.2 mostra a diferença da resposta polar entre difusores 1D e 2D; nos difusores 1D, também conhecidos como unidimensionais, o som é dispersado numa forma semicilíndrica enquanto nos 2D é dispersado em forma semiesférica. A resposta no difusor 1D depende do ângulo de incidência, já no 2D isso não acontece é independente do ângulo de incidência. Também é possível relacionar a quantidade de energia dispersa entre estes dois tipos de difusores. O difusor 2D ao dispersar a energia de forma omnidirecional espalha metade da energia em relação ao difusor 1D para uma mesma direção.

3.2 Princípio de Huygens

Em 1678 o físico, matemático e astrónomo Christiaan Huygens ajudou a entender, de forma fortuita, o fenómeno da difusão. As construções de Huygens serviam inicialmente para explicar o fenómeno do espalhamento da luz, mais tarde as mesmas construções foram adaptadas com sucesso à acústica.

O princípio de Huygens propõe que a superfície de espalhamento seja dividida num conjunto de fontes sonoras equidistantes que propagam ondas hemisféricas. Se desenharmos uma linha a unir os pontos mais afastados destas ondas formam-se linhas retas, pois as fontes estão à mesma distância e em fase. A estas linhas chamam-se frentes de onda e mostram a direção e propagação da onda refletida.

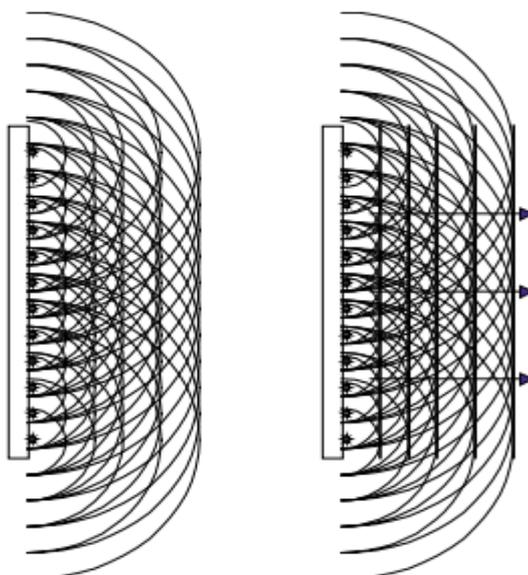


Figura 3.3 – Princípio de Huygens aplicado numa superfície plana com incidência de uma onda normal a esta (in Cox e D`Antonio, 2009)

Ao contrário da figura 3.3, se o ângulo de incidência for diferente de 90 graus, algumas ondas em fase vão destruir-se umas às outras, ou seja, em certas direções não haverá propagação de ondas. Se se alterar as superfícies, através da introdução de saliências e reentrâncias de diferentes profundidades, transformam-se em superfícies difusoras.

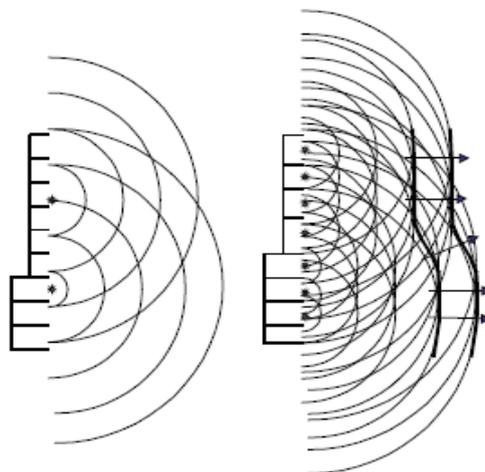


Figura 3.4 – Princípio de Huygens aplicado numa superfície com reentrâncias de diferentes profundidades (in Cox e D`Antonio, 2009)

Na figura 3.4 denota-se que, quando as ondas hemisféricas se intercetam, ocorrem interferências que fazem com que aconteçam desvios nas direções das frentes de onda. Este é um exemplo simples, mas é possível, através de outras reentrâncias e saliências, que as ondas ainda se desviem em mais direções, tornando um campo ainda mais difuso.

Outra maneira de se dispor de superfícies difusoras é através da introdução de superfícies curvas, o formato curvo faz com que a energia vinda de qualquer direção seja dispersada.

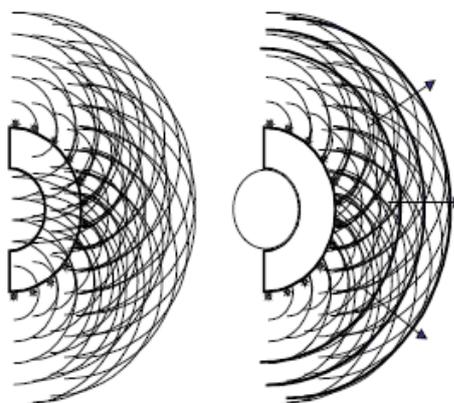


Figura 3.5 – Princípio de Huygens aplicado numa superfície curva (in Cox e D`Antonio, 2009)

3.3 Difusor de Schroeder

Manfred Schroeder foi um físico alemão que, em 1970, revolucionou por completo o fenômeno da difusão, com a invenção do tipo de difusor mais famoso da história com o qual partilha a mesma denominação.



Figura 3.6 – Difusor de Schroeder (in portfólio da empresa Ajasom)

A principal característica deste tipo de difusores é que, através de algumas formulações matemáticas, os engenheiros acústicos conseguem produzir superfícies difusoras sabendo à partida qual vai ser o seu desempenho acústico. Estes difusores, formados por saliências e reentrâncias, são dimensionados de forma bastante simples; as reentrâncias terão a mesma largura mas diferentes profundidades, enquanto que as saliências serão bem mais estreitas e rígidas para impedir fenômenos de vibração.

O princípio de funcionamento destes difusores é a alteração das fases de onda, quando as ondas sonoras incidem em cada concavidade de profundidade variável e percorrem assim distâncias diferentes, vai fazer com que as ondas à saída das reentrâncias obtenham diferentes fases. Esta diferença de fases, provocada propositadamente, irá fazer com que uma estrutura deste tipo disperse o som uniformemente.

Schroeder utilizou como base, para o dimensionamento do difusor residual quadrático, a teoria numérica formada por Gauss, de modo a obter uma sequência de reentrâncias e de saliências e respetivas dimensões.

3.4 Considerações finais

Redondo et al (2013) utilizaram cilindros, dispersos periodicamente, a funcionar como difusores, ou seja, mediram o coeficiente de difusão ao longo das frequências. As três situações analisadas foram: os cilindros à frente de uma superfície plana; a superfície plana e um difusor QR “Quadratic Residue”. Numa primeira fase os cristais sônicos à frente da superfície plana não foram muito eficazes, comparando com o resultado obtido pelo difusor QR. Depois, efetuou-se uma alteração no afastamento dos cilindros em diferentes grupos, que provocou um aumento do nível do coeficiente de difusão e uma redução da desvantagem que tinha perante o difusor QR.

Neste trabalho vai ser seguido um modelo com algumas semelhanças ao que está acima mencionado. Vai ser calculado o valor do coeficiente de difusão, mas apenas para duas situações: a superfície plana e os cilindros dispostos periodicamente, mas desta feita sem nada de trás destes.

4 PROCEDIMENTO LABORATORIAL

4.1 Introdução

Neste capítulo vai ser descrito o procedimento laboratorial que permite avaliar a capacidade difusora de provetes de cristais sónicos em várias configurações e também realizar comparações com um provete de superfície lisa.

Foi com base na norma ISO/CD 17497-2 (2005) que os ensaios foram efetuados e posteriormente a sua análise, podendo assim avaliar as diversas soluções estudadas quanto à sua capacidade difusora.

4.2 Instalação laboratorial e equipamentos

A atividade laboratorial desenrolou-se na cave do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, numa sala em condições semi-aneecóicas. Esta sala tem de dimensões 4,2 metros por 3,5 metros e 2,35 metros de altura; o teto e as paredes estão revestidos por um material exposto que apresenta um coeficiente de absorção aproximadamente de um a partir da banda de terço de oitava de 160 Hz. Esta sala exhibe ainda um nível de ruído de fundo de $LA_{[100-5000]Hz} = 17 \text{ dB(A)}$.

Em termos de equipamentos utilizaram-se um microfone com pré-amplificador, uma fonte sonora, um amplificador, um analisador portátil e um computador com o programa dBBATI32. O microfone da marca “G.R.A.S. Sound and Vibration” do modelo 40AF ½ tem a função de recetor das respostas impulsivas; este microfone também é constituído por um pré-amplificador da mesma marca do modelo 26AK-S1 ½. A fonte sonora utilizada é da marca “RTO”, e, tal como a sua designação indica, é a partir desta que o ruído é emitido. O amplificador, da marca “InterM” do modelo M700, controla a potência sonora que é emitida pela fonte. O computador portátil equipado com o programa dBBATI32 juntamente com o analisador portátil do modelo Symphonie, da marca “01dB” servem, em conjunto, para registar e analisar em tempo real as medições efetuadas.



Figura 4.1 – Equipamentos utilizados no ensaio experimental, em cima o amplificador, à esquerda o analisador portátil, ao meio o microfone e pré-amplificador e à direita a fonte sonora

4.3 Procedimento de ensaio

O primeiro passo neste procedimento experimental foi assinalar na sala a localização do provete, as posições de resposta impulsiva recebidas pelo microfone e também a posição da fonte sonora. O provete ficou exatamente a meio da parede de maior comprimento, a partir do centro deste, desenhou-se uma semicircunferência de raio 1,9 metros dividida em 36 espaços iguais, ou seja, de modo a alcançar as 37 posições de medição do microfone que a norma ISO/CD 17497-2 sugere, indo dos 90 aos -90 graus de 5 em 5 graus. Um requisito importante na colocação dos microfones que a norma indica, é que pelo menos 80% das posições deste devem estar fora da zona especular, ou seja, podem estar, no máximo, 20% das posições de resposta impulsiva entre as duas linhas imaginárias traçadas a partir dos extremos do provete até ao arco que contém os recetores. Como a figura 4.2 mostra, apenas 3 das 37 posições estão nessa zona, ou seja, cerca de 92% estão fora dela.

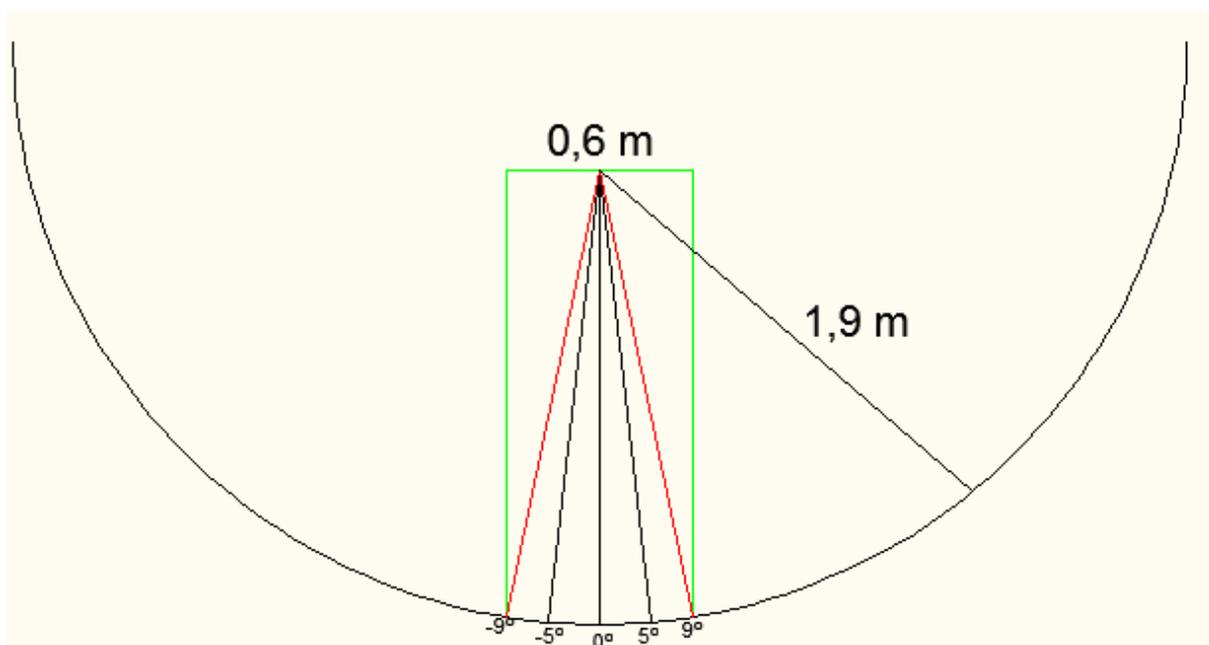


Figura 4.2 – Posições do microfone na zona especular

A fonte sonora foi colocada a 3 metros do provete, o máximo exequível naquela sala. Segundo a norma atrás referida, a fonte pode ser colocada a 0, 35 e -35 graus em relação ao provete, a 60 e 80 graus não foi possível devido às dimensões limitadas da sala.

