



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

# **Comportamento de barreiras acústicas – a aplicação do conceito de “cristal sónico” à atenuação do ruído de tráfego**

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

Autor

**Rui Miguel Tavares Dias**

Orientadores

**(Prof. Doutor) Luís Manuel Cortesão Godinho**

**(Prof. Doutor) Paulo Jorge Rodrigues Amado Mendes**

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

**Coimbra, Julho, 2014**

## AGRADECIMENTOS

Aproveito este espaço para agradecer a todas as pessoas que, de uma ou outra forma, me ajudaram, não só na realização deste trabalho, mas também ao longo deste percurso universitário.

Em primeiro lugar, um profundo agradecimento aos meus professores e orientadores deste trabalho, Professor Doutor Luís Manuel Cortesão Godinho e Professor Doutor Paulo Jorge Rodrigues Amado Mendes, por todo o conhecimento transmitido, ajuda e disponibilidade ao longo destes meses.

Um agradecimento também a todos os professores e diversos funcionários do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, por de alguma forma terem contribuído para o meu crescimento como aluno e pessoa.

Aos amigos Hugo Tavares, Bruno Marques, Márcio Machado e Renato Lobo, com quem vivi ao longo de vários anos, um grande obrigado por estarem sempre presentes nos bons e maus momentos.

Aos “primos” Tiago Silva, Diogo Silva, Daniel Rodrigues, Paulo Zacarias, Luís Girão e Edi Miguel, ao Virgílio Ferreira, Diogo Alves, Pedro Gonçalves, a todos os amigos e colegas que me acompanharam no magnífico perfil de Construções, por serem daqueles amigos que levo para a vida e me ajudaram sempre que necessário e prestaram o seu apoio e motivação para a elaboração deste trabalho.

Não sendo possível neste curto espaço agradecer a todos os meus amigos e colegas com quem tive o prazer de partilhar conhecimentos, ideias, vivências e tudo mais, um grande obrigado a eles.

Para finalizar, o maior agradecimento é dirigido à minha família. Aos meus pais, à minha irmã e aos meus avós, deixo aqui o mais sincero agradecimento por terem estado sempre a meu lado e por todo o apoio prestado. Sem vocês isto não seria possível de forma alguma.

## RESUMO

Ao longo dos últimos anos têm sido feitos vários estudos relativos aos metamateriais e às suas distintas propriedades, face às que normalmente se conhecem dos materiais mais convencionais.

Um dos casos particulares dos metamateriais são as estruturas periódicas de cristais sónicos. Sendo um cristal sónico a repetição de um elemento base numa grelha, ao variar a periodicidade da grelha é possível variar também as características do cristal sónico. Consoante a periodicidade da grelha e o material constituinte do cristal sónico, existem certas bandas de frequência que restringem a passagem das ondas, sendo essas bandas designadas por “bandgap’s”.

O presente trabalho pretende contribuir com informação acerca dos metamateriais e dos cristais sónicos, desde as suas propriedades e mecanismos de funcionamento, acrescentando ainda uma exposição da pesquisa de vários trabalhos nesses campos realizados por diversos outros autores. Essa pesquisa engloba variadas aplicações destes metamateriais nos campos da engenharia, como por exemplo o conceito de “cloaking”, redução da vibração sísmica, aplicação em difusores e em barreiras acústicas.

Dentro do campo das barreiras acústicas foi ainda realizada uma campanha experimental com amostras de barreiras acústicas de cristais sónicos feitas numa escala geométrica de 1/10, por forma a verificar em que medida estas barreiras podem ser uma alternativa às tradicionais barreiras acústicas na atenuação do ruído de tráfego.

Englobando a análise dos trabalhos feitos anteriormente neste campo e os resultados observados dos ensaios experimentais realizados, pode-se concluir que as barreiras acústicas de cristais sónicos apresentam-se como uma boa solução para enfrentar os problemas do ruído de tráfego.

O trabalho de pesquisa aqui apresentado foi apoiado por fundos FEDER através do Programa Operacional para Fatores de Competitividade – COMPETE e por fundos nacionais através da FCT (Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia), em fase de pesquisa do projeto PTDC/ECM-COM/1438/20.

## ABSTRACT

Over the last few years, several studies have been made related to metamaterials and their different properties compared to those that are generally known of the conventional materials.

One particular case of metamaterials are the periodic structures of sonic crystals. Being a sonic crystal a repetition of one basic element in a grid, by varying the periodicity of the grid it is possible to change the characteristics of the sonic crystal. Depending on the periodicity of the grid and the material of the sonic crystal, there are certain frequency bands that hinder the passage of waves, which are called “bandgap’s”.

This work intends to contribute with information about sonic crystals and metamaterials, their properties and working mechanisms, including also a description of several research studies in these fields, made by different authors. Those research works include various applications in many fields of engineering, such as the concept of “cloaking”, reducing of seismic vibration, and application on diffusers and on acoustic barriers.

On the field of acoustic barriers, an experimental campaign was also performed with samples with sonic crystals acoustic barriers in a 1/10 geometric scale, in order to assess whether these barriers can be an alternative to traditional acoustic barriers for traffic noise mitigation.

Taking into account the analysis of the studies previously made in this field and the results observed in the experimental tests, it can be concluded that the sonic crystal acoustic barriers can be presented as a good mitigation solution to face the problems of traffic noise.

The research work present herein was supported by FEDER funds through the Operational Programme for Competitiveness Factors – COMPETE and by national funds through the FCT (Portuguese Foundation for Science and Technology), under research project PTDC/ECM-COM/1438/2012.

---

## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Estrutura da tese.....	3
2	METAMATERIAIS .....	4
3	CRISTAIS SÓNICOS.....	11
3.1	Aspetos gerais sobre Cristais Sónicos e propagação do som.....	11
3.1.1	"Bandgap".....	13
3.1.2	Defeitos Pontuais.....	16
3.1.3	Guia de Onda.....	17
3.2	Aplicações na área da engenharia.....	18
3.2.1	Efeito de Ocultação/Camuflagem - "Cloaking".....	18
3.2.2	Redução da vibração sísmica.....	22
3.2.4	Barreiras.....	29
4	BARREIRAS ACÚSTICAS DE CRISTAIS SÓNICOS.....	30
5	PROPOSTA DE UM MODELO LABORATORIAL PARA ANÁLISE DO DESEMPENHO DE BARREIRAS ACÚSTICAS DE CRISTAIS SÓNICOS.....	44
5.1	Objetivos.....	44
5.2	Equipamento Utilizado para Registo das Medições.....	44
5.3	Constituição das Amostras a Ensaiar.....	45
5.4	Procedimento de Ensaio.....	46
5.5	Apresentação dos Resultados.....	49
5.5.1	Configuração Retangular com $a=2xD$ .....	50
5.5.2	Configuração Triangular com $a=2xD$ .....	51
5.5.3	Configuração Retangular com $a=3xD$ .....	53
5.5.4	Configuração Triangular com $a=3xD$ .....	54
5.5.5	Configuração Retangular com $a=2xD$ sem fila do meio.....	55
5.5.6	Configuração Triangular com $a=2xD$ sem fila do meio.....	56
5.5.7	Configuração Retangular com $a=2xD$ com vazios.....	57
5.5.8	Configuração Triangular com $a=2xD$ na direção vertical.....	58
5.6	Discussão dos Resultados.....	59
6	CONCLUSÃO.....	61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Índice de refração positivo (esquerda) e negativo (direita) .....	4
Figura 2.2 – Metamaterial formado por anéis de cobre e fio metálico (David Smith, 2000)....	5
Figura 2.3 – Metamaterial formado por membranas acústicas (Yang et al., 2010) .....	6
Figura 2.4 – Membrana acústica construída. A) membrana; B) massa anexada; C) anel de suporte rígido (Naify et al., 2010) .....	7
Figura 2.5 – Comparação da perda por transmissão entre o ensaio experimental e a análise de elementos finitos quando se usam massas distintas (Naify et al, 2010) .....	8
Figura 2.6 – Célula AAMM construída (Akl e Baz, 2012) .....	8
Figura 2.7 – Esquema de medição utilizando a célula AAMM (Akl e Baz, 2012) .....	9
Figura 2.8 – Metamaterial que consiste num arranjo periódico de “cabeças” (Assouar et al., 2012) .....	9
Figura 2.9 – Metamaterial formado por pilares elevados (Bilal e Hussein, 2013) .....	10
Figura 3.1 – Periodicidade em uma, duas e três direções .....	11
Figura 3.2 – Escultura de Eusebio Sempere nos jardins da Fundación Juan March em Madrid (Garcia, 2010) .....	13
Figura 3.3 – Observação de “bandgap” num intervalo de frequências (Garcia, 2010).....	14
Figura 3.4 – Constante de grelha “a” em sistemas periódicos (Garcia, 2010).....	15
Figura 3.5 – Diferentes tipos de defeitos pontuais. A) Dispersores intersticiais; B) Vagas/Falhas; C) Defeitos intersticiais; D) Defeitos substitucionais (Garcia, 2010).....	16
Figura 3.6 – Modo localizado devido à introdução de um defeito pontual na estrutura periódica (Garcia, 2010).....	17
Figura 3.7 – Propagação de ondas através de guias de onda (Garcia, 2010).....	18
Figura 3.8 – Resposta em termos de pressão sem cilindro (imagem da esquerda), com cilindro (imagem central) e com cilindro envolvido por um manto de camuflagem (imagem da direita) (imagem adaptada de Cummer e Schurig, 2007).....	19
Figura 3.9 – Estruturas cilíndricas periodicamente homogeneizadas em camadas (Torrent e Sánchez-Dehesa, 2011).....	19
Figura 3.10 – Resposta da reflexão com o aumento do número das camadas de camuflagem (Torrent e Sánchez-Dehesa, 2011).....	20
Figura 3.11 – Cilindro camuflado por um conjunto de chapas de metal cónicas empilhadas (Alitalo et al., 2011).....	21

---

Figura 3.12 – Estrutura sísmica de cristais construída no solo (Alagoz e Alagoz, 2011) .....	22
Figura 3.13 – Resultados da magnitude de vibração para diferentes configurações do cristal sísmico (Alagoz e Alagoz, 2011).....	23
Figura 3.14 – Aplicação de barreiras sísmicas em torno de construções (retirado de Kim e Das, 2012) .....	24
Figura 3.15 – Meta-caixas que constituem a barreira (Kim e Das, 2013).....	25
Figura 3.16 – Nível de pressão sonora: (a) barreira com metamateriais e (b) barreira normal (Kim e Das, 2013).....	25
Figura 3.17 – Modelo de dispersão múltipla utilizando uma matriz de cilindros posicionados em frente a um difusor de Schroeder (Pogson et al., 2010).....	26
Figura 3.18 – Comparação do coeficiente de difusão considerando apenas os cilindros, apenas o difusor de Schroeder e com os cilindros em frente ao difusor de Schroeder (Pogson et al., 2010).....	27
Figura 3.19 – Tela mista formada por uma barreira tradicional e por um cristal adjacente que funciona como difusor (Redondo et al., 2013).....	28
Figura 3.20 – Esquema de modelação utilizado (Redondo et al., 2013).....	28
Figura 4.1 – Esquema de funcionamento de uma barreira padrão .....	31
Figura 4.2 – Barreira de cristais sónicos (Garcia, 2010).....	31
Figura 4.3 – Posição dos pontos de medição (em cima à esquerda), grelhas utilizadas (em cima à direita) e tipo de árvores utilizadas (em baixo) (Martínez-Sala et al., 2006).....	34
Figura 4.4 – Diferentes configurações com defeitos e caminhos de onda (Babino et al., s.d.).....	35
Figura 4.5 – Estrutura mista com tubos de alumínio e balões e comparação dos seus valores de atenuação acústica com os de uma estrutura constituída apenas por tubos de alumínio (Fuster-Garcia et al., 2007).....	36
Figura 4.6 – Corte dos cilindros utilizados na barreira de cristais sónicos (Krynkin et al., 2010).....	37
Figura 4.7 – Resultados em termos de Perda por Inserção para o caso de cilindros rígidos (imagem da esquerda) e para o caso dos cilindros ocos com 4 fendas (Krynkin et al., 2010).37	37
Figura 4.8 – Painel perfurado (esquerda) e consequente cilindro (direita) (García-Chocano et al., 2012).....	38
Figura 4.9 – Esquema com cilindros contendo partículas de borracha utilizado para o algoritmo de otimização (imagem adaptada de García-Chocano e Sánchez-Dehesa, 2012).....	39
Figura 4.10 – Arranjo dos dispersores e Perda por Inserção obtida através do Método dos Elementos Finitos (Castiñeira-Ibáñez et al., 2012).....	40
Figura 4.11 – Barreira acústica de cristais sónicos (Martins et al., 2013b).....	43
Figura 5.1 – Equipamento das medições: a) amplificador; b) fonte sonora; c) microfone; d) Symphonie; e) computador portátil com dBbati32 .....	44

---

---

Figura 5.2 – Montagem base das barreiras de cristais sónicos .....	46
Figura 5.3 – À esquerda “túnel anecoico” e à direita câmara semi-aneecóica .....	46
Figura 5.4 – Configuração para as medições a realizar .....	47
Figura 5.5 – Escolha e configuração do microfone a utilizar nas medições .....	48
Figura 5.6 – Calibração do microfone .....	48
Figura 5.7 – Configuração do setup de aquisição .....	49
Figura 5.8 – Configuração Retangular com $a=2xD$ .....	50
Figura 5.9 – Comparação da Perda por Inserção entre os valores ensaiados experimentalmente (linha vermelha) e os valores previstos teoricamente (linha azul), no caso da configuração retangular com $a=2xD$ .....	51
Figura 5.10 – Configuração Triangular com $a=2xD$ .....	52
Figura 5.11 – Comparação da Perda por Inserção entre os valores ensaiados experimentalmente (linha vermelha) e os valores previstos teoricamente (linha azul), no caso da configuração triangular com $a=2xD$ .....	52
Figura 5.12 – Configuração Retangular com $a=3xD$ .....	53
Figura 5.13 – Comparação da Perda por Inserção entre os valores ensaiados experimentalmente (linha vermelha) e os valores previstos teoricamente (linha azul), no caso da configuração retangular com $a=3xD$ .....	53
Figura 5.14 – Configuração Triangular com $a=3xD$ .....	54
Figura 5.15 – Comparação da Perda por Inserção entre os valores ensaiados experimentalmente (linha vermelha) e os valores previstos teoricamente (linha azul), no caso da configuração triangular com $a=3xD$ .....	54
Figura 5.16 – Configuração Retangular com $a=2xD$ sem fila do meio .....	55
Figura 5.17 – Comparação da Perda por Inserção entre os valores ensaiados experimentalmente (linha vermelha) e os valores previstos teoricamente (linha azul), no caso da configuração retangular com $a=2xD$ sem fila do meio .....	55
Figura 5.18 – Configuração Triangular com $a=2xD$ sem fila do meio .....	56
Figura 5.19 – Comparação da Perda por Inserção entre os valores ensaiados experimentalmente (linha vermelha) e os valores previstos teoricamente (linha azul), no caso da configuração triangular com $a=2xD$ sem fila do meio .....	56
Figura 5.20 – Configuração Retangular com $a=2xD$ com vazios .....	57
Figura 5.21 – Comparação da Perda por Inserção entre os valores ensaiados experimentalmente (linha vermelha) e os valores previstos teoricamente (linha azul), no caso da configuração retangular com $a=2xD$ com vazios .....	58
Figura 5.22 – Configuração Triangular com $a=2xD$ na direção vertical .....	58
Figura 5.23 – Comparação da Perda por Inserção entre os valores ensaiados experimentalmente (linha vermelha) e os valores previstos teoricamente (linha azul), no caso da configuração triangular com $a=2xD$ na direção vertical .....	59

---



## **SIMBOLOGIA**

dB – Decibel

Hz – Hertz

$\varepsilon$  – Permissividade

$\mu$  – Permeabilidade

$\eta$  – Índice de refração

$\lambda$  – Comprimento de onda

Z – Impedância do meio

$c_{\text{som}}$  – Velocidade do som no meio

$\rho$  – Densidade

$\tau$  – Tempo normalizado

a – Constante representativa do espaçamento entre elementos da grelha

r – Raio dos dispersores

$\alpha$  – Absorção acústica

## ABREVIATURAS

OMS – Organização Mundial de Saúde

$L_{den}$  – Indicador de ruído dos períodos diurno, entardecer e noturno

$L_n$  – Indicador de ruído do período noturno

AAMM – Metamaterial Acústico Ativo

MST – Teorema da Dispersão Múltipla

ff – Coeficiente de preenchimento ou “Filling Fraction”

FDTD – Método das Diferenças Finitas no domínio do tempo

IL – Perda por Inserção ou “Insertion Loss”

EN – Norma Europeia

MFS – Método das Soluções Fundamentais ou “Method of Fundamental Solutions”

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

Ao longo dos últimos anos, tem-se vindo a assistir a um desenvolvimento ao nível da indústria, comércio, infraestruturas, etc., com o propósito de melhorar e facilitar o nível de vida das populações. No entanto, nem tudo inerente a esse desenvolvimento conduz a efeitos positivos para as populações, sobretudo para aquelas que habitam em espaços urbanos. Com o crescimento urbano surgem também novas fontes de ruído (sons indesejáveis) provenientes das mais diversas atividades e/ou trabalhos, que resultam num aumento da poluição sonora naquele espaço.

O ruído de tráfego é um dos tipos particulares de ruído que afeta as populações, que tem vindo a aumentar essencialmente devido ao crescente número de meios de circulação rodoviários que são construídos de modo a dar resposta ao desenvolvimento do nível de vida. Assim, aumentando o número de meios de circulação, é inevitável o aumento do tráfego rodoviário, daí resultando o aumento do ruído de tráfego.

Para se ter uma pequena noção desse aumento, segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), entre 2007 e 2010, o número de veículos registados no Mundo aumentou em 15% (WHO, 2013).

Além da óbvia degradação de qualidade da vida que o ruído provoca, este contribui também para o aparecimento de problemas de saúde junto das populações, seja a nível de cansaço, perda de audição, insónias, capacidade de concentração, etc. De referir também que o ruído não afeta de forma igual todas as pessoas e depende, por exemplo, da intensidade, da distância à fonte e do tempo de exposição.

A OMS estima que cerca de 40% da população da União Europeia está exposta a níveis de ruído de tráfego rodoviário superiores a 55 dB(A) de dia e que mais de 30% está exposta a níveis superiores a 55 dB(A) durante a noite (WHO, 1999).

O Regulamento Geral do Ruído (R.G.R.), documento que estipula os valores limite de exposição ao ruído, indica como valores limite 55 dB(A) para o indicador  $L_{den}$  e 45 dB(A) para o indicador  $L_n$  em zonas sensíveis, enquanto que em zonas mistas estes valores são 65

dB(A) e 55 dB(A) respetivamente. O indicador  $L_{den}$  representa uma média ponderada das 24h e o  $L_n$  representa o ruído médio durante o período noturno (das 23h às 7h).

Deste modo, surge como necessidade a implementação de medidas que diminuam o próprio ruído de tráfego e/ou medidas que diminuam a intensidade com que este atinge os recetores.

As medidas a considerar para a redução do ruído podem ser aplicadas diretamente na fonte, no espaço entre a fonte e o recetor (meio de propagação) ou no recetor.

No que diz respeito a medidas a aplicar na fonte estas centram-se sobretudo na aplicação/desenvolvimento de tecnologias que diminuam o ruído, quer o que é gerado pelo próprio motor dos veículos, como o ruído provocado pela contato entre o pneu e o pavimento.

Relativamente a medidas a considerar na redução do ruído no meio de propagação pode referir-se a aplicação de obstáculos, que consistem na sua maioria na utilização de barreiras acústicas. Estas são uma solução que pode obter bons níveis de redução sonora. Outro ponto importante na redução do ruído de tráfego entre a fonte e o recetor é a distância entre ambos. No caso de uma fonte linear (a que mais se assemelha a uma via de tráfego), a energia sonora diminui para metade sempre que a distância à fonte aumento para o dobro. Assim as barreiras acústicas surgem como um boa solução quando já existem infraestruturas construídas e não é possível um aumento da distância à fonte.

Em relação a medidas de atenuação do ruído no recetor, podemos considerar, por exemplo, o melhoramento do isolamento acústico das fachadas dos edifícios.

Uma das novas soluções em termos de barreiras acústicas para a mitigação do ruído de tráfego passa pela construção de barreiras de cristais sónicos, sendo que estas estruturas periódicas impedem a passagem do som em determinadas gamas de frequência.

Além da aplicação em barreiras acústicas, estas estruturas periódicas podem também ser usadas noutros campos da engenharia, tais como na aplicação em difusores, utilização no conceito de “cloaking”, etc.

## 1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como principal objetivo avaliar a resposta dada em termos de atenuação sonora por parte de barreiras acústicas de cristais sónicos, dando assim continuidade a estudos feitos anteriormente por outros autores.

Com essa finalidade foram construídas barreiras acústicas de cristais sónicos à escala geométrica de 1/10, para a realização de ensaios experimentais, de modo a que se possa observar e compreender o comportamento obtido por cada uma delas.

Além dessa avaliação experimental é também tido como objetivo neste trabalho dar a conhecer outras aplicações para os cristais sónicos no campo da engenharia, com especial ênfase na aplicação em barreiras acústicas.

### **1.3 Estrutura da tese**

O presente trabalho apresenta-se dividido em seis capítulos.

O primeiro capítulo apresenta o enquadramento geral do tema principal deste trabalho, os objetivos a alcançar e apresenta ainda a estruturação do trabalho.

No capítulo dois é introduzido o conceito de metamateriais, desde a sua origem até aos seus campos de aplicações.

O terceiro capítulo aborda mais especificamente o conceito de cristais sónicos. São dados a conhecer os aspetos gerais e os conceitos teóricos acerca dos mesmos. Além disso, são também analisados diferentes campos de aplicação dos cristais sónicos.

O capítulo quatro descreve exclusivamente a aplicação dos cristais sónicos em barreiras acústicas, dando também a conhecer o trabalho de outros autores neste campo.

No quinto capítulo descreve-se a proposta de um modelo laboratorial para análise do desempenho de barreiras acústicas de cristais sónicos, utilizando amostras experimentais à escala geométrica 1/10, que permitem observar experimentalmente o comportamento destas em termos de atenuação sonora.

No capítulo seis são analisadas as conclusões gerais do presente trabalho, deixando também como sugestão futuros trabalhos nesta área.

