



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

# **Estudo numérico e experimental do desempenho de barreiras acústicas com estrutura periódica**

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

Autor

**Marta Duarte Cordeiro**

Orientador

**Luís Manuel Cortesão Godinho**

**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, 2015**

## **AGRADECIMENTOS**

A realização da presente dissertação só foi possível graças à ajuda de um conjunto de pessoas a quem deixo o meu profundo agradecimento.

Em primeiro lugar, gostaria de destacar o Professor Doutor Luís Manuel Cortesão Godinho e o Professor Doutor Paulo Jorge Rodrigues Amado Mendes, pela forma como acompanharam e auxiliaram este trabalho ao longo destes meses.

Um agradecimento também ao Pedro Gil, pela ajuda e pela disponibilidade na realização da parte experimental desta dissertação.

Partilho ainda o meu “obrigada” com todos os meus amigos, tanto de Coimbra como da Barreira que, sempre me apoiaram não só durante os últimos meses como também ao longo de todo o meu percurso académico, tornando-o assim mais fácil.

Por último, o meu maior agradecimento é dirigido à minha família, pais e irmãos, que sempre me apoiaram ao longo destes anos e que me deram a possibilidade de realizar mais este pequeno passo da minha caminhada.

## RESUMO

O ruído de tráfego representa uma preocupação para a saúde da população, principalmente a que habita os grandes centros urbanos. Assim, a implantação de barreiras acústicas revela-se como uma das principais medidas de mitigação adotadas.

Por forma a otimizar o efeito gerado por uma barreira acústica tradicional, nas últimas décadas, têm sido alvo de estudo barreiras com diferentes configurações, como é o caso das barreiras acústicas com estrutura periódica baseadas no conceito de cristal sónico.

A tipologia de barreira considerada nesta dissertação apresenta, como principal vantagem, o facto de inibir a passagem de ondas sonoras em determinadas gamas de frequência, denominadas “bandgaps”, permitindo a passagem de energia através da barreira para as restantes gamas de frequência.

No presente trabalho foi analisado o comportamento de barreiras acústicas baseadas no conceito de cristal sónico recorrendo a estudos numéricos e experimentais. Assim, numa primeira fase, foi realizado um estudo comparativo entre os resultados obtidos experimentalmente e os resultados obtidos através de modelos numéricos 2D e 3D, onde se procurou analisar o comportamento acústico de diferentes barreiras através do parâmetro de perda por inserção.

Numa segunda fase, efetuou-se um estudo paramétrico e comparativo para diferentes soluções de barreiras acústicas, variando a geometria dos cilindros dispersores e o seu arranjo na estrutura da barreira.

Uma vez realizadas as diferentes análises é possível concluir que barreiras acústicas com uma estrutura periódica representam uma alternativa válida às barreiras acústicas ditas tradicionais, principalmente quando se pretende inibir a propagação das ondas sonoras numa dada gama de frequência.

## ABSTRACT

Traffic noise is a concern for health of population living, mainly, in urban centres. So, the implantation of noise barrier is revealed as one of the main mitigation measures adopted.

In order to optimize the effect generated by a traditional noise barrier, in the last decades, barriers with different configurations have been subject of study, such as barriers with periodic structure based on sonic crystal concept.

The barrier type considered in this dissertation has, as main advantage, the possibility to inhibit the passage of sound waves in some frequency ranges, namely “bandgaps”, allowing the passage through the barrier for the other frequency ranges.

In this present work, was analysed the behaviour of noise barriers based on sonic crystal concept using numerical and experimental studies. Thus, in a first stage was performed a comparative study between the experimental results and results from 2D and 3D numerical models, which is sought to compare attenuation levels generated by the barrier defined by the insertion loss parameter.

In a second stage, a parametric and comparative study for different acoustic barriers solutions was performed, varying the geometry of the scatterers and their arrangement in the barrier structure.

Once the different analyses were performed, it was possible to conclude that acoustic barriers with a periodic structure represent a valid alternative to traditional acoustic barriers, mainly where the purpose is to inhibit the propagation of sound waves in a certain frequency range.

---

## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Enquadramento .....	1
1.2	Objetivos e metodologia .....	3
1.3	Estrutura da dissertação .....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	Barreiras acústicas tradicionais.....	5
2.2	Barreiras acústicas baseadas em cristais sónicos.....	11
3	MODELOS DE ANÁLISE .....	21
3.1	Modelo laboratorial.....	21
3.2	Modelos computacionais .....	28
3.2.1	MFS 2D .....	29
3.2.2	BEM 3D.....	30
4	COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS .....	33
4.1	Configuração triangular completa .....	33
4.1.1	Fonte posicionada a 40cm da barreira .....	34
4.1.2	Fonte posicionada a 80cm da barreira .....	35
4.2	Configuração triangular com vazios .....	36
4.2.1	Fonte posicionada a 40cm da barreira .....	37
4.2.2	Fonte posicionada a 80cm da barreira .....	37
4.3	Configuração triangular com duas filas .....	38
4.3.1	Fonte posicionada a 40cm da barreira .....	39
4.3.2	Fonte posicionada a 80cm da barreira .....	39
4.4	Configuração retangular completa.....	40
4.4.1	Fonte posicionada a 40cm da barreira .....	41

---

4.5	Configuração retangular com vazios .....	41
4.5.1	Fonte posicionada a 40cm da barreira .....	42
4.5.2	Fonte posicionada a 80cm da barreira .....	42
4.6	Configuração retangular com duas filas .....	43
4.6.1	Fonte posicionada a 40cm da barreira .....	44
4.6.2	Fonte posicionada a 80cm da barreira .....	44
4.7	Discussão dos resultados .....	45
5	ESTUDO PARAMÉTRICO E COMPARATIVO DE DIFERENTES SOLUÇÕES .....	47
5.1	Para uma frequência fixa variando a configuração da barreira.....	48
5.1.1	Barreiras tradicionais .....	48
5.1.2	Barreira composta por cilindros .....	49
5.1.3	Barreira composta por meios cilindros.....	50
5.1.4	Barreira composta por meios cilindros rodados .....	51
5.1.5	Barreira composta por paralelepípedos .....	53
5.1.6	Diferentes composições da barreira.....	53
5.2	Para a mesma configuração da barreira variando a frequência.....	54
5.2.1	Barreira tradicional de 10 metros de comprimento .....	55
5.2.2	Barreiras compostas por 3 filas de cilindros.....	56
5.2.3	Barreiras constituídas por meios cilindros.....	56
5.2.4	Barreiras constituídas por 3 filas de paralelepípedos .....	57
6	CONCLUSÃO.....	59
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	62

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Barreira acústica tradicional visivelmente degradada .....	6
Figura 2.2 - Representação esquemática da trajetória de uma onda sonora (Freitas e Trabulo, 2007).....	6
Figura 2.3 - Esquema de ensaio segundo a norma CENT/TS 1793-5:2003 (Freitas e Trabulo, 2007).....	8
Figura 2.4 - Representação esquemática do ensaio (Watts e Morgan, 2007).....	9
Figura 2.5 - Esquema representativo das diferentes geometrias adotadas: a) barreira com comprimento infinito; b) barreira confinada lateralmente de um dos lados; c) barreira confinada em ambos os lados (Godinho et al, 2002) .....	10
Figura 2.6 - Representação esquemática em planta dos pontos de medição em relação à amostra (Sanchez-Perez et al, 2002) .....	13
Figura 2.7 - Disposição dos pontos de medição em relação à amostra (Martínez-Sala et al, 2006) .....	14
Figura 2.8 - Representação esquemática do ensaio a barreira contendo partículas de borracha (García-Chocano et al, 2015).....	15
Figura 2.9 - Protótipo da barreira acústica de cristais sónicos usado na conceção do ensaio (Martins et al, 2013) .....	16
Figura 2.10 - Representação esquemática do ensaio (esq.) e gráfico de IL obtido (dir.) (Martins et al, 2013).....	17
Figura 2.11 - Protótipo usado na conceção do ensaio (Santos et al, 2014).....	17
Figura 2.12 - Representação esquemática dos modelos estudados: a) disposição retangular dos dispersores; b) disposição triangular dos dispersores (Santos et al, 2014).....	18
Figura 2.13 - Representação esquemática do modelo 2D usado no ensaio (Kessissoglou et al, 2015).....	19
Figura 2.14 - Representação esquemática do modelo 3D usado no ensaio (Kessissoglou et al, 2015).....	19
Figura 2.15 - Representação esquemática de um cilindro dispersor (Sánchez-Perez et al, 2015) .....	20
Figura 3.1 - Espaço semianecóico .....	22
Figura 3.2 - Equipamentos - Amplificador (esq); Fonte sonora (dir.).....	22
Figura 3.3 - Microfone e suporte .....	23
Figura 3.4 - Computador portátil com o programa dBbati32 .....	24

---

Figura 3.5 - Janela de ensaio do programa dBati32.....	24
Figura 3.6 - Representação esquemática em planta do ensaio .....	25
Figura 3.7 - Ensaio sem barreira.....	26
Figura 3.8 - Gráfico obtido através dos resultados experimentais .....	27
Figura 3.9 - Gráfico de IL comparativo entre os resultados experimentais, numérico 2D e numérico 3D .....	27
Figura 3.10 - Ensaio com barreira sobre placa de acrílico .....	28
Figura 3.11 - Representação esquemática do modelo MFS para um dispersor. $\Omega$ representa o domínio do problema que é delimitado pelas condições de fronteira $\Gamma_1$ e $\Gamma_2$ (Santos et al, 2014) .....	30
Figura 3.12 - Representação esquemática do ensaio (esq) e gráfico de perda por inserção (dir) (Santos et al, 2014).....	30
Figura 3.13 - Representação esquemática dos resultados obtidos para o campo de pressão de uma barreira com estrutura periódica (Godinho et al, 2015).....	32
Figura 4.1 - Representação esquemática da disposição dos cilindros dispersores .....	34
Figura 4.2 - Gráfico com os resultados experimentais para as três alturas do microfone e para a resultante das três alturas.....	34
Figura 4.3 - Gráfico de IL comparativo entre os resultados experimentais, numérico 3D e numérico 2D para uma disposição triangular com a fonte a 40cm da barreira .....	35
Figura 4.4 - Gráfico de IL comparativo entre os resultados experimentais, numérico 3D e numérico 2D para uma disposição triangular com a fonte a 80cm da barreira .....	36
Figura 4.5 - Representação esquemática da disposição dos cilindros dispersores .....	36
Figura 4.6 - Gráfico de IL comparativo entre os resultados experimentais, numérico 3D e numérico 2D para uma disposição triangular com vazios e com a fonte posicionada 40cm da barreira.....	37
Figura 4.7 - Gráfico de IL comparativo entre os resultados experimentais, numérico 3D e numérico 2D para uma disposição triangular com vazios e com a fonte posicionada a 80cm da barreira.....	38
Figura 4.8 - Representação esquemática da disposição dos cilindros dispersores .....	38
Figura 4.9 - Gráfico de IL comparativo entre os resultados experimentais, numérico 3D e numérico 2D para uma disposição triangular com duas filas e com a fonte posicionada a 40cm da barreira.....	39
Figura 4.10 - Gráfico de IL comparativo entre os resultados experimentais, numérico 3D e numérico 2D para uma disposição triangular com duas filas e com a fonte posicionada a 80cm da barreira.....	40
Figura 4.11 - Representação esquemática da disposição dos cilindros dispersores .....	40
Figura 4.12 - Gráfico de IL comparativo entre os resultados experimentais, numérico 3D e numérico 2D para uma disposição retangular com a fonte a 40cm da barreira.....	41
Figura 4.13 - Representação esquemática da disposição dos cilindros dispersores .....	41

---

---

Figura 4.14 - Gráfico de IL comparativo entre os resultados experimentais, numérico 3D e numérico 2D para uma disposição retangular com vazios e com a fonte posicionada a 40cm da barreira.....	42
Figura 4.15- Gráfico de IL comparativo entre os resultados experimentais, numérico 3D e numérico 2D para uma disposição retangular com vazios e com a fonte posicionada a 80cm da barreira.....	43
Figura 4.16 - Representação esquemática da disposição dos cilindros dispersores .....	43
Figura 4.17 - Gráfico de IL comparativo entre os resultados experimentais, numérico 3D e numérico 2D para uma disposição retangular com duas filas com a fonte posicionada a 40cm da barreira.....	44
Figura 4.18 - Gráfico de IL comparativo entre os resultados experimentais, numérico 3D e numérico 2D para uma disposição retangular com duas filas com a fonte posicionada a 80cm da barreira.....	45
Figura 5.1 - Representação esquemática obtida através do programa GID: a) Barreira constituída por 2 filas de cilindros dispersores e malhas de recetores b) configuração discretizada.....	48
Figura 5.2 - Representação esquemática dos resultados obtidos para barreiras tradicionais e para uma frequência de 1000Hz: a) Barreira com 5m de comprimento; b) Barreira com 10m de comprimento; c) barreira com 20m de comprimento .....	49
Figura 5.3 - Representação esquemática dos resultados obtidos para barreiras compostas com cilindros dispersores e para uma frequência de 1000Hz: a) Barreira com 1 fila de cilindros; b) Barreira com 2 filas de cilindros; c) Barreira com 3 filas de cilindros; d) Barreira com 4 filas de cilindros .....	50
Figura 5.4 - Representação esquemática dos resultados obtidos para barreiras compostas por meios cilindros dispersores e para uma frequência de 1000Hz: a) Barreira com 3 filas de meios cilindros com a face reta para a fonte; b) Barreira com 3 filas de meios cilindros com a face curva para a fonte; c) Barreira com 4 filas de meios cilindros com a face reta para a fonte; d) Barreira com 4 filas de meios cilindros com a face curva para a fonte.....	51
Figura 5.5 - Representação esquemática da rotação imposta aos meios cilindros: a) Meio cilindro rodado 180°; b) Meio cilindro rodado 90°.....	52
Figura 5.6 - Representação esquemática dos resultados obtidos para barreiras compostas por meios cilindros dispersores e para uma frequência de 1000Hz: a) Barreira com 2 filas de meios cilindros rodados 180°; b) Barreira com 2 filas de meios cilindros rodados 90°; c) Barreira com 3 filas de meios cilindros rodados 180°; d) Barreira com 3 filas de meios cilindros rodados 90° .....	52
Figura 5.7 - Representação esquemática dos resultados obtidos para barreiras compostas com paralelepípedos dispersores e para uma frequência de 1000Hz: a) Barreira com 1 fila de paralelepípedos; b) Barreira com 2 filas de paralelepípedos; c) Barreira com 3 filas de paralelepípedos; d) Barreira com 4 filas de paralelepípedos.....	53

---

---

Figura 5.8 - Representação esquemática dos resultados obtidos para uma frequência de 1000Hz: a) Barreira convencional de 5 metros; b) Barreira com 3 filas de cilindros; c) Barreira com 3 filas de meios cilindros; d) Barreira com 3 filas de paralelepípedos.....	54
Figura 5.9 - Representação esquemática dos resultados obtidos para uma barreira tradicional de 10 metros de comprimento: a) Para uma frequência de 400Hz; b) Para uma frequência de 500Hz; c) Para uma frequência de 1000Hz.....	55
Figura 5.10 - Representação esquemática dos resultados obtidos para uma barreira com 3 filas de cilindros: a) Para uma frequência de 400Hz; b) Para uma frequência de 500Hz; c) Para uma frequência de 1000Hz.....	56
Figura 5.11 - Representação esquemática dos resultados obtidos para barreiras compostas por meios cilindros dispersores: a) Barreira com 3 filas de meios cilindros com a face reta para a fonte para uma frequência de 500Hz; b) Barreira com 3 filas de meios cilindros com a face reta para a fonte para uma frequência de 1000Hz; c) Barreira com 3 filas de meios cilindros com a face curva para a fonte para uma frequência de 500Hz; d) Barreira com 3 filas de meios cilindros com a face curva para a fonte para uma frequência de 1000Hz.....	57
Figura 5.12 - Representação esquemática dos resultados obtidos para barreiras constituídas 3 filas de paralelepípedos: a) Para 500Hz; b) Para 1000Hz.....	58

## SÍMBOLOGIA

dB – Decibel

Hz – Hertz

$L_{den}$  – Indicador de ruído diurno-entardecer-noturno

$L_n$  – Indicador de ruído noturno

$L_{eq}$  – Nível de pressão sonora contínuo equivalente

$D_{LR}$  – Índice de Isolamento ponderado

$p$  – Pressão acústica

$\omega$  – Velocidade angular

$f$  – Frequência

$c$  – Velocidade da propagação do som num meio acústico

$\alpha$  – Coeficiente de absorção

## **ABREVIATURAS**

OMS – Organização Mundial de Saúde  
R.G.R – Regulamento Geral do Ruído  
MST – Teorema da Dispersão Múltipla  
MFS – Método das Soluções Fundamentais  
CETUR - Centre d'Études de Transports Urbains  
FHWA – Federal Highway Administration  
EN – Norma Europeia  
BEM – Método dos Elementos Fronteira  
IL – Perda por Inserção

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

O crescimento da população mundial, acompanhado por uma incessante necessidade de desenvolvimento, pode acarretar para o ser Humano inúmeros prejuízos para a saúde, tanto da população como de todo o planeta.

Um dos fatores que causa grande preocupação na Organização Mundial de Saúde é a poluição sonora provocada, principalmente, pelo aumento da indústria e do tráfego automóvel nos grandes centros urbanos. As consequências para a população e para o meio ambiente são devastadoras e representam não só um aumento do desconforto acústico, como também problemas de saúde como, por exemplo, doenças cardiovasculares, distúrbios do sono ou até mesmo um comprometimento cognitivo. A OMS estima que, pelo menos, um milhão de anos de vida saudável são perdidos devido ao ruído de tráfego. (WHO, 2000) (WHO, 2011)

Em Portugal, os níveis de ruído legalmente aceitáveis estão descritos no R.G.R (“Regulamento Geral do Ruído”). Este tem como objetivo salvaguardar a saúde humana e o bem-estar das populações através de medidas que limitem a poluição sonora existente, principalmente nos grandes centros urbanos.

No Artigo 11, Capítulo 3 do R.G.R, estão estipulados os valores limite de exposição para os diferentes tipos de zonas. Sendo que, no caso das zonas consideradas como mistas, estas não devem ficar expostas a ruído ambiente exterior,  $L_{den}$ , superior a 65dB(A) e superior a 55 dB(A) para  $L_n$ . Para as zonas consideradas sensíveis estes valores são, naturalmente, mais baixos sendo o limite de 55dB(A) para  $L_{den}$  e de 45dB(A) para  $L_n$ . O mesmo regulamento define os indicadores  $L_{den}$  e  $L_n$  como sendo, o “Indicador de ruído diurno-entardecer-noturno” e o “Indicador de ruído noturno” respetivamente sendo o último compreendido entre as 23 e as 7horas do dia. (Decreto-Lei n.º 9/2007)

Com a finalidade de diminuir os efeitos negativos que o ruído pode causar em toda a sua envolvente, existem várias medidas de controlo acústico que podem atuar em diferentes áreas de propagação do som, ou seja, na fonte, no meio de propagação ou ao nível do recetor.

Nos últimos anos tem vindo a registar-se um aumento de estudos que procurem atenuar os efeitos nocivos do ruído de tráfego através de dispositivos de redução de ruído. A implementação de barreiras acústicas tradicionais é o método mais comum que procura responder às necessidades de controlo dos níveis sonoros, no entanto têm vindo a ser desenvolvidas outras alternativas. A barreira acústica é considerada uma medida de mitigação de ruído de tráfego que atua ao nível do meio de propagação do som.

Existem alguns aspetos a ter em conta aquando do projeto de uma barreira acústica, tais como a sua dimensão, os materiais a utilizar, o custo, a durabilidade, a manutenção, a estética e impacto que esta causará para a população e para toda a sua envolvente.