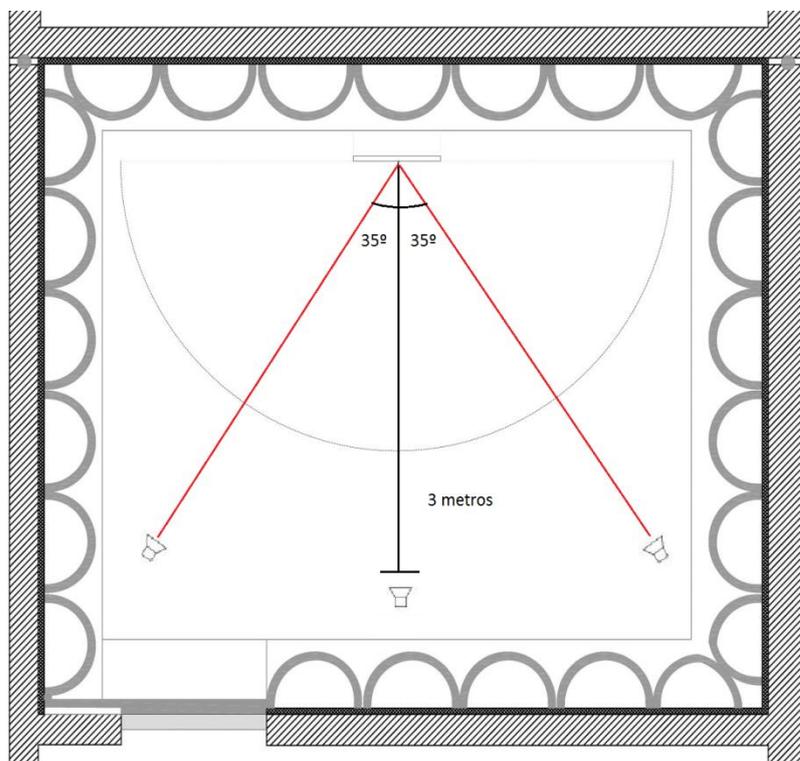


Figura 4.3 – Esquema da sala em condições semi-aneecóicas, fonte sonora central a 0 graus, fonte sonora à esquerda a 35 graus e a fonte sonora à direita a -35 graus

De seguida, com o programa dBATI32 configurou-se uma aquisição para ser utilizada ao longo dos ensaios, com uma escala 1:1 e emissão dos 100 Hz aos 4000 Hz. Usou-se a técnica de MLS (“Maximum-Lenght-Sequences”), para medir as respostas impulsivas, com o máximo de sequências definido por $2^{14}-1=16383$, com uma duração de 20,5 segundos.

Antes de começar as medições foi necessário calibrar o microfone com a ajuda do respetivo calibrador. O manual de instruções do dBATI32 indica que deve ser calibrado no intervalo entre 92,5 dB e 95,5 dB, foi então escolhido 94 dB pois trata-se da média dos dois. O amplificador foi ligado no nível 13, de maneira a limitar a oscilação da fonte, para evitar que esta se movimentasse sozinha com a potência das vibrações geradas.

Por fim, colocou-se o microfone na posição -90 graus e correu-se o programa, de emissão e receção do sinal, repetindo-se este passo sequencialmente ao longo das 37 posições. O microfone foi disposto o máximo possível numa posição perpendicular à semicircunferência e os fios de ligação deste distribuídos fora da semicircunferência e encostados ao chão para que perturbassem o mínimo possível as ondas sonoras vindas da fonte.

Colocou-se a fonte sonora na posição a 0 graus e emitindo um ruído branco ao longo de 20,5 segundos contendo todas as bandas de frequência a analisar. De igual forma repetiu-se o procedimento até aqui descrito para as posições 35 e -35 graus da fonte.

Este ensaio foi realizado primeiro com a “sala vazia”, isto é, sem o provete apenas com a fonte e microfone e depois foi concretizado com os vários provetes testados. Este passo vai ser importante para o tratamento de dados.

4.4 Tratamento de dados

A figura 4.4 representa um esquema resumo do tratamento de dados, que permite obter o valor do coeficiente de difusão. Esta figura específica trata do caso de uma superfície plana e apresenta os passos necessários para calcular este parâmetro, estes passos vão ser explicados pormenorizadamente de seguida.

Como atrás foi dito, em primeiro lugar mediu-se a resposta de fundo sem o difusor ($h_2(t)$), ou seja, o microfone registou em cada posição o som produzido pela fonte. Depois, avaliou-se a

resposta de fundo já com o difusor na sua posição natural ($h_1(t)$). Através da subtração entre o registo de fundo com o difusor e a resposta de fundo agora sem difusor, isolou-se a resposta deste. A norma ISO/CD 17497-2 destaca a “Janela Temporal” que tem o objetivo de isolar as reflexões do provete em estudo das reflexões residuais. O ajuste da janela temporal é realizado através do tempo mais curto e longo das reflexões de interesse; o mais curto é obtido através de considerações geométricas, o mais longo abrange mais do que as reflexões de primeira ordem, de modo a assegurar a obtenção da resposta completa do provete em questão. Para a janela temporal deve-se garantir que o rácio sinal-para-ruído, *signal-to-noise* (S / N) seja de 40 dB para superfícies de referência planas. O valor de S/N é determinado para cada banda de um terço de oitava através da seguinte expressão, em que T é a janela temporal adotada:

$$\frac{S}{N} = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\int_T [h_1(t) - h_2(t)]^2 dt}{\int_T h_2^2(t) dt} \right\} \quad (1)$$

O passo seguinte foi transformar as respostas impulsivas de cada posição do microfone para o domínio da frequência, para isso aplicou-se a Transformada de Fourier aos sinais impulsivos.

Por conseguinte, determinou-se os gráficos polares somando as frequências de resposta em 1/3 de banda de oitava, obtendo-se as pressões sonoras, L_i , em decibéis. Como todas as respostas foram medidas sobre um mesmo arco não foi necessário efetuar correções no cálculo do nível da pressão sonora.

Finalmente determinou-se o coeficiente de difusão, para cada frequência, a partir das respostas polares, através de uma função de autocorrelação. Para se usar a função de autocorrelação da norma ISO/CD 17497-2 têm que ser cumpridos alguns aspetos importantes, entre eles: a posição fixa da fonte e cada posição do microfone receber impulsos da mesma área de medição para frequências em terço de oitava. Obedecendo-se a estes preceitos é possível calcular o coeficiente de difusão direcional através da seguinte função:

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

em que θ é o ângulo de incidência, L_i os valores de pressão sonora obtidos a partir das respostas polares em dB pelo recetor i e n é o número de recetores.

Outro modo de avaliar o parâmetro coeficiente de difusão é analisar uma situação em função de outra mais genérica. Neste caso, pode-se optar por fazer uma normalização através dos resultados de uma superfície lisa, utilizando a expressão:

$$d_{\theta,n} = \frac{d_{\theta} - d_{\theta,r}}{1 - d_{\theta,r}} \quad (3)$$

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

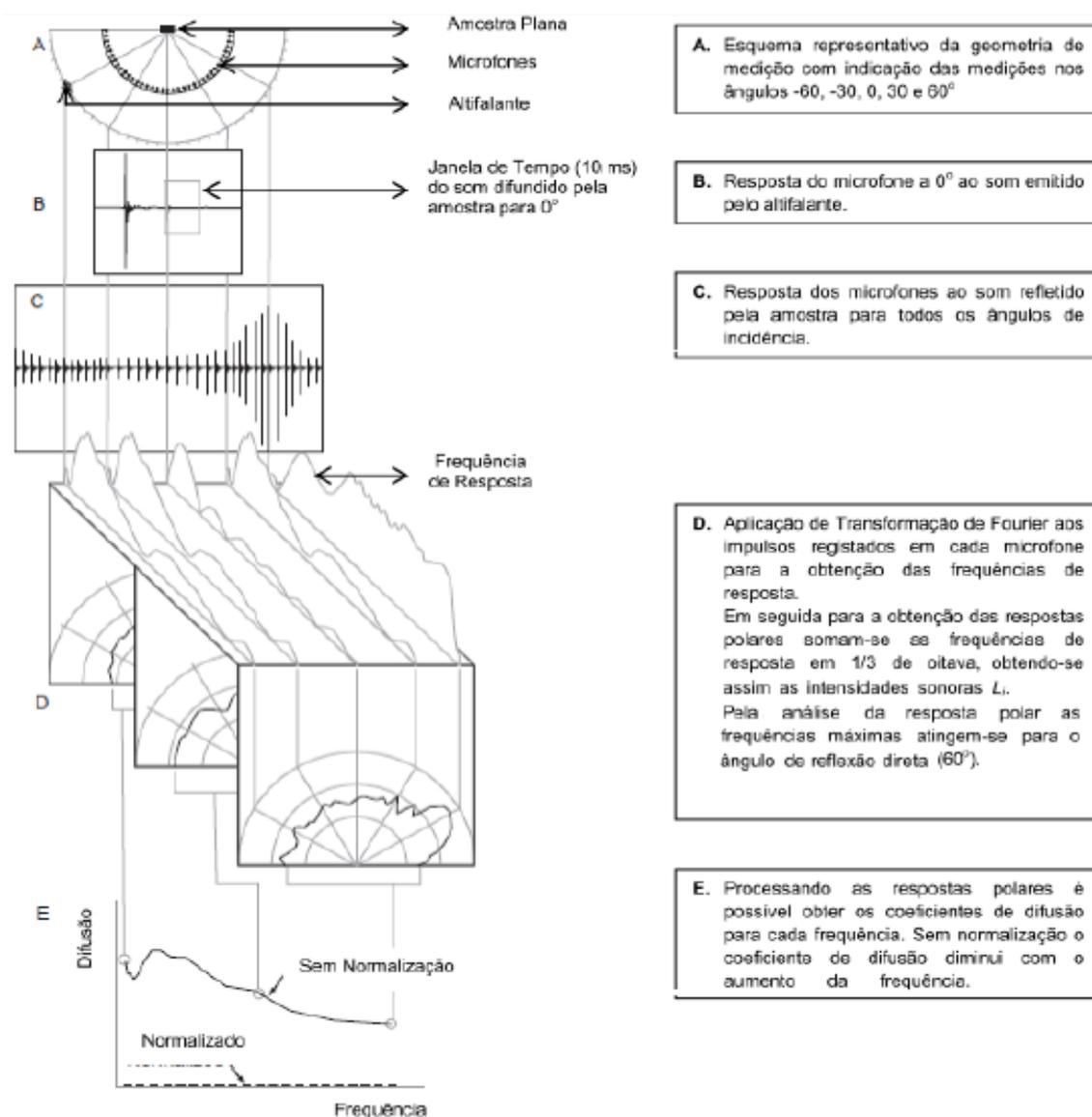


Figura 4.4 – Esquema resumo do método para obtenção do coeficiente de difusão para uma amostra plana (imagem adaptada da norma AES-4id)

4.5 Obtenção de parâmetros caracterizadores

Como vimos no subcapítulo anterior, referente à análise de dados, os parâmetros principais que vão servir para caracterizar e comparar os vários provetes estudados são os diagramas polares e a variação do coeficiente de difusão ao longo das gamas de frequência.

4.5.1 Diagramas polares

Neste tipo de ensaio experimental, para determinação do coeficiente de difusão, o diagrama polar é uma representação gráfica que permite exibir, facilmente, a forma como a energia proveniente da fonte se dispersa pelas diferentes direções após chegar ao provete analisado.

O diagrama polar é uma representação circular que na circunferência exterior exhibe as diferentes direções ao redor do provete, ou seja, dos 0 aos 360 graus. A partir do centro saem outras circunferências igualmente espaçadas, que representam o intervalo de valores do parâmetro avaliado, neste caso é a pressão sonora.

Assim, é possível saber, com este tipo de diagrama, quais as direções que ostentam valores mais elevados de pressão sonora, para uma determinada frequência.

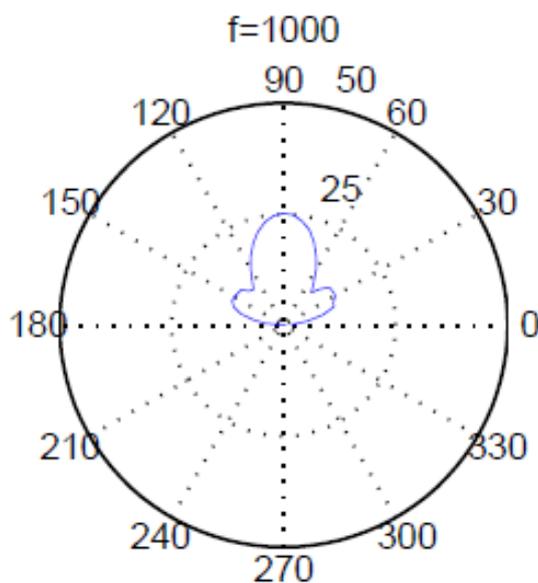


Figura 4.5 – Exemplo de um diagrama polar de uma superfície plana aos 1000 Hz

4.5.2 Coeficiente de difusão

O gráfico do coeficiente de difusão é obtido a partir das respostas polares. É um gráfico de linha com dois eixos, ou seja a duas dimensões; no eixo das abcissas encontra-se a gama de frequências que importa analisar, enquanto o eixo das ordenadas apresenta o intervalo de valores do coeficiente de difusão.

Este gráfico tem o objetivo de mostrar a forma como o coeficiente de difusão varia ao longo das diferentes frequências. Outra grande vantagem deste tipo de representação gráfica é que é possível sobrepor várias linhas no mesmo gráfico, isto é, pode-se comparar diferentes situações no mesmo referencial e assim verificar, não só a forma como o coeficiente de difusão de cada diferente tipologia se comporta, mas também como varia este entre algumas situações distintas.

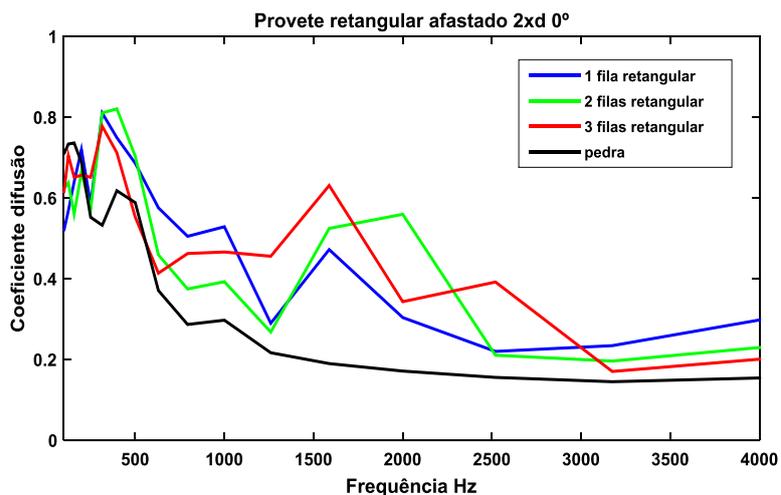


Figura 4.6 – Exemplo de um gráfico de linhas comparando provetes de diferentes tipologias

5 RESULTADOS

Neste capítulo vão ser apresentadas e descritas as características e as diferentes singularidades dos provetes ensaiados. Posteriormente, vão ser mostrados e interpretados os resultados do coeficiente de difusão, através de gráficos que contêm a informação necessária para descobrir entre as diferentes configurações quais as mais vantajosas e eficazes. Ensaiou-se também uma pedra lisa de 60 por 60 centímetros com o intuito de confrontar os seus resultados com os dos provetes produzidos.