## 2 METAMATERIAIS

Os metamateriais são produzidos através de materiais convencionais (como por exemplo metais ou plásticos), sendo dotados de propriedades físicas que não são encontradas diretamente na natureza. Essas propriedades não são obtidas direta e exclusivamente em função do tipo de material constituinte, mas sim em função da sua disposição geométrica. Estes materiais são normalmente dispostos em grelhas periódicas, podendo assim ser chamados de estruturas periódicas.

Veselago (1968), ensaiou pela primeira vez um metamaterial do qual observou o aparecimento de um índice de refração negativo, ao contrário de todos os materiais naturais que apresentam um índice de refração positivo.



Figura 2.1 – Índice de refração positivo (esquerda) e negativo (direita)

No campo da ótica, quase todos os materiais, como o vidro ou a água, possuem valores positivos de permissividade ( $\epsilon$ ) e permeabilidade ( $\mu$ ). Por exemplo, a velocidade da luz num meio define-se com base na permissividade e permeabilidade. O índice de refração,  $n$ , na prática, pode-se determinar como:

$$n = \pm \sqrt{\mu\epsilon}$$

Por convenção, considera-se positiva a raiz quadrada de  $n$ .

No entanto, alguns metamateriais possuem tanto permeabilidade como permissividade negativos. Nesse caso, o produto é positivo e, deste modo  $n$  é real. Contudo, nessas circunstâncias toma-se a raiz quadrada de  $n$  negativa.

Quando a permissividade e a permeabilidade são ambas negativas, está-se na presença de um índice de refração negativo.

Um índice de refração negativo é uma importante característica no projeto e fabrico de metamateriais.

O uso de metamateriais pode-se aplicar a diversos campos da engenharia, tais como no conceito de “cloaking” (abordado no Capítulo 3), construção de barreiras acústicas de cristais sônicos (Capítulo 4), na redução da interferência em antenas, etc.

Smith et al (2001) criaram um material bidimensional com anéis de cobre e fios metálicos (Figura 2.2) capaz de curvar a radiação na direção contrária dos materiais normais como o vidro.



Figura 2.2 – Metamaterial formado por anéis de cobre e fio metálico (Smith et al., 2000)

Além do campo dos metamateriais eletromagnéticos (os primeiros a serem abordados), também os metamateriais acústicos e sísmicos têm sido alvo de estudos. Embora as ondas eletromagnéticas e acústicas sejam muito diferentes, os princípios básicos dos metamateriais óticos aplicam-se aos metamateriais acústicos.

Um metamaterial afeta as ondas (eletromagnéticas ou acústicas), por ter características estruturais menores que o comprimento de onda da respetiva onda.

Até aos dias de hoje a maioria dos metamateriais que se têm conseguido construir ainda são de grandes dimensões, quando comparados com o comprimento de onda da radiação visível.

Com o aparecimento dos metamateriais, tornou-se também possível aproximar da realidade a criação de mantos de camuflagem, ou seja, um processo esconder objetos. Eles podem forçar a luz a fazer uma trajetória curva, possibilitando assim a criação de mantos de invisibilidade. Este tema será abordado com maior detalhe no Capítulo 3.3.1 Efeito de Ocultação/Camuflagem - “Cloaking”.

Yang et al (2010) demonstraram experimentalmente que um metamaterial, do género de uma membrana acústica, pode funcionar como uma superfície totalmente refletora em certas frequências. Como termo comparativo, os autores referem as paredes de alvenaria como eficazes a partir das médias frequências (acima dos 500 Hz). No entanto, este tipo de parede vê a sua eficácia reduzida nas frequências em torno dos 100 Hz, mostrando valores de atenuação na ordem dos 20 dB, que é considerado como pouco, tendo em conta que o ruído sonoro das ruas atinge frequentemente os 70 dB. Segundo a lei teórica da densidade da massa, a transmissão acústica através de uma parede é inversamente proporcional ao produto da espessura da parede, da densidade e da frequência do som. Assim, duplicando a espessura da parede ter-se-á uma adição de 6 dB ao valor da atenuação. Para essa atenuação passar dos 20 dB para os 40 dB seria necessário uma espessura oito vezes superior.

Desta forma, os autores criaram metamateriais que consistem em painéis acústicos criados com base numa membrana fina ligeiramente alargada e fixada por uma grelha de plástico relativamente rígida, com um pequeno peso ligado ao centro de cada grelha tal como se observa na Figura 2.3. A membrana apresenta uma espessura de 0,28 mm, cada célula unitária tem uma largura de 0,10 mm e 0,15 mm de altura. As paredes que separam cada célula têm espessura de 1 mm. O peso utilizado em cada centro tem 0,11 gr. Assim, o tamanho de cada painel é 300x300x15 mm<sup>3</sup>. Para esta amostra, os resultados mostram uma atenuação de 30,5 dB nos 107 Hz. Usando duas amostras em conjunto, em que o peso ligado aos centros passa a ser de 0,21 gr, observa-se uma atenuação de 48,4 dB em torno dos 200 Hz. Utilizando separadamente as amostras, estas apresentam valores de 16,1 dB de atenuação. Estes resultados são bastante superiores quando comparados com os previstos pela lei teórica da densidade da massa.



Figura 2.3 – Metamaterial formado por membranas acústicas (Yang et al., 2010)



Naify et al (2010) estudaram também a resposta em termos de perda por transmissão de um metamaterial formado por uma membrana acústica. Os autores referem, que quando comparado com um placa fina que obedece à lei da massa, o uso de metamateriais acústicos pode levar até um aumento de cinco vezes da perda por transmissão nas baixas frequências. Variando as propriedades da membrana é possível ajustar a frequência de pico para a perda por transmissão. Neste trabalho, os autores calcularam a perda por transmissão em função da frequência, num tubo de impedância, variando a massa e a tensão da membrana. Estes resultados experimentais são comparados com uma análise de elementos finitos. A membrana utilizada é uma película de polieterimida, com 29 mm de diâmetro e 0,0762 mm de espessura. A Figura 2.4 mostra a membrana construída.

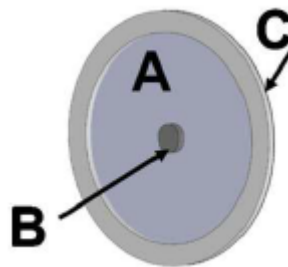


Figura 2.4 – Membrana acústica construída. A) membrana; B) massa anexada; C) anel de suporte rígido (Naify et al, 2010)

A tensão da membrana é variada através de três temperaturas de cura da membrana. Além da medição da perda por transmissão, também foi medido o deslocamento e a aceleração da estrutura durante a excitação, com recurso a um vibrómetro a laser. As amostras foram excitadas acusticamente em frequências discretas de 300 até 4500 Hz, usando um alto-falante no tubo de impedância. Dividindo a força incidente na membrana pela sua aceleração obteve-se a massa dinâmica efetiva.

Em termos de resultados, verificou-se que o uso destas membranas aumenta bastante a perda por transmissão abaixo dos 1000 Hz, quando comparados com os valores previstos pela lei da massa. Comparando os resultados experimentais quando se varia a massa da membrana com os resultados obtidos com recurso à análise de elementos finitos, a Figura 2.5 mostra um bom ajuste entre os dois métodos e uma diferença entre as duas massas utilizadas.

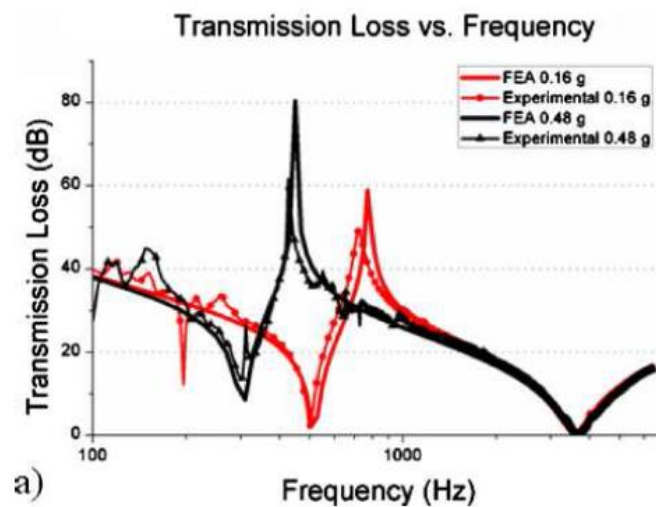


Figura 2.5 – Comparação da perda por transmissão entre o ensaio experimental e a análise de elementos finitos quando se usam massas distintas (Naify et al, 2010)

A partir destes resultados, os autores concluem ser possível isolar os sons de baixa frequência e posteriormente sintonizar para uma frequência desejada.

Akl e Baz (2012) desenvolveram um metamaterial acústico ativo (AAMM) para superar a largura de banda de frequências limitada dos metamateriais passivos. A caracterização acústica da célula AAMM criada foi feita em termos da medição da sua impedância acústica e perda por transmissão, comparando os resultados com as previsões do modelo de elementos finitos. O AAMM construído consiste num cilindro de acrílico cortado, com um volume de água confinado dos dois lados por piezoelétricos bilaminares, tal como mostra a Figura 2.6.



Figura 2.6 – Célula AAMM construída (Akl e Baz, 2012)

O esquema de medição utilizado para a realização das medições consistiu em colocar o AAMM num tubo de impedância com um acessório para a perda de transmissão, como mostra a Figura 2.7. No ensaio foram considerados três casos. No primeiro caso, nenhum sinal de

resposta é alimentado para o acionamento bilaminar, tornando toda a célula passiva. No segundo caso, é alimentado um sinal de resposta negativo para acionar o bilaminar aumentando a sua rigidez. No último caso, é alimentado uma resposta positiva para acionar o bilaminar reduzindo a sua rigidez. Em geral, os resultados obtidos mostraram uma boa concordância com o método dos elementos finitos desenvolvido. A célula construída mostra também propriedades dinâmicas homogeneizadas acima dos 3 kHz, tornando-o num sistema com um único grau de liberdade, com propriedades do material controláveis, manifestadas na única frequência natural nessa largura de banda. Os autores concluem, assim, que o AAMM criado pode ser útil na fabricação da próxima geração de mantos acústicos e metamateriais.

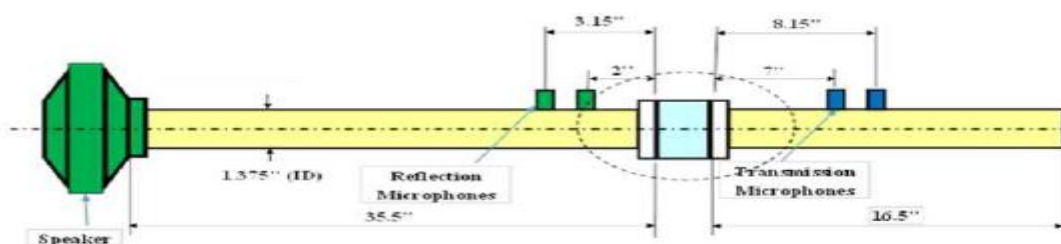


Figura 2.7 – Esquema de medição utilizando a célula AAMM (Akl e Baz, 2012)

Assouar et al (2012) estudaram uma estrutura de um metamaterial que consistia num arranjo periódico dum conjunto de “cabeças” (tungstênio em borracha de silicone) depositada numa chapa fina de alumínio, tal como mostra Figura 2.8.

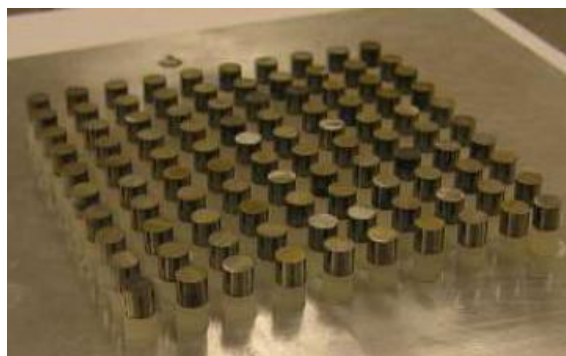


Figura 2.8 – Metamaterial que consiste num arranjo periódico de “cabeças” (Assouar et al., 2012)

A periodicidade do arranjo é de 1 cm e o diâmetro das “cabeças” de 6 mm. Em termos de resultados observou-se a capacidade de atenuação desta estrutura em baixas frequências, que é alcançada através de uma largura de banda superior a 2300 Hz, com a “bandgap” (banda de

frequências onde a propagação é impedida) a começar nos 650 Hz. Verificou-se ainda, que retirando duas ou três filas de “cabeças”, se observam caminhos de onda.

Bilal e Hussein (2013) investigaram as características de dispersão de um metamaterial localmente ressonante, formado por pilares elevados em regiões sólidas numa placa padronizada por um conjunto de buracos periódicos (Figura 2.9).

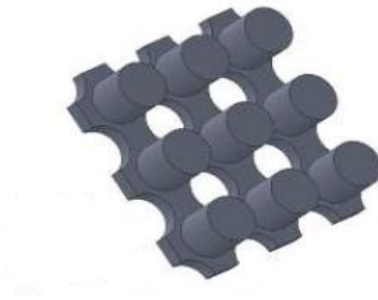


Figura 2.9 – Metamaterial formado por pilares elevados (Bilal e Hussein, 2013)

Os autores consideram um “efeito trampolim” levado a cabo pelas regiões sólidas, levando a um aumento da ressonância por parte dos pilares, quando comparado com o caso em que se tem apenas pilares sem buracos. Com este “efeito trampolim”, é possível que o comprimento de onda das “bandgaps” aumente até cerca de 4 vezes. Os autores adiantam que o conceito de metamaterial “trampolim” proporciona diversas oportunidades para as aplicações que requerem grandes “bandgaps”.

## 3 CRISTAIS SÓNICOS

### 3.1 Aspectos gerais sobre Cristais Sónicos e propagação do som

A forma de uma estrutura de cristais sónicos corresponde a uma “grelha”, que consiste num elemento base que é repetido regularmente em uma, duas ou três dimensões (Figura 3.1).

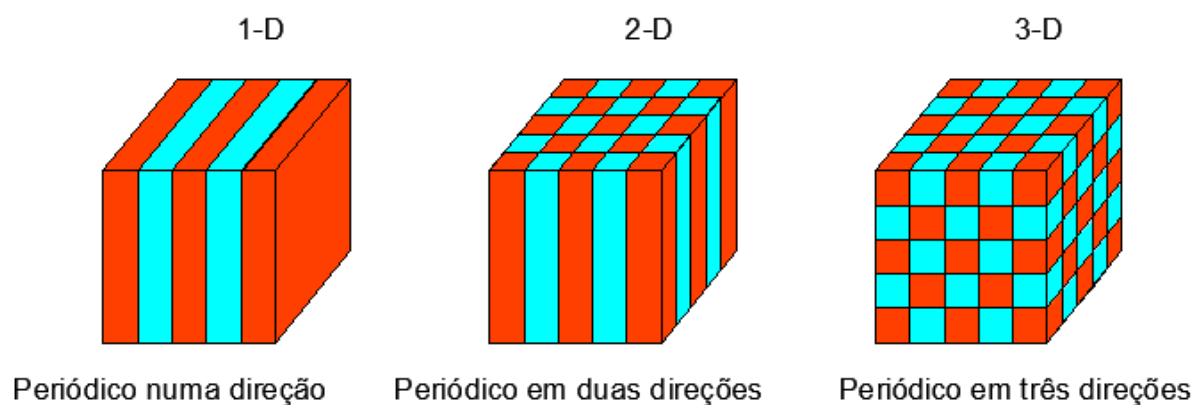


Figura 3.1 – Periodicidade em uma, duas e três direções

Os cristais sónicos podem ser considerados como um caso particular dos “metamateriais”, quando o comprimento de onda,  $\lambda$ , é maior que a distância de separação entre os elementos dispersores,  $a$ .

Sendo os cristais sónicos estruturas constituídas por dispersores de som, que são arranjados periodicamente numa grelha, estes inibem a propagação do som em certas bandas de frequência. A essas bandas inibidas dá-se o nome de “bandgap’s”. Diz-se, portanto, que os cristais sónicos são uma versão sonora dos cristais fotónicos (que afetam o movimento dos fótons ou partículas de luz).

Além da capacidade dos cristais sónicos impedirem a propagação do som em determinadas bandas de frequência, estes têm também a capacidade de deixar passar com grande eficiência

outras ondas. O caminho por onde essas ondas passam é designado por guia de onda e estas podem ser conseguidas se se retirarem alguns dos elementos dispersores.

Para que se forme um cristal sónico é preciso que a impedância dos centros dispersores seja maior que a do meio onde estão inseridos.

$$Z = c_{\text{som}} \cdot \rho ,$$

onde  $Z$  representa a impedância do meio,  $c$  é a velocidade do som nesse meio e  $\rho$  a sua densidade.

Devido ao facto dos meios em questão terem diferentes impedâncias (diferentes valores de densidade e de velocidade de propagação), na interface desses meios vai existir uma quantidade de energia refletida.

Tomando os elementos (cilindros) como um fluido de grande densidade, a equação do movimento para a pressão, segundo Rubio et al (1999), é dada por:

$$\nabla \cdot \left( \frac{\nabla p(r, t)}{\rho(r)} \right) = \frac{1}{c^2(r)\rho(r)} \cdot \frac{\partial^2 p(r, t)}{\partial t^2}$$

Na fórmula,  $p(r, t)$  é a pressão,  $\rho(r)$  a densidade e  $c(r)$  a velocidade. Todas estas quantidades dependem da sua posição no espaço bidimensional  $r = (x, y)$ .

Com o auxílio de métodos numéricos, Rubio et al (1999) concluíram que a equação anterior é adequada sempre que o quociente entre as densidades dos meios seja maior que 200 e o quociente das velocidades seja maior que 17.

Os níveis de atenuação acústica destas estruturas periódicas dependem essencialmente de dois aspetos: a configuração geométrica da estrutura e as propriedades acústicas dos elementos que a constituem.

O facto de se poderem utilizar diversas configurações geométricas e diversos materiais na constituição destas estruturas de cristais sónicos, torna possível um vasto número de diferentes soluções que se podem adaptar por forma a obter os melhores resultados consoante o tipo de local ou ambiente a que serão sujeitas. Por exemplo, a utilização de materiais porosos nos cilindros dispersores leva a um aumento da atenuação devido às propriedades absorventes do material. Assim, esta solução pode ser particularmente interessante quando

existem duas barreiras paralelas, visto que, neste caso, as reflexões entre as barreiras em questão seriam menores.

Considera-se que a primeira evidência de atenuação acústica por parte deste tipo de estruturas periódicas surgiu com os ensaios realizados em 1995 a uma escultura presente nos jardins da Fundación Juan March em Madrid (Figura 3.2), constituída por vários tubos metálicos verticais dispostos segundo uma grelha retangular. Das medições efetuadas constataram-se efeitos atenuadores em certas bandas de frequência de sons.



Figura 3.2 – Escultura de Eusebio Sempere nos jardins da Fundación Juan March em Madrid (Garcia, 2010)

### 3.1.1 “Bandgap”

Tal como referido anteriormente, as “bandgap’s” são tidas como bandas de frequências inibidas nas estruturas periódicas.

Isto quer dizer que se uma determinada onda com uma frequência fora da “bandgap” incide na estrutura periódica, ela pode excitar um modo de propagação e, nesse caso, a onda pode passar através da estrutura periódica (cristal sónico).

No caso da frequência da onda incidente estar dentro do limite da “bandgap”, então a propagação da onda através do sistema periódico será inibida.



Partindo da equação da propagação do som e aplicando nela equações estacionárias e outras funções devidas à periodicidade, Díaz e Benassi (s.d), obtiveram uma equação que serve para a determinação das “bandgap’s”.

A partir dessa equação, os referidos autores, no seu artigo, determinaram as bandas inibidas num determinado intervalo de frequências.

Tal como dito anteriormente, a existência de “bandgap’s” verifica-se pela ausência de bandas em determinados feixes de frequência. A Figura 3.3 permite ter uma boa percepção desse fenómeno de ausência de banda.

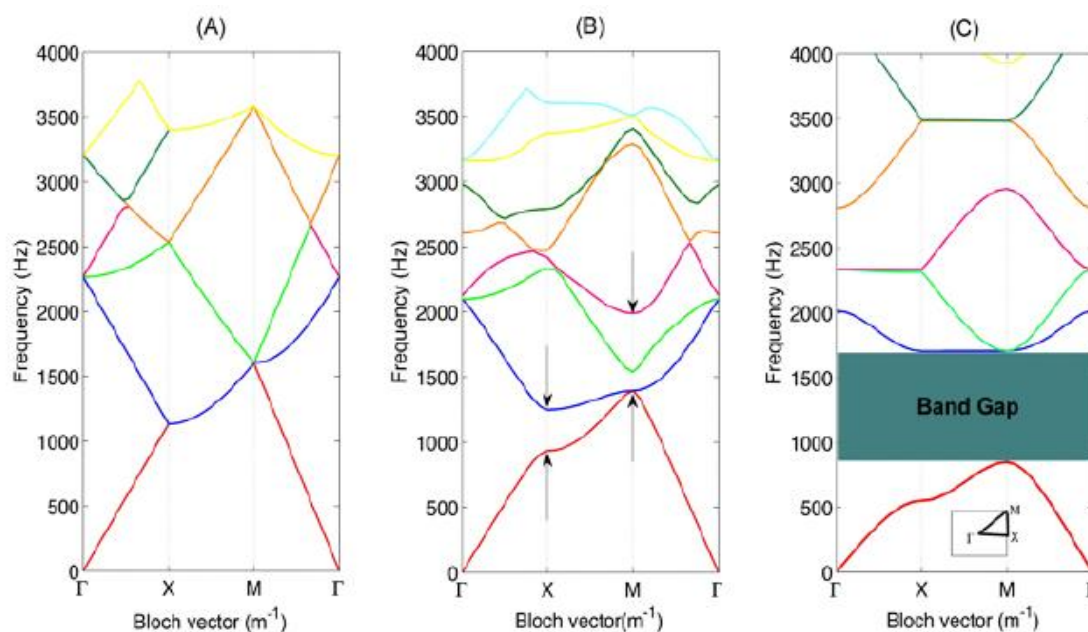


Figura 3.3 – Observação de “bandgap” num intervalo de frequências (Garcia, 2010)

A presença de “bandgap’s” em estruturas periódicas deve-se à difração de Bragg. Devido ao espalhamento/difração em cada plano de dispersores pode surgir um pico de difração em certas frequências, para determinados comprimentos de onda e ângulos de incidência.