As barreiras acústicas tradicionais apresentam, no entanto, algumas limitações, como é o caso de a sua eficácia depender, quase exclusivamente, da sua altura e espessura, limitando a sua gama de utilização. Assim, têm sido estudadas alternativas que possam vir a preencher as lacunas apresentadas pelas barreiras tradicionais.

Barreiras acústicas compostas por uma estrutura periódica têm sido, nas últimas décadas, alvo de estudo, por forma a virem representar uma alternativa fiável às barreiras acústicas ditas tradicionais.

Uma barreira acústica baseada no conceito de cristal sónico é composta por elementos dispersores, na maioria dos casos cilindros, espaçados entre si, constituindo uma estrutura periódica. Estas têm a particularidade de serem capazes de inibir a propagação do som em determinadas bandas de frequência, denominadas “bandgaps”. Os estudos feitos relativamente a este tema tendem a testar várias barreiras com diferentes disposições dos dispersores e constituídas por diferentes materiais, de modo a determinar os níveis de atenuação sonora que estas produzem.

Uma vez que, numa barreira acústica constituída por uma estrutura periódica, os dispersores se apresentam espaçados entre si, existindo assim espaços vazios no interior da estrutura, esta torna-se mais leve e menos suscetível à ação do vento do que as barreiras acústicas ditas tradicionais.

Esta dissertação procura averiguar os níveis de eficácia de uma barreira acústica com cristal sónico perante diferentes composições geométricas, em comparação com as barreiras acústicas tradicionais

## 1.2 Objetivos e metodologia

O presente trabalho insere-se no âmbito da dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra e tem como principal objetivo estudar a atenuação de ruído gerada por uma barreira acústica composta por uma estrutura periódica recorrendo a diferentes métodos de análise.

Com essa finalidade, foi realizado um estudo comparativo inicial entre o conceito de barreira acústica tradicional e o conceito de barreira acústica com cristal sónico.

No que diz respeito ao estudo de barreiras acústicas com estruturas periódicas foram estabelecidas duas áreas principais de ação, a parte computacional e a parte experimental.

Numa primeira fase, mais experimental, foram desenvolvidos dois modelos de estrutura periódica, com tubos de PVC, e foram realizados ensaios numa câmara semianecóica, com o intuito de averiguar os níveis de atenuação que estas provocam para diferentes composições geométricas. Cada um dos modelos foi ainda sujeito a algumas variações, tanto ao nível da distância da fonte sonora à barreira, como ao nível do número de cilindros dispersores que a constituíam.

Os resultados obtidos experimentalmente foram posteriormente comparados com os resultados obtidos através de modelos computacionais 2D e 3D.

Numa segunda fase, foram estudados os níveis de atenuação acústica para diferentes disposições e diferentes geometrias dos elementos verticais que constituem a barreira.

Neste ponto não só foram estudadas barreiras baseadas no conceito de cristal sónico bem como barreiras ditas tradicionais por forma a estabelecer uma comparação entre elas. Assim, recorreu-se ao programa GID, onde foram desenhadas e discretizadas em malhas as diferentes tipologias de barreira, e posteriormente foi usado um código de cálculo desenvolvido em Matlab para efetuar a análise acústica.

## 1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação é composta por seis capítulos principais.

O primeiro capítulo representa uma fase introdutória do trabalho. Nele está presente um enquadramento geral do tema, bem como as motivações que levam ao estudo mais aprofundado

do tema. Ainda neste primeiro capítulo são apresentados os principais objetivos a alcançar com a realização desta dissertação, bem como a estrutura da mesma.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica realizada por forma a averiguar os trabalhos realizados no mesmo âmbito de estudo, bem como para a obtenção de conceitos até à data desconhecidos. Este segundo capítulo é dividido em duas partes principais, uma referente às barreiras acústicas tradicionais e uma segunda parte referente às barreiras acústicas constituídas por uma estrutura periódica.

O terceiro capítulo descreve os métodos de análise utilizados para a obtenção de resultados. Neste capítulo são explorados tanto o modelo laboratorial como os modelos computacionais a que se recorreu.

No quarto capítulo está presente uma comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e através dos modelos numéricos 2D e 3D.

O quinto capítulo estabelece um estudo paramétrico comparativo entre as diferentes soluções para barreiras acústicas estudadas ao longo do trabalho.

Por último, no sexto capítulo, estão presentes as principais conclusões retiradas como resultado da presente dissertação.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo consiste numa revisão dos estudos realizados até à data sobre o tema das barreiras acústicas, por forma a adquirir e sustentar conhecimentos necessários à realização desta dissertação.

Uma barreira acústica representa uma medida de mitigação adotada com o objetivo de proteger a envolvente dos impactos gerados por um uma fonte de elevado nível ruído. Nas últimas décadas têm sido estudadas alternativas às barreiras acústicas ditas tradicionais por forma a torna-las mais eficazes e para facilitar a incorporação na sua envolvente.

A revisão bibliográfica é realizada em duas fases distintas, sendo a primeira relativa às barreiras acústicas tradicionais e a segunda relativa às barreiras acústicas baseadas no conceito de cristal sónico.

### 2.1 Barreiras acústicas tradicionais

A população residente nos grandes centros urbanos carece de uma especial atenção no que diz respeito ao ruído de tráfego, uma vez que este pode gerar incómodo, irritabilidade, problemas de sono, perdas de audição, podendo evoluir para problemas de saúde mais graves.

Para proteger as envolventes de uma zona de ruído de tráfego rodoviário podem ser tomadas várias medidas de mitigação, sendo que se privilegiam as que abrangem um maior número de edifícios em detrimento das que apenas protegem a fachada de um único edifício.

Com o objetivo de proteger toda a envolvente de uma fonte de elevado nível de ruído, a implantação de barreiras acústicas é a medida mais usada. Esta representa um obstáculo contínuo à propagação das ondas sonoras provenientes do ruído de tráfego rodoviário e ferroviário.

Uma barreira acústica dita tradicional pode ser constituída por diversos materiais, desde painéis de madeira, metálicos, de acrílico, de betão ou de alvenaria, entre outros. A escolha dos materiais, bem como da sua cor, deve ter em conta não só a atenuação gerada por cada material

mas também deve ter em conta as condições estéticas de forma a incorporar a barreira no meio causando o mínimo impacto visual.

A manutenção é, também, um aspeto fundamental para que uma barreira possa desempenhar corretamente a sua função, aspeto, no entanto, muitas vezes negligenciado. A Figura 2.1 representa uma barreira acústica onde se pode verificar uma clara degradação dos materiais que a constituem, fruto da falta de manutenção, levando a uma diminuição da sua eficácia como barreira.



Figura 2.1 - Barreira acústica tradicional visivelmente degradada

Do ponto de vista físico, quando uma onda sonora gerada por uma fonte de ruído atinge um obstáculo, a energia nela contida sofre diferentes fenómenos, podendo ocorrer a reflexão, a transmissão ou a difração dessa energia. Este último será, provavelmente, o que mais preocupação gera aquando o dimensionamento de uma barreira.

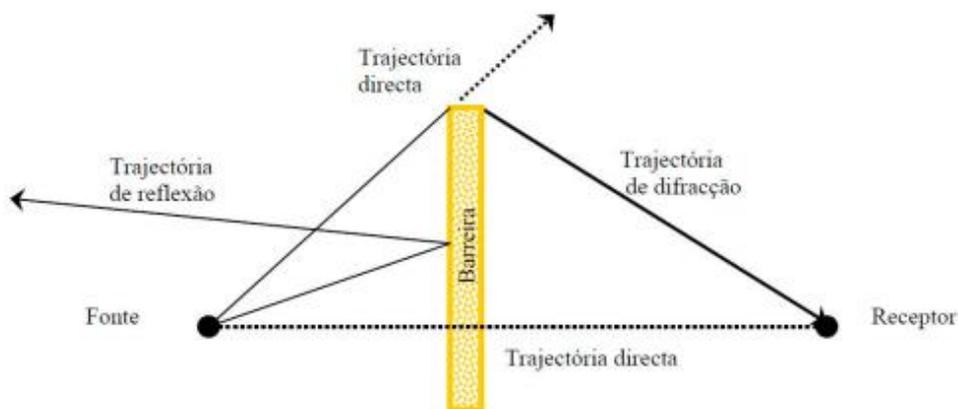


Figura 2.2 - Representação esquemática da trajetória de uma onda sonora (Freitas e Trabulo, 2007)

A eficácia de uma barreira acústica depende da sua densidade, altura, comprimento e localização sendo a atenuação do ruído, normalmente, não superior a 10dB(A) para uma altura entre 2 e 6 metros. (Tadeu et al, 2010)

Para dimensionar uma barreira acústica é necessário recorrer a modelos de previsão. Existem vários métodos passíveis de ser adotados por forma a realizar essa previsão, uns mais simples que levam a resultados mais limitados e com menos rigor, e outros mais complexos que necessitam de um volume de cálculo maior mas que produzem resultados menos restritivos. Assim, a escolha do método a usar deve ter em conta as características e condicionantes do espaço em estudo. Os modelos mais usados são o da FHWA (USA) (FHWA, 1998) e do CETUR (França) (CETUR, 1980), estes caracterizam-se por uma aplicação simples e resultam de estudos experimentais elaborados em situações específicas. A principal desvantagem a apontar aos modelos supracitados é o facto de não permitirem uma análise em frequência, obtendo apenas uma previsão do  $L_{eq}$  global. (Tadeu et al, 2010)

Este tipo de modelos implicam um conhecimento prévio dos dados relativos ao local em estudo, como a sua geometria e a absorção acústica do solo, e de dados relativos às características da circulação rodoviária como o volume e a composição do tráfego.

Um dos modelos mais usado é o método de cálculo para ruído rodoviário recomendado pelo CETUR (Centre d'Études de Transports Urbains, Lyon). Este modelo contempla duas variantes, uma mais simples e outra mais complexa. A primeira recorre a fórmulas de cálculo empíricas e é denominado de "método simplificado". A segunda variante é um método mais detalhado que pode ser aplicado a uma gama mais vasta de situações e é calculado em simultâneo a partir de fórmulas empíricas e ábacos.

Existem, ainda, outros modelos de análise passíveis de serem usados, tais como o método de diferenças finitas, o método de elementos finitos e o método de elementos fronteira.

Vários estudos foram realizados com o intuito de desenvolver os vários métodos supracitados bem como para testar modelos de otimização para as barreiras ditas tradicionais.

Do ponto de vista da avaliação experimental, (Freitas e Trábulo, 2007), estabeleceram um estudo sobre dois métodos de medição para avaliar o desempenho das barreiras acústicas. Neste trabalho, foi estudado um método de ensaio para determinar o isolamento sonoro de uma barreira segundo a Norma Europeia CENT/TS 1793-5:2003, e ainda um outro método mais expedito e por isso menos rigoroso. O método de ensaio baseado na norma consistiu na emissão de uma onda sonora, gerada por uma fonte, que se propaga na direção de uma barreira acústica

onde, com um auxílio de um microfone foram captados os sinais provenientes da fonte. O esquema de ensaio está representado na Figura 2.3.

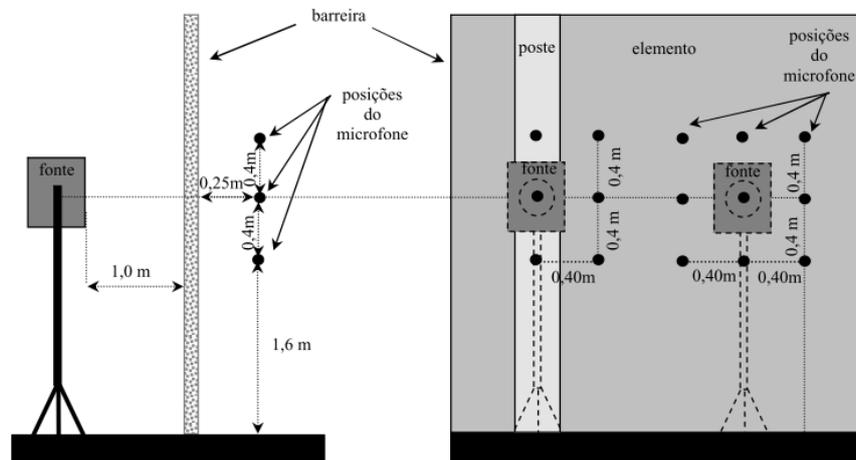


Figura 2.3 - Esquema de ensaio segundo a norma CEN/TS 1793-5:2003 (Freitas e Trabulo, 2007)

O método expedito recorre a dois sonómetros para fazer a medição das componentes do ruído de tráfego. Os sonómetros captaram o nível sonoro equivalente e o espectro de ruído em terços de oitava, num dado período de tempo. Estes foram colocados atrás da barreira, um dentro dos limites da barreira e outro fora, de forma a captar o ruído em campo aberto. A diferença entre este método e o primeiro é que não consegue separar a parte do ruído que é difratada da que é transmitida, impedindo assim a determinação do índice de isolamento sonoro. O estudo conclui que a metodologia baseada na norma CEN/TS 1793-5:2003 se mostrou mais adequada para a verificação das características da barreira aquando do fabrico do produto, enquanto que o método mais expedito se adequa melhor à avaliação do desempenho “in situ”. Assim, uma utilização complementar destes dois métodos torna-se mais vantajosa.

Num outro estudo, realizado por (Watts e Morgan, 2007), a norma CEN/TS 1793-5:2003 foi novamente aplicada. Desta vez em comparação com a norma EN 1793-2 e aplicadas a barreiras de madeira. Para tal, foram usadas seis amostras de barreiras de madeira compostas tanto por folha simples como por folha dupla.

O método usado “in situ” consistiu na colocação de um altifalante de um lado da barreira e de um microfone no lado oposto, permitindo assim obter o impulso de resposta do sistema. Este impulso era representado por uma série de picos e depressões.

O sistema estava disposto de acordo com a Figura 2.4, onde  $h_s$  é a altura do altifalante,  $h_m$  a altura do microfone central,  $d_s$  é a distância do altifalante à barreira e  $d_m$  é a distância da barreira ao microfone.  $T_b$  representa a espessura da barreira e  $h_b$  a altura da mesma.

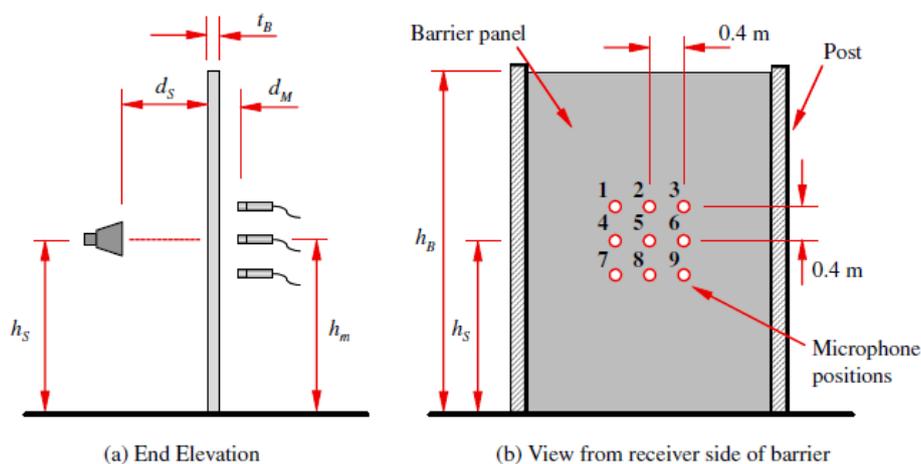


Figura 2.4 - Representação esquemática do ensaio (Watts e Morgan, 2007)

O teste em laboratório foi realizado em duas salas reverberantes, uma onde era emitido o som e outra onde se encontravam os microfones. Como resultado da comparação entre os diferentes testes, concluiu-se que existe uma correlação entre ambos os resultados, no entanto o facto de o leque de amostras ser reduzido torna os resultados um pouco limitados. Os resultados obtidos abrem uma possibilidade de avaliar o desempenho acústico de barreiras na estrada, onde a qualidade de construção pode ser variável e o desempenho acústico pode não coincidir com as condições de laboratório onde a barreira é construída mais cuidadosamente

(Watts, 1997) realizou, ainda, um trabalho com o objetivo de desenvolver um método de medição do isolamento aos sons aéreos. Para tal, efetuaram-se medições “in situ” para determinar o isolamento ao ruído que envolveram a determinação da intensidade de som incidente e transmitida, usando o tráfego como fonte de ruído. As medições foram feitas em quatro barreiras constituídas por painéis de madeira que posteriormente foram removidos e foram sujeitos a testes em laboratório.

Como conclusões a retirar da comparação dos resultados “in situ” e em laboratório, temos que, acima das gamas de frequência de 250Hz a 3.2kHz os resultados foram semelhantes para ambos os casos, sendo as diferenças de menos de 2dB dentro desta gama de frequência. O facto de os resultados serem concordantes, permite concluir que a técnica utilizada para medir o isolamento ao ruído das barreiras era apropriado. No entanto, o estudo permite concluir que os painéis de madeira não representam uma boa solução para barreiras de atenuação acústica, uma vez que

as imperfeições existentes na madeira permitiam a passagem do som. Estas apresentaram ainda variação de resultados em função da temperatura.

Outros trabalhos foram realizados tendo em vista a otimização da barreira acústica tradicional, alterando a sua geometria ou os materiais constituintes. (Kim e Yoon, 2014) procuraram combinar materiais rígidos com materiais porosos em barreiras com diferentes tipologias.

(Oldham e Egan, 2015) desenvolveram um estudo sobre a performance de uma barreira com arestas adicionais localizadas em ambos os lados da barreira. Os autores estudaram parâmetros relacionados com a distância da barreira à fonte e ao recetor, a altura da barreira e as dimensões da aresta adicional e determinaram os valores de perda por inserção provocados pela variação desses parâmetros.

(Godinho et al, 2002) realizaram um estudo sobre a propagação das ondas sonoras na presença de barreiras acústicas quando confinadas lateralmente por edifícios altos. Recorrendo ao método de elementos fronteira (BEM) para modelar as barreiras e ao método de imagem fonte para simular os edifícios altos, foram estudadas diferentes geometrias da barreira. Usando os modelos numéricos descritos no artigo, o estudo recaiu sobre três configurações de ensaio diferentes, sendo a primeira com comprimento considerado infinito, a segunda continha uma superfície vertical plana situada num dos lados da barreira e na terceira configuração considerou-se a presença da superfície vertical plana em ambos os lados da barreira acústica.

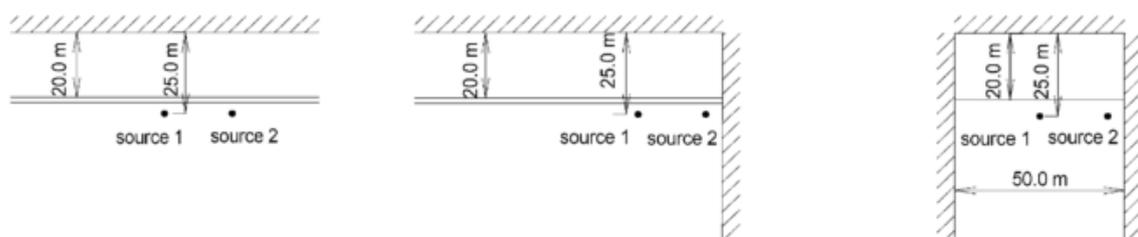


Figura 2.5 - Esquema representativo das diferentes geometrias adotadas: a) barreira com comprimento infinito; b) barreira confinada lateralmente de um dos lados; c) barreira confinada em ambos os lados (Godinho et al, 2002)

Os estudos realizados no domínio do tempo confirmaram uma interação entre os pulsos de onda difratados diretamente na extremidade da barreira e os pulsos refletidos pelo solo gerando um aumento do campo na zona do solo. A inclusão das paredes laterais aumentou o número de pulsos dispersos que, interagindo em conjunto, levam a uma redução da atenuação provocada pela barreira. O estudo concluiu ainda que barreira com maior altura geram níveis de atenuação acústica superiores.