5.1 Configurações dos provetes a ensaiar

Todos os provetes analisados são formados por tubos VD com 2 centímetros de diâmetro e com 60 centímetros de altura. Foram colados ao chão, conforme a sua configuração, e utilizaram-se ainda placas de poliestireno extrudido no topo dos tubos para que estes se mantivessem numa posição o mais vertical possível.

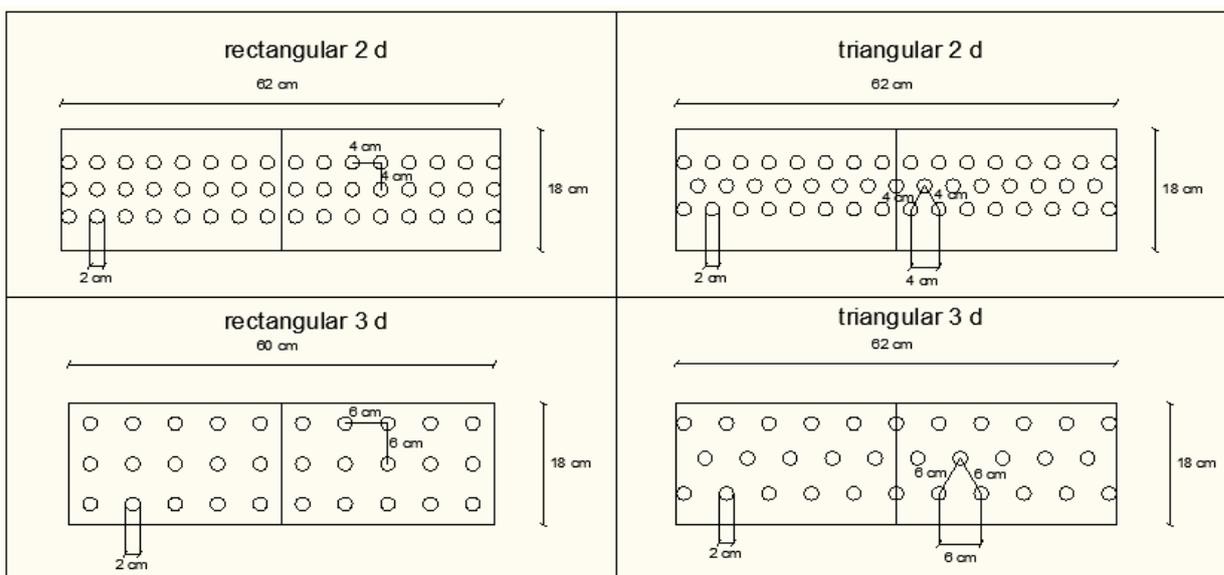


Figura 5.1 – Configurações retangulares e triangulares com afastamento 2xd e 3xd, no plano

Os cilindros, quando dispostos periodicamente, originam estruturas denominadas por cristais sônicos e adquirem comportamentos diferentes conforme as diferentes configurações. Nos ensaios laboratoriais foram estudadas duas configurações, usualmente conhecidas como retangular e triangular. Nestes dois tipos de configuração utilizaram-se distâncias diferentes entre os centros dos cilindros; primeiro utilizou-se a distância de duas vezes o diâmetro de um cilindro ($2xd$), depois usou-se três vezes esse diâmetro ($3xd$), como mostra figura 5.1.

O cristal sônico retangular $2xd$ contém três filas com 16 cilindros cada, enquanto o retangular $3xd$ possui 10 cilindros por fila. A estrutura triangular $2xd$ tem na primeira e terceira fila 16 cilindros, a do meio tem apenas 15. O cristal sônico triangular $3xd$, tal como no $2xd$, contabiliza na fila intermédia menos um cilindro que as exteriores, neste caso 10 e 11 cilindros, respetivamente.



Figura 5.2 – Em cima à esquerda cristal sônico retangular $2xd$, à direita em cima cristal sônico triangular $2xd$, em baixo à esquerda cristal sônico retangular $3xd$ e à direita em baixo cristal sônico triangular $3xd$

5.2 Apresentação dos resultados dos provetes com afastamento $2xd$

5.2.1 Configuração retangular com afastamento $2xd$

Para melhor se compreender a forma como os diversos cristais sônicos se comportaram nestes ensaios, foi retirada fila a fila, sequencialmente de trás para a frente e testou-se três tipologias diferentes, ou seja, com três, duas e uma única fila. Os resultados para a fonte sonora localizada a 0 graus encontram-se na figura 5.3.

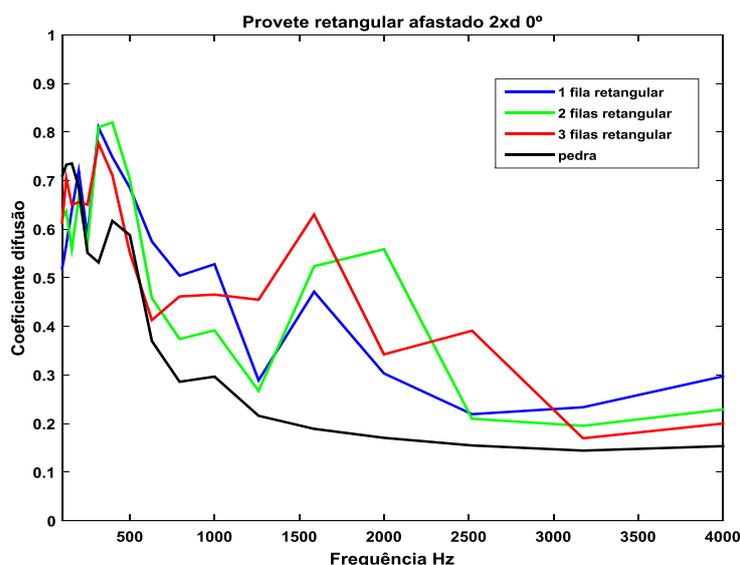


Figura 5.3 – Gráfico do coeficiente de difusão com a fonte a 0 graus, do cristal sônico retangular 2xd

Fazendo uma análise do gráfico acima não se consegue afirmar facilmente com quantas filias é mais eficaz o cristal sônico em questão. A eficácia do número de filias varia ao longo da gama de frequências. Até aos 500Hz as 3 tipologias têm um comportamento parecido, depois, dos 500 aos 1000Hz a estrutura com uma só fila apresenta um valor ligeiramente superior às outras. Dos 1000 aos 3000Hz a tipologia mais eficaz é a que tem 3 filias, com exceção da zona dos 2000Hz na qual a de 2 filias apresenta um pico que suporta um valor superior. Por fim, dos 3000 até aos 4000Hz a estrutura com 1 fila volta a tirar vantagem em relação às demais. As 3 tipologias apresentam um pico máximo de aproximadamente 0,8 localizado basicamente na mesma frequência, aos 400Hz. O mínimo ocorre naturalmente para as altas frequências. Para todas as tipologias é possível verificar que qualquer uma delas possui um comportamento melhor do que a pedra lisa para a maior parte das gamas de frequência.

Ainda para estes tipos de estruturas foram efetuados ensaios com a fonte sonora a 35 e -35 graus. Como se pode observar nas figuras 5.4 e 5.5 os dois gráficos são muitos semelhantes, como seria de esperar, já que as posições da fonte sonora eram simétricas em relação ao provete.

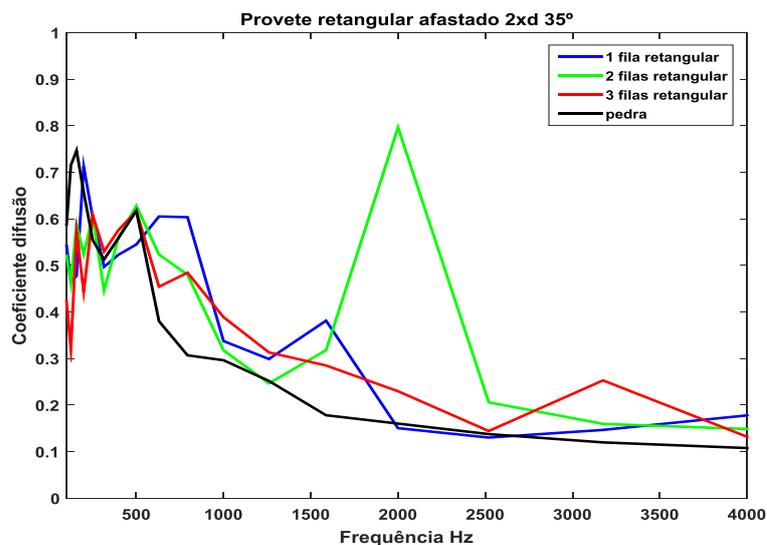


Figura 5.4 – Gráfico do coeficiente de difusão com a fonte a 35 graus, do cristal sônico retangular 2xd

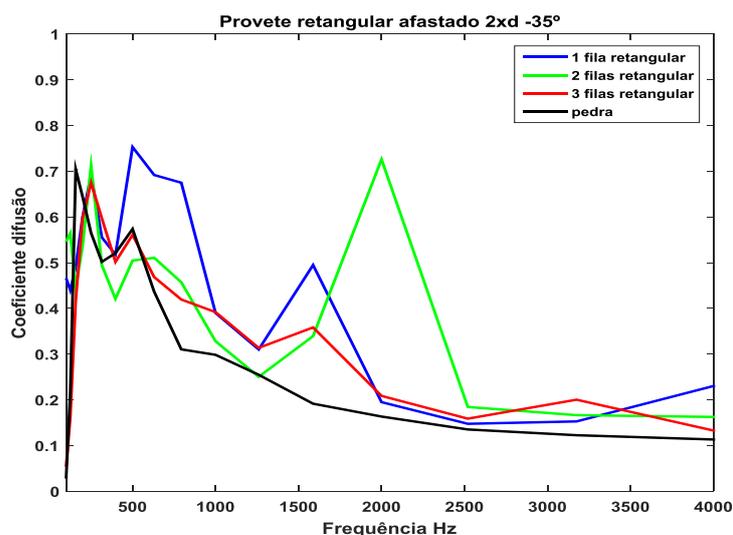


Figura 5.5 – Gráfico do coeficiente de difusão com a fonte a -35 graus, do cristal sônico retangular 2xd

Em geral, para as frequências abaixo de 1500Hz a melhor tipologia é que tem apenas 1 fila, também dos 3500 aos 4000 Hz esta volta a ser a mais eficaz mas de forma muito ligeira. O cristal sônico com 2 filas mostra melhores resultados para a gama de frequências entre os 1500 e 2750Hz e até apresenta um pico bastante elevado aos 2000Hz. Por fim, no intervalo entre os 2750 e 3500Hz acontece um equilíbrio entre as 3 estruturas. Também é facilmente visualizado que a pedra lisa não é tão eficiente como os diversos cristais sônicos estudados, apesar de nas altas frequências não perder assim tanto para estes.

5.2.2 Configuração triangular com afastamento 2xd

O mesmo processo de retirar filas foi executado também para a configuração triangular com afastamento de 2xd. Os resultados das 3 tipologias são mostrados no gráfico da figura 5.6 para a fonte a 0 graus.

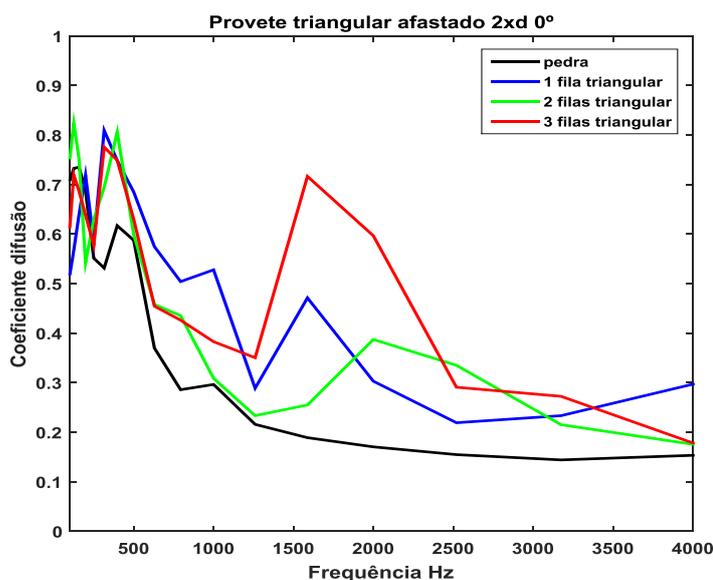


Figura 5.6 – Gráfico do coeficiente de difusão com a fonte a 0 graus, do cristal sónico triangular 2xd

Até aos 500Hz as 3 tipologias apresentam um comportamento idêntico, dos 500 aos 1000Hz e no final, mas apenas de forma ligeira, dos 3500 aos 4000Hz a estrutura com 1 fila é a que detém um melhor comportamento; o cristal sónico de 3 filas tem uma resposta mais eficaz para as frequências entre os 1000 e os 3500Hz. A pedra lisa, com exceção das frequências mais baixas, possui um coeficiente de difusão sempre mais baixo que qualquer uma das 3 tipologias.

De seguida são expostos os resultados com a fonte sonora nas posições de 35 e -35 graus.