Contextualizando, no tema em análise, a difração ou dispersão é um processo físico que ocorre quando as ondas sonoras são obrigadas a desviar-se da sua trajetória, devido a “obstáculos” localizados no meio por onde elas passam. Quando as ondas se propagam ao longo de uma barreira de cristais sónicos elas serão dispersadas por cada um dos dispersores. Depois disso, essas mesmas ondas serão novamente dispersadas por outros dispersores criando um fenómeno infinito de dispersão das ondas entre os dispersores. Esse fenómeno é



conhecido como dispersão múltipla. O Teorema da Dispersão Múltipla (MST) caracteriza-se como auto-consistente, sendo aplicável a cilindros espaçados periodicamente ou aleatoriamente. Várias vezes o termo dispersão múltipla é associado à difusão. Os painéis que são projetados/utilizados para provocar uma dispersão múltipla são também correntemente chamados de painéis difusores ou apenas difusores.

Para a definição das “bandgap’s” um dos parâmetros mais importantes dos sistemas periódicos é a constante de grelha, normalmente definida como parâmetro “a” (distância entre os centros dispersores). Na Figura 3.4 é possível observar como se faz a medição dessa constante.

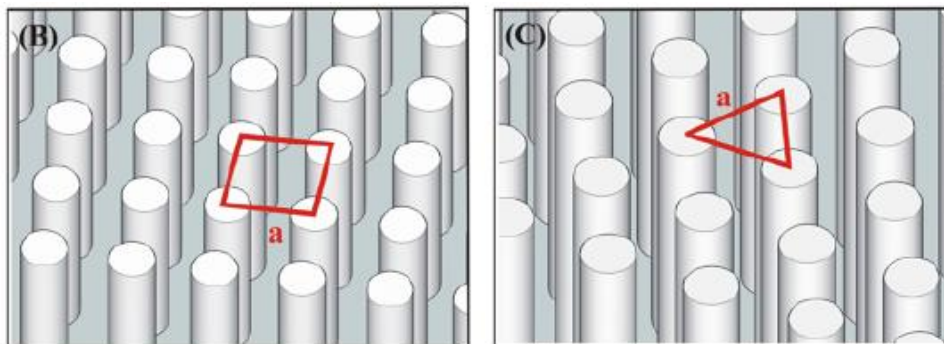


Figura 3.4 – Constante de grelha “a” em sistemas periódicos (Garcia, 2010)

Através desta constante de grelha (a) e do raio dos dispersores (r) é possível determinar o Fator de Preenchimento - “Filling Factor” (ff), que define a relação entre a área ocupado pelos dispersores e a área total ocupado pela amostra, no caso bidimensional.

Para uma grelha retangular o Fator de Preenchimento é dado por:

$$ff = \frac{\pi r^2}{a^2}$$

Tratando-se de um grelha triangular:

$$ff = \frac{2\pi r^2}{\sqrt{3}a^2}$$

Assim, observa-se que as “bandgap’s” podem ser conseguidas alterando o diâmetro dos dispersores e/ou a configuração geométrica da grelha.

Qualquer estrutura periódica apresenta as suas características e propriedades em função da sua geometria. Como tal, considera-se que se está a introduzir um defeito sempre que a regularidade desta seja distorcida. Estes defeitos, em função da sua dimensão, vão alterar diretamente as propriedades físicas do sistema periódico.

### 3.1.2 Defeitos Pontuais

Considera-se um defeito pontual como a distorção do sistema numa célula unitária que constitui esse sistema (Figura 3.5). No caso particular das barreiras acústicas de cristais sónicos, diz-se que se está na presença de um defeito pontual quando um dos dispersores é afetado/distorcido.

De entre os defeitos pontuais, os mais comuns são:

- Dispersores intersticiais: quando um dispersor ocupa uma posição entre dois pontos de equilíbrio na grelha;
- Vagas/Falhas: ponto da grelha onde não existe dispersor;
- Defeitos intersticiais: quando um dispersor de um material diferente é colocado num ponto intersticial da grelha;
- Defeitos substitucionais: quando se tem um dispersor de um material diferente colocado num ponto da grelha.

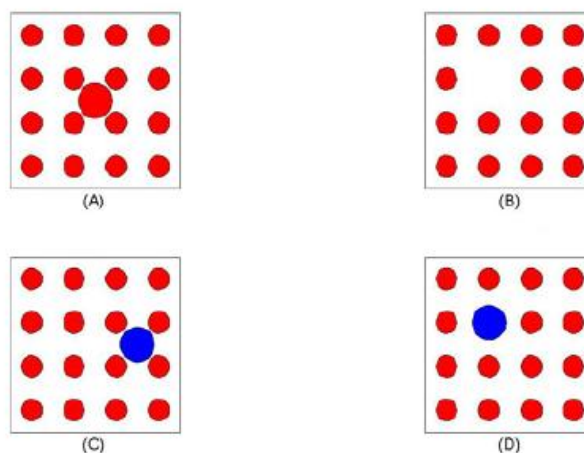


Figura 3.5 – Diferentes tipos de defeitos pontuais. A) Dispersores intersticiais; B) Vagas/Falhas; C) Defeitos intersticiais; D) Defeitos substitucionais (imagem adaptada de Garcia, 2010)

Com a introdução de um defeito pontual na estrutura periódica dá-se o aparecimento daquilo a que se chama modo localizado dentro da “bandgap”. Por exemplo, com a introdução de uma vaga/falha na estrutura periódica gera-se uma cavidade que fica cercada por um meio periódico. Nesse caso, as ondas com frequência na “bandgap” correspondente a essa periodicidade, podem estar localizadas na cavidade e as suas fronteiras atuam como espelhos perfeitos para estas frequências. Daí o motivo pelo qual esses modos são conhecidos como modos localizados. Quando uma onda entra na cavidade uma parte dela é transmitida para o meio periódico e outra parte é refletida pelas fronteiras da cavidade e vai contribuir para o modo localizado, que se mostra na Figura 3.6 em termos de pressão.

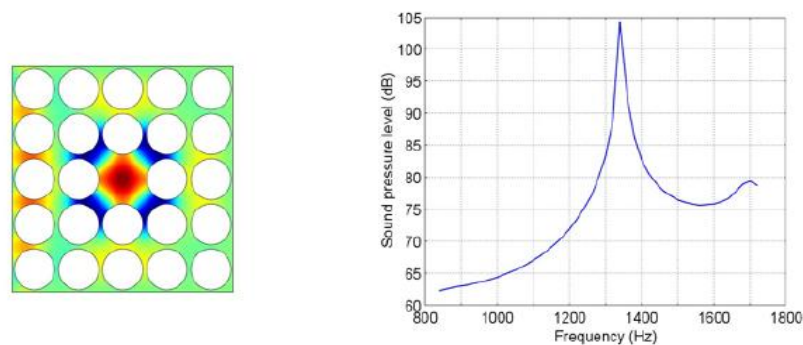


Figura 3.6 – Modo localizado devido à introdução de um defeito pontual na estrutura periódica (Garcia, 2010)

### 3.1.3 Guias de Onda

A criação de guias de onda (“waveguides”) pode ser conseguida com a introdução de defeitos lineares na estrutura periódica, por exemplo, removendo uma linha de dispersores do sistema original.

Nas guias de onda gera-se um corredor que divide a estrutura periódica original em duas partes iguais, de tal forma que as ondas com frequência dentro da “bandgap” se podem propagar através desse guia de onda criado, como mostra a Figura 3.7.

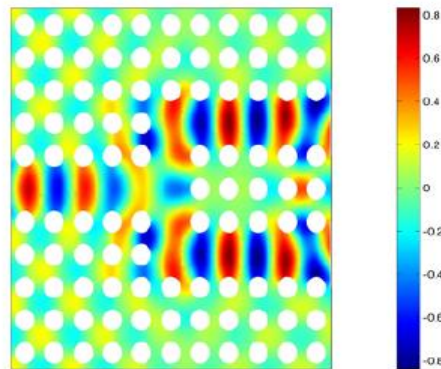


Figura 3.7 – Propagação de ondas através de guias de onda (Garcia, 2010)

## 3.2 Aplicações na área da engenharia

### 3.2.1 Efeito de Ocultação/Camuflagem - “Cloaking”

O termo “cloaking”, considerando como campo de aplicação a engenharia, refere-se à capacidade de camuflar/disfarçar o movimento de ondas.

Segundo Schurig et al (2006), o grande interesse nesta técnica deve-se sobretudo a dois pontos. Um deles refere-se ao facto da demonstração do “cloaking” ser atualmente viável. O outro ponto é devido à perceção de que a equação de onda, a transformação de coordenadas e as propriedades do material estarem interligadas entre si.

Apesar deste conceito estar hoje em dia mais desenvolvido no campo do eletromagnetismo, existem também outros estudos que o remetem para a aplicação noutros tipos de onda, como por exemplo, no campo da acústica.

Segundo Torrent e Sánchez-Dehesa (2011), Milton e Nicorovici (2006) foram os primeiros a explorar a camuflagem acústica. Analisando as equações de movimento para um meio elástico geral em transformação de coordenadas, observando que a forma das equações de movimento não são invariantes à transformação.

A primeira proposta de camuflagem acústica foi estudada por Cummer e Schurig (2007), utilizando um cilindro com um manto como revestimento. A Figura 3.8 ilustra os resultados em termos de pressão obtidos para três casos distintos: ausência de dispersor, com o dispersor cilíndrico e com o mesmo cilindro envolvido por um manto de camuflagem.

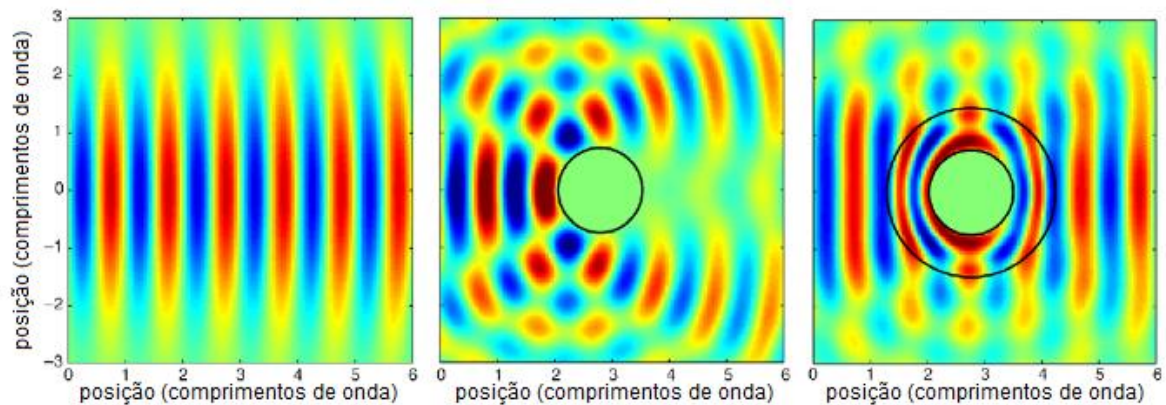


Figura 3.8 – Resposta em termos de pressão sem cilindro (imagem da esquerda), com cilindro (imagem central) e com cilindro envolvido por um manto de camuflagem (imagem da direita) (imagem adaptada de Cummer e Schurig, 2007)

Dando seguimento ao estudo de Cummer e Schurig (2007), Torrent e Sánchez-Dehesa (2011), introduzem o estudo de aplicação de estruturas cilíndricas periodicamente homogeneizadas em camadas como aproximação para dispositivos de camuflagem (Figura 3.9). Consideram que a principal razão para a camuflagem é a anisotropia dos materiais acústicos. Lembra-se aqui que um material anisotrópico apresenta propriedades mecânicas diferentes em diferentes direções. De forma a obter-se uma densidade de massa anisotrópica são utilizadas estruturas com camadas alternadas de dois materiais isotrópicos.

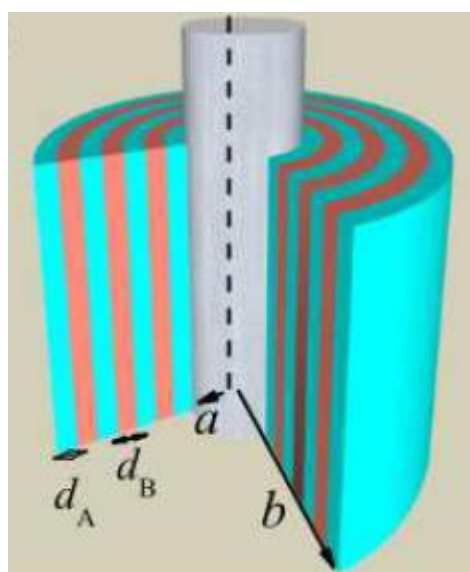


Figura 3.9 – Estruturas cilíndricas periodicamente homogeneizadas em camadas (Torrent e Sánchez-Dehesa, 2011)

Os mesmos autores consideram ainda ser também necessário assegurar que ambas as camadas utilizadas têm de ser feitas de materiais acústicos que possuam uma velocidade de som superior aquela permitida pelo meio envolvente. Por exemplo, se o meio envolvente for água é difícil encontrar materiais com velocidade de som muito superior (pelo menos dez vezes) à da água. No caso do meio ser o ar esse problema não existe, no entanto é difícil juntar no ar as ondas sonoras e o manto de camadas devido à grande diferença de impedância. Torrent e Sánchez-Dehesa (2011) acrescentam ainda que, para o caso da camuflagem acústica, é importante que o material com maior velocidade de som apresente também uma densidade muito pequena, que é uma característica difícil de encontrar nos materiais. Considerando uma célula de camuflagem com “N” duplas camadas e os valores de “a” e “b” definidos na Figura 3.9, a sua constante (d) de espessura será:

$$d = \frac{b - a}{N}$$

Quanto menor o valor d (maior o de N), melhor será o comportamento da célula de camuflagem. No entanto, apresenta a desvantagem dos parâmetros acústicos dos materiais constituintes se tornarem muito elevados. Contudo, a criação destes mantos imperfeitos deve representar o equilíbrio entre o número de camadas e a viabilidade de encontrar os materiais com as propriedades acústicas desejadas. A Figura 3.10 ilustra o efeito, sobre a reflexão, com o aumento das camadas de camuflagem.

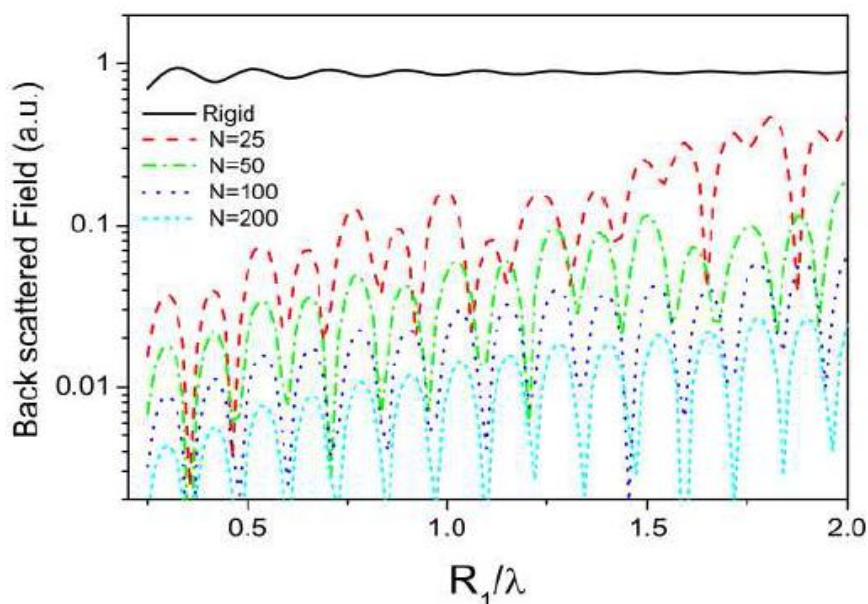




Figura 3.10 – Resposta da reflexão com o aumento do número das camadas de camuflagem  
(Torrent e Sánchez-Dehesa, 2011)

Os autores do referido estudo concluem que, apesar dos mantos imperfeitos não camuflarem completamente o objeto, eles reduzem a força incidente no alvo, o que em certos casos práticos pode ser suficiente.

Além de outros trabalhos no campo de camuflagem para ondas eletromagnéticas, Alitalo et al (2011) caracterizaram a resposta dada em termos de dispersão por uma estrutura tridimensional de camuflagem. O efeito de camuflagem foi caracterizado medindo em campo aberto os padrões de dispersão do objeto, camuflado e não camuflado, comparando-os depois. A estrutura de camuflagem consiste num conjunto de placas de metal cónicas empilhadas, como se observa na Figura 3.11, que pretendem camuflar um cilindro. As placas formam um conjunto de guias de onda, onde as ondas viajam com pequenas reflexões, em volta do cilindro colocado no centro. Este objeto de camuflagem é projetado para funcionar para objetos eletricamente pequenos, pois a onda que se move dentro do dispositivo deve percorrer uma distância maior do que a onda que se propaga num campo livre em linha reta. Além dos resultados experimentais, foram também apresentados os resultados numéricos obtidos com recurso a um software numérico. Refere-se ainda que as dimensões do dispositivo de camuflagem são otimizadas para frequências em torno dos 10 GHz. Para as medições, usaram um manto com 20 células de diâmetro total ( $L_1$  na Figura 3.11) igual a 61 mm e um cilindro de latão com 30 mm de diâmetro. Em termos de resultados os autores demonstram que o manto reduz a largura da dispersão total do cilindro descoberto em 70%, no máximo, e que os resultados experimentais e numéricos se assemelham.

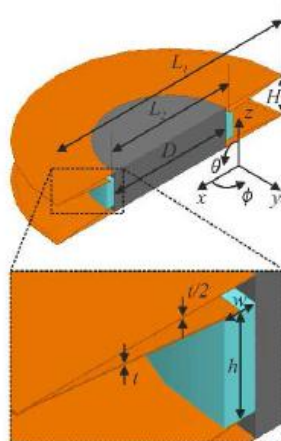


Figura 3.11 – Cilindro camuflado por um conjunto de chapas de metal cónicas empilhadas  
(Alitalo et al., 2011)

### 3.2.2 Redução da vibração sísmica

Os sismos são considerados como um dos maiores desastres naturais, resultantes de uma grande libertação repentina de energia na crosta terrestre que leva à criação de ondas sísmicas e conseqüente propagação.

Os metamateriais sísmicos são materiais que se projetam com o intuito de neutralizar/atenuar os efeitos negativos das ondas sísmicas em estruturas na superfície da terra. O uso destes metamateriais sísmicos tem como base de funcionamento direcionar as ondas sísmicas em redor das estruturas, fazendo como se essas estruturas não existissem (pode-se também referir aqui o conceito de “cloaking”).

Guenneau et al (2009), estudaram teoricamente um manto que consiste num conjunto de anéis concêntricos feitos de plástico e fixados à superfície da Terra. A rigidez e elasticidade dos anéis são aspetos que são controlados com bastante precisão para que as ondas de superfície passem para dentro do material e não sejam refletidas ou dispersadas pela superfície do material. Ajustando as propriedades dos materiais, as ondas, quando saem do manto, voltam ao seu tamanho original. Ajustando os anéis, é possível alterar a gama de frequência das ondas que passam para dentro do manto.

Alagoz e Alagoz (2011) estudaram a atenuação das ondas sísmicas de superfície provocada pela criação de uma estrutura sísmica de cristais, construída no solo, com uma extensão de quilómetros. Os buracos periódicos no solo funcionam como sendo os dispersores, cuja representação esquemática é mostrada na Figura 3.12.

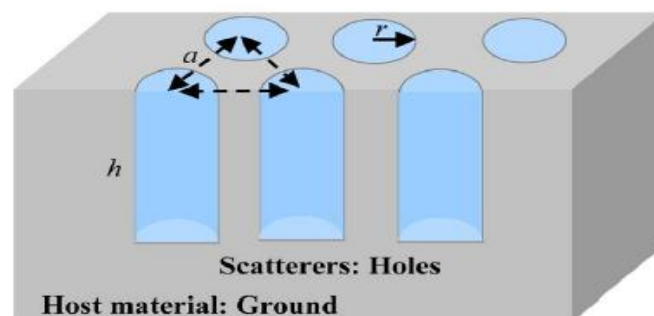


Figura 3.12 – Estrutura sísmica de cristais construída no solo (Alagoz e Alagoz, 2011)



Em comparação com as “bandgap’s” das estruturas periódicas de cristais sónicos que funcionam como isoladoras a certas bandas de frequência, neste caso pretende-se atenuar a propagação de vibrações longitudinais no solo.

A Figura 3.13 mostra os resultados obtidos para várias configurações do cristal sísmico, através da qual se observa um notório decrescimento da magnitude de vibração atrás das referidas configurações do cristal sísmico. As imagens do lado esquerdo referem-se ao campo de deslocamentos resultante da propagação das ondas e as imagens do lado direito são a resposta em termos de vibração, na escala de Richter.