Mais recentemente, (Gajardo et al, 2015), efetuaram uma análise numérica a barreiras acústicas com uma superfície difusora usando o método de elementos fronteira 2.5D. Os autores desenvolveram o método e implementaram-no a novos perfis de superfícies de barreiras acústicas onde concluíram que o efeito gerado por barreiras com superfícies difusoras pode ser importante no caso de configurações muito longas.

## **2.2 Barreiras acústicas baseadas em cristais sónicos**

Nas últimas décadas, o conceito de cristal sónico, tem sido objeto de estudo por parte de muitos investigadores com vista a ser aplicado em estratégias de redução de ruído.

Estes são constituídos por dispersores dispostos verticalmente numa estrutura periódica e têm como principal objetivo inibir a propagação do som em determinadas bandas de frequências denominadas “bandgaps”. Para além disso, têm ainda a capacidade de deixar passar com grande eficiência outras frequências, sendo o caminho descrito por elas denominado guias de onda.

O funcionamento do princípio de cristal sónico depende da impedância tanto dos cilindros dispersores como do meio envolvente. Para que ocorra o fenómeno pretendido a impedância dos centros dispersores deve ser maior que a do meio onde estão inseridos. Os diferentes valores de densidade e de velocidade de propagação das ondas vão fazer com que ocorra o fenómeno de reflexão na interface dos meios envolvidos.

O facto de a estrutura periódica inibir a propagação de ondas sonoras para certas gamas de frequência, denominadas “bandgaps”, ocorre devido à difração de Bragg, ou seja, o espalhamento dos dispersores pode gerar um pico de difração em determinadas frequências. Quando uma onda incide sobre uma barreira de cristais sónicos esta vai sofrer fenómenos infinitos de difração gerados pelos diferentes dispositivos dispersores.

A aplicação do conceito de cristal sónico a uma barreira acústica consiste na colocação de uma estrutura, arranjada periodicamente, entre a fonte de ruído e os recetores. Esta estrutura pode ter diferentes configurações geométricas e ser contruída com diferentes materiais, tendo em conta as gamas de frequência que se pretende inibir. Por forma a melhorar a atenuação que a barreira provoca, a escolha de um material mais poroso nos cilindros dispersores é uma solução passível de ser adotada devido às suas propriedades absorventes.

Em comparação com uma barreira acústica dita tradicional, as barreiras acústicas constituídas por cristais sónicos apresentam tanto vantagens como desvantagens. Quanto às vantagens, o

facto de não ser uma estrutura opaca e conter espaços vazios na sua composição torna-a num elemento mais leve e com uma menor oposição ao vento. Como principal desvantagem é apontada a necessidade de uma espessura considerável, e superior à das barreiras tradicionais, para obter os mesmos valores de atenuação.

A primeira evidência de que uma estrutura organizada periodicamente limita, em certa medida, a propagação do som surgiu de um modo furtivo, num elemento escultural nos jardins da Fundación Juan March em Madrid, em 1995, projetada pelo artista Eusebio Sempere (Martínez-Sala et al, 1995). A partir desse momento, inúmeros estudos têm sido realizados por forma a obter uma barreira acústica eficaz.

Para melhorar a taxa de atenuação em certas gamas de frequência existem três importantes parâmetros de ajuste, sendo eles, o fator de preenchimento, a densidade e a configuração dos cristais (Aa e Forssén, 2013). Assim, tomando por base estes três fatores, têm sido alvo de estudo barreiras com diferentes configurações.

Numa primeira fase, (Chen e Ye, 2001) realizaram uma análise mais teórica da transmissão acústica através de matrizes bidimensionais de cilindros rígidos colocados paralelamente no ar. O estudo tinha ainda o propósito de averiguar o modo como a aleatoriedade da disposição dos dispersores afeta a transmissão acústica. A análise teórica foi complementada com situações experimentais de matrizes regulares onde foram obtidos resultados favoráveis. Os resultados teóricos demonstraram a existência de “bandgaps”, tanto no caso da disposição regular como no caso dos cilindros dispostos aleatoriamente, sendo que, no último caso se verificou a obtenção de uma gama mais larga de inibição.

Na sequência do estudo anterior, vários trabalhos foram realizados tendo em vista o estudo mais aprofundado do conceito de “bandgaps”. No presente trabalho (Li et al, 2013) estudaram o fenómeno de “bandgap” com recurso ao método de elementos fronteira. O método utilizado teve em conta a interface líquido-sólido e foi aplicado a diferentes meios com diferentes índices de impedância.

Com o objetivo de expandir os estudos feitos na área dos cristais sónicos, (Sanchez-Perez et al, 2002), realizaram um estudo experimental fora de condições controladas por forma a averiguar se o comportamento das barreiras seria semelhante ao demonstrado em laboratório. O ensaio foi realizado considerando uma estrutura periódica com tubos de PVC com 3m de comprimento e 16 cm de diâmetro, com a disposição no campo descrita na Figura 2.6.

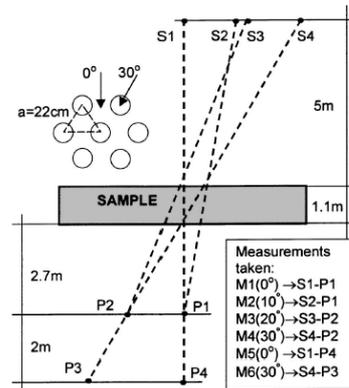


Figura 2.6 - Representação esquemática em planta dos pontos de medição em relação à amostra (Sanchez-Perez et al, 2002)

O objetivo deste estudo era provar que uma estrutura periódica, embora comprometida por um número reduzido de elementos, em condições livres obteria níveis de atenuação sonora capazes de competir com as ditas barreiras acústicas tradicionais. Após a realização do estudo os autores, concluíram que o conceito de cristal sónico aplicado a barreiras acústicas pode representar uma alternativa válida às barreiras já existentes, uma vez que estas apresentam diversas vantagens e os resultados obtidos foram semelhantes.

(Martínez-Sala et al, 2006) demonstraram que é possível melhorar a atenuação do som através de um conjunto de árvores arrançadas numa estrutura periódica como no caso da estrutura em cristal sónico. Para tal, realizaram dois tipos de medições: em primeiro lugar, foram obtidos resultados medidos num campo existente onde as árvores estavam dispostas aleatoriamente. No segundo caso, foram colocadas árvores em vasos, permitindo assim estudar diversas disposições e arranjos periódicos. Em ambos os casos, foi considerado que as plantas tinham uma geometria circular. Para estudar a perda por inserção foi feita uma comparação entre os resultados obtidos com a amostra e sem ela. Os resultados mostram que os níveis de atenuação obtidos dependem do fator de enchimento enquanto que a posição dos picos de atenuação numa determinada gama de frequência depende do ângulo de incidência em que o som atinge a barreira. Como conclusão é ainda possível verificar que as árvores dispostas em grelha são as que obtêm uma atenuação sonora superior. O estudo demonstra, assim, que é possível construir um novo tipo de barreira acústica ecológica.

A Figura 2.7 esquematiza as características geométricas dos ensaios realizados para o estudo, bem como a disposição dos pontos de medição.

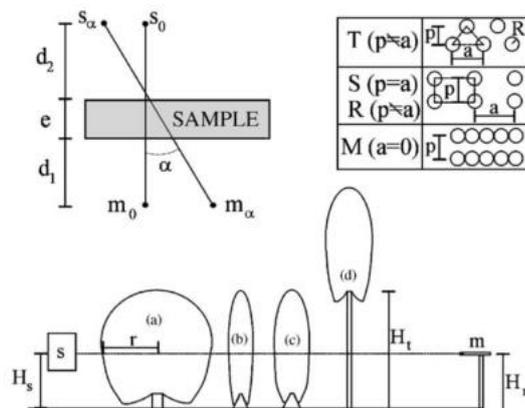


Figura 2.7 - Disposição dos pontos de medição em relação à amostra (Martínez-Sala et al, 2006)

(Babino et al, s.d) realizaram um estudo numa barreira com estrutura periódica determinando a sua “bandgap”. À medida que decorria o ensaio foram introduzidos defeitos na barreira, removendo alguns dos cilindros que a constituíam, o que fez com que ocorresse a transmissão na zona de “bandgap”. Concluiu-se então que a transmissão das ondas sonoras era tanto maior quando se aumentava o número de defeitos impostos. Foram ainda realizados ensaios onde estabeleceram caminhos como guias de onda no cristal sónico, verificando-se que a trajetória reta favorece a transmissão das ondas para dadas frequências.

(Fuster-Garcia et al, 2007) procuraram demonstrar que estruturas construídas por dispersores rígidos e ressoadores incorporados, poderiam eliminar a dependência que a eficácia de uma barreira acústica tem da sua forma e da direção das ondas incidentes. Os ressoadores eram constituídos por balões cheios de ar e hélio. Assim, demonstraram que é possível melhorar a atenuação em certas bandas e, com o auxílio de dispersores, usando estruturas mistas de dispersores rígidos e ressoadores poderiam obter uma estrutura de melhor eficácia acústica. A principal vantagem das estruturas mistas, comparadas com as formadas unicamente por ressoadores é que é possível melhorar a gama de atenuação de frequência.

Mais recentemente, (Sánchez-Dehesa et al, 2011) estudaram uma outra versão de uma barreira acústica. Desta vez, o estudo recaiu sobre uma barreira acústica com estrutura periódica constituída por cilindros usando materiais reciclados. Os materiais utilizados foram, essencialmente, um granulado de borracha obtido através da reciclagem do pneu. Os resultados obtidos concluíram que o granulado de borracha contribuiu para um aumento da perda por inserção nessas barreiras quando comparadas com as ditas tradicionais.

(García-Chocano et al, 2015), realizaram um estudo sobre barreiras acústicas com estrutura periódica construídas por materiais com elevada capacidade de absorção. A atenuação da barreira é assim conseguida a partir da combinação de dois mecanismos: a dispersão de Bragg e a absorção por parte dos cilindros. Foi ainda desenvolvido um algoritmo de otimização que permite uma conceção mais eficaz da barreira acústica destinada ao ruído de tráfego.

Numa primeira fase do trabalho foram estudados dois tipos de barreiras, uma constituída por um granulado de borracha e outra por conchas cilíndricas micro-perfuradas. Como resultado concluíram que o modelo em que se usam conchas micro perfuradas tem uma performance de atenuação acústica mais elevada do que o modelo contruído com granulado de borracha.

Numa segunda fase foi estudado um modelo de otimização para uma barreira com a geometria descrita na Figura 2.8. Este modelo é constituído por 3 filas de cilindros distanciados entre eles e é estudado em função do parâmetro  $D_{LR}$ , índice de isolamento ponderado, definido na norma EN 1793-2.

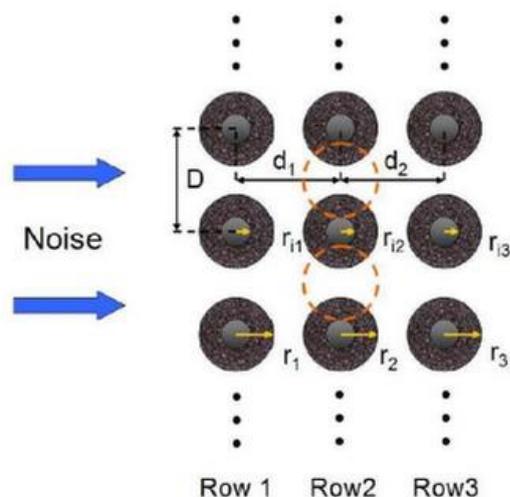


Figura 2.8 - Representação esquemática do ensaio a barreira contendo partículas de borracha (García-Chocano et al, 2015)

Foram consideradas diferentes amostras na conceção do processo de otimização. A primeira consistia em três linhas cilindros compostos por conchas micro-perfuradas. Na segunda amostra foi colocado um invólucro micro perfurado no interior dos cilindros dispersores.

Os estudos demonstraram que é possível vir a obter barreiras acústicas com valores de  $D_{LR}$  aceitáveis.

(Martins et al, 2013) Desenvolveram um estudo sobre barreiras acústicas compostas por estruturas periódicas. O principal objetivo do trabalho era contribuir para o estudo de cristais sónicos já realizados na área através de uma abordagem experimental em conjunto com uma

abordagem numérica. As diferentes abordagens tinham em vista a utilização de um modelo numérico baseado no Método das Soluções Fundamentais (MFS) na análise computacional destas estruturas.

Em primeiro lugar foi planeados um conjunto de medições acústicas experimentais com o objetivo de avaliar o grau de adequação do modelo numérico a usar no decorrer do estudo. As medidas usadas na conceção do modelo tiveram em conta a possibilidade de uma futura aplicação em troncos de madeira. Assim, os cilindros dispersores tinham como diâmetro 0.2m e estavam espaçados entre si centro a centro 0.4m. O modelo foi, no entanto, construído à escala 1:5 e foram dispostos numa estrutura triangular, como demonstra a Figura 2.9.



Figura 2.9 - Protótipo da barreira acústica de cristais sónicos usado na conceção do ensaio (Martins et al, 2013)

A Figura 2.10 evidencia os resultados obtidos para uma configuração da barreira. O estudo concluiu que os resultados obtidos através do modelo numérico se aproximaram bastante dos resultados obtidos experimentalmente revelando assim a viabilidade e eficácia do método.

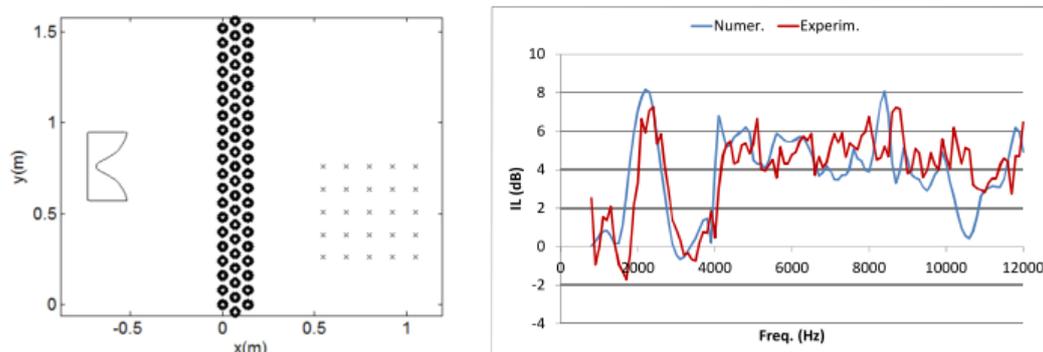


Figura 2.10 - Representação esquemática do ensaio (esq.) e gráfico de IL obtido (dir.) (Martins et al, 2013)

Com o objetivo de complementar o trabalho citado acima, (Santos et al, 2014) desenvolveram um novo estudo, agora a uma escala de menor dimensão (1:10) e com diferentes disposições dos cilindros dispersores.

O modelo numérico considerado foi o mesmo do adotado em (Martins et al, 2013), e o protótipo estudado consistia num arranjo periódico de tubos de PVC ocos com 500mm de altura e 20mm de diâmetro encaixados em duas pranchas de poliestireno expandido, como se pode ver na Figura 2.11. Os testes decorreram numa câmara quase anecoica para evitar possíveis interferências geradas por possíveis reflexões.



Figura 2.11 - Protótipo usado na conceção do ensaio (Santos et al, 2014)

Foram comparados os resultados numéricos obtidos através do modelo MFS e os resultados experimentais para oito configurações diferentes da estrutura, tanto triangulares como retangulares ou até, em alguns casos, com algumas falhas de cilindros no interior na estrutura. Os resultados obtidos mostraram que a estrutura estudada é uma proposta eficaz no que diz respeito à atenuação sonora. De destacar ainda que, mesmo as configurações com menos

cilindros dispersores, e portanto mais económicas, apresentaram uma atenuação significativa dos níveis sonoros.

Outros estudos relacionados com os métodos de cálculo têm vindo a ser realizados como é o caso do estudo efetuado por (Santos et al, 2014) que realizaram uma análise de propagação sonora em estruturas baseadas no conceito de cristais sónicos usando o Método das Soluções Fundamentais (MFS).

Os autores efetuaram uma simulação numérica recorrendo ao método MFS por forma a obter o valor de perda por inserção gerado. O modelo consistiu num arranjo de cilindros dispersores incorporados em diferentes meios e para diferentes materiais que os constituem. A Figura 2.12 representa os modelos adotados estipulando as posições da fonte, dos cilindros e dos recetores.

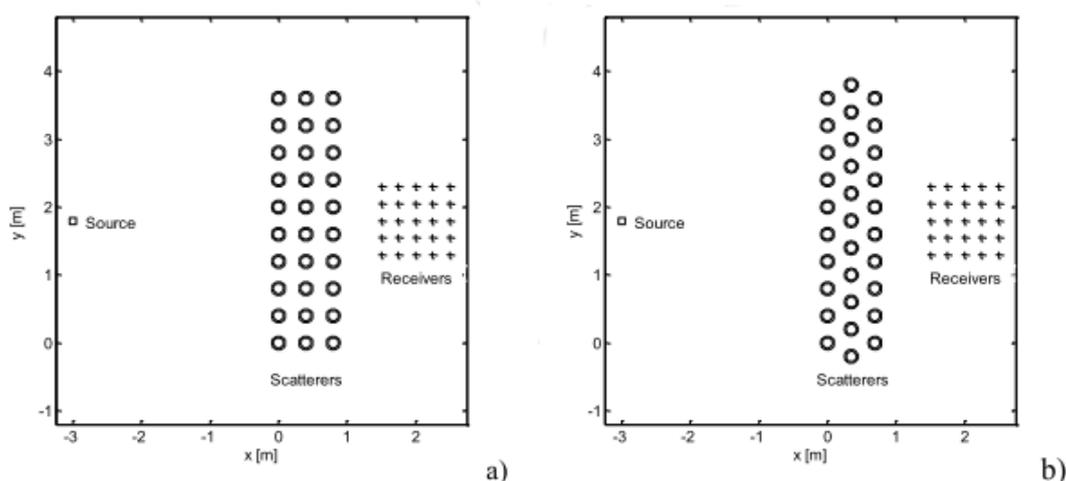


Figura 2.12 - Representação esquemática dos modelos estudados: a) disposição retangular dos dispersores; b) disposição triangular dos dispersores (Santos et al, 2014)

Os resultados mostraram que quando a barreira é incorporada num meio fluido com propriedades semelhantes às do ar é possível observar uma banda de atenuação sonora, o que não acontece para um meio fluido semelhante à água. Foi possível concluir ainda que, para um grande contraste fluido e solido, a propagação do som não é afetada pela rigidez, o que não acontece quando existe um baixo contraste ente os dois meios.

(Kessissoglou et al, 2015), usaram o método de elementos finitos para desenvolver vários modelos numéricos de barreiras acústicas. Este trabalho tinha como principal motivação investigar a performance de uma barreira acústica composta por cristais sónicos, tanto em 2D como em 3D, recorrendo a cilindros verticais com altura finita utilizado o método de elementos

finitos. Foi ainda desenvolvido um modelo “quase-periódico ” de uma barreira acústica com estrutura periódica 3D usando o método de elementos fronteira (BEM). A perda por inserção dos modelos 2D e 3D das barreias obtida pelos diferentes modelos de calculo foram então comparadas.

O modelo utilizado consistia em cilindros arranjados numa matriz 5x5. Os modelos 2D e 3D de elementos finitos estão representados na Figura 2.13 e Figura 2.14 e foram desenvolvidos utilizando o software COMSOL. Foi aplicada uma condição periódica nas superfícies laterais e uma condição não refletiva nas fronteiras das outras superfícies. No topo da superfície foi aplicada uma condição de barreira rígida, tal como no chão.