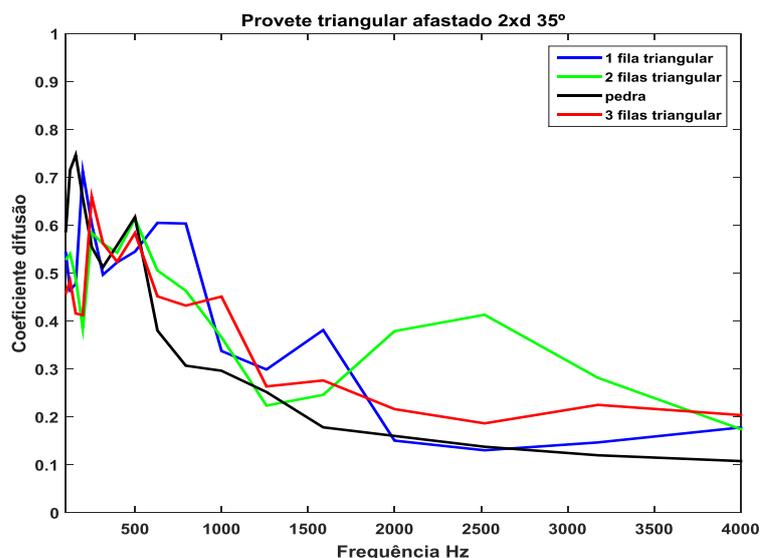


Figura 5.7 – Gráfico do coeficiente de difusão com a fonte a 35 graus do cristal sônico triangular 2xd

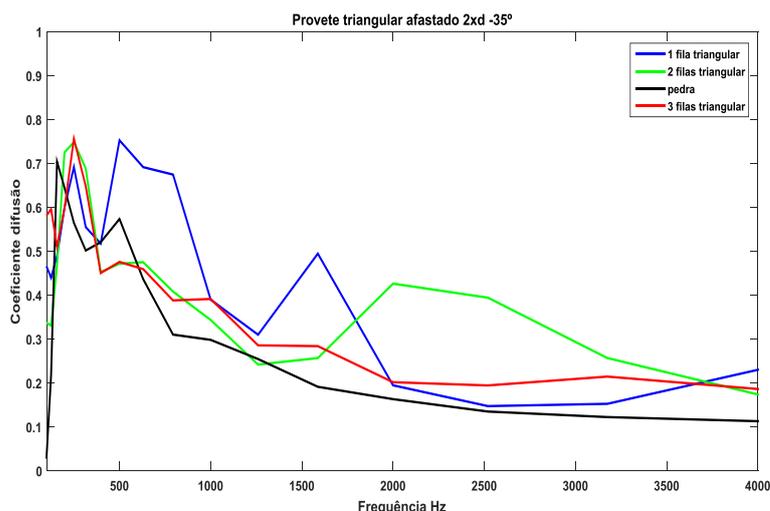


Figura 5.8 – Gráfico do coeficiente de difusão com a fonte a -35 graus do cristal sônico triangular 2xd

Os dois gráficos das figuras 5.7 e da 5.8 apresentam um andamento muito parecido, como era de prever. As estruturas de 2 filas têm o valor do coeficiente de difusão superior às outras 2 tipologias para as frequências mais altas entre os 2000 e os 4000Hz. Para as frequências entre os 500 e os 2000Hz, o cristal sônico mais eficaz é o que tem apenas 1 fila. Até aos 500Hz, as 3 tipologias juntamente com a pedra lisa denotam um comportamento muito semelhante, apesar de esta última continuar a apresentar para as outras gamas de frequência valores mais baixos do coeficiente de difusão.

5.3 Apresentação dos resultados dos provetes com afastamento 3xd

5.3.1 Configuração retangular com afastamento 3xd

Seguidamente, vão ser apresentados os resultados para as mesmas configurações analisadas anteriormente, agora com a distância entre os centros dos cilindros de 3xd, ou seja, 6 centímetros. O procedimento foi igual ao efetuado anteriormente, retirando-se sequencialmente uma fila, de trás para a frente. No entanto, ocorreu um fenómeno estranho nos cristais sônicos de 1 e 3 filas com este afastamento. Para as primeiras frequências estudadas estes cristais possuíam valores do coeficiente de difusão muito baixos, inclusive alguns apresentavam valor zero. Mas estes resultados acontecem nas frequências mais baixas, à volta dos 100/150 Hz e como tal podem não ter significado físico devido às dimensões da sala.

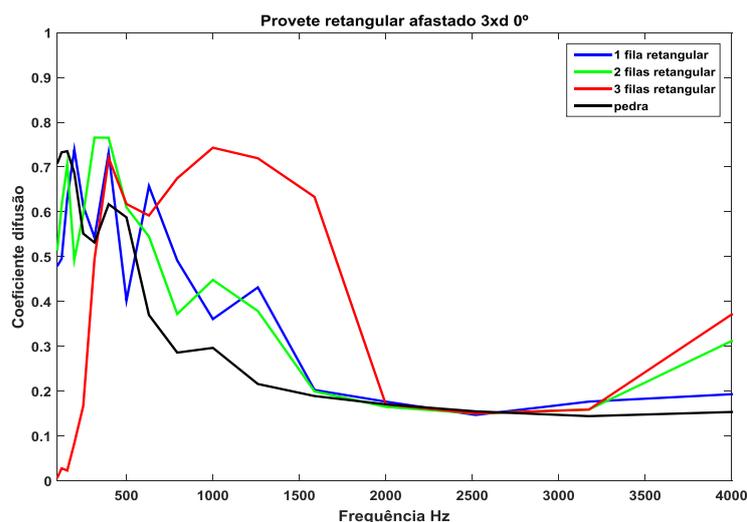


Figura 5.9 – Gráfico do coeficiente de difusão com a fonte a 0 graus do cristal sónico retangular 3xd

A primeira conclusão que se pode retirar da representação gráfica da figura 5.9 é que para as frequências abaixo dos 500Hz aproximadamente, a tipologia de 3 filas tem uma resposta com bastante menos eficiente em relação às outras, inclusivamente em relação à pedra lisa. Dos 500 aos 2000Hz e a partir dos 3250 até aos 4000Hz a estrutura de 3 filas já apresentou os melhores resultados. Dos 2000 até aos 3250Hz todas as estruturas, pedra lisa incluída, obtiveram um coeficiente de difusão quase igual.

Na figura 5.10 são apresentados, graficamente, a evolução do coeficiente de difusão agora com a fonte sonora nas posições 35 e -35 graus respectivamente. Seria de esperar uma maior correspondência entre eles, uma vez que as fontes estão em posições simétricas, a tipologia de 2 filas é a única que manifesta uma maior semelhança.

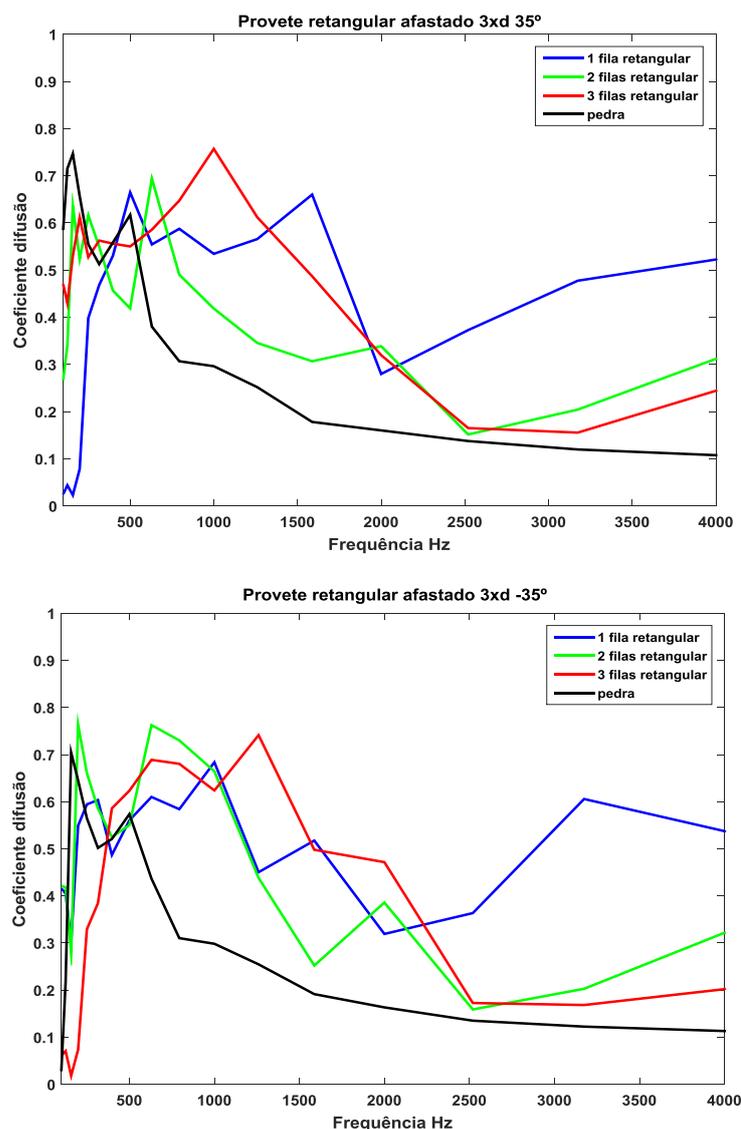


Figura 5.10 – Gráfico do coeficiente de difusão com a fonte a 35 graus na imagem acima e abaixo a -35 graus, do cristal sônico retangular 3xd

Em geral verificou-se que a estrutura de 1 fila, dos 2000 aos 4000Hz, apresenta um coeficiente de difusão bem superior em relação às outras tipologias, até alcança mesmo um valor idêntico para as altas e baixas frequências. Dos 1000 aos 2000Hz o cristal sônico de 3

filas é o mais eficaz, dos 1000Hz para baixo todas as estruturas obtêm uma solução aparentemente semelhante.

5.3.2 Configuração triangular com afastamento de 3xd

Finalmente são expostos os resultados da configuração triangular com afastamento 3xd num processo idêntico ao retangular 3xd.

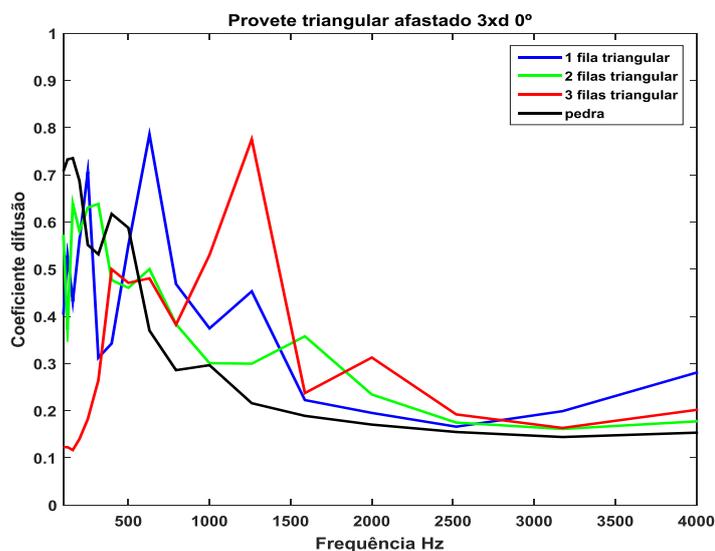


Figura 5.11 – Gráfico do coeficiente de difusão com a fonte a 0 graus, do cristal sônico triangular 3xd

Com exceção do cristal sônico de 3 filas, até aos 500Hz existe uma homogeneidade nos valores do coeficiente de difusão. Dos 500 aos 1000Hz e dos 3000 até aos 4000Hz, mas aqui de forma muito ligeira, a estrutura de 1 fila é a mais eficiente, enquanto que a de 3 filas tira vantagem para as gamas de frequência entre os 1000 e os 3000Hz. A partir dos 2000Hz, sensivelmente, a pedra lisa não perde muito para as restantes configurações e mesmo antes de se atingir os 2000Hz a pedra consegue equiparar-se com os cristais sônicos menos eficazes.

Ao contrário da configuração rectangular com afastamento de 3xd, a triangular exhibe uma semelhança bastante evidente nos dois gráficos que representam a fonte sonora a 35 e -35 graus, o que era de prever, já que as posições da fonte sonora são simétricas.

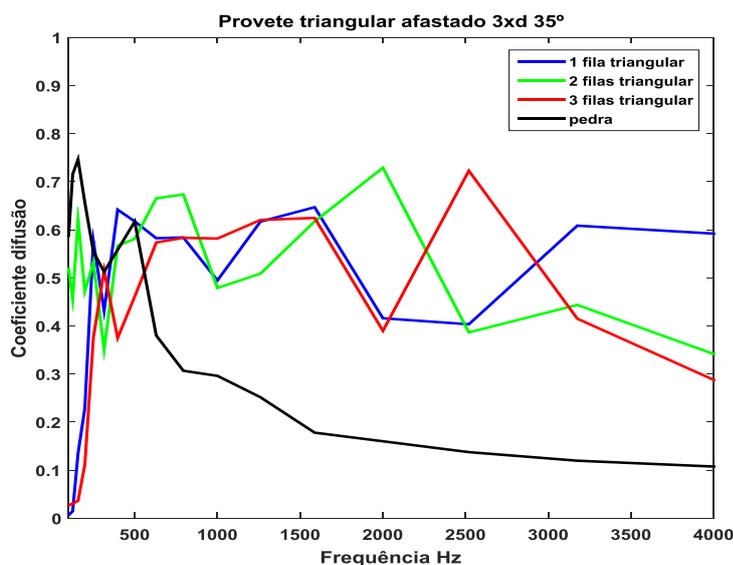


Figura 5.12 – Gráfico do coeficiente de difusão com a fonte a 35 graus, do cristal sônico triangular 3xd

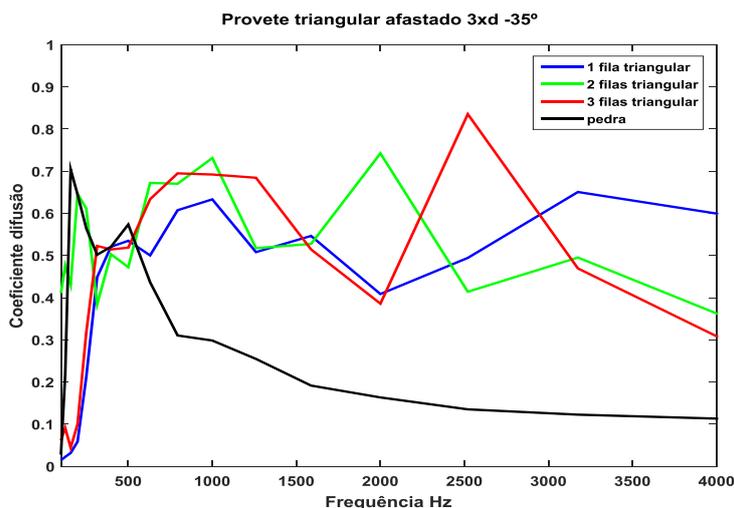


Figura 5.13 – Gráfico do coeficiente de difusão com a fonte a -35 graus, do cristal sônico triangular 3xd

Até aos 1500Hz existiu, em geral, uma uniformidade entre as diferentes estruturas, excetuando a pedra lisa, que a partir dos 500Hz até final ostenta valores do coeficiente de difusão bem inferiores em relação aos demais. Posteriormente é possível verificar que cada uma das 3 tipologias ganha um maior relevo em gamas de frequência específicas, dos 1500 aos 2250Hz a estrutura de 2 filas é a mais eficiente, a de 3 filas já é dos 2250 até aos 3000Hz e finalmente dos 3000 aos 4000Hz é o cristal sônico de 1 fila o que possui maior valor do coeficiente de difusão, consegue inclusive apresentar um valor superior para as frequências mais altas do que para as mais baixas.