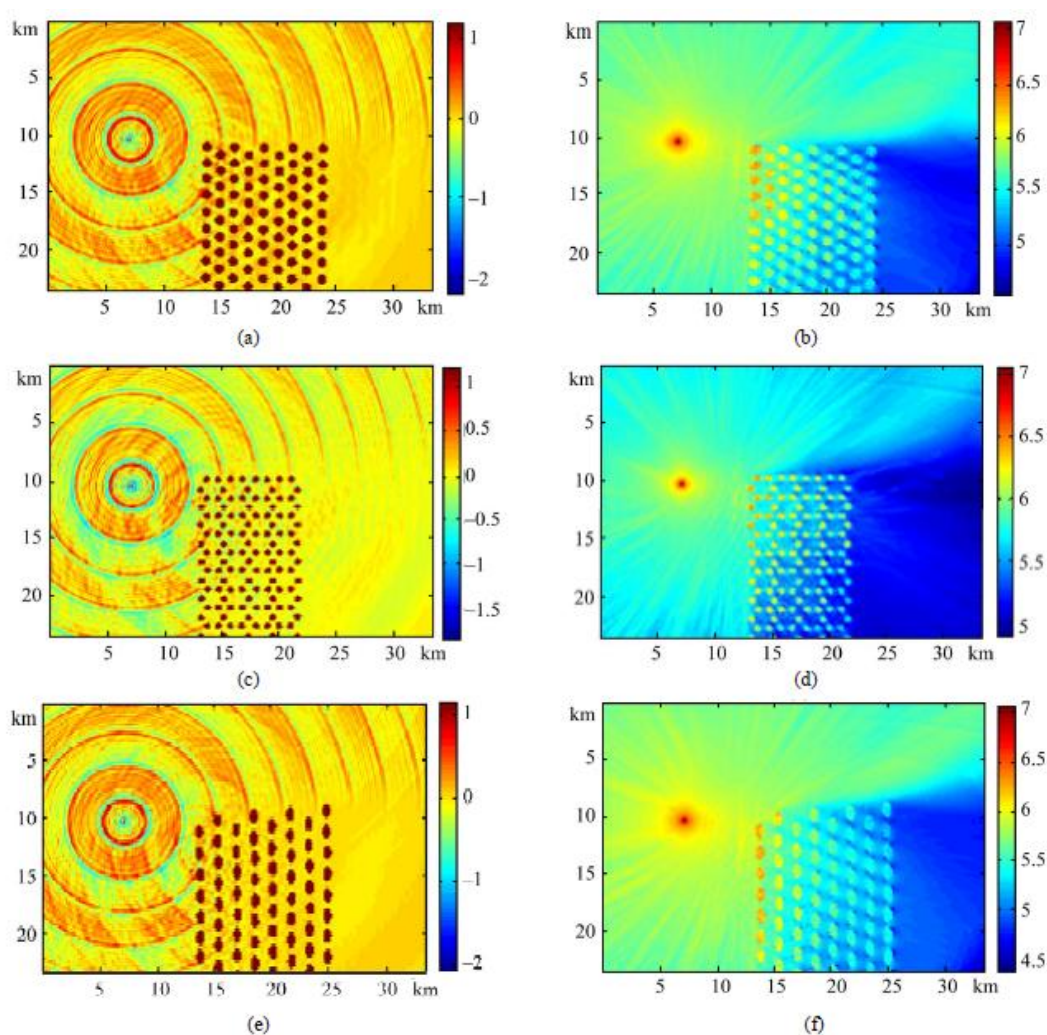


Figura 3.13 – Resultados da magnitude de vibração para diferentes configurações do cristal sísmico (Alagoz e Alagoz, 2011)

Kim e Das (2012) desenvolveram uma configuração usando metamateriais acústicos com o objetivo de reduzir a amplitude das ondas sísmicas, convertendo-as em ondas evanescentes em determinadas gamas de frequência, sem que estas toquem nos edifícios que se pretende proteger. O atenuador ou barreira sísmica é constituído por ressoadores no solo colocados em volta do edifício a proteger (Figura 3.14). Misturando diferentes ressoadores é possível abranger diferentes gamas de frequências das ondas sísmicas. Os autores consideram este método de barreiras sísmicas efetivo, especialmente em construções isoladas, devido à necessidade de alguma área para a construção dessas barreiras em redor do edifício em causa.

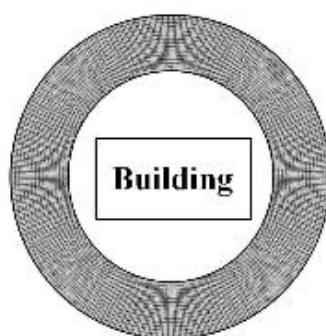


Figura 3.14 – Aplicação de barreiras sísmicas em torno de construções (retirado de Kim e Das, 2012)

Os mesmos autores, Kim e Das (2013) desenvolveram um novo método antissísmico de metamateriais acústicos com a finalidade de criar uma sombra sísmica. O método descrito pelos autores consiste em enterrar em torno dos edifícios a proteger enormes caixas com furos laterais (que façam corresponder às frequências de ressonância das ondas sísmicas). Desta forma, a barreira feita com estas caixas com furos laterais vai atenuar as ondas sísmicas, reduzindo a amplitude de onda e conseqüentemente leva à dissipação da energia sísmica. A barreira, ao funcionar como um atenuador, vai não só proteger os edifícios que estão atrás dessa barreira, bem como proteger aqueles que rodeiam a barreira. Basicamente, trata-se de um método que atenua as ondas sísmicas e não apenas um método que desvia essas ondas. Na Figura 3.15 podem observar-se as caixas que funcionam como metamateriais na construção das barreiras.

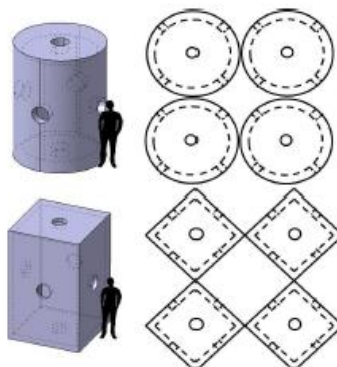


Figura 3.15 – Meta-caixas que constituem a barreira (Kim e Das, 2013)

A comparação entre este tipo de barreira e uma barreira normal foi feita recorrendo a uma simulação computacional, em termos de nível sonoro, convertendo as ondas sísmicas em som. A Figura 3.16 mostra o nível de pressão sonora para cada tipo de barreira.

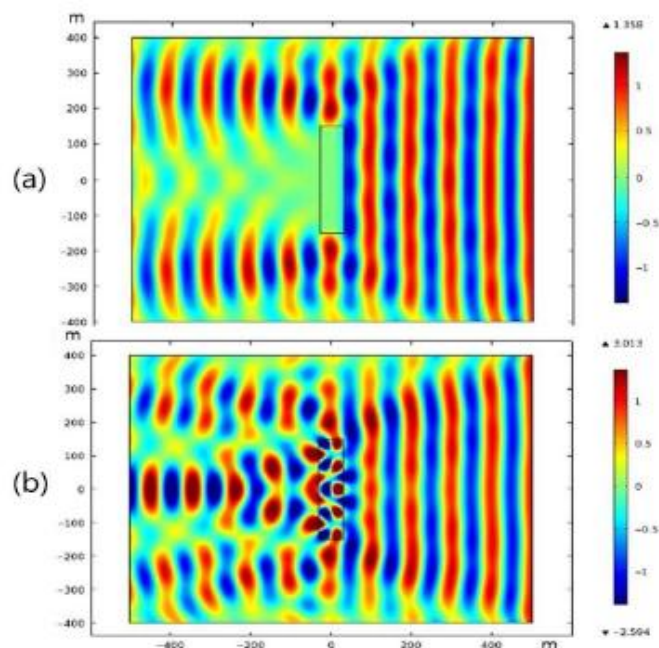


Figura 3.16 – Nível de pressão sonora: (a) barreira com metamateriais e (b) barreira normal (Kim e Das, 2013)

A utilização da barreira de metamateriais desenvolvida pelos autores mostra que ela leva a uma redução da energia sísmica quando comparada com o desempenho de uma barreira normal. Do lado das vantagens, os autores destacam como a principal, o facto deste tipo de barreira proteger todos os edifícios atrás dela.

### 3.2.3 Difusores

Os difusores são normalmente utilizados em espaços onde é necessário tratar alguns problemas acústicos (como por exemplo os ecos) sem que para tal seja preciso reduzir a energia sonora.

Pogson et al (2010) estudaram um modelo de dispersão múltipla, considerando uma matriz de cilindros posicionados em frente a um difusor de Schroeder. Um difusor de Schroeder caracteriza-se por apresentar uma sequência de cavidades de diferentes profundidades. O esquema de ensaio testado é o apresentado na Figura 3.17.

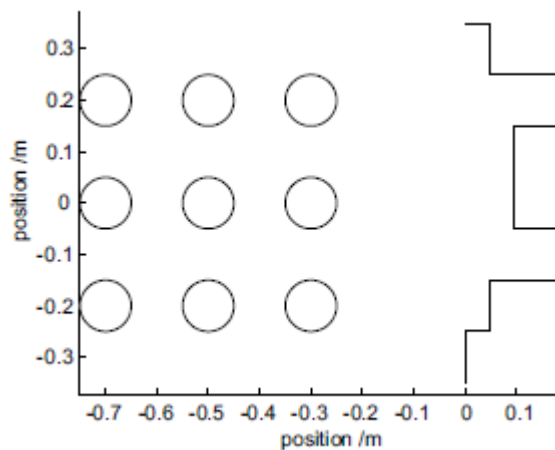


Figura 3.17 – Modelo de dispersão múltipla utilizando uma matriz de cilindros posicionados em frente a um difusor de Schroeder (Pogson et al., 2010)

A Figura 3.18 mostra os resultados obtidos. Os índices a) e b) referem-se aos dois métodos utilizados para comparar resultados, enquanto que o índice c) apresenta o gráfico do coeficiente de difusão. Mais à esquerda são dados os resultados referentes aos cilindros, no centro da figura os resultados para o difusor de Schroeder e à direita os resultados considerando o esquema com os cilindros em frente ao difusor tal como ilustra a Figura 3.18.

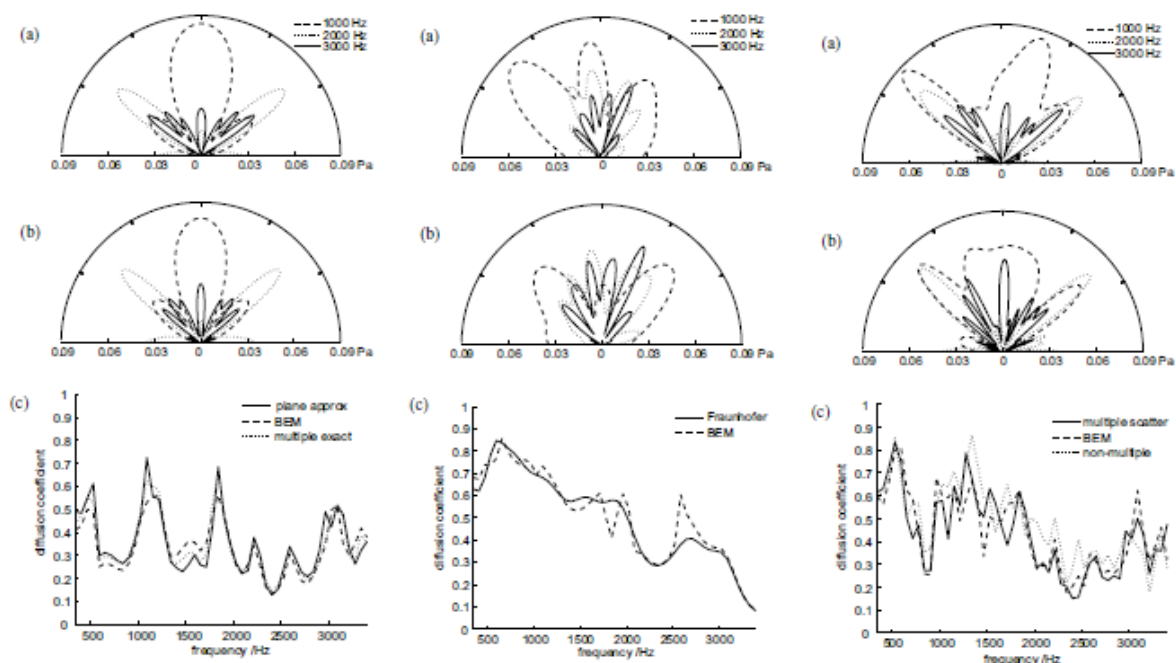


Figura 3.18 – Comparação do coeficiente de difusão considerando apenas os cilindros, apenas o difusor de Schroeder e com os cilindros em frente ao difusor de Schroeder (Pogson et al., 2010)

Nesse mesmo estudo os autores testaram ainda um arranjo mais complexo da malha de cilindros, com eles desarranjados, em frente a um difusor de Schroeder periodicamente repetido.

Apesar dos autores terem observado uma ligeira discrepância entre os métodos, eles concluem que existe um melhoramento visível no desempenho dos difusores com a inclusão dos cilindros.

Redondo et al (2013) estudaram o comportamento de cristais sónicos quando utilizados como difusores de som em telas acústicas para redução do ruído de tráfego. A solução apresentada consiste no desenho de uma tela mista, formada por uma barreira tradicional e por um cristal adjacente que atua como difusor. O objetivo principal era que este tipo de solução diminuísse as reflexões provenientes da barreira até à fonte sonora, sendo a reflexão um fator que diminuiu consideravelmente a eficácia das barreiras convencionais. A ferramenta de desenho utilizada foi o Método das Diferenças Finitas no domínio do tempo (FDTD), e a barreira mista proposta consistia num cristal sónico formado por 148 cilindros de raio 0,035 m dispostos numa rede retangular. A Figura 3.19 mostra o esquema completo, observando-se que, ao longo do difusor, encontram-se quatro partes alternadas de duas em duas. A tela acústica

clássica é formada por um paramento contínuo de 3 m de altura e 0,15 m de largura, sendo a distância entre o difusor e a tela clássica de 0,04 m. Assim sendo, a tela clássica funciona como o painel traseiro que normalmente se encontra nos difusores.

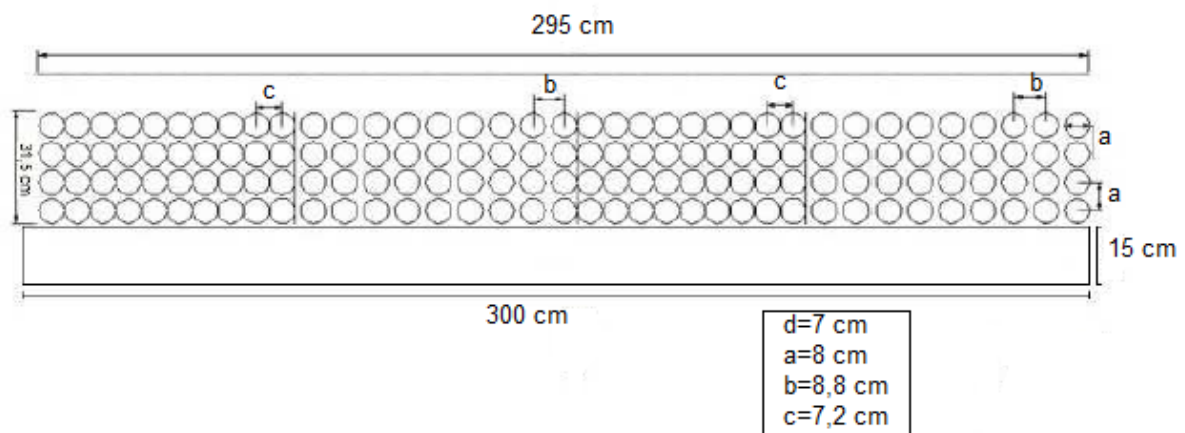


Figura 3.19 – Tela mista formada por uma barreira tradicional e por um cristal adjacente que funciona como difusor (Redondo et al., 2013)

Recorrendo ao método FDTD, os autores recriaram uma vista em perfil de um espaço aberto em 2D, que representa a borda duma estrada na qual se instalou uma tela acústica a 2,5 metros da origem das coordenadas. Considerou-se o solo e tela (com cristal incluído) como totalmente refletores, e os contornos como totalmente absorventes de forma a simular um espaço aberto. A fonte sonora é colocada no solo a 0,50 m da origem, simulando o ruído de rodagem emitido pelos pneus. A Figura 3.20 mostra o esquema de medições utilizado.

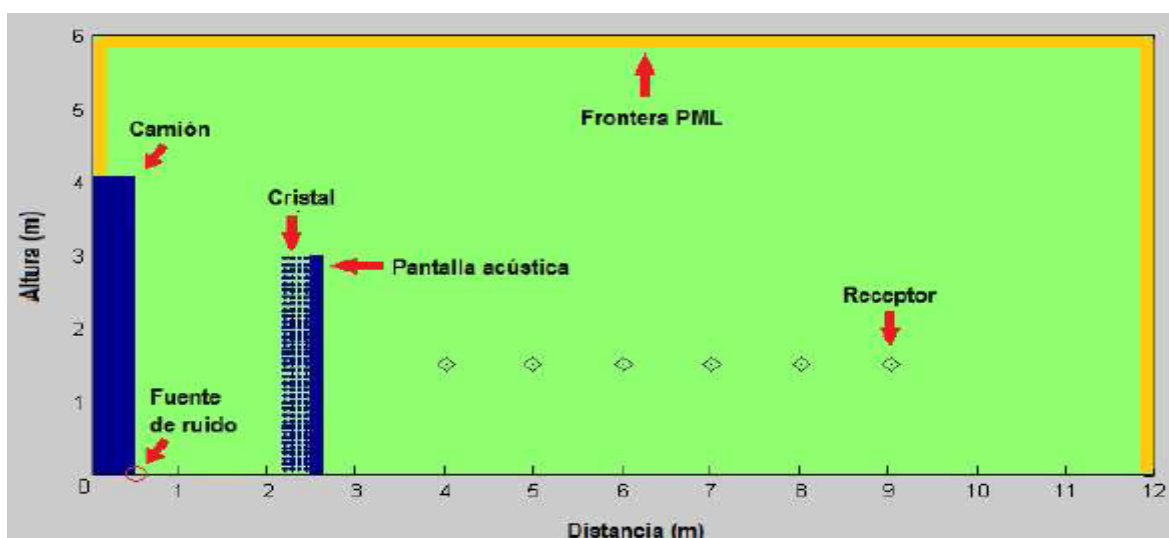


Figura 3.20 – Esquema de modelação utilizado (Redondo et al., 2013)

Num dos casos estudados observou-se a eficácia da tela acústica considerando a existência de um veículo com uma altura superior à da barreira (normalmente 3 metros). Dos resultados observou-se uma clara diminuição da eficácia da tela quando se está na presença de um veículo mais alto que a própria tela, isto devido às sucessivas reflexões entre a tela e o veículo.

Comparando a eficácia de uma tela clássica e a de uma tela mista (tela clássica e cristal sónico) na presença de um veículo com altura superior à das telas, verifica-se que a tela mista é mais eficaz, chegando a aumentar a Perda por Inserção em cerca de 5 dB nas pequenas frequências. Concluindo, os resultados obtidos neste estudo mostram que o cristal sónico pode ser um bom complemento para as telas acústicas. Além de reduzirem as sucessivas reflexões também aumentam a Perda por Inserção.

#### **3.2.4 Barreiras**

No que diz respeito às técnicas utilizadas para a redução do ruído de tráfego, a aplicação de barreiras acústicas é das mais utilizadas. De todos os tipos de barreiras acústicas já “conhecidas” do quotidiano destacam-se as barreiras de betão, de alvenaria, de metal, de plástico, de madeira e até barreiras naturais (árvores ou outra vegetação).

Sabendo-se que o desempenho das barreiras depende, entre outros fatores, da geometria e dos materiais constituintes, têm vindo a ser estudadas, ao longo dos últimos anos, barreiras com uma estrutura periódica. Sendo esta uma solução interessante do ponto de vista acústico e estético, ela será abordada com maior detalhe no capítulo seguinte do presente trabalho.



## 4 BARREIRAS ACÚSTICAS DE CRISTAIS SÓNICOS

A atenuação sonora tem sido um tema bastante estudado ao longo dos últimos anos.

No caso específico da atenuação do ruído de tráfego, sabe-se da eficácia apresentada por barreiras acústicas no que à redução dos níveis sonoros diz respeito. A técnica tradicional muitas vezes utilizada para o aumento da atenuação do ruído consiste no aumento da espessura ou da massa dos materiais usados. Surge então a necessidade/interesse de estudar novas soluções que possam ser usadas como medida de mitigação.

O desempenho das barreiras acústicas depende essencialmente da própria geometria da estrutura e das propriedades do material (ou materiais) que a constituem. Quando se projeta uma barreira acústica destinada a atenuar o ruído de tráfego, deve-se ter em consideração aspetos como a dimensão, os materiais a utilizar, o custo, a durabilidade, a manutenção e até estética da mesma. Outro aspeto que se deve considerar é o impacto que a colocação da barreira acústica em determinado local causará às populações adjacentes, como, por exemplo, a sensação de perda de luz natural e/ou sensação de confinamento.

Desde há alguns anos atrás que se têm vindo a fazer estudos acerca da eficiência de diferentes tipos de barreiras acústicas, isto é, por exemplo, utilizando diferentes materiais. No dia-a-dia é recorrente verem-se barreiras acústicas feitas de betão, metal, alvenaria ou outros materiais. A Figura 4.1 mostra o esquema de funcionamento de uma barreira acústica padrão. Parte da energia sonora que é produzida pela fonte sonora é refletida pela própria barreira ou absorvida (dependendo dos materiais e do revestimento). Outra parte da energia, a que chega ao recetor, resulta da transmissão direta através da barreira acústica ou através do fenómeno de difração (quando as ondas sonoras encontram e contornam um obstáculo).



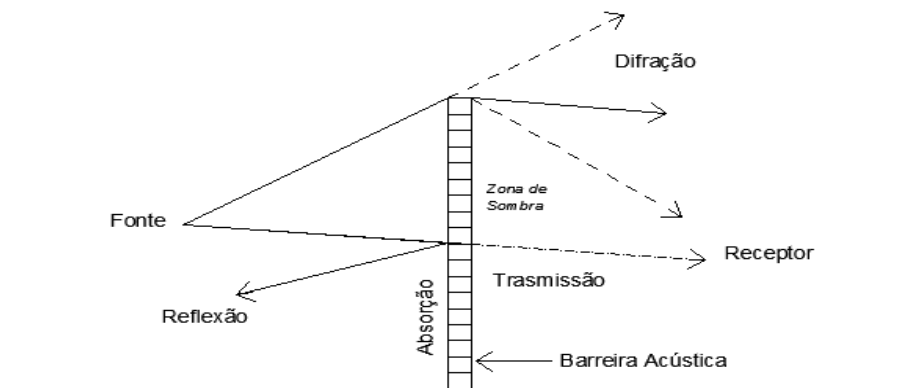


Figura 4.1 – Esquema de funcionamento de uma barreira padrão

Mais recentemente, têm vindo a ser feitos estudos para averiguar a viabilidade e eficiência de se considerar uma estrutura periódica para aplicação como barreiras acústicas. Tal como visto anteriormente (Capítulo 3 – Cristais Sónicos), a um conjunto de elementos cilíndricos verticais arranjados periodicamente, com uma configuração geométrica que permita a atenuação dos níveis de ruído para uma determinada gama de frequência, dá-se o nome de cristal sónico (Figura 4.2).



Figura 4.2 – Barreira de cristais sónicos (Garcia, 2010)

Fazendo uma rápida comparação com as tradicionais barreiras acústicas, constata-se que as estruturas de cristais sónicos oferecem uma menor oposição ao vento, pelo facto de ser uma estrutura aberta, além de ser uma estrutura mais leve em condições normais e de fácil

construção. Do lado das desvantagens pode-se apontar a necessidade de ter uma espessura considerável para atingir valores de atenuação semelhantes aos verificados numa barreira acústica tradicional.