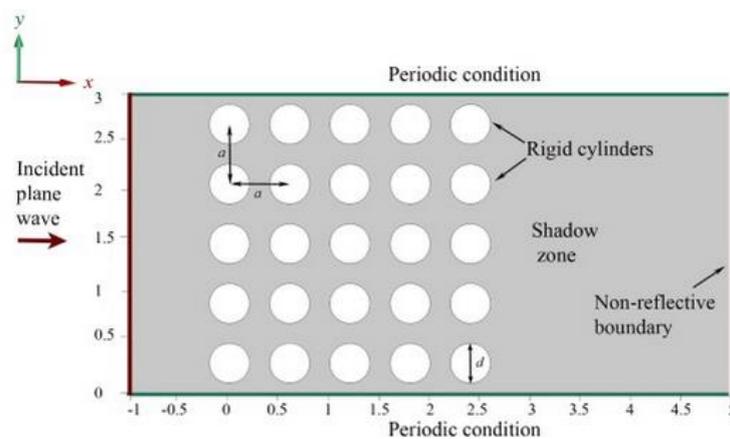


Figura 2.13 - Representação esquemática do modelo 2D usado no ensaio (Kessissoglou et al, 2015)

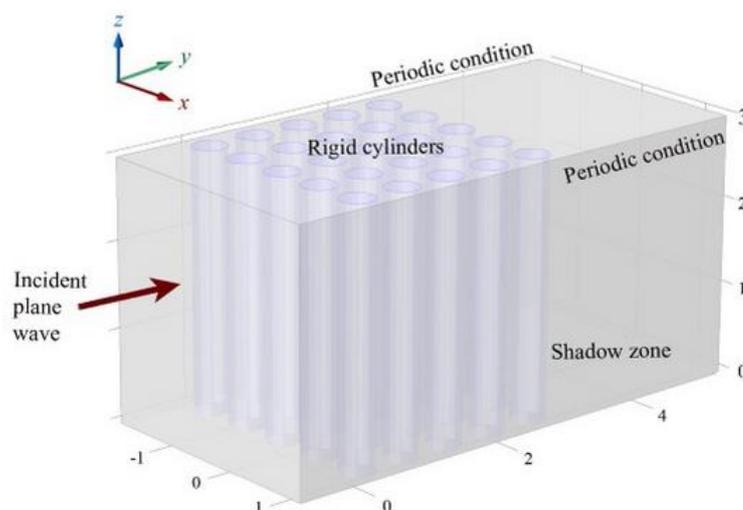


Figura 2.14 - Representação esquemática do modelo 3D usado no ensaio (Kessissoglou et al, 2015)

Os resultados obtidos da comparação entre os dois modelos de cálculo, método de elementos finitos e método de elementos fronteira, apresentaram-se muito semelhantes no que diz respeito aos valores de perda por inserção. No entanto, o BEM necessita de um esforço computacional menor uma vez que o tamanho do modelo numérico é mais reduzido.

(Sánchez-Perez et al, 2015) elaboraram um protótipo de barreira acústica com base numa disposição triangular dos dispersores absorventes. O estudo teve por base as normas europeias EN 1793 relativas à redução de ruído de tráfego rodoviário. Para a realização dos ensaios foram considerados cilindros dispersores com propriedades absorventes, ressonantes e dispersoras. Assim, os dispersores eram constituídos por três camadas, um núcleo rígido, cobertura porosa e chapa perfurada, tal como mostra a Figura 2.15.

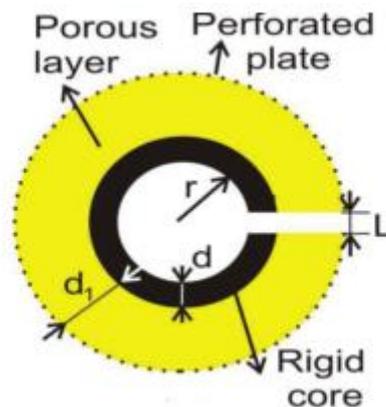


Figura 2.15 - Representação esquemática de um cilindro dispersor (Sánchez-Perez et al, 2015)

Como conclusão do estudo os resultados revelaram que cristais sónicos representam uma boa alternativa como dispositivos de atenuação sonora.

### **3 MODELOS DE ANÁLISE**

No âmbito desta dissertação inserida no Mestrado Integrado em Engenharia Civil foram realizados vários estudos com o objetivo de analisar a eficácia de uma barreira acústica constituída por uma estrutura periódica.

Um dos parâmetros que define a eficácia de uma barreira acústica é o nível de atenuação sonora que esta gera, sendo representado pelo valor de perda por inserção, (“Insertion Loss – IL”).

No presente capítulo são apresentados os modelos laboratoriais e numéricos adotados para a realização de um estudo comparativo das diferentes configurações da barreira.

#### **3.1 Modelo laboratorial**

Com o objetivo de determinar o valor da perda por inserção provocado por uma barreira baseada em cristais sónicos, realizou-se um conjunto de ensaios laboratoriais. Este parâmetro exprime a diferença de nível sonoro medido num mesmo ponto, com e sem barreira. Assim, para cada amostra, foram realizadas medições que posteriormente foram comparadas com os resultados obtidos sem barreira.

Os ensaios laboratoriais foram realizados num ambiente controlado, tendo em vista a redução de interferências exteriores ao ensaio. Para tal, estes foram realizados no interior de um espaço semianecóico, apresentada na Figura 3.1, onde todos os elementos constituintes do ensaio foram cobertos por espuma de modo a evitar reflexões indesejadas. Procurou-se ainda que as medições para cada amostra fossem realizadas todas no mesmo dia para, assim, garantir o mais possível as mesmas condições de ensaio.



Figura 3.1 - Espaço semianecóico

Para a obtenção de resultados foi necessário recorrer a alguns equipamentos. Assim, para gerar o sinal sonoro foi necessário recorrer a uma fonte sonora da marca “Sony”, modelo XS-F1026SE ligada a um amplificador da marca “M700 Power Amplifier”.



Figura 3.2 - Equipamentos - Amplificador (esq); Fonte sonora (dir.)

As medições foram captadas através de um microfone com pré-amplificador do tipo 26 AK da marca “G.R.A.S Sound & Vibration” e posteriormente passaram por um analisador portátil modelo Symphonie da marca “01db”. O microfone foi colocado sobre um suporte, possibilitando assim a variação da sua altura, estando este suporte coberto de esponja para evitar a reflexão das ondas sonoras nos seus elementos constituintes, tal como está apresentado na Figura 3.3.

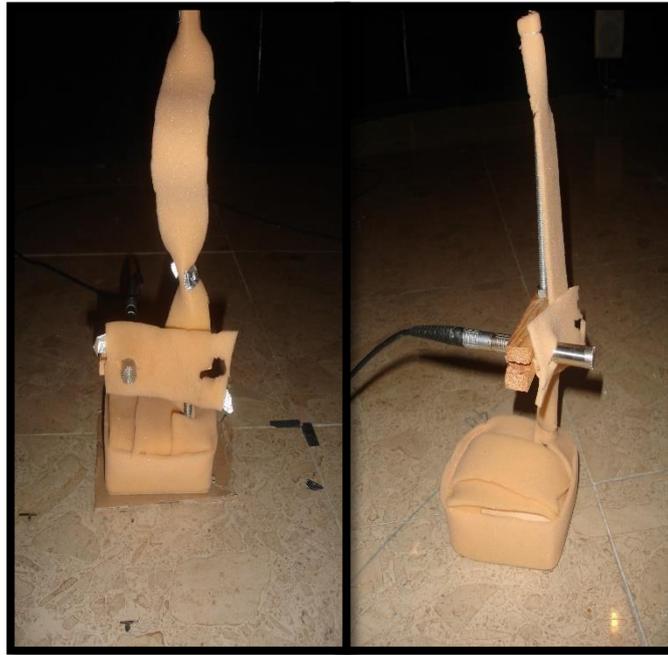


Figura 3.3 - Microfone e suporte

Os resultados foram recolhidos com o auxílio de um computador portátil equipado com o programa dBati32, os quais posteriormente foram analisados com recurso a um código implementado em Matlab.

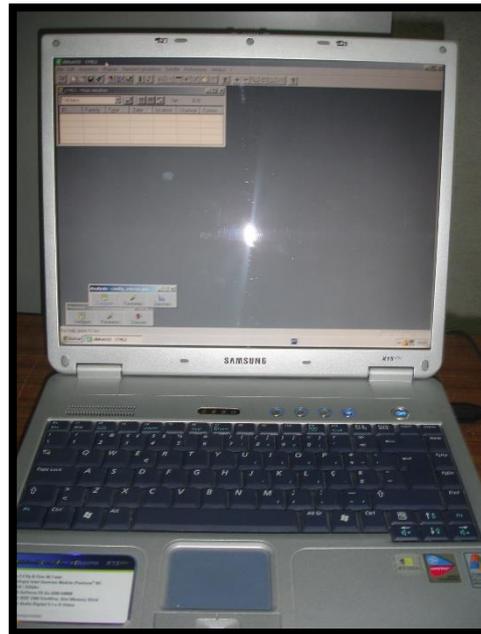


Figura 3.4 - Computador portátil com o programa dBati32

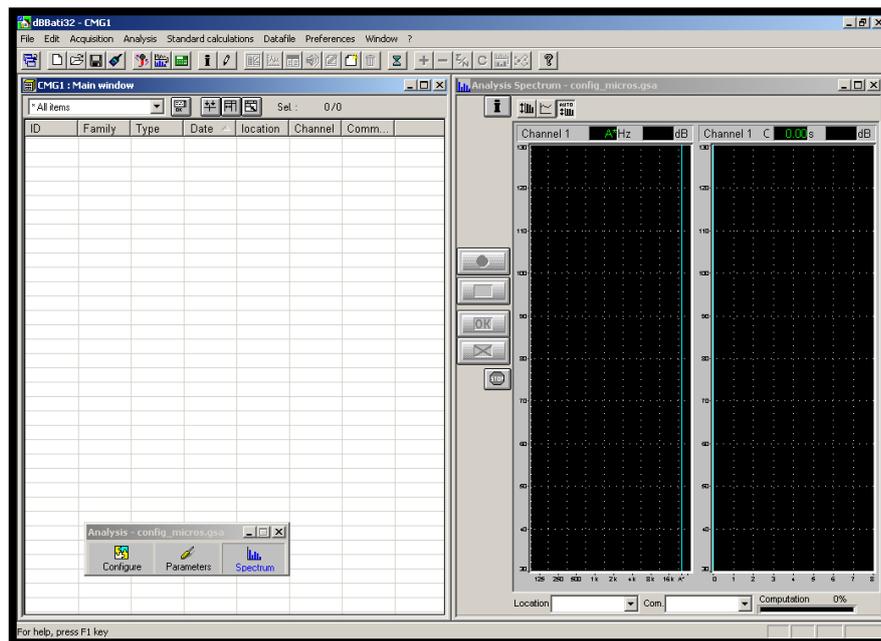


Figura 3.5 - Janela de ensaio do programa dBati32

Como referido anteriormente, os ensaios foram realizados num espaço semianecóico, onde se procurou simular o comportamento de uma barreira com estrutura periódica. Assim, colocou-se a amostra no interior da câmara, juntamente com a fonte e o microfone. Foram definidos

previamente vinte cinco pontos de medição, que serviram de referência para a colocação do microfone.

O esquema de ensaio foi estabelecido consoante a Figura 3.6, onde os pontos de medição estavam espaçados entre si 10cm e a 10cm da barreira. A posição da fonte foi definida a 40cm do centro da barreira, para uma variante de ensaio e a 80cm para outra. O ruído era emitido pela fonte a uma altura de 9cm do solo.

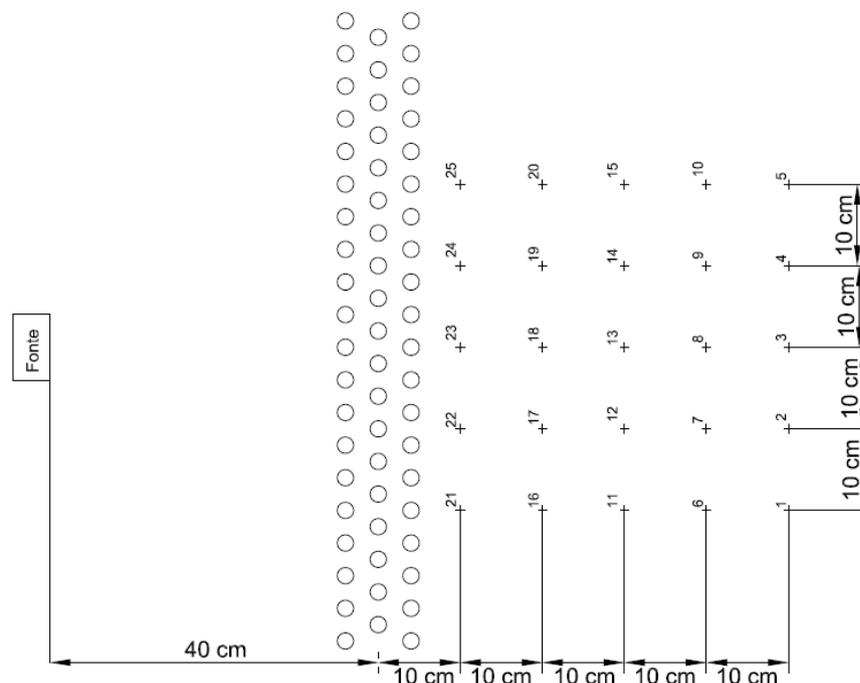


Figura 3.6 - Representação esquemática em planta do ensaio

As amostras consideradas resultaram de uma disposição triangular e retangular dos cilindros que a constituíam, que ao longo do ensaio foram sendo retirados por forma a obter algumas variantes da estrutura inicial.

Para cada amostra foram realizadas vinte cinco medições, referentes a cada ponto de medição, repetindo-se o processo para três alturas diferentes do microfone (6cm, 10cm, 15cm) e para duas distâncias da fonte à barreira (40cm, 80cm). Posteriormente, foram realizadas as mesmas medições para a situação sem barreira, como se pode ver na Figura 3.7, por forma a obter o valor da perda por inserção.



Figura 3.7 - Ensaio sem barreira

Para a realização das medições, com recurso ao programa dBati32, procedeu-se em primeiro lugar, no início de cada dia de ensaio, à calibração do microfone, realizada com o auxílio de um calibrador, sendo este calibrado para 94dB aos 1000Hz.

Posteriormente, foi gerado um ruído branco que foi captado pelo microfone para cada ponto de medição em terço de oitava numa gama de frequências dos 100 aos 2000Hz. Uma vez obtidas as medições nos 25 pontos, os sinais resultantes foram exportados e analisados em Matlab por forma a obter os resultados em forma de gráfico, tal como demonstra a Figura 3.8. De seguida, procedeu-se à análise desses mesmos dados, comparando com os resultados obtidos através dos modelos computacionais 2D e 3D, como mostra a Figura 3.9.

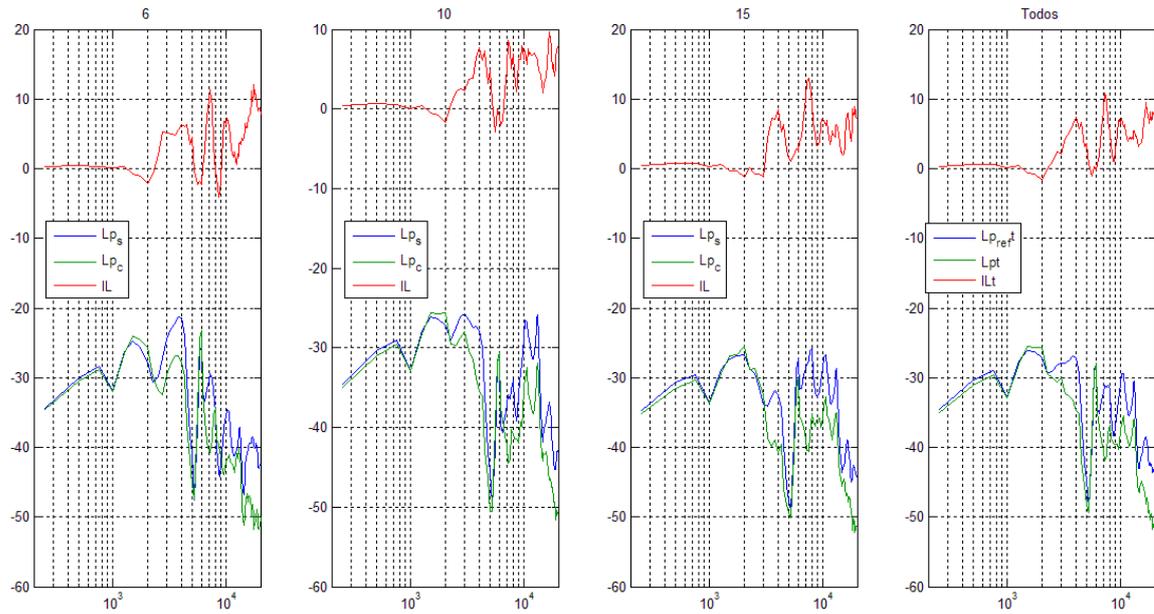


Figura 3.8 - Gráfico obtido através dos resultados experimentais

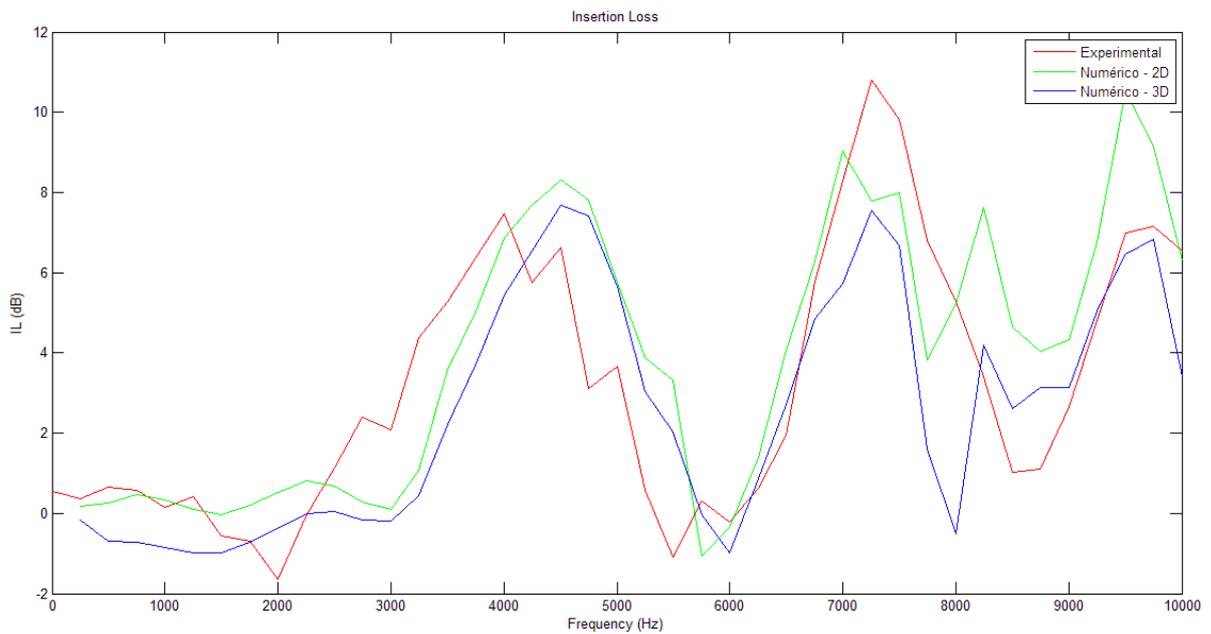


Figura 3.9 - Gráfico de IL comparativo entre os resultados experimentais, numérico 2D e numérico 3D

Este procedimento resultou de uma série de tentativas que procuraram otimizar os resultados obtidos. Assim, inicialmente procurou-se colocar os cilindros constituintes da amostra colados sobre uma placa de acrílico, tal como apresentado na Figura 3.10, que simularia o efeito da reflexão no solo e possibilitaria a retirada da amostra de dentro da câmara semianecóica.