5.4 Comparação entre os provetes com afastamentos $2xd$ vs $3xd$

5.4.1 Comparação entre os provetes retangulares com afastamentos $2xd$ vs $3xd$

Neste subcapítulo vai ser analisado, de novo com ajuda de representações gráficas, o comportamento dos diferentes cristais sônicos, de configuração retangular, à medida que se altera as distâncias dos centros dos cilindros.

Observando com atenção as três representações gráficas da figura 5.14, a configuração retangular com afastamento de $2xd$ é a mais eficaz, embora, à medida que o número de filas aumenta o cristal sónico rectangular com afastamento de $3xd$ vai diminuindo a supremacia evidenciada pela configuração retangular $2xd$.

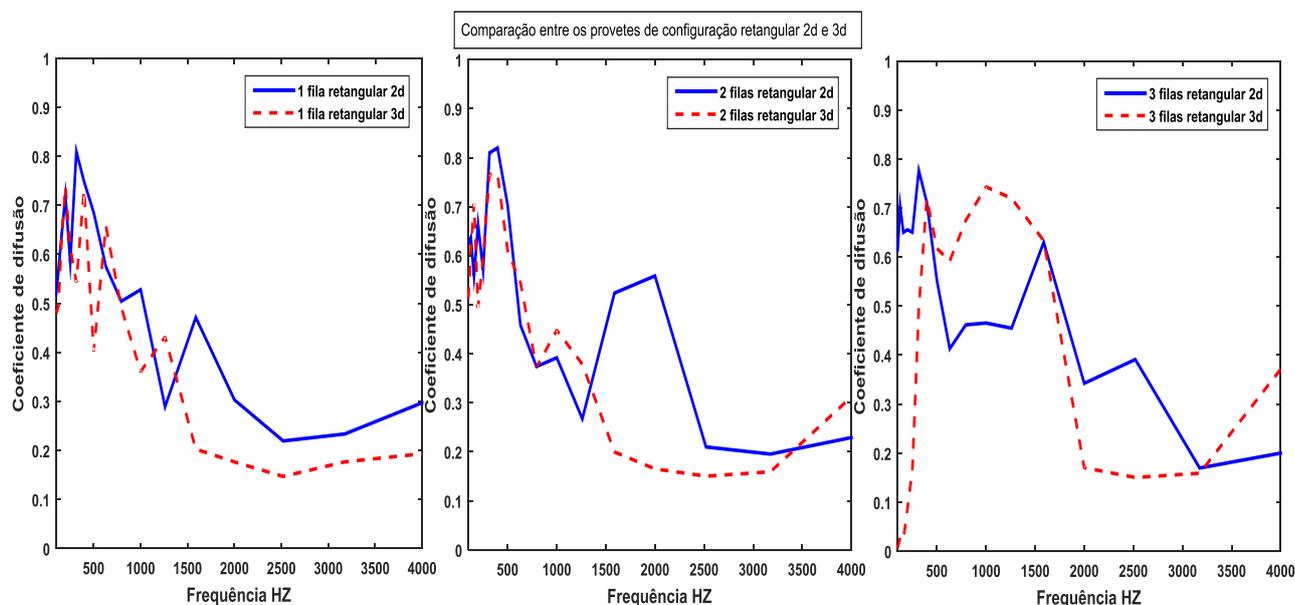


Figura 5.14 – À esquerda o gráfico do coeficiente de difusão para as estruturas de 1 fila, ao meio as estruturas de 2 filas e à direita as estruturas de 3 filas, todas com a fonte a 0 graus

A figura 5.15 mostra os resultados anteriormente contemplados mas agora com a fonte sonora a 35 graus. Decidiu-se não colocar os gráficos para a fonte sonora a -35 graus porque o andamento destas representações gráficas é muito semelhante.

Nas estruturas de 1 fila, aquela que é distanciada de $3xd$ apresenta um comportamento bastante melhor que a tipologia de $2xd$ a partir sensivelmente dos 1000Hz. Quando os cristais sônicos são constituídos por 2 filas a eficiência das 2 configurações é mais equilibrada, umas

vezes quando os cilindros estão mais próximos favorecem uma certa gama de frequências outras vezes passa-se o contrário. Por último, a tipologia de 3 filas afastadas $3xd$ exhibe após os 500Hz um valor do coeficiente de difusão superior, maioritariamente, ao longo das frequências.

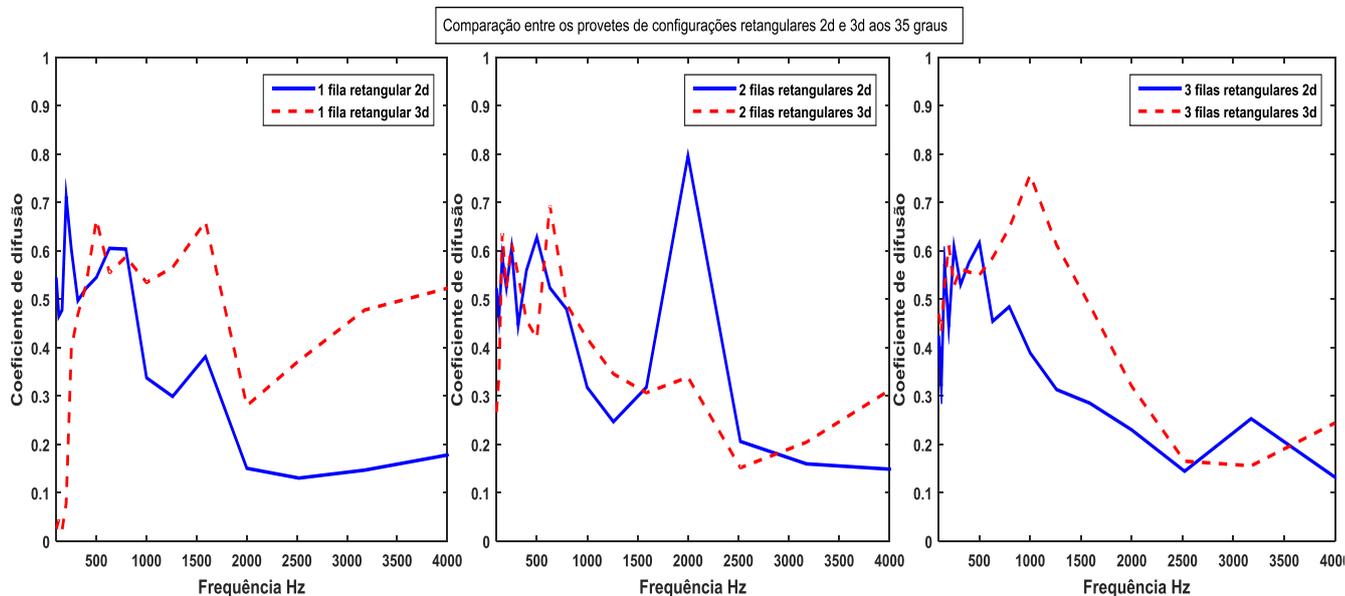


Figura 5.15 – À esquerda o gráfico do coeficiente de difusão para as estruturas de 1 fila, ao meio as estruturas de 2 filas e à direita as estruturas de 3 filas, todas com a fonte a 35 graus

5.4.2 Comparação entre os provetes triangulares com afastamentos de $2xd$ vs $3xd$

À semelhança do subcapítulo anterior vai ser estudado, o comportamento dos diferentes cristais sônicos, de configuração triangular, à medida que se modifica as distâncias entre os centros dos cilindros.

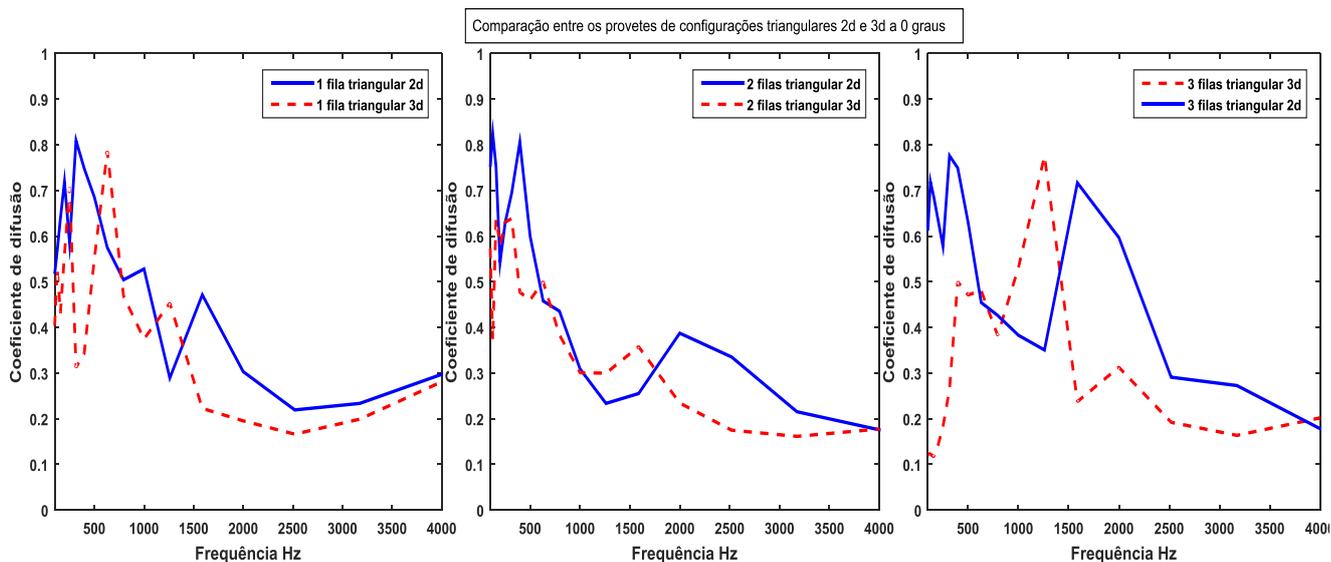


Figura 5.16 –   esquerda o gráfico do coeficiente de difusão para as estruturas de 1 fila, ao meio as estruturas de 2 filas e   direita as estruturas de 3 filas, todas com a fonte a 0 graus

Nas estruturas de 1 e 2 filas   visível um valor superior do coeficiente de difusão dos cristais s nicos afastados $2xd$. Nos casos em que existem 3 filas a superioridade dos cilindros afastados $2xd$   ainda mais evidente ao longo das diferentes gamas de frequência, com exce o do intervalo entre os 1000 e 1500Hz.

Os resultados das posi es da fonte sonora a 35 e -35 graus voltaram a ser muito parecidos e tal como anteriormente apenas serão exibidos os resultados para um dos casos, o da posi o 35 graus.

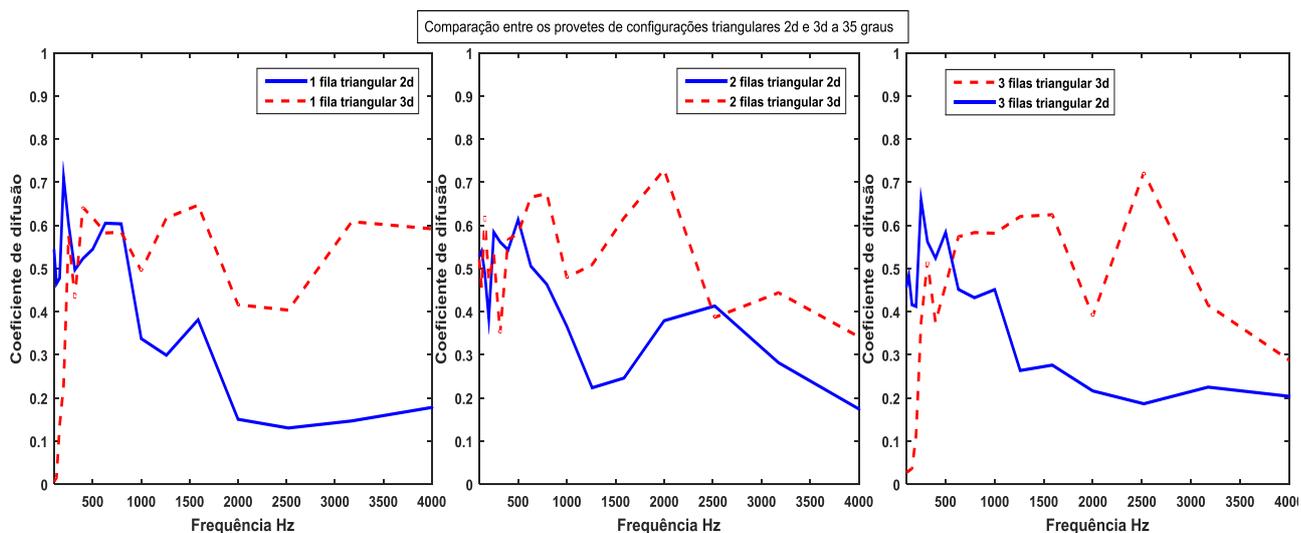


Figura 5.17 –   esquerda o gráfico do coeficiente de difusão para as estruturas de 1 fila, ao meio as estruturas de 2 filas e   direita as estruturas de 3 filas, todas com a fonte a 35 graus

No caso da configuração triangular, em todas as filas a superioridade do afastamento $3x_d$ é incontestável em relação ao $2x_d$, excetuando dos 500Hz para baixo, o valor do coeficiente de difusão é muito superior.