Dentro das possibilidades para melhorar a atenuação nestas estruturas pode-se referir, desde já, o tipo de material a usar como dispersor. Desde materiais rígidos como o alumínio, o PVC, a madeira, combinando com materiais absorventes, tais como, borracha ou lã de rocha. Outro método para o melhoramento da banda de atenuação está ligado à otimização da estrutura. A otimização pode ser conseguida introduzindo defeitos na grelha, alterando a geometria (retangular, triangular, hexagonal, etc), mudando o “Filling Fraction” (utilizar diferentes diâmetros), ou utilizando diferentes materiais como dispersores.

São já alguns os estudos feitos por diversos autores que avaliam a eficiência deste tipo de barreiras considerando fatores distintos, como, por exemplo, o material constituinte dos dispersores cilíndricos, a geometria da grelha, etc. Em seguida, são dados a conhecer alguns desses estudos realizados no âmbito de barreiras acústicas de cristais sónicos.

Chen e Ye (2001) apresentaram uma análise teórica da transmissão acústica através de uma grelha de cilindros rígidos bidimensional, colocados paralelamente no ar. Esta análise foi feita seguindo as características/geometrias do estudo experimental desenvolvido por Sánchez-Pérez et al (1998), por forma a que se pudesse posteriormente comparar os resultados obtidos. Observando os espectros de atenuação de ambas as análises, verificou-se uma boa correspondência entre elas e foi também possível verificar que existe uma boa atenuação (com um máximo de 25 dB) em torno dos 1500 Hz. Os autores fizeram ainda um ensaio onde os cilindros eram espalhados aleatoriamente pela grelha, tendo observado que essa aleatoriedade não afeta a transmissão nas baixas frequências para a amostra estudada. Esse efeito de aleatoriedade apenas diminuiu a transmissão para frequências acima da frequência crítica e que quanto maior fosse o tamanho da amostra, menor seria essa frequência crítica, o que leva à obtenção de uma gama mais larga de inibição.

Sánchez-Pérez et al (2002) consideravam que a maioria dos ensaios realizados com arranjos periódicos de dispersores tinham sido feitos em condições controladas. Por essa razão, decidiram estudar os resultados obtidos por barreiras bidimensionais de cristais sónicos quando ensaiadas no exterior em condições de campo livre. A amostra ensaiada consistia em tubos de PVC com 3 m de comprimento e 16 cm de diâmetro, arranjos numa configuração triangular com 22 cm entre centros. A plataforma da amostra tinha 1,1 m de largura e 7,2 m de comprimento, por forma a tornar o efeito de difração lateral desprezável. Os ensaios foram feitos num espaço aberto, longe de obstáculos, para que não ocorressem reflexões indesejadas. Da análise dos resultados observou-se que estas estruturas produzem uma boa atenuação, o suficiente para competir com as típicas barreiras convencionais, possuindo ainda a vantagem

de serem fáceis de construir e de, ao variar a constante de grelha, ser possível ajustar a banda de atenuação sonora.

Martínez-Sala et al (2006) levaram a cabo um ensaio experimental no exterior, utilizando árvores arrançadas periodicamente como cristais sónicos (Figura 4.3) para avaliar a sua eficiência em termos de atenuação sonora. Foram realizadas duas séries de medições: uma dela feita em campos existentes onde existiam árvores plantadas em diferentes arranjos; e outra medição feita num viveiro onde as árvores eram colocadas nuns vasos, sendo assim possível construir diferentes arranjos. Em todos os casos considera-se que a sua forma exterior é aproximada a um círculo (forma mais usada para os dispersores em ensaios de cristais sónicos). As superfícies de terra em que as medições foram realizadas variaram, sendo chão duro no caso do viveiro, relva nos campos existentes e solo cultivado nos outros casos. O comprimento dos arranjos é suficientemente grande para tornar desprezável o efeito de difração através dos bordos laterais das amostras. Para a determinação da Perda por Inserção fez-se a diferença entre o sinal obtido da medição sem a amostra e com a amostra. No caso do viveiro, mediu-se o som emitido com a fonte na mesma posição, com e sem a amostra. No caso do campo exterior, existindo já as árvores plantadas, o som direto foi medido junto da amostra, de modo a que as condições do chão e atmosféricas fossem as mesmas. Como demonstra a Figura 4.3, os raios circulares considerados são os que estão ao nível do plano paralelo ao chão, que intersecta as árvores à altura da posição da fonte e do microfone. Ou seja, dependendo da altura das árvores, o raio pode ser apenas o raio do tronco ou pode contemplar também o espaço ocupado pelos ramos e folhas. Os resultados obtidos mostram que as árvores conseguem atenuar certas bandas de frequências com mais eficiência se elas estiverem arrançadas numa configuração tipo grelha (em baixas frequências). Mostrou-se ainda que a estrutura construída com árvores apresenta o comportamento típico dos cristais sónicos, dependendo o nível de atenuação do Fator de Preenchimento (“Filling Fraction”), e que a posição do pico de atenuação ao longo da gama de frequências depende do tipo de grelha utilizada e do ângulo de incidência do som. Conclui-se, assim, que é possível criar novos tipos de barreiras acústicas ecológicas usando árvores.

Na Figura 4.3,  $m_o$  e  $m_a$  são as posições do microfone e  $s_o$  e  $s_a$  as respetivas posições da fonte; T define as configurações triangulares, S as quadradas, R as retangulares e M as múltiplas linhas periódicas;  $H_s$  a altura da fonte,  $H_m$  a altura do microfone,  $r$  o raio da árvore,  $H_t$  a altura da árvore e os parâmetros (a), (b), (c) e (d) os diferentes tipos de árvores.

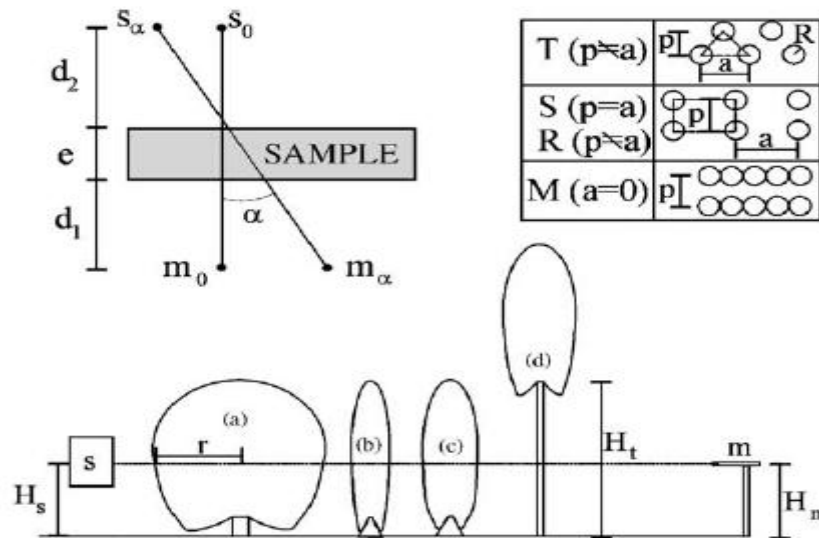


Figura 4.3 – Posição dos pontos de medição (em cima à esquerda), grelhas utilizadas (em cima à direita) e tipo de árvores utilizadas (em baixo) (Martínez-Sala et al., 2006)

Babino et al (s.d) fizeram um conjunto de ensaios experimentais, utilizando um cristal sónico com 100 tubos de alumínio ocos com 2 cm de diâmetro, dispostos em 10 filas com 10 tubos cada uma e com uma distância de separação entre os tubos de 5 mm. Para isolar o cristal sónico de qualquer tipo de reflexões foi colocada uma caixa de espuma envolvendo toda a configuração experimental e ainda se colocou também alguma espuma na base e no topo dos tubos por forma a minimizar variações bruscas de impedância que geram ondas na direção vertical. Determinaram que existe uma “bandgap” entre as frequências  $(5,000 \pm 0,025)$  kHz e  $(8,750 \pm 0,025)$  kHz. Esta pequena variação é tomada em conta uma vez que o programa de cálculo calcula a “bandgap” considerando o cristal sónico infinito, enquanto que o ensaio foi feito com um finito. Nos ensaios em que foram introduzidos defeitos no cristal sónico, observaram que, desse modo, existia transmissão na zona da “bandgap”, e que esta transmissão aumentava à medida que os defeitos alargavam. Noutros ensaios realizados introduziram caminhos como guias de onda ao longo do cristal sónico, para os quais concluíram que os caminhos retos favorecem a transmissão em determinados intervalos de frequência e que esses intervalos dependem das dimensões do caminho. A Figura 4.4 mostra as configurações ensaiadas para os defeitos e caminhos de guia de onda introduzidos.



Figura 4.4 – Diferentes configurações com defeitos e caminhos de onda (Babino et al., s.d.)

Fuster-Garcia et al (2007) apresentaram um projeto de estruturas mistas, construídas com dispersores rígidos e ressoadores, com o objetivo de eliminar a dependência na constante de grade e na direção da onda acústica incidente para a criação das “bandgap’s”. Estes autores consideram que as “bandgap’s” podem ser obtidas em várias gamas de frequência, o que não depende da periodicidade do cristal mas sim da frequência de ressonância dos ressoadores. A partir da conclusão dos estudos feitos, os autores demonstram que é possível aumentar a banda de atenuação ao utilizarem estruturas mistas. É possível observar-se que a soma dos efeitos (ressonância e dispersão múltipla) permite a criação de estruturas com um melhoramento de atenuação acústica. Outra vantagem destas estruturas é o facto de se poder escolher a gama de frequências ressonantes (alterando o diâmetro dos ressoadores) e a gama de frequências da dispersão múltipla (introduzindo defeitos no cristal sónico). A Figura 4.5 ilustra um esquema para estas estruturas mistas, usando balões (cheios com uma mistura de hélio e ar) como ressoadores e tubos de alumínio como dispersores rígidos. A Figura 4.5 contém também um gráfico de atenuação onde se pode verificar o melhoramento ao considerar-se a estrutura mista em prol de utilizar apenas os dispersores rígidos.

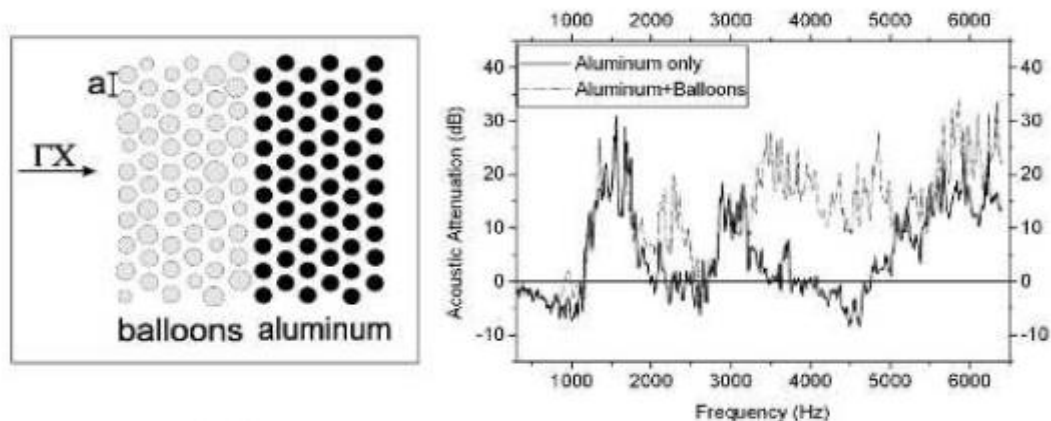


Figura 4.5 – Estrutura mista com tubos de alumínio e balões e comparação dos seus valores de atenuação acústica com os de uma estrutura constituída apenas por tubos de alumínio (Fuster-Garcia et al., 2007)

Sánchez-Dehesa et al (2011) testaram uma barreira de cristais sónicos feita com materiais reciclados. A barreira consistia em 3 filas com 9 tubos de metal perfurados de 1 m de comprimento, preenchidos com granulado de borracha que se obtém da reciclagem de pneus de carro usados. Realizaram-se 5 ensaios de amostras de barreiras diferentes numa câmara anecoica com dimensões de  $8 \times 8 \times 8 \text{ m}^3$ . Os autores concluíram que a utilização do granulado de borracha como meio absorvente poroso resulta num aumento da Perda por Inserção nessas barreiras, quando comparado com as barreiras baseadas apenas em cilindros rígidos. Deste modo, verifica-se que se podem utilizar determinados materiais reciclados para o melhoramento da eficiência deste tipo de estruturas, o que é sem dúvida uma solução bastante interessante devido ao aproveitamento de materiais usados.

Krynkin et al (2010) estudaram os resultados práticos e teóricos de barreiras de cristais sónicos, onde os elementos dispersores eram cilindros rígidos ocos com 4 fendas e o interior elástico. A Figura 4.6 mostra um corte desses dispersores.

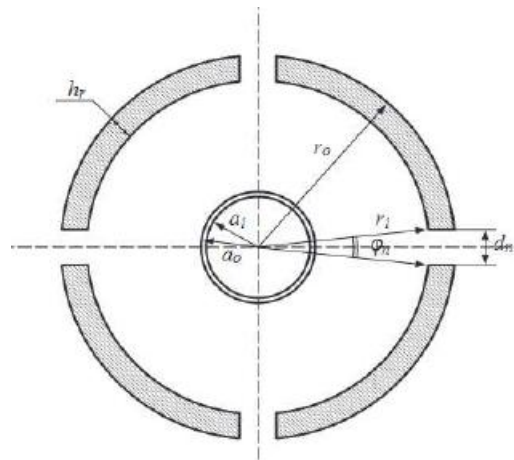


Figura 4.6 – Corte dos cilindros utilizados na barreira de cristais sónicos (Krynkin et al., 2010)

Em termos de resultados observados é possível concluir que o uso deste tipo de elementos dispersores fornece, numa perspetiva geral, um acréscimo de Perda por Inserção, quando comparado com o uso de cilindros rígidos ocios sem fendas, tal como se observa na Figura 4.7.

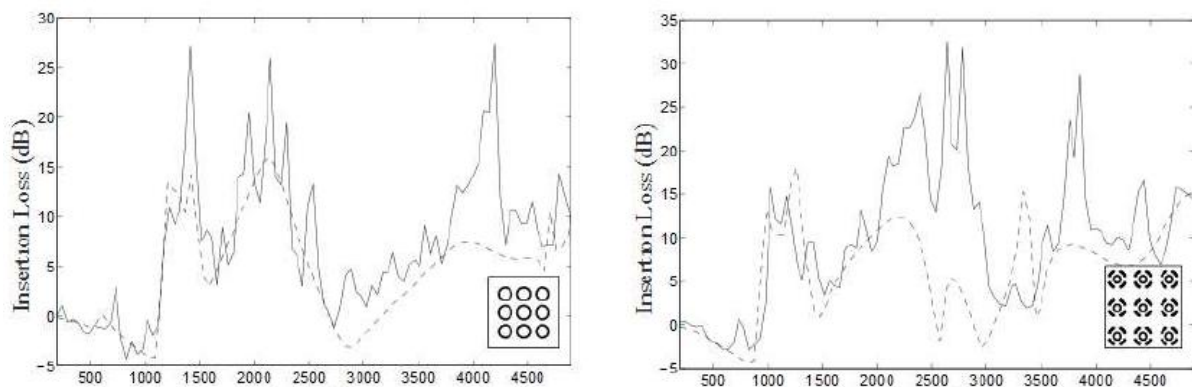


Figura 4.7 – Resultados em termos de Perda por Inserção para o caso de cilindros rígidos (imagem da esquerda) e para o caso dos cilindros ocios com 4 fendas (Krynkin et al., 2010)

A estrutura elástica no interior exibe uma ressonância adicional nas baixas frequências, por isso, quando combinada com o elemento rígido exterior com fendas, origina uma gama de “bandgap’s”.

García-Chocano et al (2012) relatam como as propriedades de absorção de barreiras acústicas bidimensionais de cristais sónicos podem ser melhoradas, usando estruturas constituídas por

cilindros microperfurados. Os cilindros microperfurados são obtidos a partir duns painéis de alumínio, microperfurados através dum processo de perfuração, onde a forma alongada dos poros sugere que eles se podem aproximar de perfurações em forma de fenda. A Figura 4.8 mostra o painel perfurado e, depois de enrolado, a forma do cilindro que se obtém.

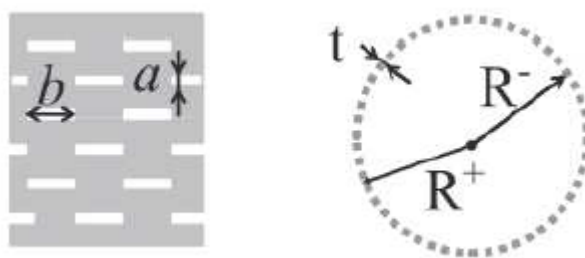


Figura 4.8 – Painel perfurado (esquerda) e conseqüente cilindro (direita) (García-Chocano et al., 2012)

Em termos de resultados, os autores concluem que as propriedades de absorção dos painéis microperfurados são substancialmente melhoradas quando eles são distribuídos numa grelha e que, devido a esse comportamento, a estrutura estudada pode ser considerada como um metamaterial acústico com uma excelente absorção de som de banda larga. Fazendo uma comparação com uma barreira clássica de betão com as mesmas dimensões (3 m de altura e 0,6 m de largura), verificou-se que esta estrutura de cilindros microperfurados compete com a barreira clássica, chegando até, em certas frequências, a exceder os níveis de atenuação da barreira clássica. Os autores, salientam ainda, que estas atenuações são conseguidas recorrendo apenas a 3 fiadas de cilindros microperfurados e que este mecanismo de atenuação difere do mecanismo de reflexão usado em barreiras convencionais, onde a energia acústica não é dissipada mas apenas espalhada por difração.

Garcia-Chocano e Sánchez-Dehesa (2012) desenvolveram um algoritmo de otimização para obter a distribuição do material e as medidas do cristal sónico que garantem as melhores propriedades de atenuação para o ruído de tráfego. As estruturas eram formadas por cilindros contendo pequenas partículas de borracha (Figura 4.9), que é um material absorvente.



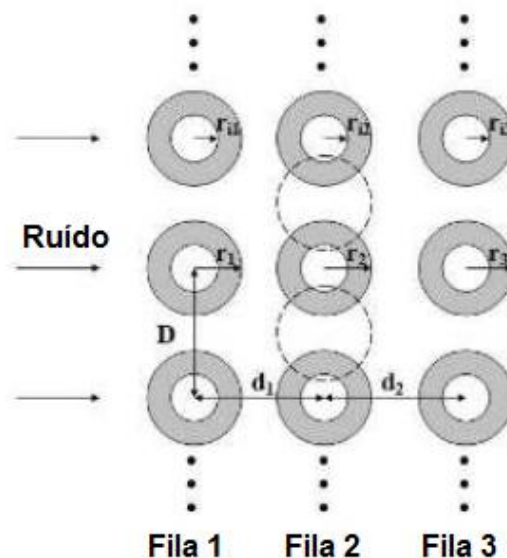


Figura 4.9 – Esquema com cilindros contendo partículas de borracha utilizado para o algoritmo de otimização (imagem adaptada de García-Chocano e Sánchez-Dehesa, 2012)

Do algoritmo de otimização feito com base na teoria do espalhamento múltiplo obtiveram-se os parâmetros para a geometria da barreira. Por forma a validar as previsões teóricas, os autores construíram e testaram experimentalmente, numa câmara de transmissão, uma barreira com 3 m de altura e 5 m de comprimento. No entanto, devido a algumas limitações práticas, não foi possível construir a barreira totalmente de acordo com os parâmetros otimizados obtidos do algoritmo desenvolvido. Ainda assim a diferença no isolamento, entre a barreira construída e a respeitante aos parâmetros otimizados, não vai além dos 0,5 dB. O ensaio prático deu um bom suporte à previsão teórica e ainda foi possível concluir que os cilindros contendo partículas de borracha fornecem melhores resultados do que usando apenas cilindros em termos de Perda por Inserção.

Castiñeira-Ibáñez et al (2012) estudaram o projeto, construção e caracterização de uma barreira acústica de cristais sônicos feita de dispersores cilíndricos. O objetivo no projeto da barreira passou por se utilizar duas estratégias: uma delas, respeitante ao arranjo geométrico dos dispersores por forma a maximizar a dispersão de Bragg; e a outra estratégia passou por capacitar os elementos dispersores para fenómenos como ressonância ou absorção. Dessa forma, a barreira estudada era construída por três tipos de dispersores. Uns eram formados por uma cavidade ressonante envolvida por lã de rocha como material absorvente, o que providenciava a ressonância e a absorção como mecanismos de atenuação. Foram utilizados dois diâmetros diferentes por forma a induzir-se dois picos de ressonância. Outros dispersores eram simplesmente elementos rígidos para reforçar as reflexões de Bragg devido à dispersão

múltipla. Por forma a maximizar ainda mais o mecanismo de Bragg, os elementos dispersores foram colocados segundo uma geometria fractal. A Figura 4.10 mostra a maneira como os dispersores foram arranjados e dá ainda informação acerca da Perda por Inserção (“Insertion Loss”) obtida através do Método dos Elementos Finitos.