Contudo, os resultados não se mostraram satisfatórios tendo sido necessário considerar outras alternativas.

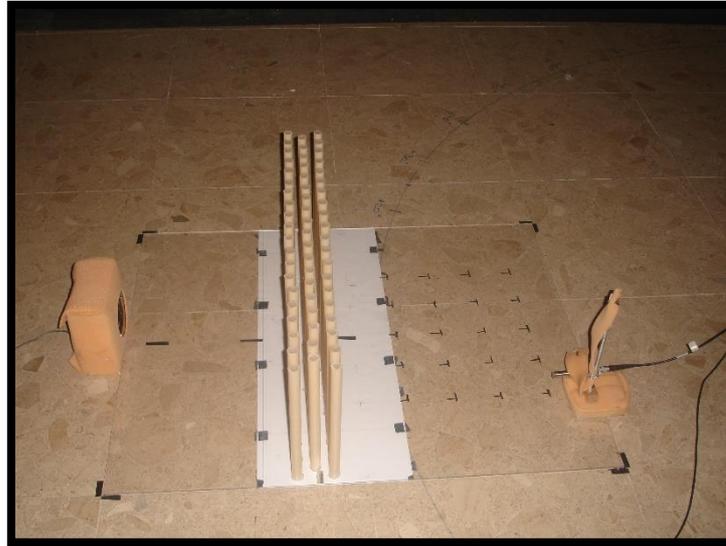


Figura 3.10 - Ensaio com barreira sobre placa de acrílico

A configuração de ensaio que se mostrou mais eficaz consistiu na colocação dos cilindros dispersores diretamente no chão. Estes foram então colados segundo o esquema apresentado na Figura 3.6, sendo as posições da fonte e dos pontos de medição também devidamente sinalizadas.

### 3.2 Modelos computacionais

A propagação do som num meio acústico, no domínio da frequência, é dada pela equação de Helmholtz que se pode escrever como:

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (1)$$

onde  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$  para problemas em 2D e  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  para problemas em 3D.  $p$  representa a pressão acústica, enquanto que o valor de  $k$  é dado pela expressão  $k = \omega/c$ , sendo  $\omega = 2\pi f$ , onde  $f$  simboliza a frequência e  $c$  a velocidade de propagação do som num meio acústico.

Considerando a equação diferencial (1), é possível definir uma solução analítica para o caso particular de condições de campo livre, onde o meio é considerado como infinito, e o campo de pressão é gerado por uma fonte de som harmónica. A pressão acústica é dada por:

$$\text{Em 2D:} \quad G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0, k) = -\frac{i}{4} H_0^{(2)}(k r) \quad (2)$$

$$\text{Em 3D:} \quad G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0, k) = \frac{e^{-ikr}}{4\pi r} \quad (3)$$

onde  $\mathbf{x}_0$  representa a posição da fonte,  $\mathbf{x}$  a posição do recetor e  $r$  a distância entre a fonte e o recetor e  $i = \sqrt{-1}$ .

### 3.2.1 MFS 2D

Nestes resultados, o campo de pressões é simulado considerando um conjunto de fontes virtuais localizadas fora do campo de análise (no interior dos cilindros). O Método das Soluções Fundamentais (MFS) é usado para obter uma aproximação da solução do problema, combinando de forma linear as soluções fundamentais de  $N_s$  fontes reais e  $N_{VS}$  fontes virtuais como:

$$p(\mathbf{x}, k) = \sum_{j=1}^{N_{VS}} Q_j G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_j, k) + \sum_{m=1}^{N_s} A_m G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0^{(m)}, k) \quad (4)$$

A primeira e a segunda soma da equação (4) representam o efeito das fontes virtuais  $N_{VS}$  (com amplitudes  $Q_j$ ) e o efeito das fontes reais  $N_s$  (com amplitudes  $A_m$ ), respetivamente. A Figura 3.11 representa esquematicamente o modelo típico MFS para o caso de um dispersor único. A gama de frequência que interessa no presente trabalho varia entre os 5000 a 15000Hz, pois representa em escala de 1:10 a gama usual para o ruído de tráfego numa escala real. A estratégia de modelação seguiu o representado por (Martins et al, 2013).

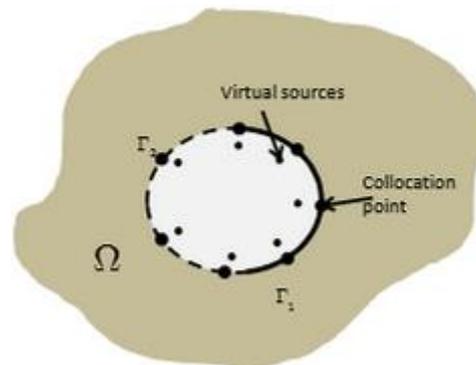


Figura 3.11 - Representação esquemática do modelo MFS para um dispersor.  $\Omega$  representa o domínio do problema que é delimitado pelas condições de fronteira  $\Gamma_1$  e  $\Gamma_2$  (Santos et al, 2014)

Aplicando a formulação descrita anteriormente, os autores elaboraram um conjunto de ensaios 2D com vista a obter o valor de Perda por Inserção gerado. A Figura 3.12 evidencia um exemplo dos resultados obtidos.

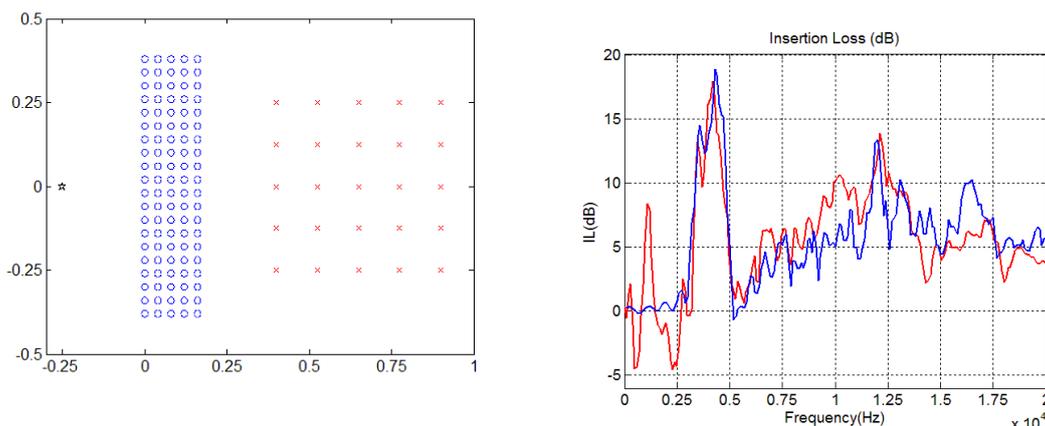


Figura 3.12 - Representação esquemática do ensaio (esq) e gráfico de perda por inserção (dir) (Santos et al, 2014)

### 3.2.2 BEM 3D

Numa análise acústica, a presença de superfícies planas de reflexão perfeita pode ser tida em conta usando o método fonte imagem. Nesta técnica, o efeito de uma fonte pontual na presença de uma dada superfície plana pode ser simulada considerando uma fonte adicional virtual, localizada de forma simétrica em relação ao plano de reflexão. Assim, se plano for definido por  $z=0$  m, a função de Green correspondente pode ser escrita como:

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0, k) = \frac{e^{-ikr}}{4\pi r} + \frac{e^{-ikr_1}}{4\pi r_1} \quad (5)$$

onde  $r$  é definido pela fórmula

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} \quad (6)$$

e  $r_1$  é dado pela expressão:

$$r_1 = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z + z_0)^2} \quad (7)$$

A equação (5) é apenas válida se o plano for perfeitamente rígido, com o coeficiente de reflexão de 1.

Conhecendo esta solução fundamental, para estabelecer a formulação do BEM pode escrever-se a seguinte equação integral:

$$\begin{aligned} C(\mathbf{x}_0)p(\mathbf{x}_0) = & -i\rho\omega \int_{\Gamma} G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0, k) v_n(\mathbf{x}) d\Gamma \\ & - \int_{\Gamma} \frac{\partial G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0, k)}{\partial n} p(\mathbf{x}) d\Gamma + G(\mathbf{x}_f, \mathbf{x}_0, k) \end{aligned} \quad (8)$$

onde,  $\Gamma$  representa a superfície de fronteira,  $\rho$  é a densidade,  $G(\mathbf{x}_f, \mathbf{x}_0, k)$  é o campo incidente em termos de pressão acústica gerada pela fonte real localizada na posição  $\mathbf{x}_f$ ,  $p(\mathbf{x})$  e  $v_n(\mathbf{x})$  simbolizam a pressão acústica e a componente normal da velocidade da partícula respetivamente. O coeficiente  $C(\mathbf{x}_0)$  depende da geometria da fronteira da fonte pontual e equivale a  $1/2$  para uma fronteira regular.

Diferentes condições fronteira podem ser prescritas para cada elemento fronteira como é o caso de Dirichlet que prescreve  $p(\mathbf{x}) = \bar{p}(\mathbf{x})$ , Neumann prescreve  $v(\mathbf{x}) = \bar{v}(\mathbf{x})$ , e Robin que prescreve  $p(\mathbf{x})/v(\mathbf{x}) = \bar{Z}(\mathbf{x})$ . Uma vez estipuladas as condições fronteira a considerar, discretizando cada fronteira em elementos e estabelecendo uma função de interpolação adequada dentro de cada segmento é obtido um sistema com  $NE_B$  equações e com  $NE_B$

variáveis. A sua resolução torna possível a obtenção da pressão acústica e da velocidade normal para cada elemento fronteira  $e$ , conseqüentemente, a pressão em cada ponto do domínio pode ser também calculada aplicando a equação integral de fronteira (8).

Através da Figura 3.13 é possível visualizar um exemplo obtido dos níveis de pressão acústica obtidos para uma estrutura baseada no conceito de cristal sónico, após a aplicação do método supracitado segundo (Godinho et al, 2015).

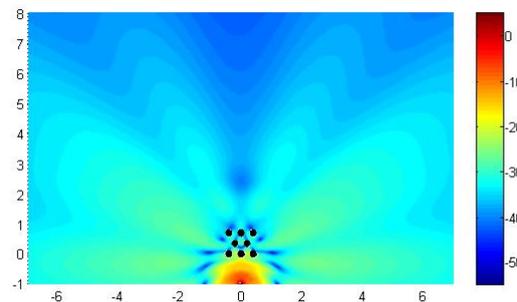


Figura 3.13 - Representação esquemática dos resultados obtidos para o campo de pressão de uma barreira com estrutura periódica (Godinho et al, 2015)

## **4 COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS**

Neste capítulo, procede-se a uma comparação entre os resultados obtidos através dos métodos numéricos citados anteriormente com os resultados obtidos experimentalmente.

Para a realização dos ensaios experimentais foi construída uma barreira acústica, constituída por três filas de cilindros de PVC numa escala 1:10 espaçados entre si. Estes foram colados no chão no interior de um espaço semianecóico por forma a simular o comportamento de uma barreira acústica.

Foram analisadas duas disposições diferentes dos cilindros constituintes da barreira, uma triangular e outra retangular. No decorrer dos ensaios foram retirados cilindros por forma a obter diferentes configurações. Cada ensaio foi realizado para duas distâncias da fonte à barreira, ou seja, a 40cm e a 80cm.

Os resultados numéricos foram calculados a uma escala 1:1 numa gama de frequência compreendida entre os 25Hz e os 1000Hz com intervalos de 25Hz.

Os resultados experimentais foram calculados numa gama de frequência compreendida entre os 250Hz e os 10000Hz com intervalos de 250Hz de forma a obter compatíveis com os avaliados computacionalmente.

Como referido anteriormente, os resultados obtidos através dos ensaios laboratoriais com recurso ao programa dBati 32 foram exportados e analisados em Matlab onde, com recurso a um código de cálculo, se realizou um estudo numérico da mesma configuração de ensaio. Assim, foi possível obter gráficos comparativos entre os resultados numéricos e experimentais das diferentes disposições da barreira estudadas.

### **4.1 Configuração triangular completa**

A Figura 4.1 apresenta a disposição dos cilindros adotada para a realização do ensaio. Estes foram colocados segundo uma malha triangular, constituída por três filas de vinte cilindros espaçados entre si 4cm centro a centro.



Figura 4.1 - Representação esquemática da disposição dos cilindros dispersores

#### 4.1.1 Fonte posicionada a 40cm da barreira

A Figura 4.2 representa os resultados experimentais, em forma de gráfico, obtidos para as diferentes alturas do microfone, (6cm, 10cm, 15cm) bem como o resultado obtido através da média ponderada da amplitude para as três alturas consideradas. A linha vermelha corresponde ao valor de perda por inserção, IL, que será comparado com o obtido através de métodos numéricos.

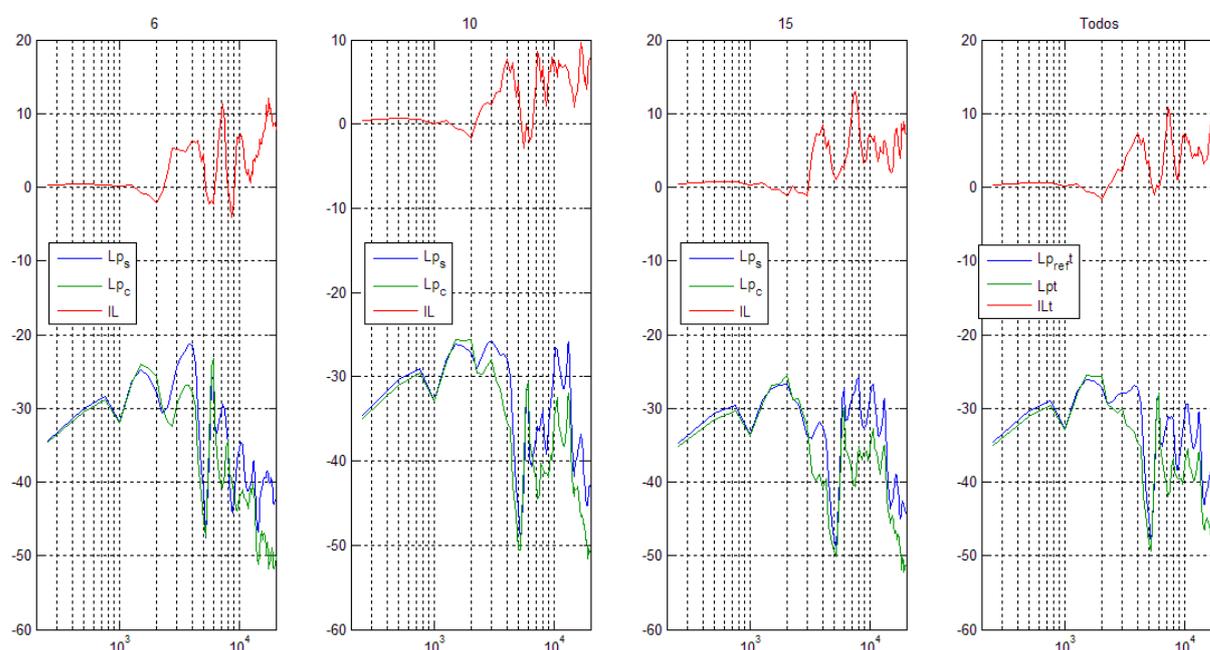


Figura 4.2 - Gráfico com os resultados experimentais para as três alturas do microfone e para a resultante das três alturas

Na Figura 4.3 é possível visualizar os resultados obtidos através dos diversos métodos de cálculo adotados, tanto numérico 2D e 3D como o método experimental. O gráfico permite verificar a existência de uma “bandgap” na banda de frequências dos 4000Hz e dos 7000Hz. Apesar de uma pequena discrepância inicial, podemos verificar que os diversos modelos estão em concordância.

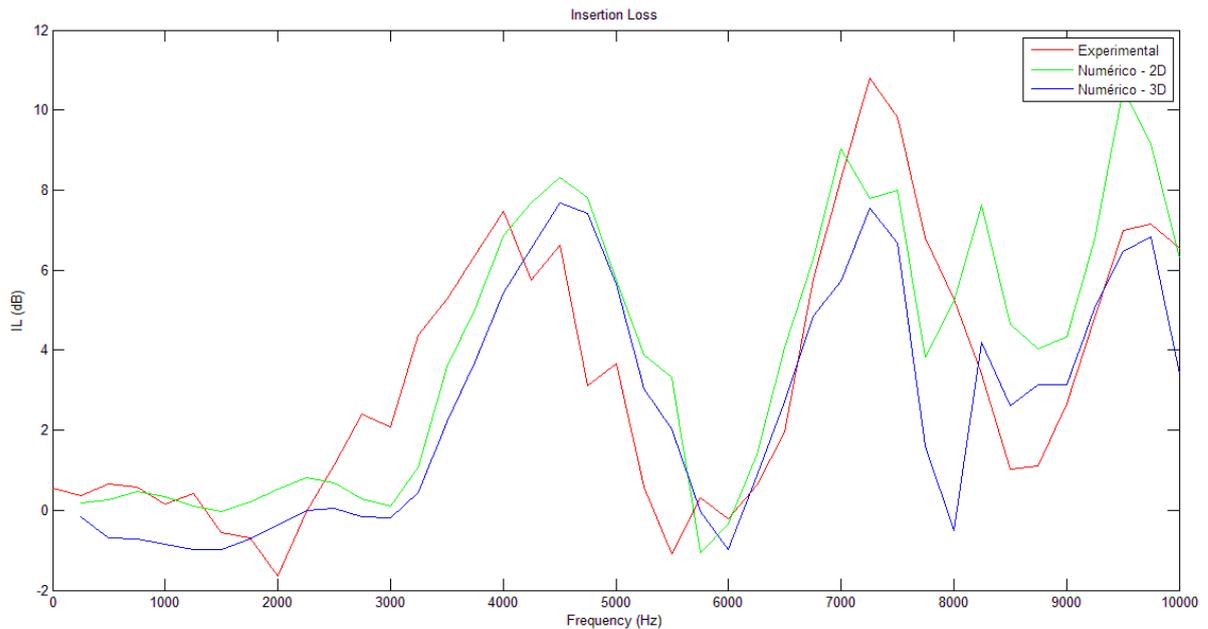


Figura 4.3 - Gráfico de IL comparativo entre os resultados experimentais, numérico 3D e numérico 2D para uma disposição triangular com a fonte a 40cm da barreira

#### 4.1.2 Fonte posicionada a 80cm da barreira

A Figura 4.4 exprime o resultado referente aos ensaios realizados, comparados com os modelos numéricos, para a mesma configuração de ensaio do caso anterior mas com a fonte a 80cm da barreira.