A conclusão geral que se pode retirar dos resultados comentados anteriormente é que para as configurações retangulares e triangulares com os cilindros separados $2x_d$ tira vantagem quando a fonte está a 0 graus, ao passo que, com a fonte a 35 graus as configurações com o afastamento $3x_d$ apresentam valores mais elevados para o coeficiente de difusão.

5.5. Comparação entre os provetes de configuração Retangular vs Triangular

Depois de avaliar quais os afastamentos dos centros dos cilindros dos cristais sónicos mais eficazes para cada configuração, agora o pretendido é conhecer qual das configurações, retangular ou triangular, é a mais preponderante tendo em conta o número de filas.

Não foram estudadas as estruturas de 1 só fila porque as configurações retangulares e triangulares para este caso específico são exatamente as mesmas.

5.5.1 Comparação entre os provetes retangulares e triangulares afastados $2x_d$

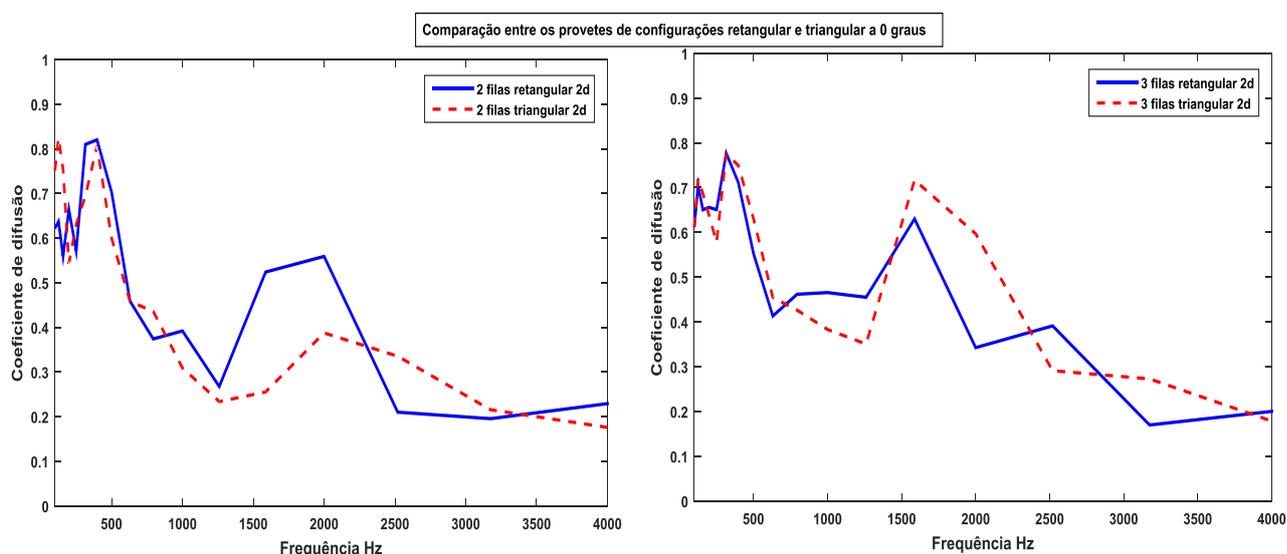


Figura 5.18 – À esquerda o gráfico do coeficiente de difusão para as estruturas de 2 filas, e à direita as estruturas de 3 filas, ambas com a fonte a 0 graus

Examinando a figura 5.18, o gráfico da esquerda mostra uma homogeneidade das 2 configurações até aos 1000Hz, de seguida a configuração retangular toma uma ligeira vantagem em quase todas as gamas de frequência com exceção do intervalo entre os 2500 e 3000Hz. Na representação gráfica da direita a homogeneidade não é tão evidente, a partir dos 500Hz ocorre uma alternância entre a eficiência das duas configurações.

Decorreu novamente uma grande semelhança dos gráficos que continham os resultados das posições simétricas da fonte sonora, foi escolhido de novo um só caso para analisar e desta vez optou-se pela posição -35 graus.

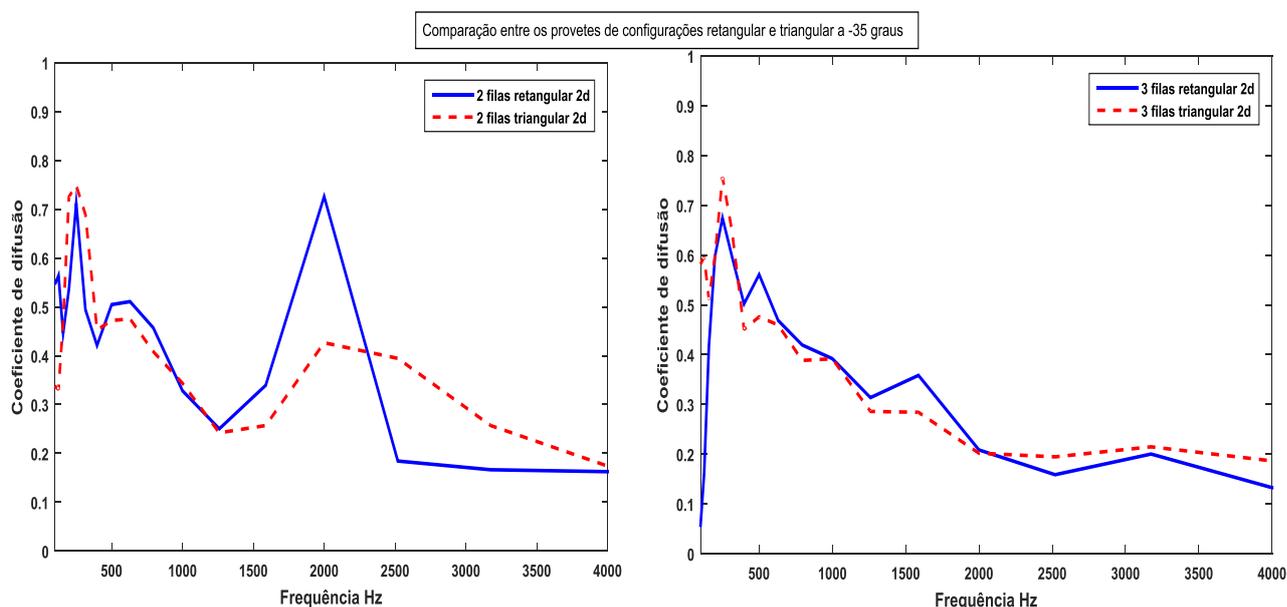


Figura 5.19 – À esquerda o gráfico do coeficiente de difusão para as estruturas de 2 filas, e à direita as estruturas de 3 filas, ambas com a fonte a -35 graus

Na imagem da direita da figura 5.19 é mais que evidente o paralelismo dos resultados das duas configurações, apenas existe uma ligeiríssima superioridade da estrutura retangular até aos 2000Hz e daí em diante o cristal sónico triangular também apresenta uma vantagem mas muito pouco acentuada. No caso à esquerda da mesma figura existe também até aos 1000Hz um conjunto de resultados muito idênticos, mas daí até aos 2250Hz a configuração retangular ostenta valores do coeficiente de difusão bastante melhores. Dos 2250 até aos 4000Hz a estrutura triangular ganha maior relevo em relação à outra configuração.

5.5.2 Comparação entre os provetes retangulares e triangulares afastados 3xd

O comportamento dos provetes com afastamento de 3xd é bem diferente em relação aos 2xd, já não existe uma correspondência nos resultados dos gráficos analisados. Conforme a gama de frequências se modifica também se altera a eficácia das diferentes configurações.

O número de filas neste caso não influenciou muito, como se pode observar na figura 5.20, logo foi possível efetuar uma análise das duas representações gráficas em simultâneo.

As estruturas triangulares apenas têm valores do coeficiente de difusão mais elevados em relação às retangulares entre os 1500/2000 e os 3000Hz, nas restantes frequências denota-se uma vantagem clara dos cristais sônicos retangulares.

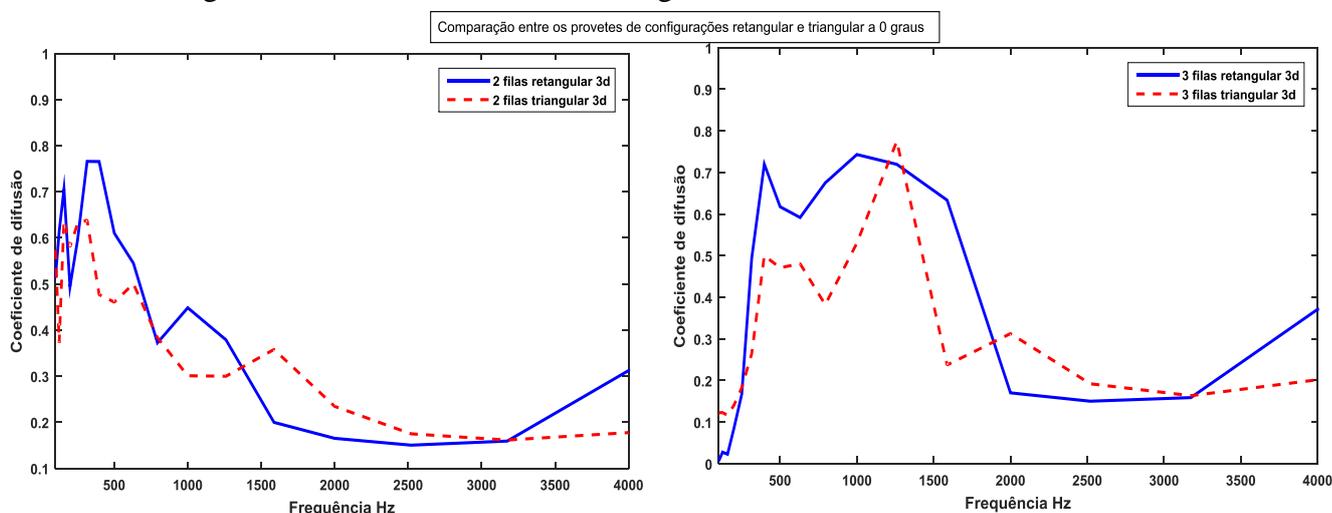


Figura 5.20 – À esquerda o gráfico do coeficiente de difusão para as estruturas de 2 filas, e à direita as estruturas de 3 filas, ambas com a fonte a 0 graus

Voltou-se a optar pela posição -35 graus da fonte sonora já que ocorreu de novo resultados semelhantes para as duas posições.

A imagem do lado esquerdo da figura 5.21 mostra que a configuração triangular exibe valores para o coeficiente de difusão mais elevados em relação à retangular a partir dos 1000Hz, porque até aqui as duas linhas do gráfico equivaleram-se. À direita o domínio da estrutura triangular manteve-se, mas a partir apenas dos 2000 Hz, até aí não existiu grandes variações entre as duas configurações analisadas.

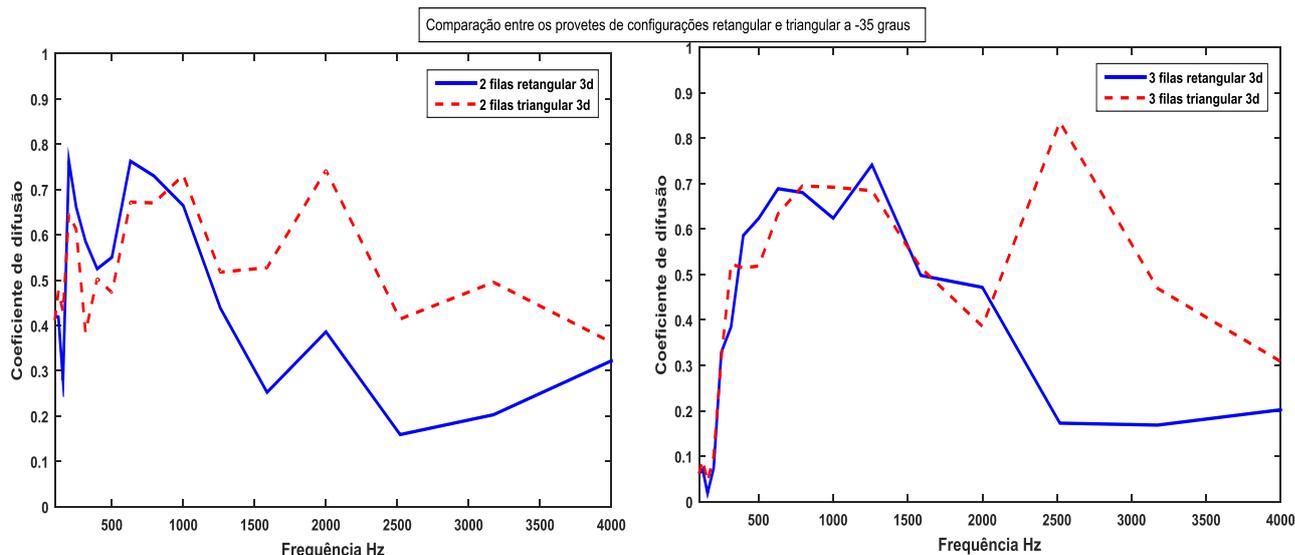


Figura 5.21 – À esquerda o gráfico do coeficiente de difusão para as estruturas de 2 filas, e à direita as estruturas de 3 filas, ambas com a fonte a -35 graus

Para as diferentes configurações afastadas 2xd houve de certa maneira uma conformidade de resultados. Nas estruturas com afastamento de 3xd, em geral, os cristais sónicos retangulares eram quem detinham um melhor comportamento para as frequências mais baixas, enquanto o oposto acontecia para as frequências mais altas.