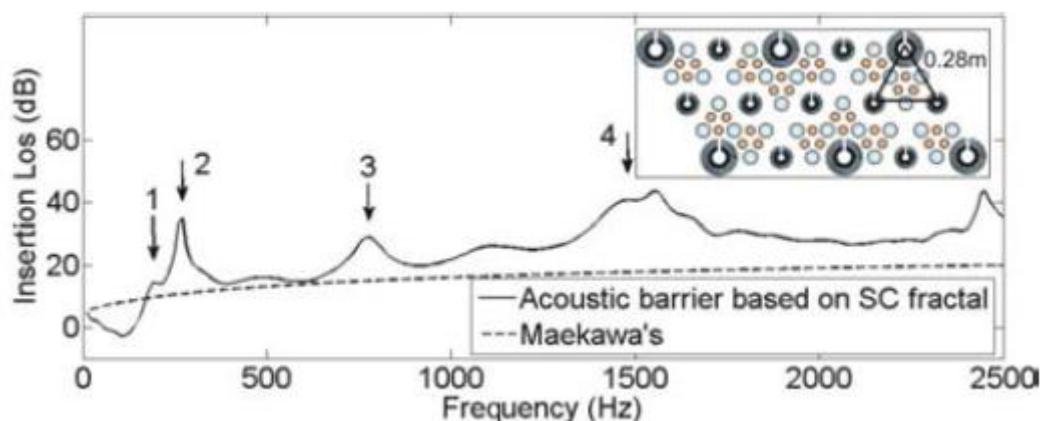


Figura 4.10 – Arranjo dos dispersores e Perda por Inserção obtida através do Método dos Elementos Finitos (Castiñeira-Ibáñez et al., 2012)

Da Figura 4.10 os autores observam que os picos 1 e 2 correspondem aos dois tipos de cavidades ressonantes devido aos dois diâmetros utilizados, e que os picos 3 e 4 correspondem ao efeito de dispersão múltipla devido à periodicidade do conjunto. Foi ainda estudada a resposta em termos de atenuação sonora de cada tipo de elemento, observando-se claramente que a melhor resposta é dada pelos dispersores que utilizam a cavidade ressonante e o material absorvente. Por forma a caracterizar acusticamente a barreira projetada foram realizados dois testes. Estes testes são usualmente utilizados para a caracterização de barreiras acústicas convencionais para o ruído de tráfego, de acordo com a Normalização Europeia. O primeiro teste era respeitante à norma EN 1793-1:1997 “Caraterísticas intrínsecas da absorção sonora”, que teve como finalidade a obtenção do coeficiente de absorção acústica,  $\alpha_s$ , numa câmara reverberante. O segundo teste respeitava a norma EN 1793-2:1997 “Caraterísticas intrínsecas do isolamento a sons aéreos”. Do primeiro teste resultou a classificação da barreira como sendo da categoria A3, sendo que a classificação do segundo teste corresponde à categoria B2. Do estudo realizado os autores concluem que este tipo de barreiras tem uma boa resposta em termos de atenuação sonora, podendo competir com as barreiras acústicas convencionais e até serem mais eficazes em determinados casos.

Com recurso a simulações numéricas, usando o Método das Soluções Fundamentais, Martins et al (2013a), estudaram a influência de diversos fatores na construção de barreiras de cristais

sônicos que influenciam os resultados. Foram realizadas diversas análises para avaliar a influência de aspetos como o número de cilindros, o diâmetro dos cilindros, os espaçamentos entre os cilindros e a variabilidade aleatória dos diâmetros dos cilindros.

Relativamente ao número de cilindros era pretendido encontrar o número mínimo de cilindros na extensão da barreira, por forma a que se deixassem de verificar fenómenos de difração nas extremidades do cristal sónico. Assim, considerando tubos com diâmetro de 0,20 m e uma distância entre centros de 0,40 m, foram variando o número de cilindros em valores múltiplos de 5 e avaliaram-se as atenuações para as frequências de 600, 800, 1000, 1200 e 1400 Hz. Observou-se que, para uma configuração quadrangular, o número mínimo de cilindro deve ser de 40 e, no caso da configuração triangular, deverão ser de 30 ou 35 (para os casos de 2 ou 3 fiadas de cilindros, respetivamente).

Para o caso da influência do diâmetro dos cilindros adotou-se cristais sônicos com o número de cilindros determinados no estudo anterior, mantendo as distâncias. Foram feitos ensaios para 3 diâmetros diferentes: 0,10 , 0,15 e 0,20 m. Da análise dos resultados foi possível observar que, em torno dos 1000 Hz, os cilindros de diâmetro de 0,20 m são os que apresentam maior atenuação.

No que diz respeito à influência do espaçamento entre os cilindros, e adotando cristais sônicos com número de cilindros e diâmetro utilizados nos ensaios anteriores, testaram-se espaçamentos de 0,30 , 0,40 e 0,50 m. Observando os resultados, conclui-se que nenhum dos espaçamentos testados apresenta uma clara vantagem sobre os outros, sendo portanto difícil eleger qual a melhor escolha.

Outro teste foi feito, desta vez considerando a influência da variabilidade aleatória dos diâmetros dos cilindros. Este ensaio pretende representar a possibilidade dos cilindros que se utilizam não apresentarem o mesmo diâmetro. Considerando um espaçamento de 0,40 m e diâmetro de 0,20 m, as variações ocorrem de forma aleatória entre  $\pm 10\%$ ,  $15\%$ ,  $20\%$  e  $25\%$  do valor previsto (0,20 m).

Outro aspeto importante e também testado foi a influência do ângulo de incidência da fonte sonora. Assim, para a medição dos resultados consideraram-se três posições distintas para a fonte. Sendo “L” o comprimento do cristal sónico, a fonte sonora foi colocada nas posições 0, L/4 e L/2, medidas a partir duma extremidade. Mantendo os valores obtidos de ensaios anteriores (a = 0,40 m e diâmetro de 0,20 m para os cilindros), os resultados mostram que a posição da fonte tem grande influência nos valores da Perda por Inserção. Com a fonte na posição 0 (posição mais afastada do centro) verificou-se, para a malha retangular, um aumento dos valores da Perda por Inserção. No caso da fonte e dos recetores estarem alinhados, não é observada grande atenuação. No caso da malha triangular o efeito é semelhante ao observado na malha retangular, mas menos evidente. Pode-se ainda concluir que com a geometria triangular a atenuação atinge valores mais altos nas baixas frequências.

Um último ensaio foi realizado para estudar a influência da absorção dos cilindros. Este estudo apresenta particular interesse no caso de se usarem como dispersores tubos de

diferentes materiais. Foram testados três valores do coeficiente de absorção ( $\alpha = 0,1$ ,  $\alpha = 0,3$  e  $\alpha = 0,5$ ) nas mesmas três posições descritas no ensaio anterior. Tal como esperado, na malha retangular observou-se um aumento progressivo da Perda por Inserção com o aumento do coeficiente de absorção. Um facto interessante que se observou foi que também no caso da fonte e os recetores estarem alinhados existe um efeito de absorção considerável, o que significa que os materiais absorventes diminuem eficientemente o efeito de caminho de onda (“waveguide”), isto é, diminuem a energia sonora que passa pelos espaços abertos no interior da malha. Com  $\alpha = 0,5$  observam-se valores altos de atenuação em qualquer posição da fonte. Com este coeficiente de absorção observaram-se valores de atenuação na ordem dos 15 dB quando a fonte sonora está desalinhada com os recetores e 6 dB quando alinhada. Os resultados para a malha triangular são similares aos observados para a malha retangular, com a particularidade de apresentarem valores ligeiramente mais altos de atenuação, o que leva a que considere esta geometria triangular como a mais adequada no caso de aplicação para combater o ruído de tráfego.

Posteriormente, Martins et al (2013b), ensaiaram uma barreira acústica de cristais sónicos à escala geométrica 1/5. A barreira é dimensionada considerando a sua aplicabilidade à redução do ruído de tráfego, e como tal, também o domínio de análise de frequências é analisado nesse campo. Para determinar a viabilidade dos ensaios de campo, estes foram comparados com os resultados fornecidos pelo modelo numérico. Analisando os resultados é possível concluir-se que os resultados do ensaio experimental combinam bem com os do modelo numérico, mostrando na gama de frequências mais significativa (para o ruído de tráfego) atenuações sonoras na ordem dos 7 dB. A barreira construída para os ensaios de campo é a mostrada na Figura 4.11.



Figura 4.11 – Barreira acústica de cristais sónicos (Martins et al., 2013b)

## 5 PROPOSTA DE UM MODELO LABORATORIAL PARA ANÁLISE DO DESEMPENHO DE BARREIRAS ACÚSTICAS DE CRISTAIS SÓNICOS

### 5.1 Objetivos

O principal objetivo da realização dos ensaios experimentais é verificar a resposta dada por cada uma das diferentes geometrias usadas na construção das barreiras acústicas de cristais sónicos em termos de atenuação sonora. O parâmetro a calcular será a Perda por Inserção (“Insertion Loss” - IL) que, tal como indicado anteriormente, traduz a diferença de nível sonoro no mesmo ponto, com e sem barreira.

### 5.2 Equipamento Utilizado para Registo das Medições

Em termos de equipamento a utilizar para o registo das medições e tratamento de dados foram utilizados os seguintes dispositivos, que são também mostrados na Figura 5.1:

- Um microfone com um pré-amplificador do tipo 26 AK da marca “G.R.A.S Sound & Vibration”;
- Um amplificador;
- Uma fonte sonora da marca “Sony”, modelo XS-F1026SE;
- Um analisador portátil modelo Symphonie da marca “01dB”;
- Um computador portátil equipado com o programa dBbati32 da marca “01dB”.



Figura 5.1 – Equipamento das medições: a) amplificador; b) fonte sonora; c) microfone; d) Symphonie; e) computador portátil com dBbati32

Relativamente à escolha da fonte sonora, optou-se por uma fonte ligada a um amplificador ao invés de utilizar uma fonte direcional, visto que, na fonte direcional disponível, se verificava uma perda de energia nas frequências mais altas (acima dos 10-12 kHz). No Capítulo 5.5 “Apresentação dos Resultados” é explicado o motivo para a necessidade uma boa definição nas altas frequências por parte da fonte sonora.

### 5.3 Constituição das Amostras a Ensaiar

Por forma a dar um seguimento ao estudo prático de Martins et al (2013b), procurou-se que, pese embora a diferente escala geométrica e os diferentes materiais, as amostras a ensaiar seguissem a mesma ideologia de montagem. As amostras a ensaiar por Martins et al (2013b) foram feitas numa escala geométrica 1/5, com cilindros de PVC\_U40 PN4, com diâmetro nominal de 40 mm e comprimento de 1 m. Para manter a verticalidade dos cilindros, estes foram fixados, na base e no topo, a uma placa de madeira com pequena espessura.

Para o presente trabalho, na criação das barreiras acústicas à escala geométrica 1/10 utilizaram-se essencialmente dois materiais. Para desempenhar a função dos dispersores utilizaram-se tubos VD, em PVC, com 20mm de diâmetro e 0,50 m de comprimento. De forma a fixar e a manter a verticalidade dos tubos foi usado, tanto na base como no topo destes, placas de poliestireno extrudido da marca Topox com 4cm de espessura e com uma densidade nominal de 30 kg/m<sup>3</sup>. Estas placas apresentam como dimensões 87cm de comprimento e 30cm de largura. Depois de cortados os tubos VD com 0,50 m de comprimento, estes eram ligeiramente cravados nas placas de poliestireno extrudido, consoante a respetiva configuração geométrica a testar. A Figura 5.2 mostra a montagem base das barreiras acústicas de cristais sónicos. Por forma a diminuir a interferência de possíveis reflexões entre as placas, optou-se por colocar, nas faces interiores de ambas, algodão e a face exterior foi revestida com uma espuma acústica.





Figura 5.2 – Montagem base das barreiras de cristais sónicos

#### 5.4 Procedimento de Ensaio

A realização prática dos ensaios foi feita em dois locais com diferentes características de montagem. Uma parte dos ensaios práticos foram realizados num “túnel anecoico”, com 2 m de profundidade e com 1 m de altura e também de largura. Nesta situação, a amostra era colocada dentro do “túnel anecoico” e a entrada do mesmo era fechada durante as medições. A outra parte dos ensaios realizaram-se numa sala semi-aneecóica com dimensões úteis de 4,20x3,50x2,35 m<sup>3</sup> (Figura 5.3). Em ambos os casos o revestimento foi feito recorrendo a espumas de cor escura, com 1 m de lado, 50 mm de espessura e uma densidade de 90 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 5.3 – À esquerda “túnel anecoico” e à direita câmara semi-aneecóica



Para a realização das medições foi sempre utilizada a mesma configuração esquemática, indicada na Figura 5.4, mudando apenas a configuração geométrica das barreiras a testar.

Inicialmente tentaram-se utilizar, à escala geométrica 1/10, as distâncias usadas por Martins et al (2013b). No entanto, ao fazer a adaptação verificou-se que, em certas configurações geométricas das barreiras acústicas, as posições 1 a 5 do microfone (representados por “+” na Figura 5.4) estariam sobre a última fiada de tubos. Assim sendo, optou-se por definir distâncias base para todas as medições a testar.

Definiu-se que a fonte sonora é colocada a 25 cm do centro da primeira fiada de tubos da barreira e os cinco primeiros pontos do microfone a 40 cm dessa mesmo centro da primeira fiada de tubos.

Os resultados são medidos para as posições de 1 a 25 do microfone.

Após a montagem da barreira de cristais sónicos, colocação da fonte sonora e marcação dos pontos de medição para o microfone, procede-se então ao registo dos valores medidos.

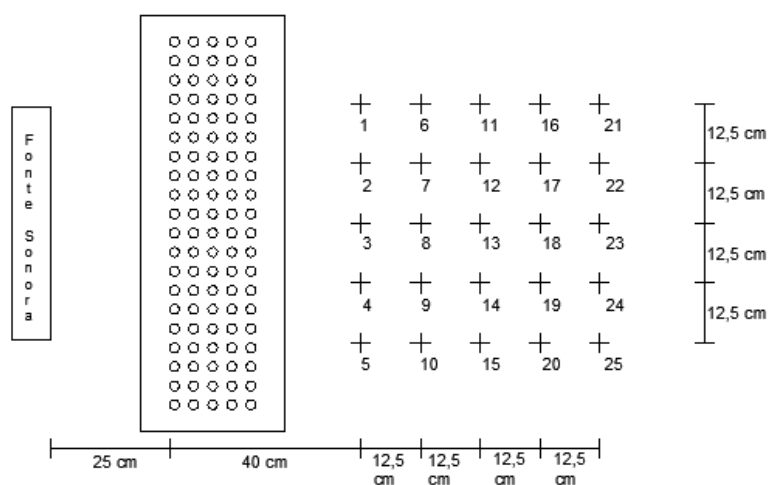


Figura 5.4 – Configuração para as medições a realizar

Com recurso ao software dBati32 inicia-se a campanha de medições. Em primeiro lugar, é importante fazer a configuração do hardware que se vai utilizar na campanha. Neste caso é utilizado apenas um microfone tal como indicado na Figura 5.5.

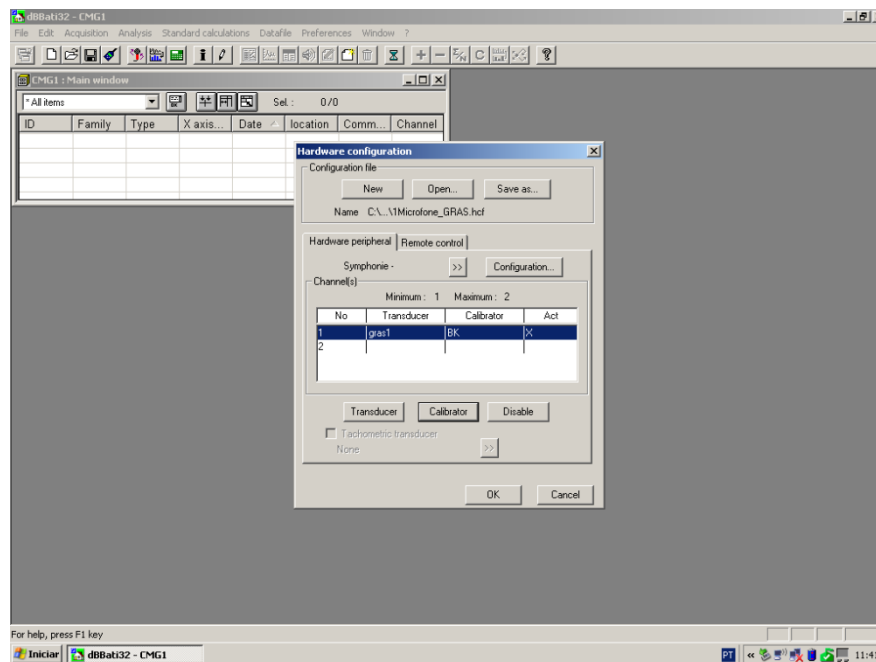


Figura 5.5 – Escolha e configuração do microfone a utilizar nas medições

Após a definição do microfone a utilizar, procede-se à respetiva calibração com auxílio de um calibrador (Figura 5.6).

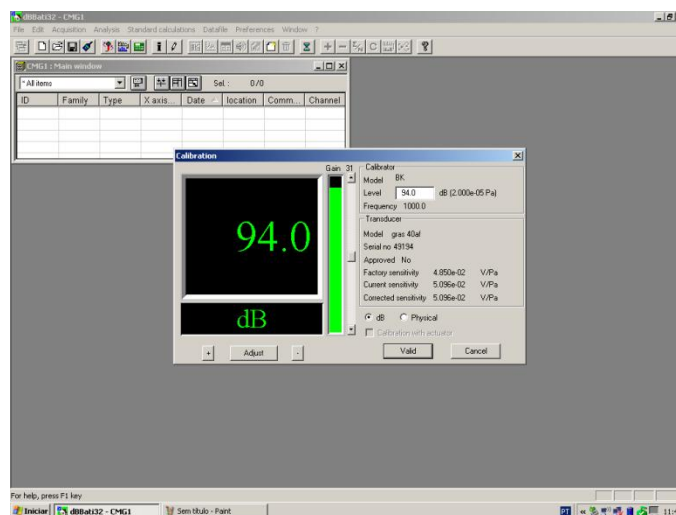


Figura 5.6 – Calibração do microfone

De seguida faz-se a configuração a utilizar em todas as medições que se efetuam. Nestes ensaios experimentais foi gerado um ruído branco em terço de oitava, com uma duração de 5 segundos (Figura 5.7).

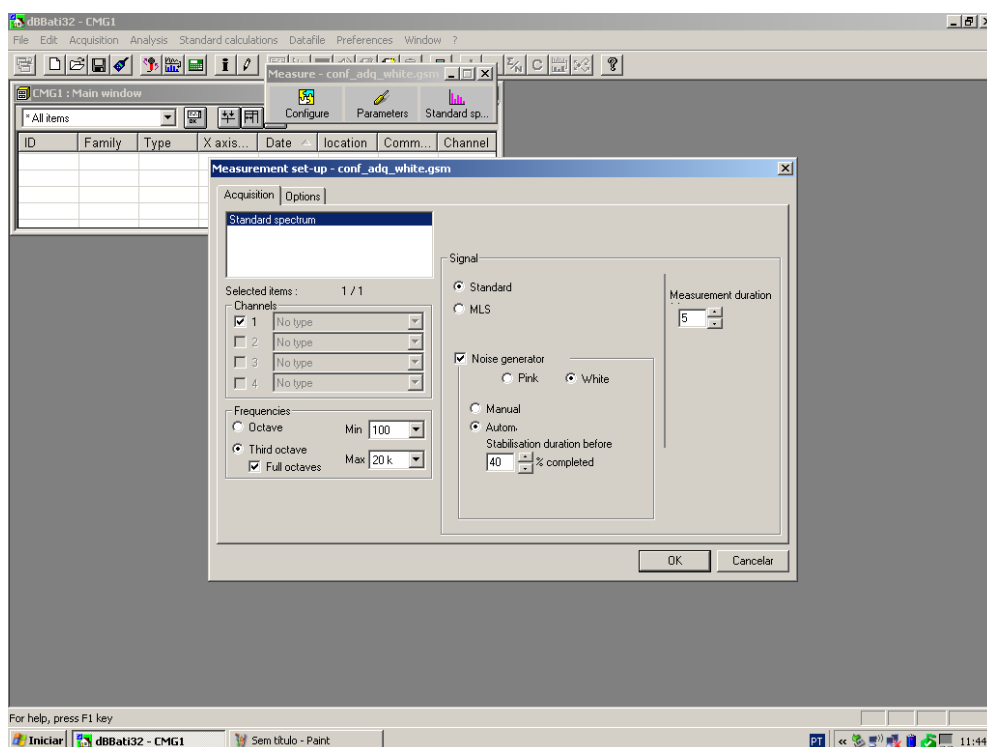


Figura 5.7 – Configuração do setup de aquisição

Finalizadas as medições para todos os 25 pontos, os dados recolhidos no software dBbati32 são exportados e analisados no Matlab. A Perda por Inserção é determinada através da diferença entre o nível de pressão sonora medido com barreira e sem barreira, utilizando a média dos 25 pontos medidos. A Perda por Inserção foi calculada entre os 0 e os 20 kHz, usando uma banda estreita de 100 Hz.

## 5.5 Apresentação dos Resultados

Tal como dito anteriormente, para a aquisição dos dados utilizou-se uma configuração com o analisador Symphonie e o software dBbati32, além do microfone GRAS Sound & Vibration Preamplifier Type 26 AK. Uma vez que se pretende avaliar a resposta dada pela barreira de cristais sónicos ao ruído de tráfego, a gama de frequência mais relevante está situada entre os 500Hz e os 1500Hz. Visto utilizar-se uma amostra à escala geométrica 1/10 em relação à original, a gama de frequência a analisar nos ensaios estará então compreendida entre os 5000Hz e os 15000Hz. No entanto, os resultados a apresentados pelo software dBbati32 estão compreendidos entre os 100Hz e os 20kHz em bandas de terço de oitava.

De seguida mostram-se as várias configurações do cristal sónico testadas e o respetivo gráfico de comparação entre os valores obtidos da medição experimental e os obtidos através dum código implementado numericamente em Matlab. O modelo numérico adotado baseia-se no Método das Soluções Fundamentais (“Method of Fundamental Solutions”) apresentado por Martins et al (2013a) e Martins et al (2013b) aplicado à modelação 2D de uma barreira acústica sujeita a um campo de ondas acústicas incidentes por uma fonte linear. O MFS é um método que requer apenas a definição de um conjunto de pontos ao longo das barreiras físicas do problema (neste caso os cilindros) por forma a estabelecer uma aproximação à sua solução. Através desses pontos e fazendo uso da combinação linear das soluções fundamentais das equações diferenciais que regem o problema, o método permite obter uma solução aproximada do problema.

### 5.5.1 Configuração Retangular com $a=2xD$

Neste ensaio o cristal sónico apresenta uma geometria retangular onde os centros dispersores estão separados de duas vezes o seu diâmetro ( $a=2xD$ ), ou seja, distam de 4 cm visto o diâmetro dos tubos ser 2 cm. A Figura 5.8 apresenta a esquemática desta configuração.