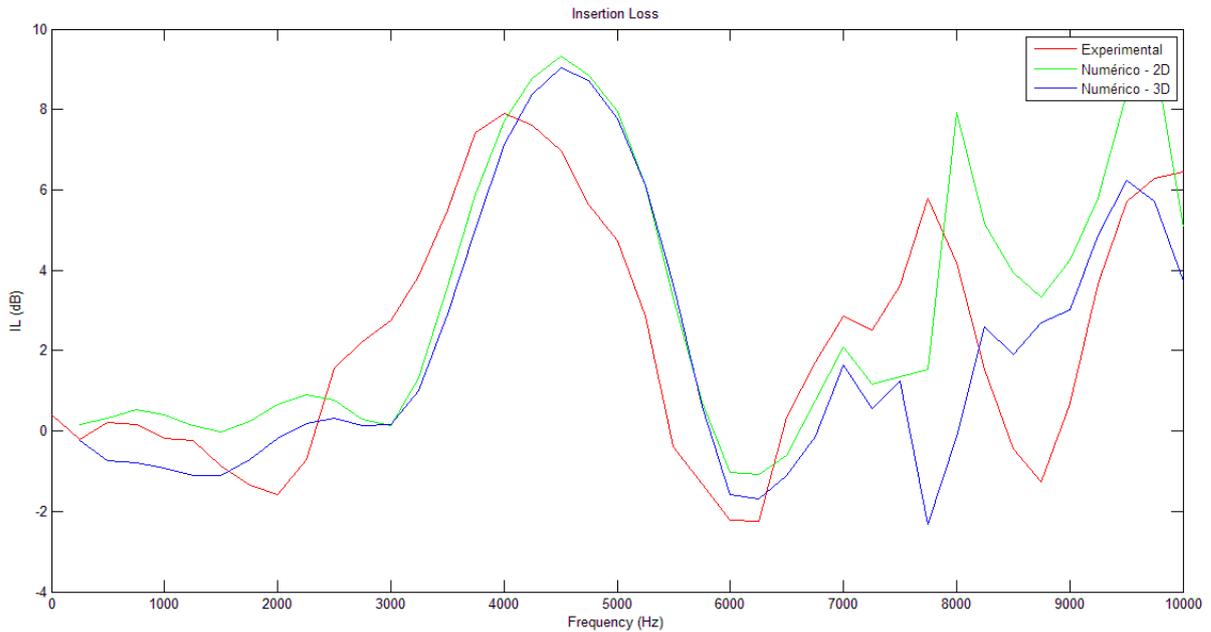


Figura 4.4 - Gráfico de IL comparativo entre os resultados experimentais, numérico 3D e numérico 2D para uma disposição triangular com a fonte a 80cm da barreira

Afastando a fonte da barreira, e comparando com o ensaio anterior, podemos verificar que a banda de frequência dos 4000Hz continua a representar uma “bandgap”. No entanto, para frequências mais elevadas é visível uma discrepância de resultados em relação aos diferentes modelos de análise. De registar ainda que a atenuação gerada pela barreira na gama dos 4000Hz está compreendida entre os 8 e os 10 dB.

## 4.2 Configuração triangular com vazios

Partindo da barreira considerada anteriormente, foram retirados alguns cilindros da fila intermédia, de forma alternada, tal como demonstra a Figura 4.5, diminuindo assim o fator de preenchimento da estrutura. Os ensaios decorreram segundo o mesmo método da configuração anterior, primeiro com a fonte a 40cm da barreira e depois com a fonte a 80cm.

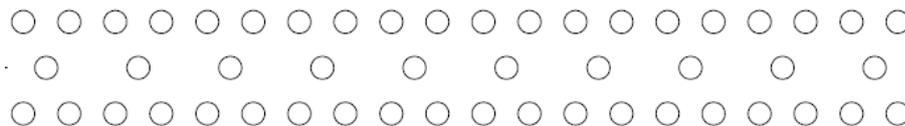


Figura 4.5 - Representação esquemática da disposição dos cilindros dispersores

#### 4.2.1 Fonte posicionada a 40cm da barreira

Realizando o mesmo processo citado anteriormente, obteve-se o gráfico representativo do valor da perda por inserção para os diferentes modelos de cálculo, tal como está representado na Figura 4.6.

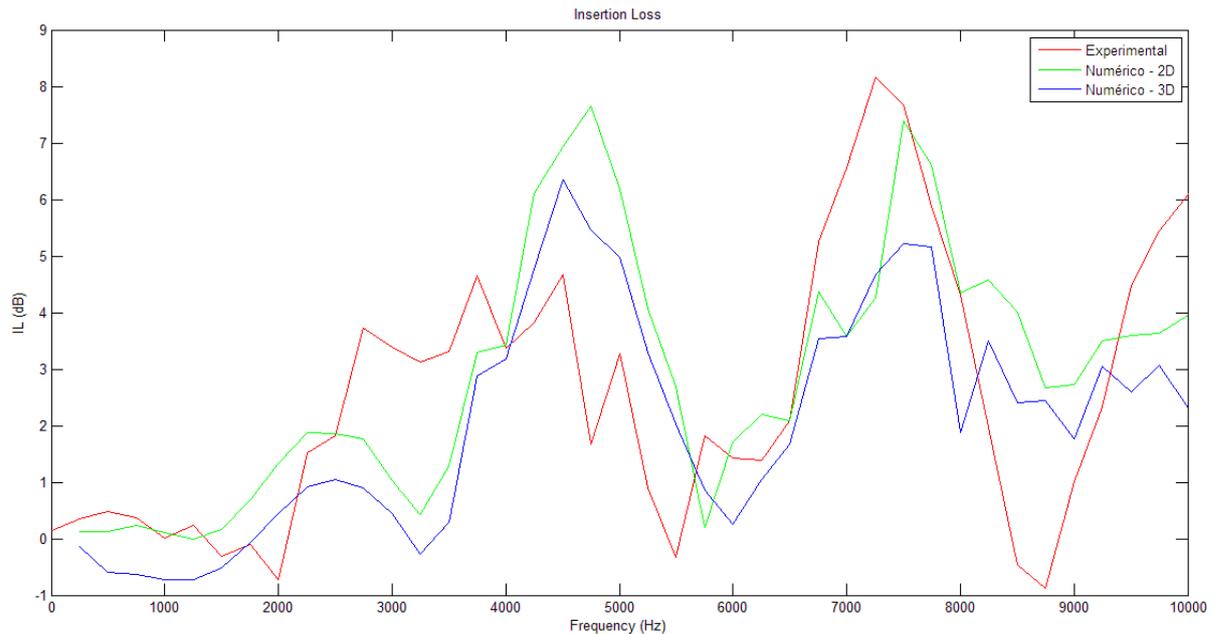


Figura 4.6 - Gráfico de IL comparativo entre os resultados experimentais, numérico 3D e numérico 2D para uma disposição triangular com vazios e com a fonte posicionada 40cm da barreira

A partir da análise do gráfico de IL é possível observar um certo desfasamento entre os resultados numéricos e os resultados experimentais com principal incidência nas bandas de frequência mais baixas. Os resultados numéricos denotam a presença de uma “bandgap” na gama de frequências dos 4000 a 5000Hz sendo também visível a presença de uma “bandgap” na banda dos 7000Hz.

#### 4.2.2 Fonte posicionada a 80cm da barreira

O gráfico de perda por inserção referente à Figura 4.7 foi obtido aumentando a distância da fonte à barreira, considerando a configuração adotada anteriormente.

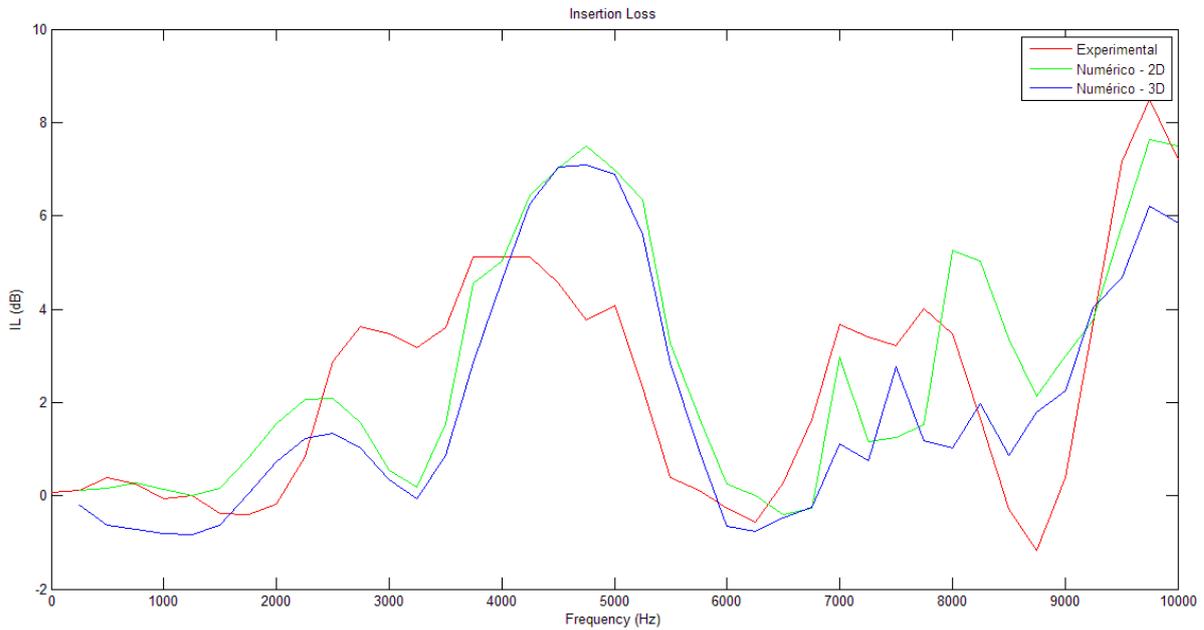


Figura 4.7 - Gráfico de IL comparativo entre os resultados experimentais, numérico 3D e numérico 2D para uma disposição triangular com vazios e com a fonte posicionada a 80cm da barreira

Através da observação do gráfico anterior podemos concluir que volta a ser evidente a existência de uma “bandgap” na proximidade da gama de frequência dos 4000Hz. De notar ainda que os resultados numéricos 2D e 3D, representados pela linha verde e azul respetivamente, apresentam uma certa concordância entre eles. Comparando os mesmos com o gráfico obtido experimentalmente é visível uma significativa discrepância inicial.

### 4.3 Configuração triangular com duas filas

No seguimento do ensaio anterior, retiraram-se os cilindros restantes da fila intermédia por forma a ficarem apenas duas filas de cilindros dispersores mais espaçadas entre si, tal como mostra a Figura 4.8.

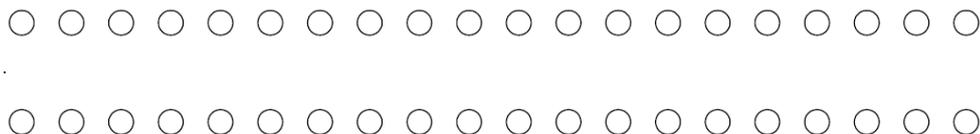


Figura 4.8 - Representação esquemática da disposição dos cilindros dispersores

### 4.3.1 Fonte posicionada a 40cm da barreira

Assim, repetindo o mesmo método de ensaio das anteriores configurações foi obtido o gráfico da Figura 4.9.

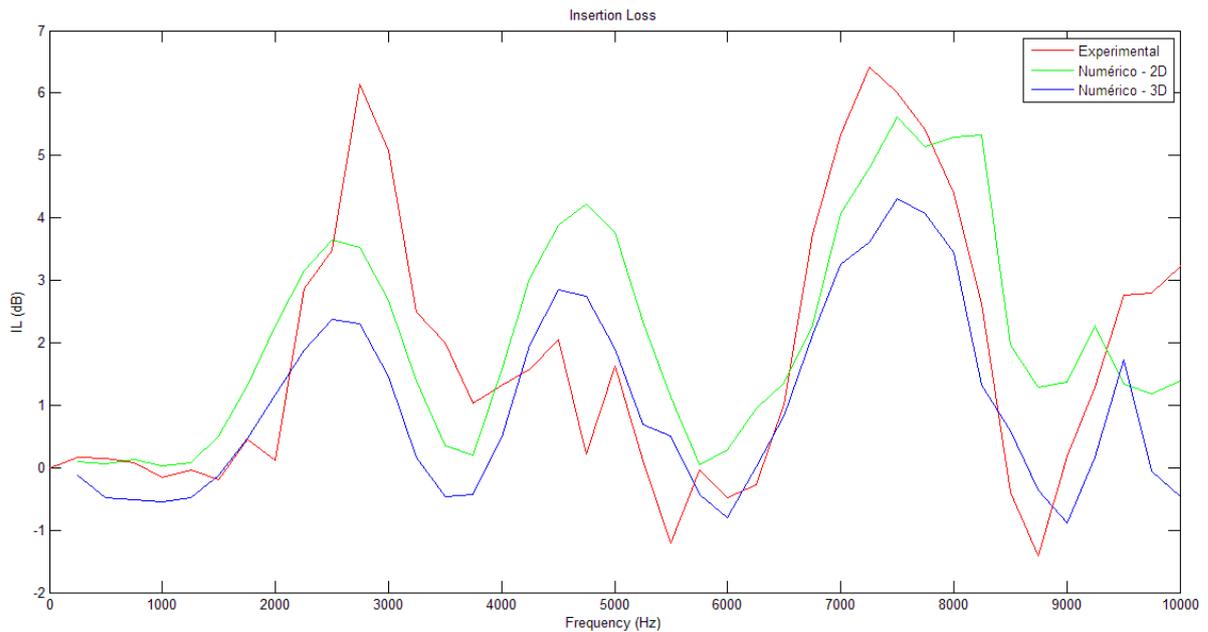


Figura 4.9 - Gráfico de IL comparativo entre os resultados experimentais, numérico 3D e numérico 2D para uma disposição triangular com duas filas e com a fonte posicionada a 40cm da barreira

O gráfico revela uma certa concordância entre os diferentes modelos de cálculo, tanto o experimental como os dois numéricos. Para a disposição considerada, não é perfeitamente visível a existência de uma “bandgap” principal, no entanto é notada a existência de três “bandgaps” na gama de frequências dos 3000Hz, 4500Hz e 7000Hz.

### 4.3.2 Fonte posicionada a 80cm da barreira

Afastando a fonte da barreira mais 40cm em relação ao ensaio anterior, e mantendo a mesma disposição dos cilindros dispersores, obteve-se o gráfico presente na Figura 4.10.

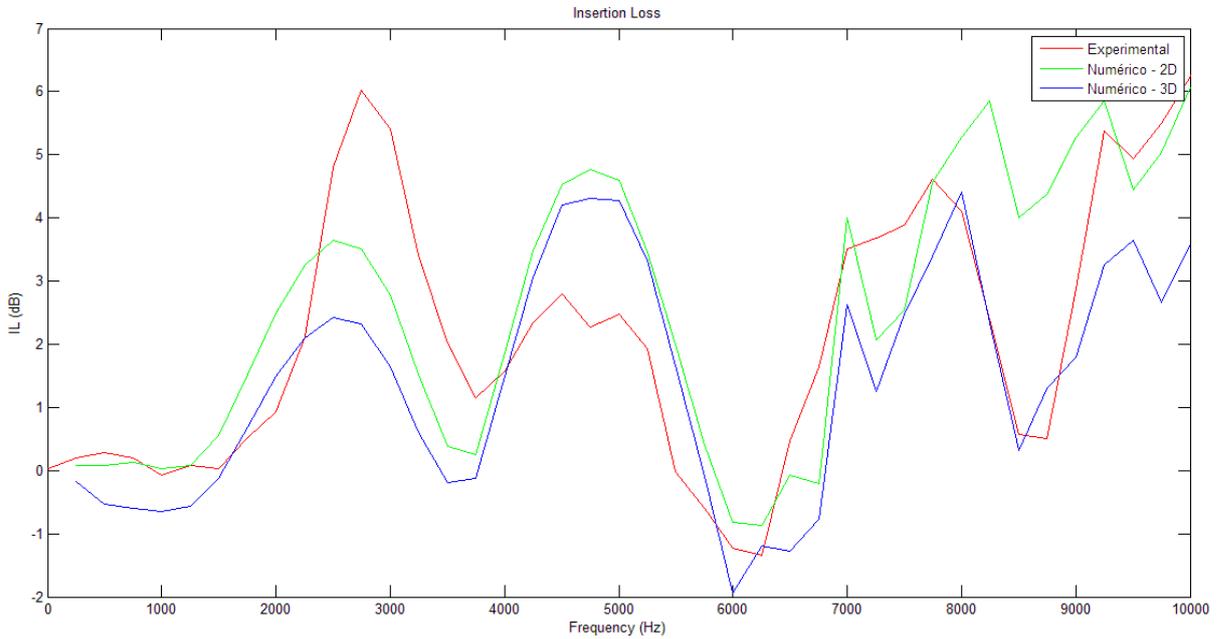


Figura 4.10 - Gráfico de IL comparativo entre os resultados experimentais, numérico 3D e numérico 2D para uma disposição triangular com duas filas e com a fonte posicionada a 80cm da barreira

Mais uma vez, o gráfico foi obtido através da comparação dos resultados experimentais com os resultados numéricos 2D e 3D. À semelhança do resultado conseguido com a fonte a 40cm da barreira, também agora não é perfeitamente visível a existência de uma “bandgap”.

#### 4.4 Configuração retangular completa

Para a realização deste ensaio, voltaram a colar-se um conjunto de cilindros dispersores no interior de um espaço semianecóico. Estes foram dispostos numa malha retangular constituída por três filas de vinte cilindros espaçados entre si 4cm de centro a centro, tal como mostra a Figura 4.11. Os pontos de medição foram os mesmos vinte cinco que foram considerados para as configurações anteriores e as alturas do microfone voltaram a ser de 6cm, 10cm, e 15cm.

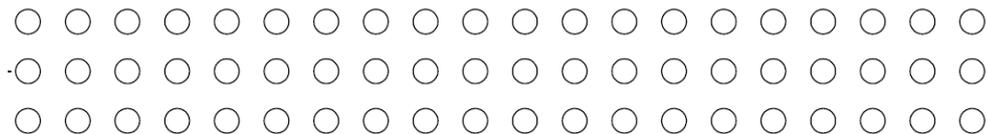


Figura 4.11 - Representação esquemática da disposição dos cilindros dispersores

#### 4.4.1 Fonte posicionada a 40cm da barreira

Como resultado dos ensaios realizados com a fonte a 40cm da barreira, e comparando com os resultados obtidos através dos modelos numéricos obteve-se o gráfico presente na Figura 4.12.

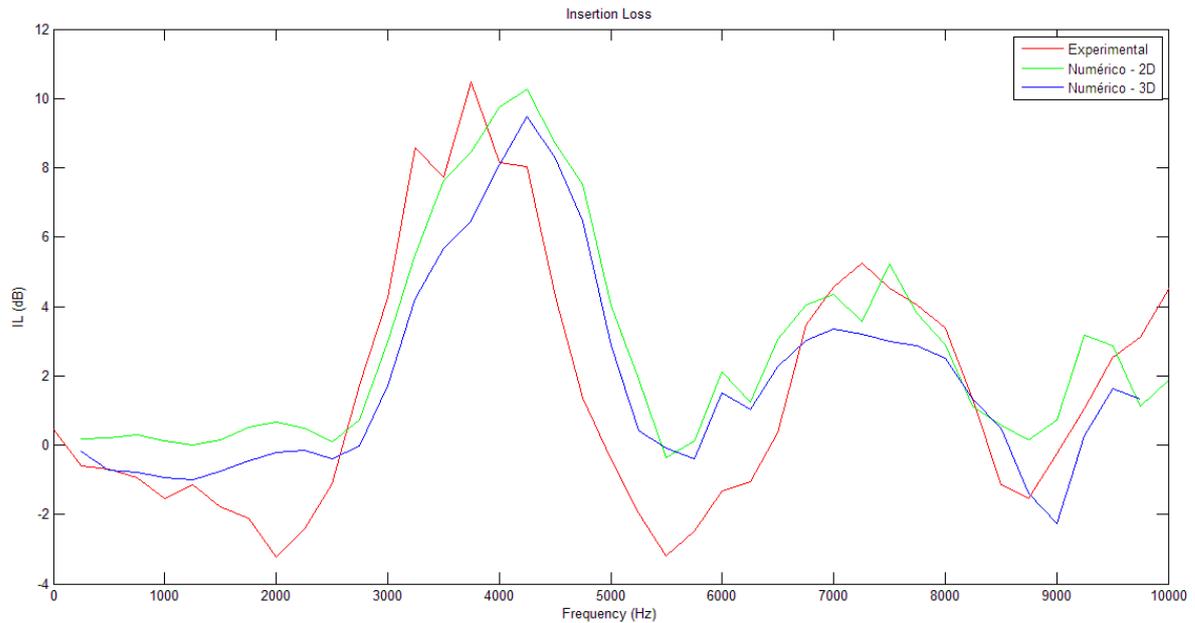


Figura 4.12 - Gráfico de IL comparativo entre os resultados experimentais, numérico 3D e numérico 2D para uma disposição retangular com a fonte a 40cm da barreira

Analisando o gráfico anterior, é visível a existência de uma “bandgap” na banda de frequência dos 4000Hz. É de notar ainda que a configuração considerada é capaz de gerar uma atenuação na ordem dos 10dB para ambos os métodos.