5.6. Comparação dos provetes em função das diferentes posições da fonte sonora

O principal objetivo a discutir neste subcapítulo é perceber o modo como as estruturas se comportam ao receber o som de frente, isto é, a 0 graus, ou então vindo das direções 35 e - 35 graus. Para isso, efetuou-se uma análise a cada uma das estruturas específicas baseando nas três direções de onde partem as ondas de energia sonora que foram ensaiadas em laboratório.

5.6.1 Comparação entre as estruturas com afastamento de 2xd

As estruturas rectangular afastadas 2xd e triangular afastadas 2xd com 1 fila foram exatamente as mesmas, logo vai ser utilizado o resultado que pertence às duas configurações.

Pelo gráfico da figura 5.22 é possível verificar que quando a fonte está localizada a 0 graus, o coeficiente de difusão é mais elevado ao longo das diferentes gamas de frequência, salvo algumas exceções, como é o caso do intervalo entre os 500 e 1000Hz. O andamento das linhas do gráfico correspondentes às outras duas posições é parecido, embora quando a fonte se encontra a -35 graus obtém uma pequena vantagem.

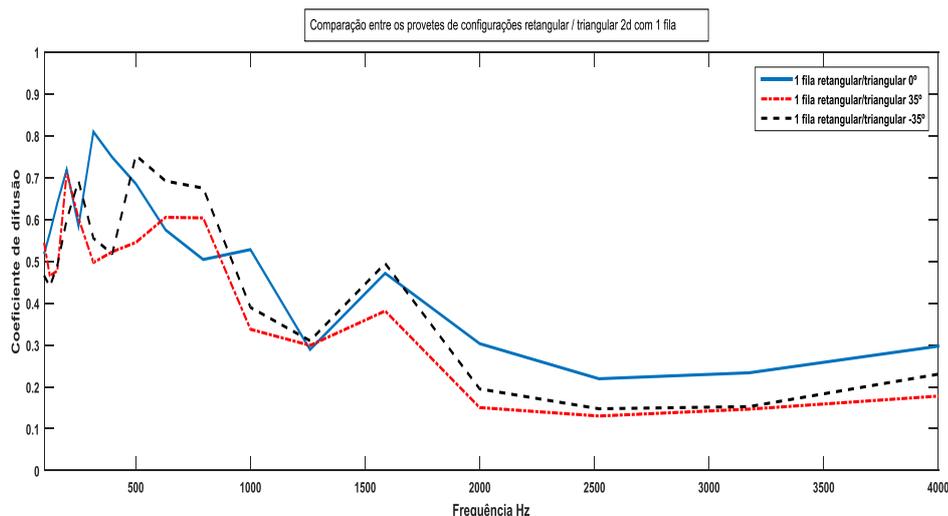


Figura 5.22 – Gráfico do coeficiente de difusão para as estruturas retangular/triangular 2xd com 1 fila

Na figura 5.23 do lado esquerdo estão representados os cristais sônicos rectangulares afastados 2d com 2 filas. Existe de novo uma tendência ligeira de superioridade para a posição da fonte a 0 graus, contudo dos 1750 até aos 2500Hz as outras duas posições obtiveram um melhor resultado. Importa também notar que para certas gamas de frequência houve um equilíbrio nas 3 linhas de resultado.

Na imagem da direita da mesma figura o equilíbrio entre as 3 posições foi ainda mais evidente, a partir dos 500Hz as diferenças foram mínimas, até aí houve algumas diferenças mas nada de relevante. Apesar da semelhança dos resultados pela primeira vez a posição da fonte a 0 graus perdeu um pouco do seu domínio depois dos 2000Hz.

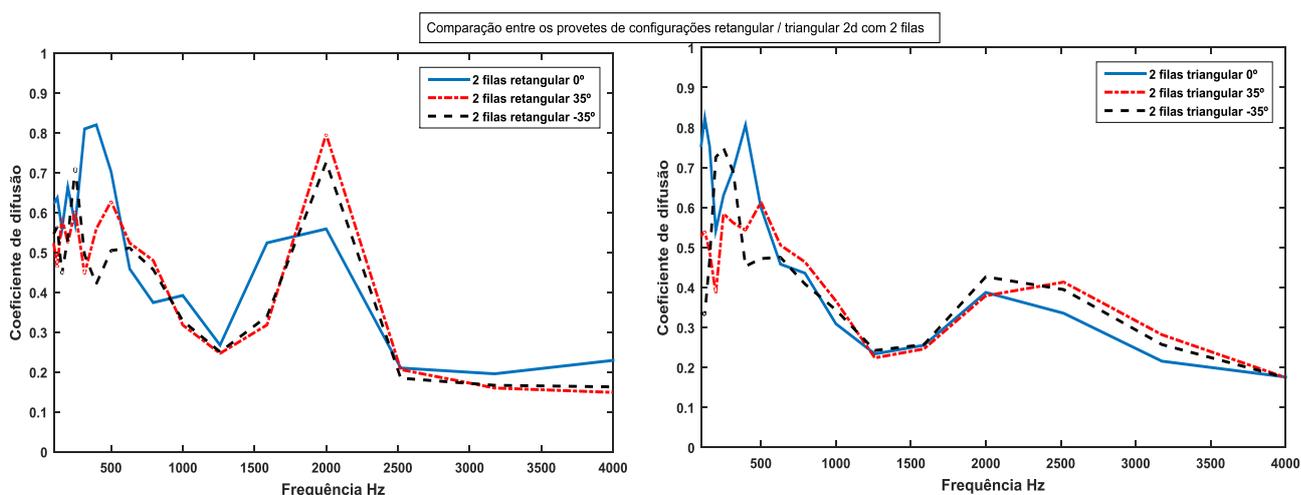


Figura 5.23 – À esquerda o gráfico do coeficiente de difusão para a estrutura retangular 2xd e à direita para a estrutura triangular 2xd ambas com 2 filas

Nas estruturas de 3 filas tanto nas retangulares como nas triangulares é facilmente verificável na figura 5.24 um domínio bastante acentuado, nas frequências intermédias, da localização da fonte a 0 graus. Nas outras duas posições existe um equilíbrio natural entre estas e também com a outra posição nas frequências iniciais e finais.

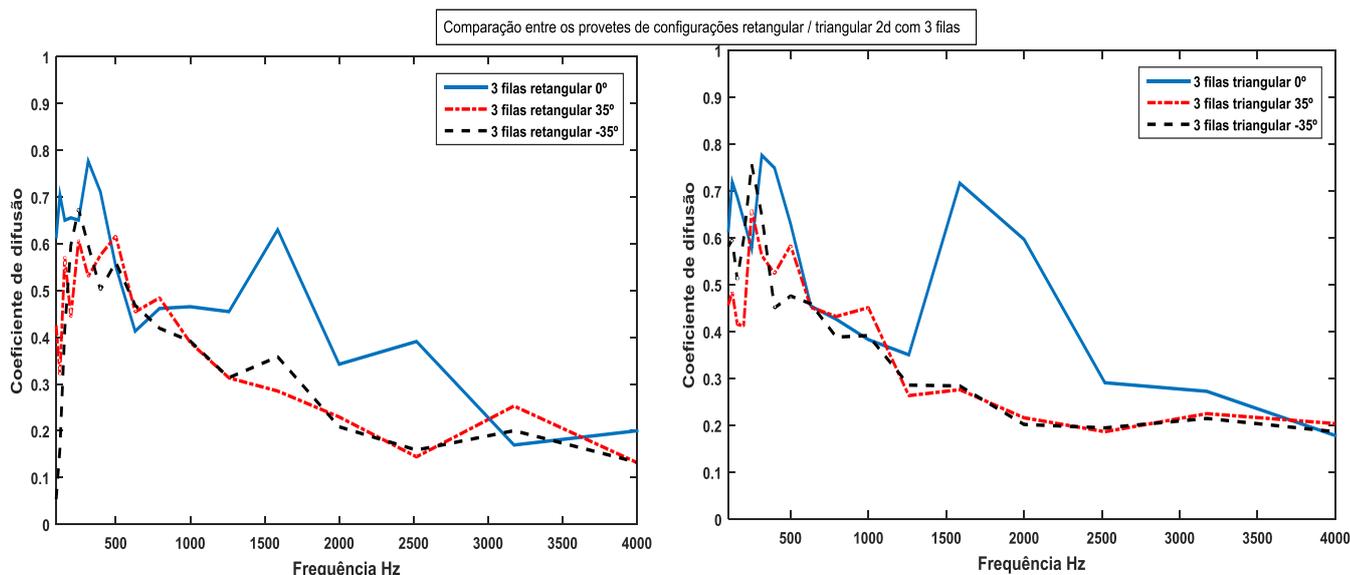


Figura 5.24 – À esquerda o gráfico do coeficiente de difusão para a estrutura retangular 2xd e à direita para a estrutura triangular 2xd ambas com 3 filas

5.6.2 Comparação entre as estruturas com afastamentos de 3xd

Neste caso as estruturas retangulares e triangulares de 1 fila eram diferentes, a triangular tinha um cilindro a mais, logo vai ser apresentado o resultado para as duas configurações.

Na figura 5.25, nas duas configurações estudadas, é facilmente perceptível que, a partir dos 500/750Hz a fonte sonora, quando colocada a 0 graus, apresenta resultados muito baixos comparativamente com as posições de 35 e -35 graus da fonte. Aliás ao longo das frequências estudadas o coeficiente de difusão na configuração triangular é praticamente constante.

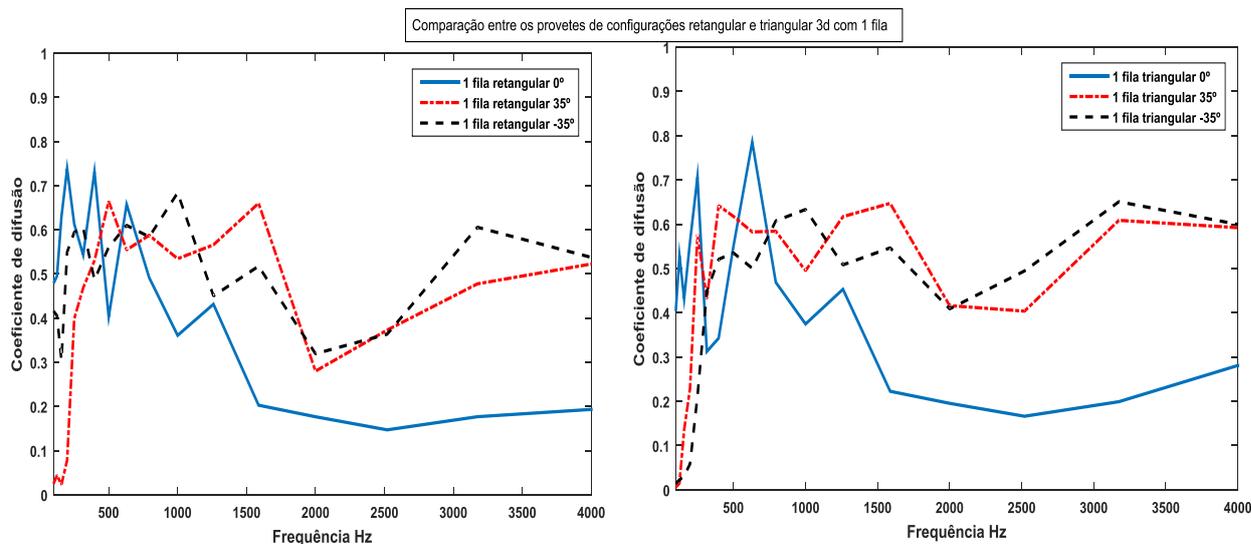


Figura 5.25 – À esquerda o gráfico do coeficiente de difusão para a estrutura retangular 3xd e à direita para a estrutura triangular 3xd ambas com 1 fila

À esquerda da figura 5.26, na estrutura retangular, existe uma predominância das duas posições simétricas em relação à de 0 graus, mas não tão grande como ocorre na configuração triangular, patente no lado direita da mesma figura.

Na figura 5.27, do lado esquerdo, a configuração retangular denota uma semelhança assinalável na maior parte das gamas de frequência. Na configuração triangular isso já não ocorre, a fonte quando localizada nas posições simétrica voltam a ter uma maior eficácia a partir dos 500Hz excetuando um pico por volta dos 1250Hz.

É possível concluir que, nas estruturas afastadas 2xd com 1 e 2 filas, existe um equilíbrio entre as 3 posições da fonte estudadas, no caso dos cristais sônicos com 3 filas, em certas gamas de frequência a fonte sonora localizada a 0 graus exibe valores mais altos para o coeficiente de difusão.

Perante as estruturas com os centros dos cilindros separados 3xd, em geral, quando a localização da fonte se situa nos 35 e -35 graus estas usufruem de uma dominância assinalável a partir dos 500Hz.