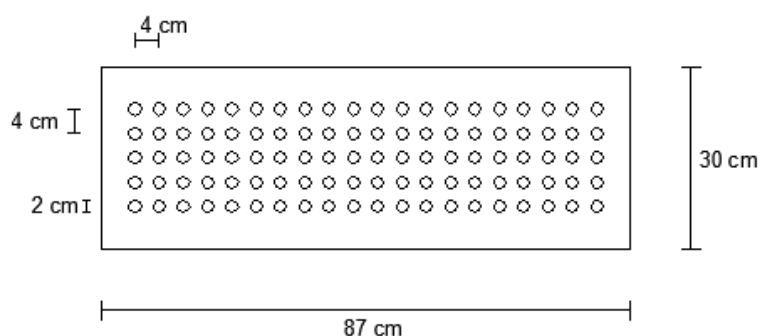


Figura 5.8 – Configuração Retangular com  $a=2xD$

As medições para esta configuração foram realizadas na câmara semi-anecóica (Figura 5.3, imagem da direita). Fazendo as referidas medições para os 25 pontos do microfone de acordo com o observado na Figura 5.4, determinou-se o correspondente gráfico comparativo da Perda por Inserção experimental e teórica por modelação numérica, que é mostrado na Figura 5.9.

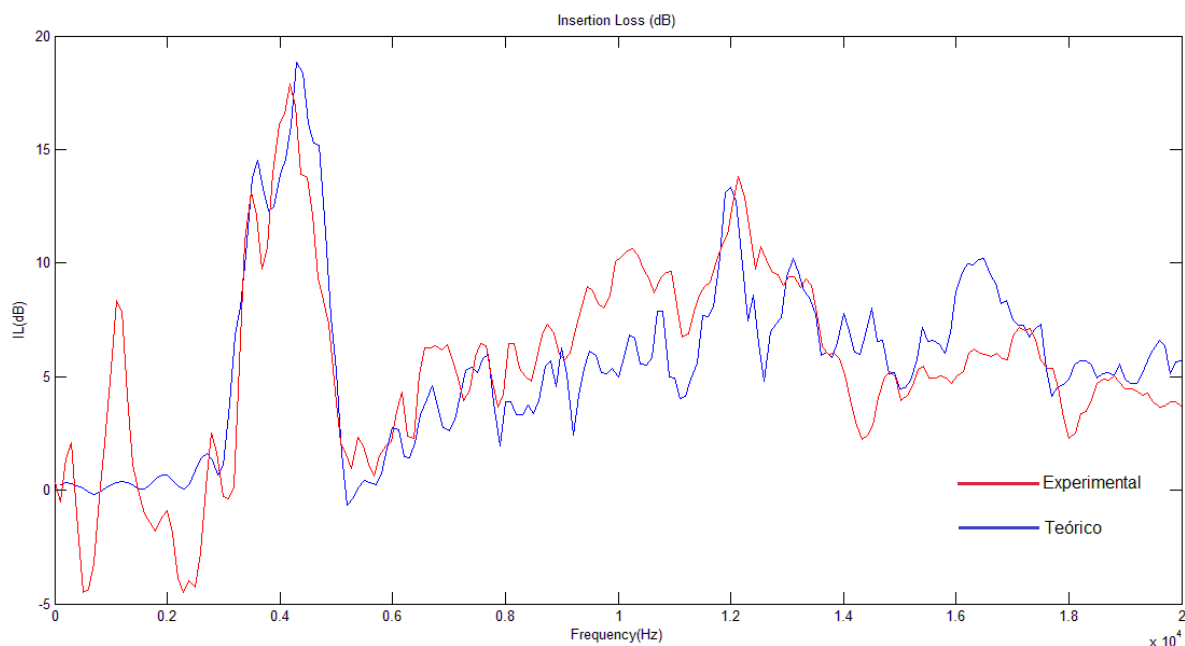


Figura 5.9 – Comparação da Perda por Inserção entre os valores ensaiados experimentalmente (linha vermelha) e os valores previstos teoricamente (linha azul), no caso da configuração retangular com  $a=2xD$

Observa-se uma boa combinação entre o resultado experimental e teórico (entre a gama de frequências pretendida), verificando-se desde logo uma primeira evidência de “bandgap” nos 4000 Hz. Em torno dos 10000 Hz, a frequência mais relevante para o ruído de tráfego nesta escala geométrica, existe uma atenuação de aproximadamente 10 dB no caso prático.

Uma observação mais geral dos ensaios realizados será comentada no Capítulo 5.6.

### 5.5.2 Configuração Triangular com $a=2xD$

Nesta configuração os centros dispersores estão arrançados em forma de triângulos, onde estão distanciados de 4 cm uns dos outros tal como mostra a Figura 5.10.

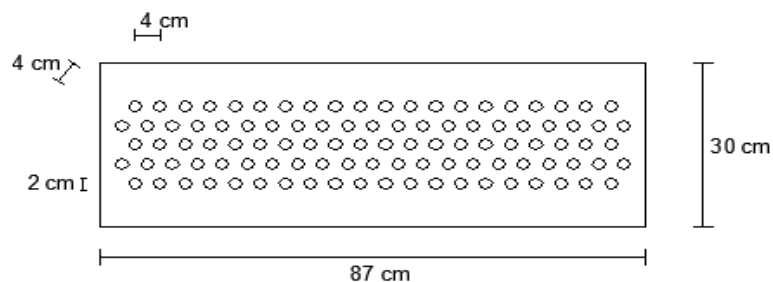


Figura 5.10 – Configuração Triangular com  $a=2xD$

Para esta configuração as medições foram executadas no “túnel anecoico” (Figura 5.3, imagem da esquerda). Após as medições o gráfico comparativo da Perda por Inserção obtido é o destacado na Figura 5.11.

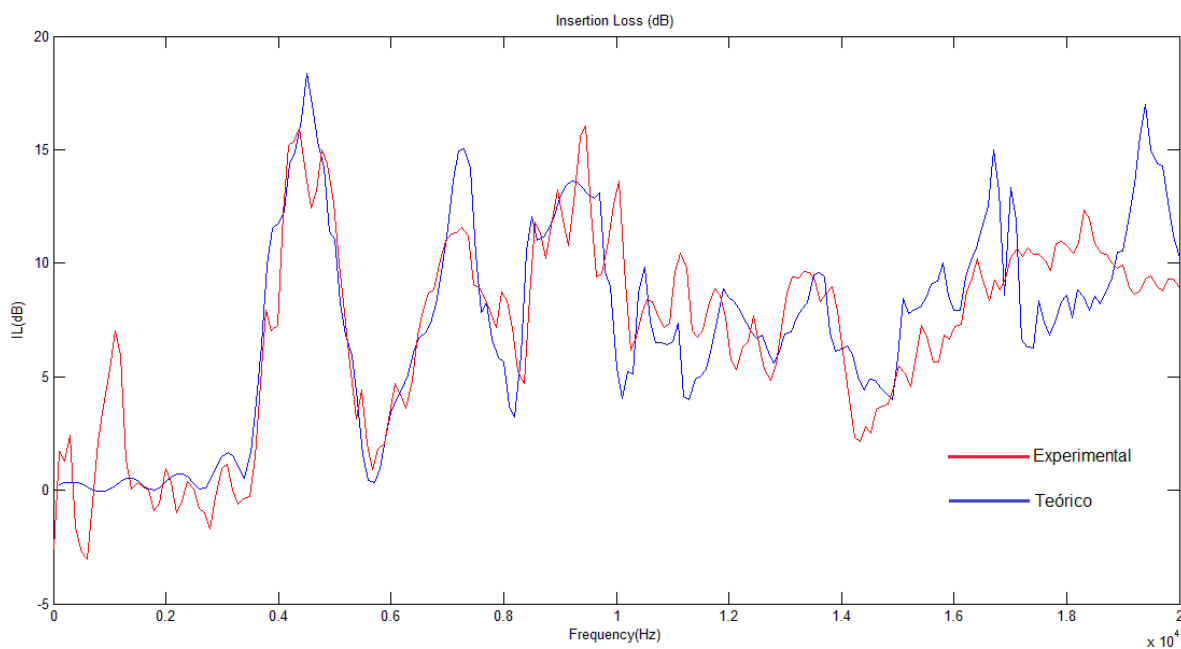


Figura 5.11 – Comparação da Insertion Loss entre os valores ensaiados experimentalmente (linha vermelha) e os valores previstos teoricamente (linha azul), no caso da configuração triangular com  $a=2xD$

Também neste caso existe uma boa concordância entre os resultados, destacando-se uma vez mais uma primeira “bandgap” próxima dos 4000 Hz. Destaca-se ainda que, tanto para o caso do ensaio experimental como do ensaio teórico por modelação numérica, a Perda por Inserção na frequência do ruído de tráfego está acima dos 10 dB.

### 5.5.3 Configuração Retangular com $a=3xD$

Neste caso a geometria retangular mantém-se, mas desta feita os centros dispersores distam de 6 cm uns dos outros, como se pode observar na Figura 5.12.

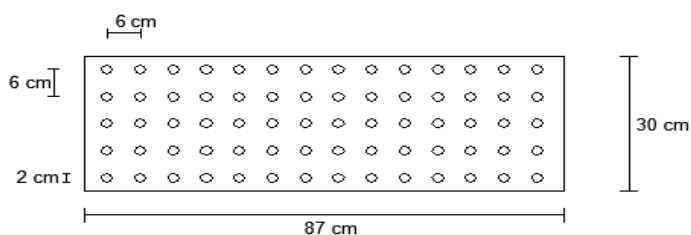


Figura 5.12 – Configuração Retangular com  $a=3xD$

O gráfico da Perda por Inserção obtido para esta configuração é o apresentado na Figura 5.13, e as medições para esta geometria foram realizadas na câmara semi-aneecóica.

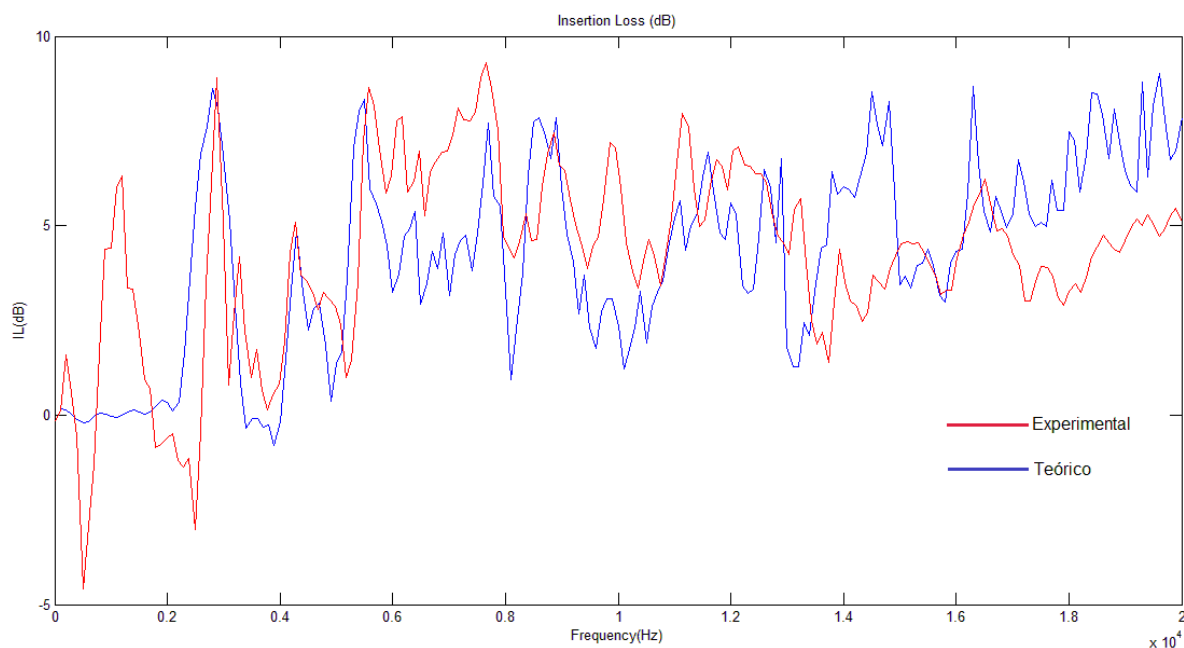


Figura 5.13 – Comparação da Perda por Inserção entre os valores ensaiados experimentalmente (linha vermelha) e os valores previstos teoricamente (linha azul), no caso da configuração retangular com  $a=3xD$

Para esta configuração geométrica não se observa uma forte evidência de “bandgap” dentro da gama de frequências mais relevante para o presente estudo.

### 5.5.4 Configuração Triangular com $a=3xD$

Neste caso a geometria é triangular e os centros dispersores estão separados de 6 cm, tal como se pode observar na Figura 5.14.

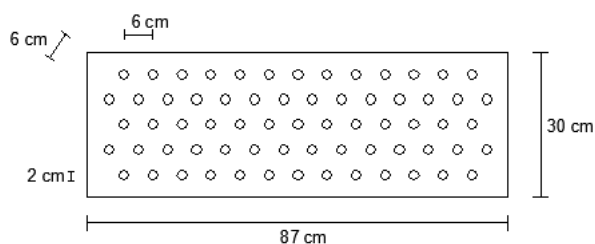


Figura 5.14 – Configuração Triangular com  $a=3xD$

Após feitas as medições na câmara semi-aneecóica, a Perda por Inserção resultante desta configuração geométrica é a indicada na Figura 5.15.

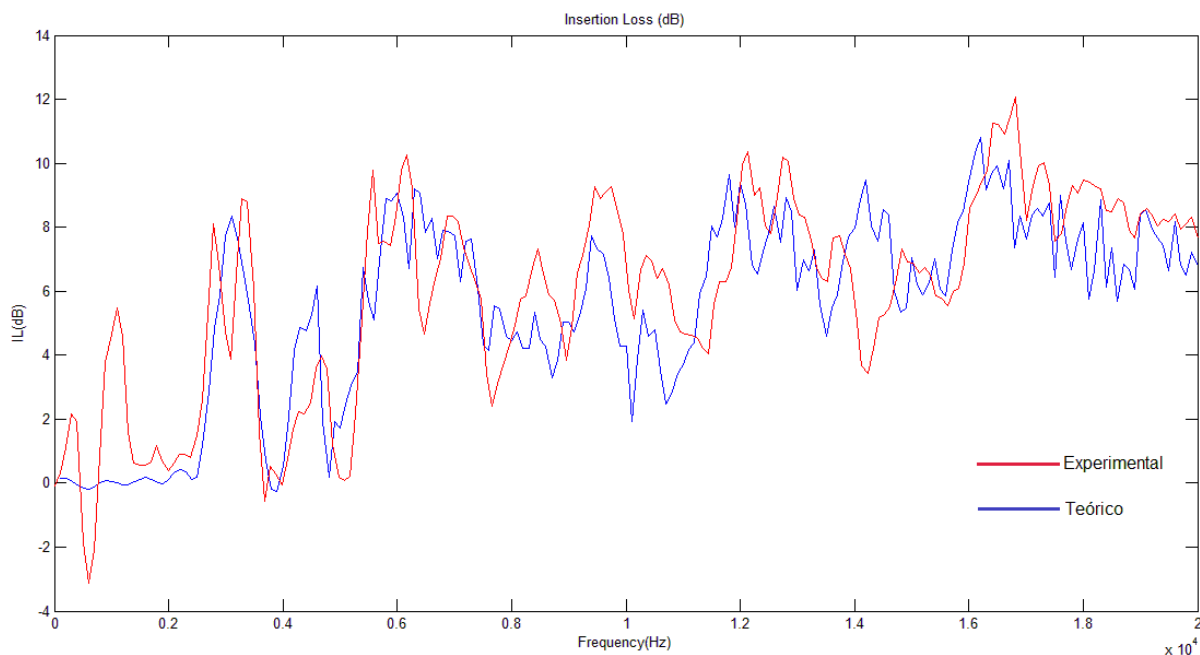


Figura 5.15 - Comparação da Perda por Inserção entre os valores ensaiados experimentalmente (linha vermelha) e os valores previstos teoricamente (linha azul), no caso da configuração triangular com  $a=3xD$



Apesar de não se observar uma presença forte de “bandgap”, existe uma boa concordância entre os dois ensaios realizados.

### 5.5.5 Configuração Retangular com $a=2xD$ sem fila do meio

Nesta situação partiu-se da geometria retangular com os centros dispersores afastados de 4 cm, mas retirou-se a fiada de tubos do meio, tal como mostra a Figura 5.16.

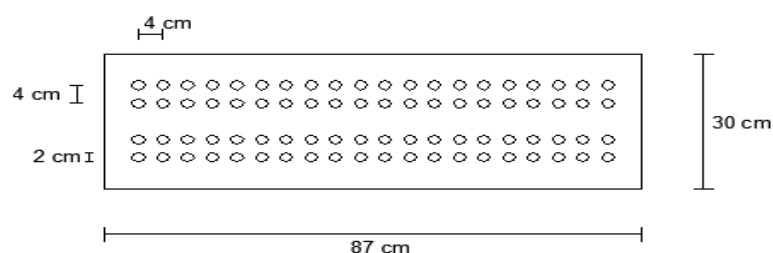


Figura 5.16 – Configuração Retangular com  $a=2xD$  sem fila do meio

Com os dados das medições realizadas no “túnel anecoico” obteve-se o gráfico para a Perda por Inserção mostrado na Figura 5.17.

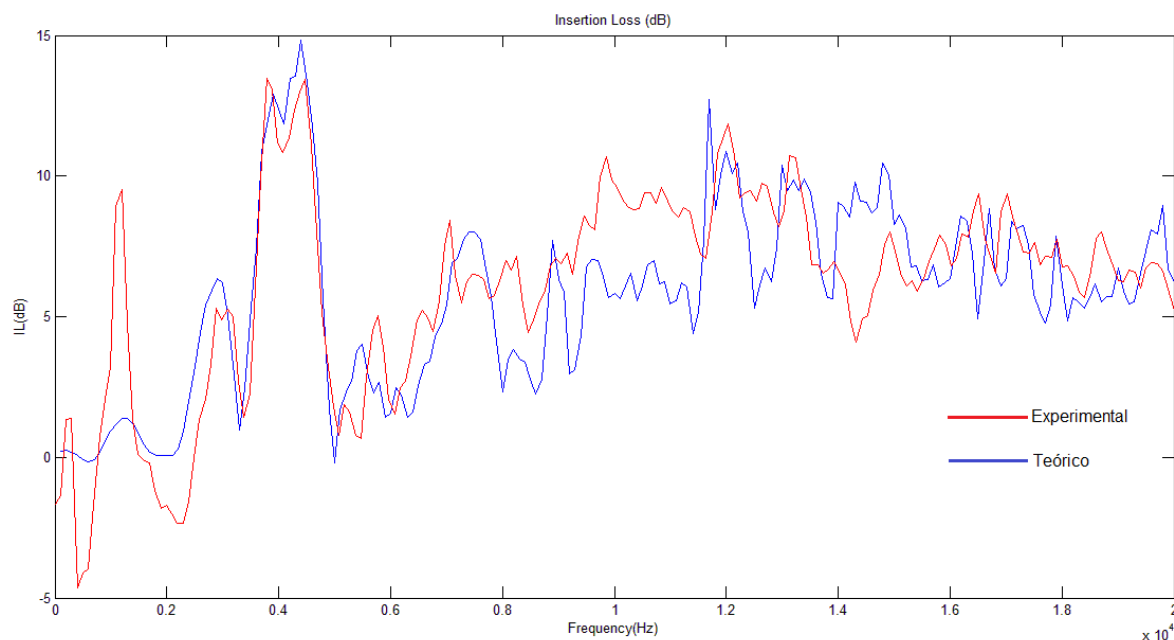


Figura 5.17 – Comparação da Perda por Inserção entre os valores ensaiados experimentalmente (linha vermelha) e os valores previstos teoricamente (linha azul), no caso da configuração retangular com  $a=2xD$  sem fila do meio

Tal como se verificou para os ensaios anteriores onde  $a=2xD$ , também nesta configuração geométrica se observa a presença de uma “bandgap” próxima dos 4000 Hz.

### 5.5.6 Configuração Triangular com $a=2xD$ sem fila do meio

Para esta configuração utilizaram-se os centros dispersores afastados de 4 cm, mas à configuração inicial triangular retiraram-se os tubos da fila do meio tal como se pode observar na Figura 5.18.

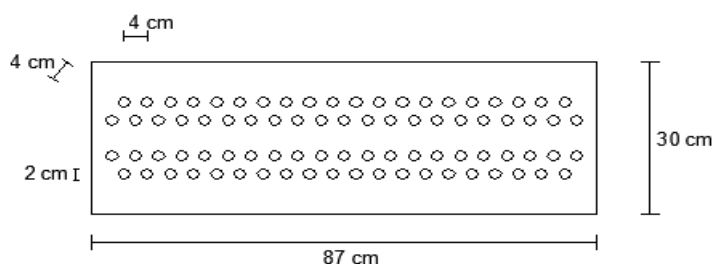


Figura 5.18 – Configuração Triangular com  $a=2xD$  sem fila do meio

Calculando os dados resultantes das medições efetuadas no “túnel anecoico” para a referida configuração obteve-se o gráfico da Figura 5.19 que traduz a Perda por Inserção.

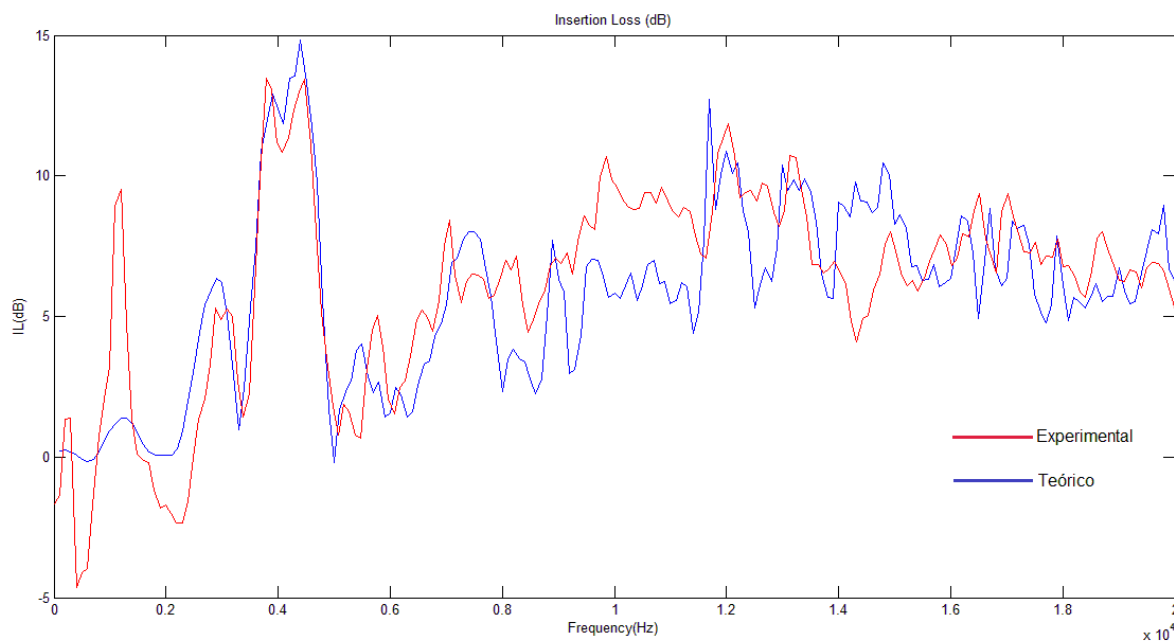


Figura 5.19 – Comparação da Perda por Inserção entre os valores ensaiados experimentalmente (linha vermelha) e os valores previstos teoricamente (linha azul), no caso da configuração triangular com  $a=2xD$  sem fila do meio

Do gráfico da Perda por Inserção, pode-se observar, uma vez mais, a presença de uma “bandgap” nos 4000 Hz. No caso do ensaio experimental atinge-se uma atenuação de 10 dB em torno dos 10000 Hz.