#### 4.5 Configuração retangular com vazios

À semelhança do ocorrido para a configuração triangular, também para a retangular foram retirados metade dos cilindros dispersores da fila intermédia da barreira como demonstra a Figura 4.13.

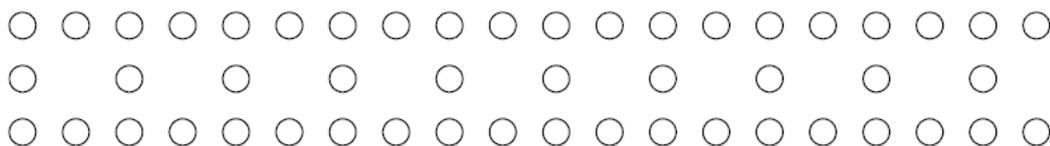


Figura 4.13 - Representação esquemática da disposição dos cilindros dispersores

#### 4.5.1 Fonte posicionada a 40cm da barreira

A Figura 4.14 exprime os resultados obtidos considerando a configuração em estudo para os três modelos de análise.

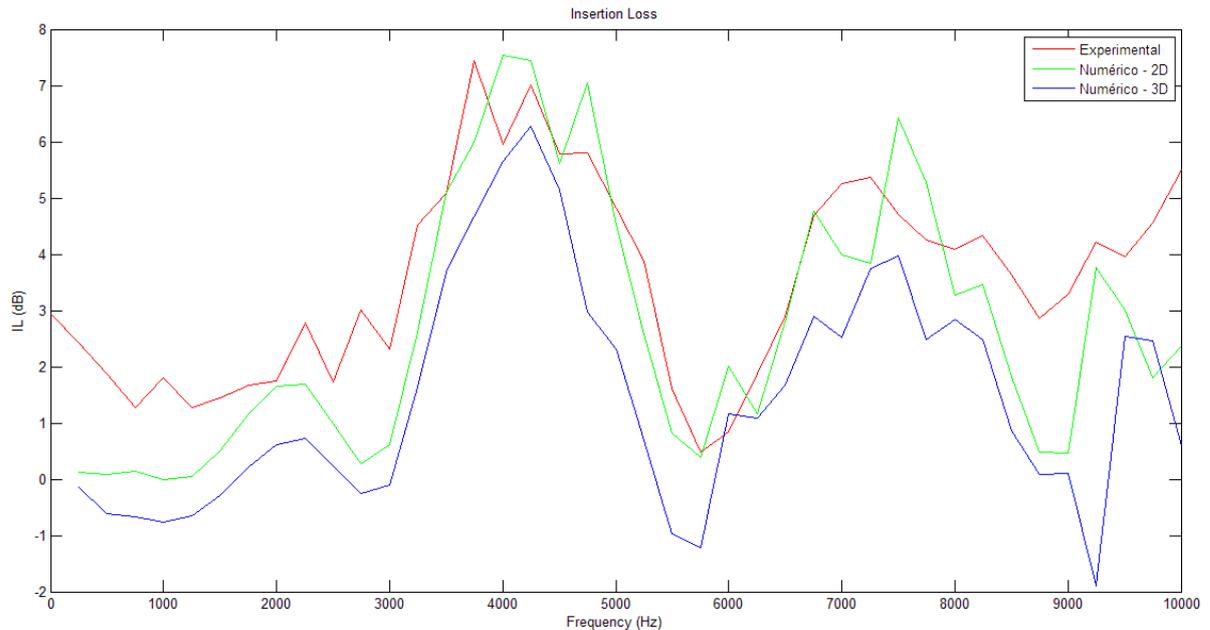


Figura 4.14 - Gráfico de IL comparativo entre os resultados experimentais, numérico 3D e numérico 2D para uma disposição retangular com vazios e com a fonte posicionada a 40cm da barreira

Como é possível verificar pelo gráfico de IL da figura anterior, os três modelos estão em concordância. Também para esta configuração a banda de frequência dos 4000 Hz revela a existência de uma “bandgap”. De notar ainda que, para esta estrutura de barreira acústica, é possível gerar níveis de atenuação na ordem dos 7dB.

#### 4.5.2 Fonte posicionada a 80cm da barreira

Seguindo o mesmo procedimento das configurações anteriores, foi testada a mesma barreira mas com a fonte distanciada 80cm da barreira. Os valores de IL obtidos experimentalmente estão expressos na Figura 4.15 bem como os resultados referentes aos modelos numéricos 2D e 3D.

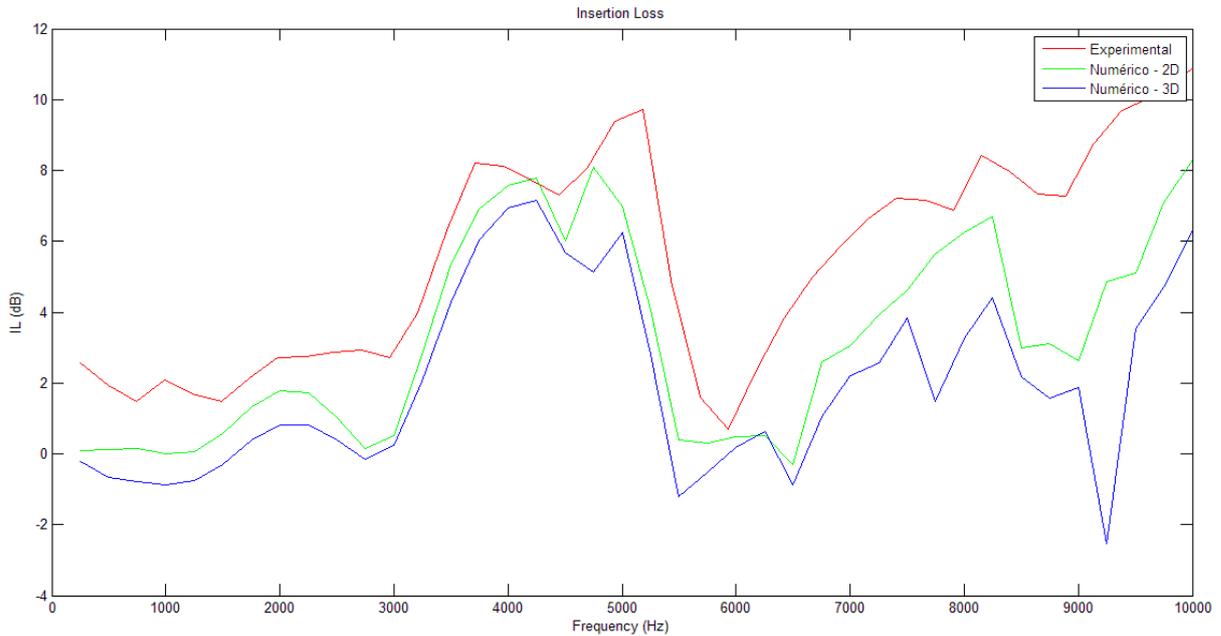


Figura 4.15- Gráfico de IL comparativo entre os resultados experimentais, numérico 3D e numérico 2D para uma disposição retangular com vazios e com a fonte posicionada a 80cm da barreira

Os resultados presentes na figura anterior denotam uma concordância entre os três modelos de cálculo diferentes. De realçar ainda, a presença clara de uma “bandgap” na banda de frequência dos 4000Hz que pode gerar níveis de atenuação sonoros entre 6dB e 10dB. Os níveis de IL registados permitem verificar uma boa eficiência da barreira com a disposição construtiva considerada.

#### 4.6 Configuração retangular com duas filas

Retirando agora a totalidade dos cilindros da fila intermédia, como mostra a Figura 4.16, foram realizados os ensaios seguindo a mesma metodologia das configurações anteriores.

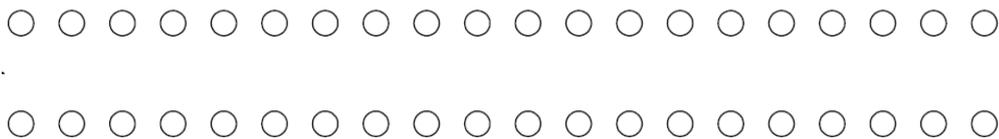


Figura 4.16 - Representação esquemática da disposição dos cilindros dispersores

#### 4.6.1 Fonte posicionada a 40cm da barreira

A Figura 4.17 apresenta o gráfico obtido após a realização do ensaio para a nova configuração.

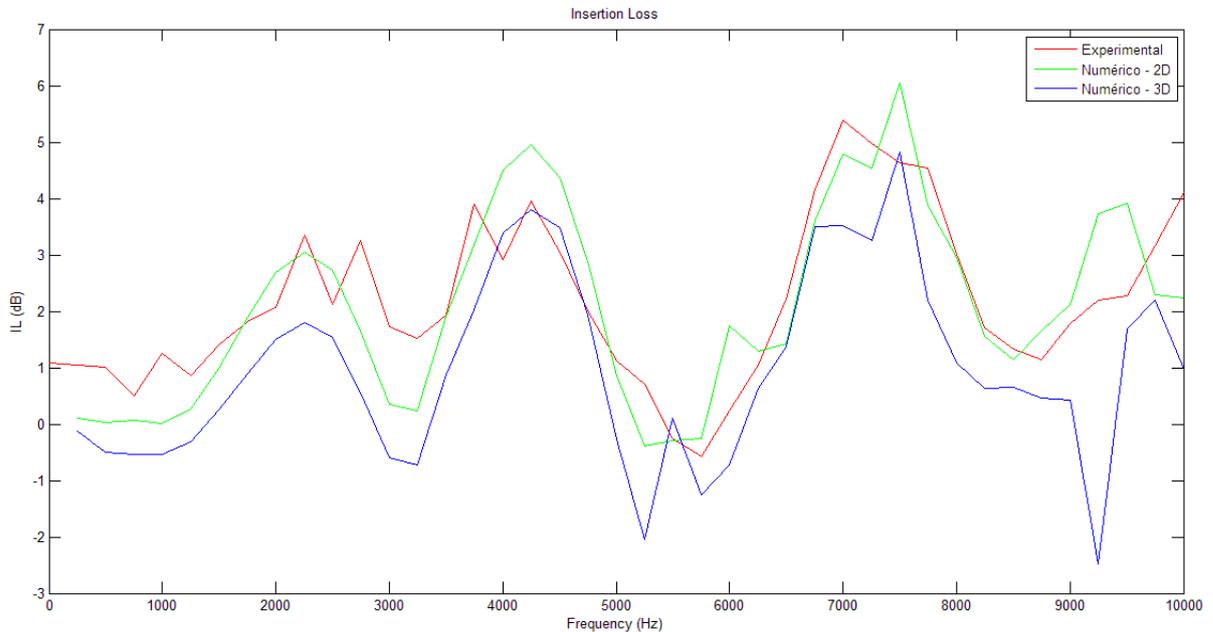


Figura 4.17 - Gráfico de IL comparativo entre os resultados experimentais, numérico 3D e numérico 2D para uma disposição retangular com duas filas com a fonte posicionada a 40cm da barreira

Com a fonte novamente a 40cm da barreira foi obtido o gráfico anterior. De referir que este não evidência a existência de uma “bandgap”.

#### 4.6.2 Fonte posicionada a 80cm da barreira

Tal como nos ensaios anteriores, voltou a manter-se a configuração da barreira, afastando a fonte mais 40cm desta. A Figura 4.18 exprime os resultados obtidos através dos diferentes modelos de cálculo, experimental e computacional.

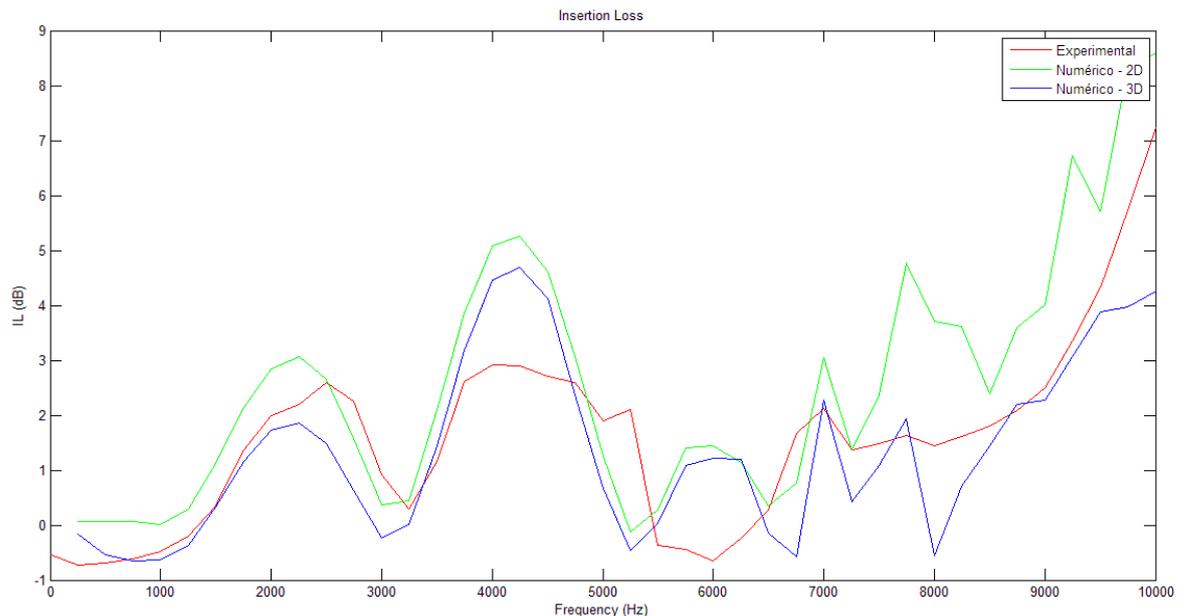


Figura 4.18 - Gráfico de IL comparativo entre os resultados experimentais, numérico 3D e numérico 2D para uma disposição retangular com duas filas com a fonte posicionada a 80cm da barreira

O gráfico anterior permite concluir que também para uma disposição com a fonte mais afastada da barreira não existe uma clara “bandgap” no entanto, para a banda de frequência dos 4000Hz existe uma certa atenuação de cerca de 5dB para os modelos numéricos, sendo inferior no caso experimental.

#### 4.7 Discussão dos resultados

Tal como foi referido anteriormente os resultados demonstrados ao longo deste capítulo foram obtidos através de três modelos diferentes: modelo experimental, modelo numérico 2D e modelo numérico 3D. Particularmente os ensaios experimentais são mais suscetíveis a ocorrerem alguns erros, que poderão influenciar os resultados finais.

Na realização dos ensaios laboratoriais teve-se o cuidado de fazer com que estes fossem efetuados nas mesmas condições, por forma a minimizar os efeitos das interferências exteriores ao ensaio nos resultados finais. No entanto, a existência destas mesmas interferências, apesar do ensaio ter sido realizado no interior de um espaço semianecóico, podem ser apontadas como uma das causas para uma discrepância entre resultados experimentais e numéricos.

Tratando-se de ensaios experimentais é ainda possível ocorrerem alguns erros decorrentes do ensaio. Ao contrário dos modelos numéricos, experimentalmente torna-se mais difícil garantir uma total precisão na colocação do microfone, tanto em altura como nos diferentes pontos de medição. O facto de a barreira ser construída manualmente e, apesar de se procurar garantir uma total verticalidade dos cilindros dispersores, alguma imperfeição nesse aspeto também pode ser uma causa a apontar para a falta de concordância ocorrida entre os modelos de cálculo numéricos e experimentais.

De um modo geral, os ensaios laboratoriais apresentaram resultados satisfatórios e dentro do expectável. A grande maioria apresentou a existência de uma “bandgap” em torno da frequência dos 4000Hz tal como reportavam os estudos realizados anteriormente.

Da observação dos resultados obtidos através das 12 configurações de ensaio diferentes, podemos concluir que os níveis de atenuação gerados pela barreira variam consoante a disposição e o número de cilindros dispersores que a constituem.

Os melhores resultados foram obtidos para as configurações completas, tanto triangular como retangular e denotam um nível de atenuação sonora na ordem dos 10dB, demonstrando assim a sua eficácia como barreira acústica. Estes resultados foram obtidos, maioritariamente, para a banda de frequência dos 4000Hz.

Os resultados obtidos através da disposição retangular dos dispersores mostram uma menor atenuação quando comparados com a disposição triangular sendo que a configuração da barreira com apenas duas filas de cilindros apenas gera níveis de atenuação na ordem dos 3dB.

É ainda possível constatar que, tal como era expectável, a diminuição do número de obstáculos à propagação do som (cilindros dispersores) é acompanhada por um decréscimo dos níveis de atenuação sonora gerados pela barreira.

Tal como foi referido anteriormente, foram ainda testadas configurações para duas distâncias diferentes da fonte à barreira, 40cm e 80cm. Observando os resultados obtidos através dos dois casos considerados não é evidente uma alteração significativa nos níveis de atenuação sonora quando se aumenta a distância da fonte à barreira.

## 5 ESTUDO PARAMÉTRICO E COMPARATIVO DE DIFERENTES SOLUÇÕES

No presente capítulo procurou-se realizar um estudo paramétrico e comparativo entre diferentes soluções de barreiras acústicas com estruturas periódicas.

Numa primeira fase, recorreu-se ao software GID versão 7.2, para definir a geometria as diversas tipologias de barreiras. Foram consideradas barreiras acústicas ditas tradicionais assim como barreiras acústicas baseadas no conceito de cristal sónico.

Quanto às barreiras acústicas tradicionais, construíram-se três modelos diferentes, com 3 metros de altura e 0.25 metros de espessura, variando em comprimento entre 5, 10 e 20 metros.

Para o caso das soluções com estrutura periódica, mantendo a mesma altura das barreiras tradicionais (3 metros), consideraram-se elementos dispersores com diferentes configurações geométricas. Estes foram desenhados com 0.2 metros de diâmetro e com um espaçamento centro a centro de 0.4 metros.

As diferentes configurações geométricas da barreira resultaram de uma disposição dos dispersores em malhas triangulares ou retangulares, sendo formadas por filas de 11 dispersores com o número de filas variável consoante a configuração adotada.

A fonte foi posicionada para todas as configurações a 0.6 metros de altura e a 2.5 metros da barreira e foi configurada para emitir uma frequência de 400Hz, 500Hz ou 1000Hz de acordo com a situação pretendida. Considerou-se ainda um coeficiente de absorção dos dispersores  $\alpha$  igual a 0.001.

Uma vez obtidas as diferentes configurações 3D da estrutura, com auxílio do mesmo programa, discretizaram-se as mesmas em malhas quadrículas, com um tamanho de cada elemento fixado em 0.05m, para estar em concordância com o definido no código do Matlab. Foram ainda consideradas três malhas de recetores, discretizadas com geometria triangular, para ser possível visualizar de melhor forma os resultados obtidos.

A Figura 5.1 evidencia as configurações obtidas através do software antes e depois de serem discretizadas em malhas.