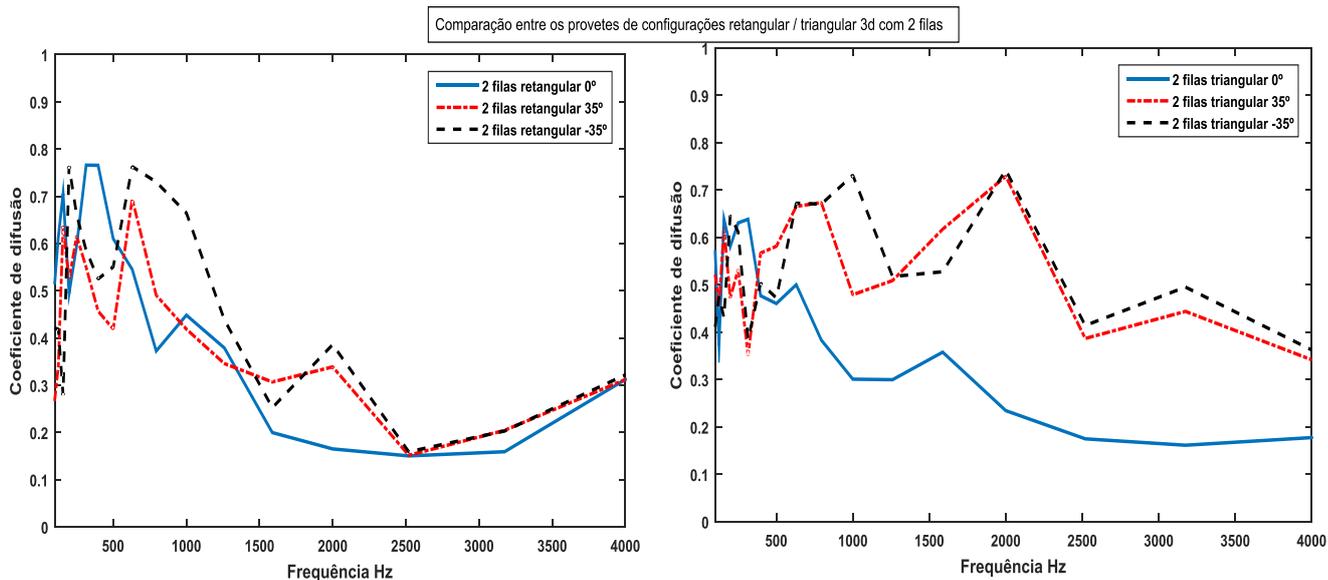


Figura 5.26 – À esquerda o gráfico do coeficiente de difusão para a estrutura retangular 3xd e à direita para a estrutura triangular 3xd ambas com 2 filas

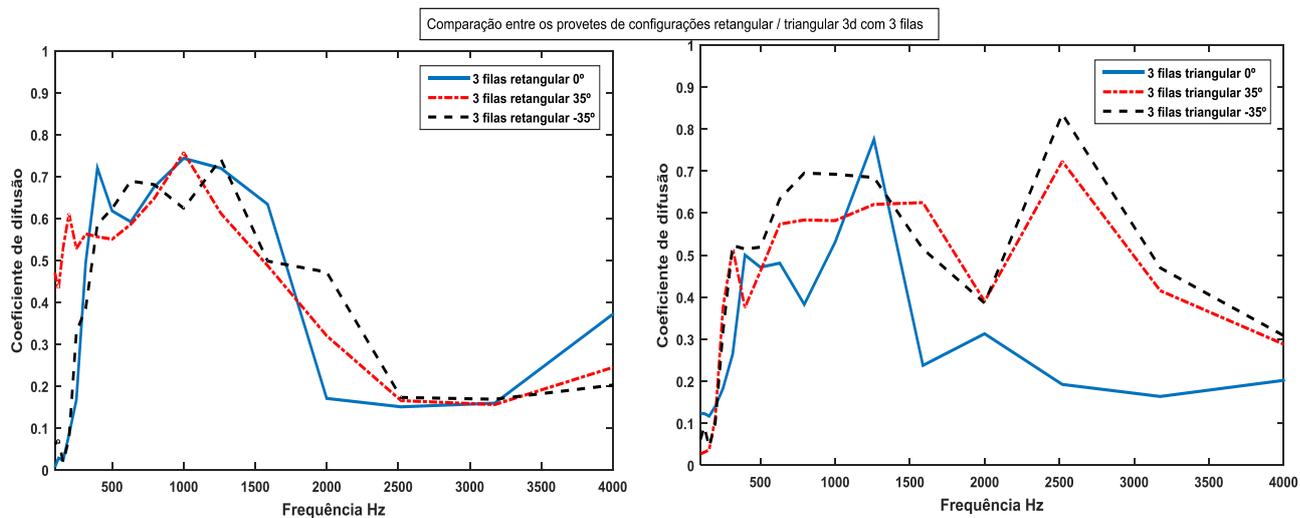


Figura 5.27 – À esquerda o gráfico do coeficiente de difusão para a estrutura retangular 3xd e à direita para a estrutura triangular 3xd ambas com 3 filas

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, o objetivo principal era perceber qual o desempenho, ao nível da capacidade de difusão, das estruturas periódicas conhecidas como cristais sônicos.

Foram ensaiadas duas configurações, retangulares e triangulares, e em cada uma das configurações foram analisadas três tipologias, com 1, 2 e 3 filas. Dentro destas ainda se alterou a distância entre os centros dos cilindros, para o dobro e triplo do diâmetro dos cilindros.

Também se ensaiou uma pedra lisa com as dimensões dos provetes para se poder comparar os resultados dos coeficientes de difusão.

A pedra lisa obtém resultados, para o coeficiente de difusão, bem mais baixos do que os cristais sônicos analisados para grande parte da gama de frequências. A superfície lisa consegue ombrear em alguns momentos com os provetes ensaiados mas nunca conquista uma supremacia em relação a estes.

Quando se analisou a influência dos afastamentos dos cilindros para as diferentes configurações, tanto as estruturas retangulares afastadas $2xd$ como as triangulares afastadas $2xd$, apresentaram melhores resultados do que as suas correspondentes com afastamento $3xd$, mas apenas quando a fonte estava na posição 0 graus. Com a fonte nas posições a 35 e -35 graus as estruturas afastadas $3xd$ obtiveram melhores resultados. Todos estes resultados comparados anteriormente, no geral, não sofreram qualquer efeito do diferente número de filas das estruturas.

Depois, foram feitas comparações entre as próprias estruturas de cristais sônicos. Nas estruturas afastadas $2xd$ as configurações retangulares e triangulares exibiram uma semelhança nos resultados, mais evidente quando os cristais sônicos têm 3 filas do que com 2 filas. Nas estruturas distanciadas $3xd$, em geral, as configurações retangulares possuem um melhor desempenho para as frequências mais baixas, já nas frequências mais altas as configurações triangulares exibem valores mais altos para o coeficiente de difusão.

Também a influência da posição da fonte sonora foi analisada. Para as estruturas com os cilindros separados $2x_d$ existe um equilíbrio nos resultados nas diferentes localizações da fonte. Excetuando quando as configurações retangulares e triangulares têm 3 filas, aí subsiste para certas gamas de frequência uma vantagem quando a fonte sonora se localiza de frente para o provete. Quando estamos presentes perante estruturas com afastamento $3x_d$ ocorre um domínio bastante assinalável quando a fonte sonora se localiza a 35 ou -35 graus.

Resumindo, para uma fonte sonora localizada a 0 graus o melhor provete a utilizar seria o de configuração triangular com afastamento $2x_d$ com 3 filas. Se a fonte se encontrar nas posições 35 ou -35 graus a melhor opção seria escolher a configuração triangular afastadas $3x_d$ com 3 filas, apesar de as tipologias de 1 e 2 filas não serem muito piores do que a escolha selecionada.

Para as frequências abaixo dos 1500 Hz, os cristais sônicos podem ser utilizados porque apresentam valores para o coeficiente de difusão bastante aceitáveis. Já para as frequências mais altas estes perdem eficácia e não serão tão úteis nestas circunstâncias.

Para trabalhos futuros há bastante por onde escolher, testar novas configurações, novas dimensões dos tubos, novos tipos de material para os provetes. Encher os tubos com outros materiais ou então furá-los e fazer com que funcionem também como absorsores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AES Standarts (2001). “AES Information Document for room acoustics and sound reinforcement systems – Characterisation and measurement of surface scattering uniformity”. AES-4id-2001 (r2007), Audio Engineering Society, New York.

Cox, T., D`Antonio, P. (2009). “Acoustic Absorbers and Diffusers”. 2º Edition, Milton Park, Abingdon.

Cummer, S., Schurig, D. (2007). “One path to acoustic cloaking”. New Journal of Physics, Vol. 9, No. 45

García, V. (2010). “On the control of propagating acoustic waves in sonic crystals: analytical, numerical and optimization techniques”. Tese de Doutorado, Departamento de Física Aplicada da Universidade Politécnica de Valência, Valência, 1º vol.

ISO 17497-2 (2005). “Acoustics – Sound scattering properties of surfaces – Part 2: Measurement of the directional diffusion coefficient in a free field”.

Maristany, A., Abadía, L., Hérran, C. (2012) “Rehabilitación acústica del teatro provincial de la ciudad de Catamarca”. VIII Congresso ibero-Americano de Acústica. Évora, Portugal.

Martínez-Sala, R., Sancho, J., Sánchez, J., Gómez, V., Llinares, J. (1995). “Sound attenuation by sculpture”. Nature. Vol. 378.

Physics Today. (junho 2004)

Redondo, J., Picó, R., Sánchez-Morcillo, V. (2013) “Sound diffusers based on sonic crystals”. Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 134, No. 6, pp. 4412-4417

R.G.R. “Regulamento Geral do Ruído”, Decreto-Lei nº9/2007 de 17 de Janeiro de 2007.

Sánchez-Pérez, J., Rubio, C., Martínez-Sala, R., Sánchez-Gandia, R., Gomez, V. (2002). "Acoustic barriers based on periodic arrays of scatterers". *Applied Physics Letters* Vol. 81, No. 27, pp. 5240-5242

Silva, L. (2013). "Desenvolvimento de difusores acústicos". Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Veselago, V., Braginsky, L., Shklover, V., Hafner, C. (2006). "Negative Refractive Index Material". *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience* Vol. 3, No. 2, pp. 1-30

Watts, G. (1995) "Acoustic performance of parallel traffic noise barriers" *Applied Acoustic*, Vol. 97, No. 2, pp. 95-119

Outra bibliografia consultada

Alitalo, P., Culhaoglu, A., Osipov, A., Thurner, S., Kemptner, E., Tretyakov, S. (2011). "Bistatic scattering characterization of a three-dimensional broadband cloaking structure". Department of Ratio Science and Engineering/SMARAD Centre of Excellence, Aalto University, Finland

Babino, A., Carabedo, F., Rodriguez, J. (s.d.) "Medición de la brecha entre bandas de un cristal sónico". Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA, Argentina

Castineira-ibáñez, S., Rubio, C., Romero-García, V., Sánchez-Pérez, J., García-raffi, L. (2012). "Design, Manufacture and Characterization of an Acoustic Barrier Made of Multi-Phenomena Cylindrical Scatters Arranged in a Fractal-Based Geometry". *Archives of Acoustics*, Vol. 37, NO. 4, pp. 455-462

Cox, T. (2004). "Acoustic Diffusers: The good, the bad and the ugly". Proceedings of the Institute of Acoustics, Salford University

Diaz, F., Benassi, A. (s.d.). "Cristales Sónicos Bidimensionales". Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA, Argentina

García-Chocano, V., Sánchez-Dehesa, J. (2012). "Optimum control of the broadband noise by barriers based on sonic crystals". Wave Phenomena Group, Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad Politécnica de València, Spain

Krynkin, A., Umnova, O., Chong, A., Taherzadeh, S., Attenborough, K. (2010). “Sonic Crystal noise barriers made of resonant elements”. Proceedings of 20th International Congress on Acoustic, ICA 2010, Sydney, Australia

Martínez-Sala, R., Rubio, C., García-Rffi, L., Sánchez-Pérez, E., Llinares, J. (2006). “Control of noise by trees arranged like sonic crystals” Journal of Sound and Vibration, Vol. 291, pp. 100-106

Martins, M., Godinho, L., Santos, L. (2013a). “Numerical Evaluation of Sound Attenuation Provided by Periodic Structures”. Archives of Acoustics, Vol. 38, No. 4, pp. 503-516

Mateus, D., Gonçalves, H., Pereira, A., Godinho, L., Branco, F. (2014). “Avaliação do coeficiente de difusão proporcionado por diversos tipos de superfície” TecniAcustica, Murcia, Espanha.

Meireles, P. (2012). “Estudo do Fenómeno da Difusão Sonora – Soluções à Base de Paineis Difusores”. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Milton, G., Nicorovici, N. (2006). “On the cloaking effects associated with anomalous localized resonance “. Proceeding of the Royal Society A, Vol. 462, No. 2074, pp. 3027-3039

Pogson, M., Whittaker, D., Gehring, G., Cox, T., Hughes, R., Angus, J. (2010). “Diffusive benefits of cylinders in front of a Schroeder diffuser”. Journal of the Acoustical Society of America, Vol 128, No. 3, pp. 1149-1154

Redondo, J., Sánchez-Morcillo, V., Picó, R. (2010). “The potential for phononic sound diffusers”. Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics, ISRA 2010, Melbourne, Austrália.

Redondo, J., Sánchez-Pérez, J., Fuster, J., Barrigón, J., Atanasio, P. (2013). “Pantallas Acústicas Basadas en Cristales de Sonido”. TecniAcustica, Valladolid, Espanha

Rubio, C., Caballero, D., Sánchez-Pérez, J., Martínez-Sala, R., Sánchez-Dehesa, J., Meseguer, F., Cervera, F. (1999). “The Existence of Full Gaps and Deaf Bands in Two-Dimensional Sonic Crystal”. Journal of Lightwave Technology, Vol.17, No. 11, pp. 2202-2207

Sánchez-Pérez, J., Caballero, D., Martínez-Sala, R., Rubio, C., Sánchez-Dehesa, J., Meseguer, F., Llinares, J., Gálvez, F. (1998). “Sound Attenuation by a Two-Dimensional Array of Rigid Cylinders”. *Physical Review Letters*, Vol. 8 No. 24, pp. 5325-5328

Torrent, D., Sánchez-Dehesa, J. (2011). “Broadband acoustic cloaks based on the homogenization of layered materials”. *Wave Motion*, Vol. 48, pp. 497-504