### 5.5.7 Configuração Retangular com $a=2xD$ com vazios

Esta configuração utiliza os centros dispersores afastados de 4 cm numa geometria de base retangular idêntica à indicada na Figura 5.20. Esta geometria foi pensada a partir da geométrica retangular com  $a=2xD$ , criando alguns vazios, mas mantendo a simetria entre eles.

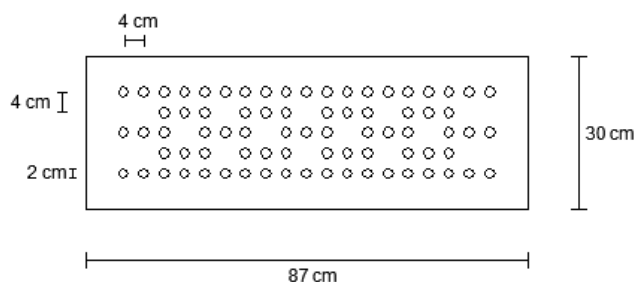


Figura 5.20 – Configuração Retangular com  $a=2xD$  com vazios

Após processar os dados resultantes das medições na câmara semi-anecoica o gráfico comparativo entre o ensaio prático e o resultado estimado teoricamente é o mostrado na Figura 5.21.

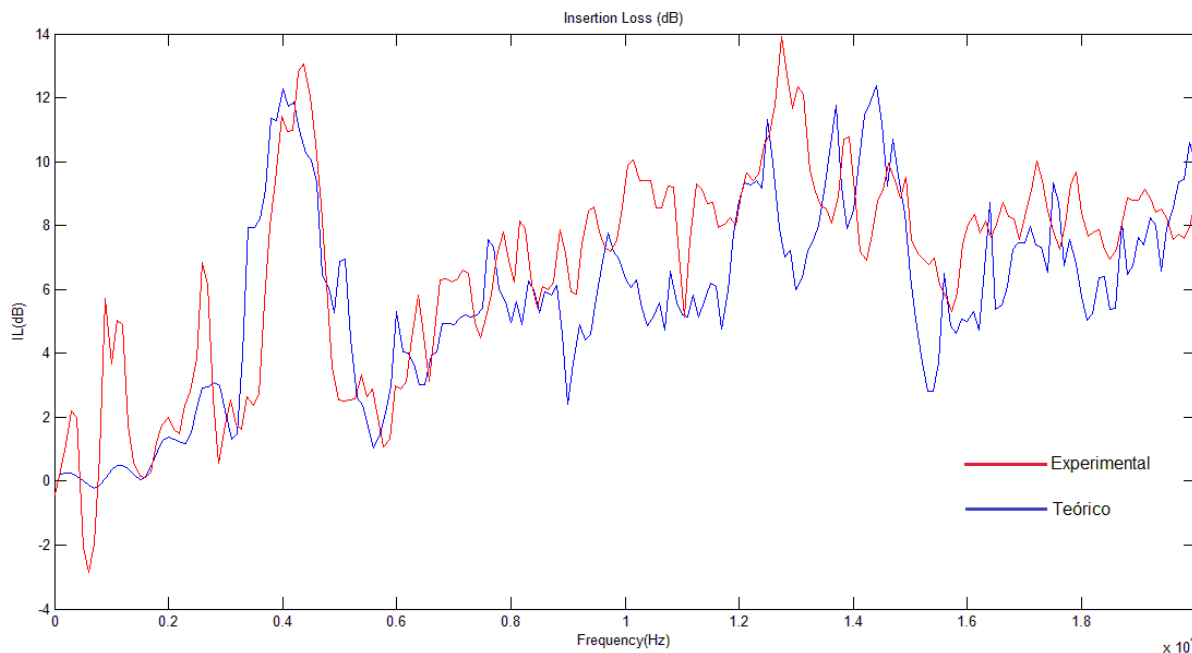


Figura 5.21 - Comparação da Perda por Inserção entre os valores ensaiados experimentalmente (linha vermelha) e os valores previstos teoricamente (linha azul), no caso da configuração retangular com  $a=2xD$  com vazios

Tal como em todos os ensaios anteriores onde foi usada uma configuração com  $a=2xD$ , também para esta disposição geométrica dos tubos, existe uma “bandgap” nos 4000 Hz.

### 5.5.8 Configuração Triangular com $a=2xD$ na direção vertical

Esta configuração parte de uma aproximação da configuração Triangular com  $a=2xD$  (Figura 5.10), no entanto neste caso foi feita a partir da direção vertical tal como se mostra na Figura 5.22.

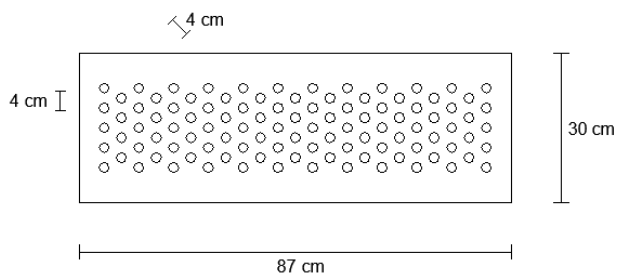


Figura 5.22 – Configuração Triangular com  $a=2xD$  na direção vertical

Os ensaios práticos para esta geometria foram realizados na câmara semi-anecoica e o respetivo gráfico da Perda por Inserção que mostra a comparação com o resultado obtido teoricamente é o dado pela Figura 5.23.

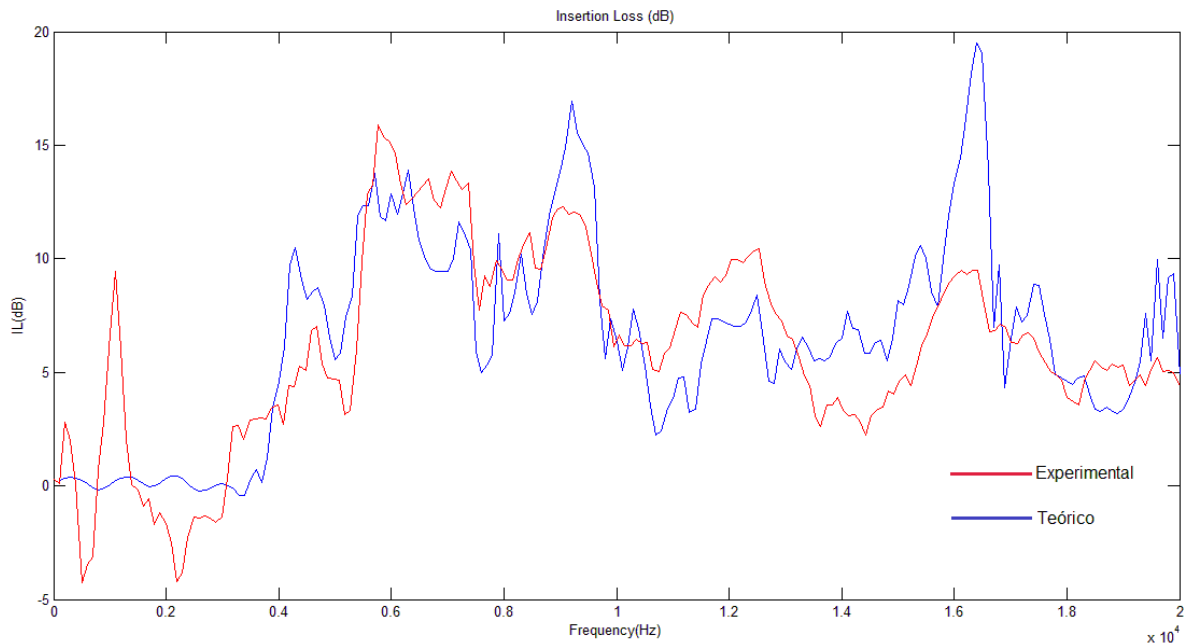


Figura 5.23 - Comparação da Perda por Inserção entre os valores ensaiados experimentalmente (linha vermelha) e os valores previstos teoricamente (linha azul), no caso da configuração triangular com  $a=2xD$  na direção vertical

Ao contrário de todas as configurações anteriores onde se usava  $a=2xD$ , desta vez não existe uma “bandgap” em torno dos 4000 Hz. Comparando com as outras configurações com  $a=2xD$ , esta não possui os tubos das faces extremas de maior comprimento alinhados, podendo ser essa a razão para que não se observe a presença da “bandgap”.

## 5.6 Discussão dos Resultados

Tratando-se de ensaios experimentais e nem todos eles terem sido realizados nas mesmas condições, existem sempre alguns erros que de certo modo podem afetar ligeiramente os resultados. Por exemplo, os ensaios experimentais foram realizados tanto no “túnel anecoico” como na câmara semi-anecoica, sendo que as condições e características variam ligeiramente entre elas.

Tal como dito anteriormente, tratando-se de barreiras sonoras com a finalidade de atenuar o ruído de tráfego, os valores das frequências a ter mais em conta na observação dos resultados

são, nesta escala geométrica 1/10, os valores em torno da frequência de 10000 Hz. Por isso, todos os valores de atenuação que sejam referidos daqui para a frente serão sempre relativos aos valores em torno dos 10000 Hz.

De um modo geral, os resultados experimentais condizem com uma certa precisão com os resultados teóricos, exceto até aos 2500 Hz. Esta imprecisão até aos 2500 Hz pode ser explicada devido ao facto da fonte sonora que se utilizou ser equipada com um “woofer” (responsável pelas baixas frequências) e por um “tweeter” (responsável pelas altas frequências), sendo que na modelação teórica apenas se considerou o “tweeter”.

Da observação dos resultados obtidos, pode-se concluir que as configurações Triangular com  $a=2xD$  (Figura 5.10) e Triangular com  $a=3xD$  (Figura 5.14) são as que apresentam uma maior aproximação entre o ensaio teórico e o ensaio experimental.

A maior atenuação em torno dos 10000 Hz é evidenciada na configuração Triangular com  $a=2xD$  (Figura 5.10), apresentando um valor de atenuação aproximado dos 15 dB.

Por outro lado, a configuração que apresenta o resultado mais baixo para a atenuação é a configuração Retangular com  $a=3xD$  (Figura 5.12), com um valor máximo de atenuação fixado nos 7,5 dB.

Apesar de em termos de geometrias testadas apenas duas delas serem relativas a geometrias com  $a=3xD$ , constata-se que estas apresentam geralmente valores mais baixos de atenuação em volta dos 10000 Hz, quando comparadas com as geometrias com  $a=2xD$ . Para as geometrias com  $a=3xD$  os valores de atenuação não ultrapassam os 9 dB, enquanto que no caso das geometrias com  $a=2xD$  estes andam sempre acima dos 10 dB, chegando mesmo a atingir valores de 15 dB.

Outra conclusão que se pode retirar dos resultados obtidos, diz respeito às “bandgap’s”. Exceto na configuração triangular com  $a=2xD$  na direção vertical (Figura 5.22), em todas as outras configurações geométricas com  $a=2xD$ , é possível verificar a existência de “bandgap” facilmente, algo que não é tão fácil de se observar nas configurações com  $a=3xD$ .

## 6 CONCLUSÃO

O desenvolvimento tecnológico tem-se feito notar nos diversos campos da engenharia, sobretudo com o intuito de melhorar a qualidade de vida das populações, mas também no melhoramento das mais diversas técnicas que são aplicadas nos dias de hoje para evitar ou diminuir os impactes mais prejudiciais provenientes desse mesmo desenvolvimento.

O aparecimento dos metamateriais e as suas notáveis propriedades que não se encontram diretamente na natureza tem levado a um crescente interesse nesses denominados metamateriais, existindo já vários estudos que exploram as suas propriedades em diversos campos da engenharia. Aquela que se considera a principal característica dos metamateriais é o fato destes apresentarem um índice de refração negativo, ao contrário dos materiais naturais que apresentam esse índice de refração positivo. Os metamateriais contam já com aplicações, por exemplo, no campo do eletromagnetismo, da acústica, e no campo sísmico. A maneira como os metamateriais afetam as ondas deve-se em parte ao facto de apresentarem características estruturais menores que o comprimento de onda da respetiva onda.

Dentro dos metamateriais existem as designadas estruturas periódicas de cristais sónicos. Por cristal sónico entende-se uma estrutura formada por um elemento base que é repetido regularmente numa grelha, em uma, duas, ou três dimensões. Assim, quando a distância entre esses elementos (dispersores) é inferior ao comprimento de onda, considera-se que este é um metamaterial.

O arranjo desses dispersores é feito de forma periódica numa grelha, sendo assim possível inibir a passagem de certas bandas de frequências. Essas bandas inibidas designam-se por “bandgaps”. Contrariamente ao conceito de “bandgaps” estas estruturas periódicas de cristais sónicos permitem também a criação de caminhos de onda, que por sua vez deixam passar com grande eficiência outras ondas com determinadas frequências. A banda de frequências que está dentro das “bandgaps” deve-se sobretudo à geometria da grelha e às características dos dispersores. Assim, alterando qualquer um destes é possível fazer variar a região da “bandgap”. Resumindo, se uma determinada onda com uma frequência dentro da “bandgap” incidir na estrutura periódica não é excitado nenhum modo de propagação e como tal essa onda não é propagada através da estrutura periódica.

Em termos de aplicações dos metamateriais nas áreas da engenharia destacam-se os conceitos de “cloaking” (camuflagem), da redução da vibração em casos sísmicos, na aplicação de difusores e com maior destaque a aplicação em barreiras acústicas de cristais sónicos.

Por outras palavras, o termo “cloaking” refere-se como a capacidade de camuflar/disfarçar o movimento de ondas. São já alguns os estudos neste campo, onde se mencionam trabalhos nos quais foram conseguidos resultados que provam que este conceito de “cloaking” é viável nos dias de hoje muito graças aos metamateriais. Mostrou-se que utilizando uma estrutura composta por metamateriais é possível camuflar determinados objetos (ainda que nos dias hoje a maioria dos ensaios sejam feitos com objetos de pequenas dimensões), mostrando que as ondas podem “passar” por esse objeto sem serem refletidas, como se não existisse nenhum objeto. Esta aplicação é deveras interessante por exemplo como aplicação para a deteção por parte dos sonares.

Relativamente à aplicação dos metamateriais como redutores das vibrações sísmicas em caso de um terramoto/sismo, estes procuram encaminhar as ondas sísmicas em redor da estrutura a proteger, fazendo assim com que estas não embatam na estrutura.

Sabendo-se que os difusores têm como objetivo tratar problemas sonoros (ecos por exemplo), alguns autores testaram a aplicação de uma estrutura de cristais sónicos em frente a um difusor, onde verificaram que o desempenho dos difusores melhora na presença da estrutura de cristais sónicos.

O caso das barreiras acústicas de cristais sónicos foi sujeito a um estudo mais elaborado que os anteriores, visto tratar-se do tema capital desta dissertação. Fazendo uma revisão do estado de arte é possível verificar que são já um número considerável de estudos feitos neste campo. As principais vantagens destas barreiras de cristais sónicos em comparação com as barreiras convencionais prendem-se no facto de serem estruturas bem mais leves, de permitirem a passagem do vento (não necessitando de fundações tão elaboradas) e serem de fácil construção. Do lado das desvantagens destaca-se a necessidade de terem uma espessura considerável para atingirem valores de atenuação na ordem dos verificando nas barreiras acústicas convencionais. Como visto anteriormente estas estruturas periódicas de cristais sónicos apresentam ainda a vantagem de permitir a “alteração” das “bandgap’s” fazendo simples modificações na geometria da grelha ou alterando a dimensão ou material dos elementos dispersores, apresentando-se assim como estruturas versáteis do ponto de vista construtivo, tal como se pode verificar pelos estudos já feitos neste campo. Dos estudos revistos no estado de arte, conclui-se que estas barreiras de cristais sónicos são uma boa alternativa às barreiras acústicas convencionais.



De forma a verificar se estas estruturas são ou não uma boa solução em termos de barreiras acústicas para atenuar o ruído de tráfego foram também levados a cabo alguns ensaios experimentais. Assim, ensaiaram-se à escala geométrica 1/10 algumas barreiras acústicas de cristais sónicos com diferentes geometrias, e para cada geometria foi determinado o gráfico da Perda por Inserção entre os 100 Hz e 20 kHz. Sendo um modelo à escala 1/10 e querendo saber-se o desempenho face ao ruído de tráfego, os resultados mais importantes a observar são em torno da frequência dos 10 kHz. De uma forma geral os resultados obtidos são positivos, mostrando existirem atenuações que podem alcançar os 15 dB.

Como ideia para trabalhos futuros neste tema, seria interessante considerar diferentes amostras construídas com dispersores feitos de outros materiais, por exemplo metal ou madeira (até mesmo utilizando troncos de árvores) e também utilizar tubos vazados como dispersores. Seria ainda interessante poder testar uma configuração deste género num ambiente real, ou seja, uma amostra feita à escala real e colocada junto a uma via rodoviária.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Akl, W., Baz, A. (2012). “Analysis and experimental demonstration of an active acoustic metamaterial cell”. *Journal of Applied Physics*, Vol. 111

Alagoz, B., Alagoz, S. (2011). “Towards Earthquake Shields: A Numerical Investigation of Earthquake Shielding with Seismic Crystals”. *Open Journal of Acoustics*, Vol. 1, pp. 63-69

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 Radio Science and Engineering/SMARAD Centre of Excellence, Aalto University, Finland

Assouar, M., Senesi, M., Oudich, M., Ruzzene, M., Hou, Z. (2012). “Broadband plate-type acoustic metamaterial for low-frequency sound attenuation”. *Applied Physics Letters*, Vol. 101

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

Bilal, O., Hussein, M. (2013). “Trampoline metamaterial: Local resonance enhancement by springboards”. *Applied Physics Letters*, Vol. 103

Castiñeira-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 Scatterers Arranged in a Fractal-Based Geometry”. *Archives of Acoustics*, Vol. 37, No. 4, pp. 455-462

Chen, Y., Ye, Z. (2001). “Acoustic Attenuation by Two-dimensional Arrays of Rigid Cylinders”. Wave Phenomena Laboratory, Department of Physics, National Central University, Chungli, Taiwan

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

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

Fuster-Garcia, E., Romero-García, V., Sánchez-Pérez, J., García-Raffi, L. (2007). “Targeted band gap creation using mixed sonic crystals arrays including resonators and rigid scatterers”. *Applied Physics Letters*, Vol. 90

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.

García-Chocano, V., Cabrera, S., Sánchez-Dehesa, J. (2012). “Broadband sound and absorption by lattices of microperforated cylindrical shells”. *Applied Physics Letters*, Vol. 101

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 Valencia, Spain

Guenneau, S., Farhat, M., Enoch, S., Movcham, A. (2009). “Cloaking bending waves propagating in thin elastic plates”. *Physical Review B*, Vol. 79

Kim, S., Das, M. (2013). “Artificial Seismic Shadow Zone by Acoustic Metamaterials”. *Modern Physics Letters B*, Vol. 27

Kim, S., Das, P. (2012). “Seismic Waveguide of Metamaterials”. *Modern Physics Letters B*, Vol. 26, Issue 17, 8 pp

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

Martínez-Sala, R., Rubio, C., García-Raffi, 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., Carbajo, J., Godinho, L., Mendes, P., Ramis, J. (2013b). “Insertion Loss Provided by a Periodic Structure – Numerical and Experimental Evaluation”. *TecniAcustica*, Valladolid, Espanha

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

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

Naify, C., Chang, C., McKnight, G., Nutt, S. (2010). “Transmission loss and dynamic response of membrane-type locally resonant acoustic metamaterial”. *Journal of Applied Physics*, Vol. 108

Norris, A. (2011). “Introduction to the special issue on cloaking of wave motion”. *Wave Motion*, Vol. 48, pp. 453-454

Pogson, M., Whittaker, D., Gehring, G., Hughes, R., Angus, A., Cox, T. (2010). “Multiple Scattering Between Cylinders and a Schroeder Diffuser”. *Acta Acustica United with Acustica*, Vol. 16, pp. 292-29

R.G.R. “Regulamento Geral do Ruído”, Decreto-Lei n.º 9/2007 de 17 de Janeiro de 2007

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 Crystals”. *Journal of Lightwave Technology*, Vol.17, No. 11, pp. 2202-2207

Sánchez-Dehesa, J., García-Chocano, V., Torrent, D., Cervera, F., Cabrera, S., Simon, F. (2011). “Noise control by sonic crystal barriers made of recycled materials”. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 129

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

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

Schurig, D., Mock, J., Justice, B., Cummer, S., Pendry, P., Starr, A., Smith, D. (2006). “Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies”. *Scienceexpress*

Smith, D., Shelby, R., Schultz, S. (2001). “Experimental Verification of a Negative Index Refraction”. *Science Magazine*, Vol. 292, No. 5514, pp. 77-79

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

Veselago, V. (1968). “The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ”. *Soviet Physics Uspekhi*, Vol.10, pp. 509-514

WHO (2013). “Global Status Report on Road Safety 2013”. World Health Organization, Genebra

WHO@(1999).[www.who.int/docstore/peh/noise/introduction.htm](http://www.who.int/docstore/peh/noise/introduction.htm). World Health Organization (página internet oficial), Genebra

Yang, Z., Chan, N., Ma, G., Sheng, P. (2010). “Acoustic metamaterial panels for sound attenuation in the 50-1000 Hz regime”. *Applied Physics Letters*, Vol. 96