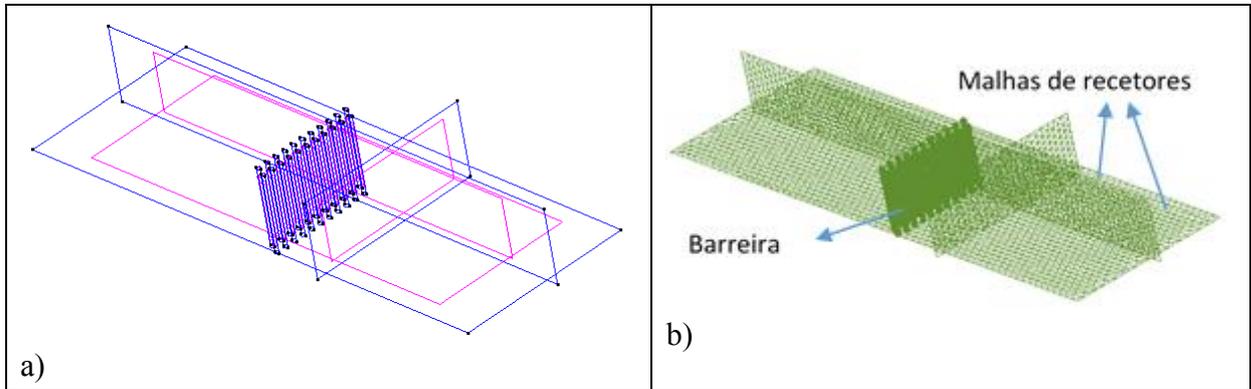


Figura 5.1 - Representação esquemática obtida através do programa GID: a) Barreira constituída por 2 filas de cilindros dispersores e malhas de recetores b) configuração discretizada

Uma vez obtida a configuração discretizada da estrutura correu-se a mesma no código efetuado em Matlab para obter os resultados nos níveis sonoros em dB para cada elemento da malha. As figuras resultantes foram analisadas numa escala de cores fixa de 100 a -15 e segundo a mesma vista para assim facilitar a comparação entre as diferentes soluções.

## 5.1 Para uma frequência fixa variando a configuração da barreira

### 5.1.1 Barreiras tradicionais

Como foi referido anteriormente, não foram só estudadas barreiras constituídas por uma estrutura periódica como as barreiras ditas tradicionais.

Para este caso consideraram-se barreiras tradicionais com diferentes comprimentos, 5m, 10m e 20m e foi emitida uma frequência de 1000Hz pela fonte. Para a barreira correspondente a 5 metros de comprimento a malha foi discretizada em 15192 elementos, para a segunda barreira (10m) o número de elementos aumentou para 29550 e para o terceiro caso (20m) o número de elementos gerado foi de 58735. Os resultados obtidos para os níveis sonoros registados nos diferentes elementos das malhas estão expostos na Figura 5.2.

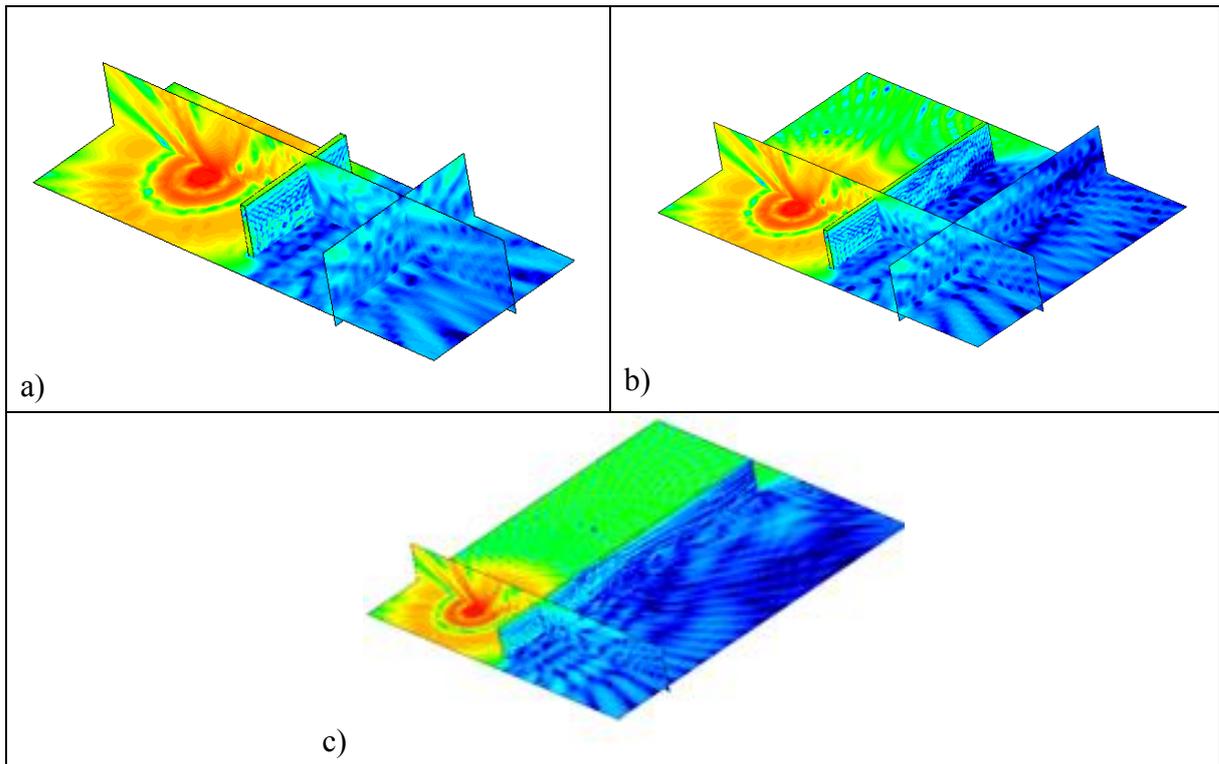


Figura 5.2 - Representação esquemática dos resultados obtidos para barreiras tradicionais e para uma frequência de 1000Hz: a) Barreira com 5m de comprimento; b) Barreira com 10m de comprimento; c) barreira com 20m de comprimento

As representações esquemáticas obtidas permitem visualizar um bom nível de atenuação sonora gerada pela barreira. Sendo que, quanto maior o comprimento da barreira maior é o nível de atenuação notada, como se pode verificar pela homogeneização da cor verificada figura c).

### 5.1.2 Barreira composta por cilindros

Estudou-se agora uma configuração composta por cilindros dispersores dispostos segundo uma estrutura periódica. Para a mesma frequência (1000Hz) procurou-se obter os níveis de atenuação gerados pela barreira à medida que se foram aumentando o número de filas de cilindros. A Figura 5.3 evidencia os resultados obtidos.

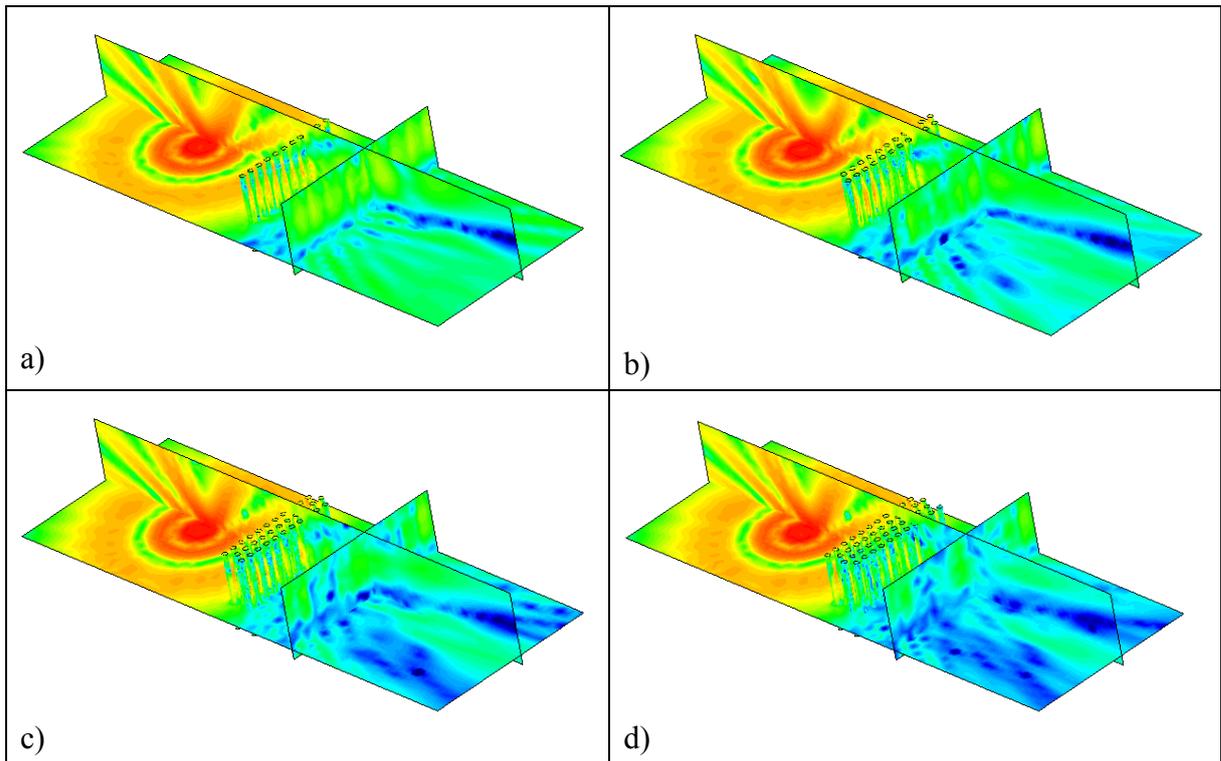


Figura 5.3 - Representação esquemática dos resultados obtidos para barreiras compostas com cilindros dispersores e para uma frequência de 1000Hz: a) Barreira com 1 fila de cilindros; b) Barreira com 2 filas de cilindros; c) Barreira com 3 filas de cilindros; d) Barreira com 4 filas de cilindros

A barreira a) foi discretizada em 13112 elementos, a barreira b) em 26224 elementos, a barreira c) em 39336 elementos e a barreira d) em 52448 elementos.

Como era expectável, os resultados obtidos permitem visualizar uma maior atenuação dos níveis sonoros à medida que se aumenta o número de filas na constituição da barreira uma vez que ao atravessar a barreira as ondas sonoras incidem sobre um maior número de elementos.

### 5.1.3 Barreira composta por meios cilindros

Com o intuito de estudar diferentes soluções para a barreira baseada no conceito de cristal sónico, considerou-se uma configuração composta por meios cilindros. Esta solução tem particular interesse, uma vez que permite uma redução de material aquando da construção da barreira. Foram estudadas duas situações diferentes para este caso, uma em que a face curva estava virada para a fonte e outra em que estava a face reta. Na Figura 5.4 estão presentes os resultados obtidos para as configurações com 3 e 4 filas para ambas as situações. Mais uma vez foi considerada uma frequência de 1000Hz.

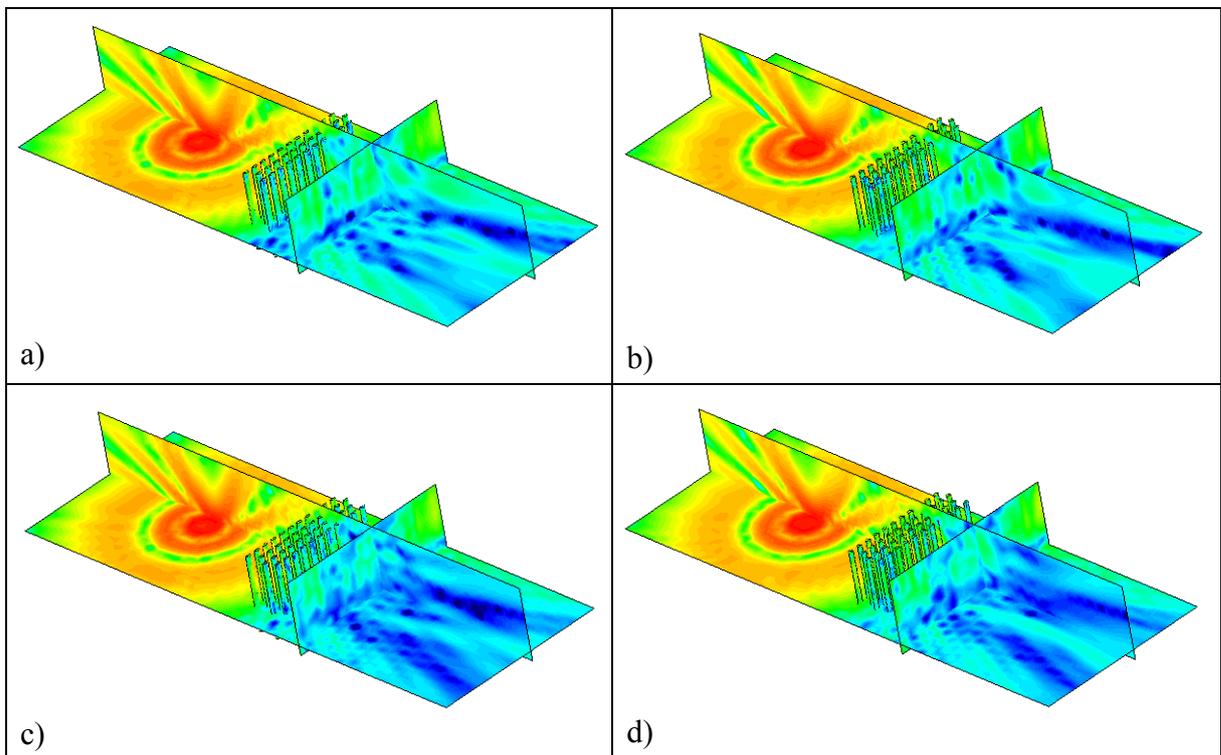


Figura 5.4 - Representação esquemática dos resultados obtidos para barreiras compostas por meios cilindros dispersores e para uma frequência de 1000Hz: a) Barreira com 3 filas de meios cilindros com a face reta para a fonte; b) Barreira com 3 filas de meios cilindros com a face curva para a fonte; c) Barreira com 4 filas de meios cilindros com a face reta para a fonte; d) Barreira com 4 filas de meios cilindros com a face curva para a fonte

Numa primeira análise, tomando em consideração as soluções constituídas para a mesma tipologia de rotação, os resultados mostram uma evidente melhoria aquando do aumento do número de elementos justificada pelo aumento de obstáculos à propagação sonora. Comparando agora as diferentes soluções, não é notória uma diferença significativa entre as duas configurações, no entanto a configuração com os meios cilindros com a face reta direcionada para a fonte apresenta melhores resultados.

#### 5.1.4 Barreira composta por meios cilindros rodados

Continuando com configurações compostas por meios cilindros, impôs-se agora uma rotação aos elementos dispersores. Num primeiro caso foram rodados 180° alguns meios cilindros e intercalados com os que não obtiveram rotação. No segundo caso, foram rodados, por ordem de disposição na fila 90°. A Figura 5.5 evidencia as rotações impostas aos meios cilindros.

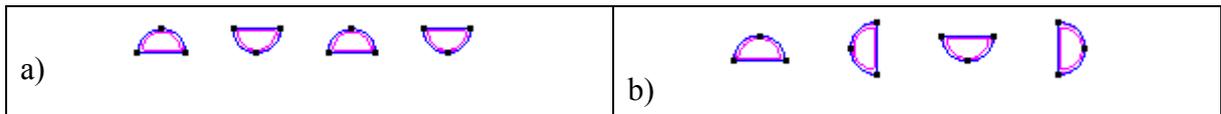


Figura 5.5 - Representação esquemática da rotação imposta aos meios cilindros: a) Meio cilindro rodado 180°; b) Meio cilindro rodado 90°

Na Figura 5.6 estão presentes os resultados obtidos para barreiras compostas por 2 e 3 filas, tanto para o caso do meio cilindro ser rodado 180° como para o caso de ser rodado 90°.

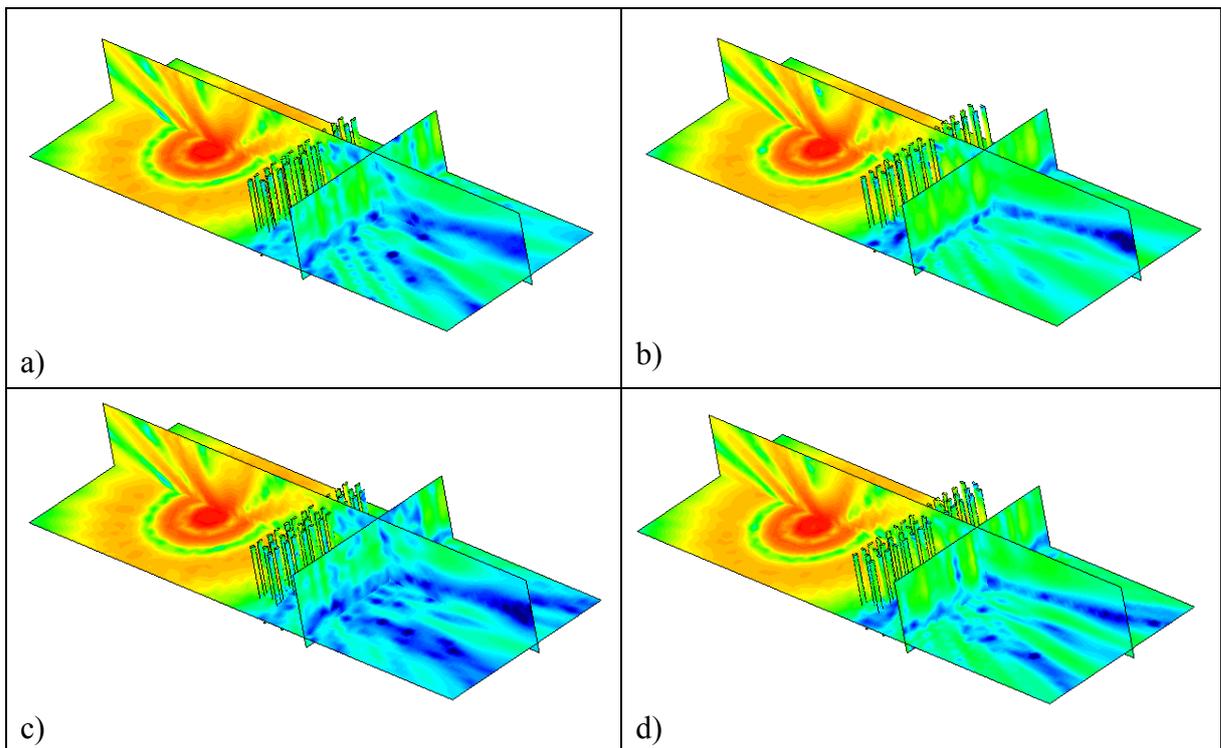


Figura 5.6 - Representação esquemática dos resultados obtidos para barreiras compostas por meios cilindros dispersores e para uma frequência de 1000Hz: a) Barreira com 2 filas de meios cilindros rodados 180°; b) Barreira com 2 filas de meios cilindros rodados 90°; c) Barreira com 3 filas de meios cilindros rodados 180°; d) Barreira com 3 filas de meios cilindros rodados 90°

A figura anterior permite efetuar dois tipos de análise. Numa primeira fase, considerando as barreiras com a mesma tipologia de rotação, podemos concluir que em ambos os casos o aumento de elementos constituintes da barreira permite gerar níveis de atenuação superiores. Numa segunda fase, comparando as soluções com meios cilindros rodados 180° e 90°, podemos verificar que a primeira opção se afigura mais eficaz atendendo ao grau de atenuação gerado.

### 5.1.5 Barreira composta por paralelepípedos

Procurou-se estudar, ainda, diferentes configurações geométricas para os dispersores, não sendo apenas cilíndricos. Assim, neste caso, optou-se por considerar uma configuração paralelepipedica. A Figura 5.7 apresenta os resultados obtidos para a configuração considerada tendo em conta que a situação a) está discretizada em 11000 elementos, a situação b) em 22000 elementos, a c) em 33000 e a situação d) em 44000 elementos.

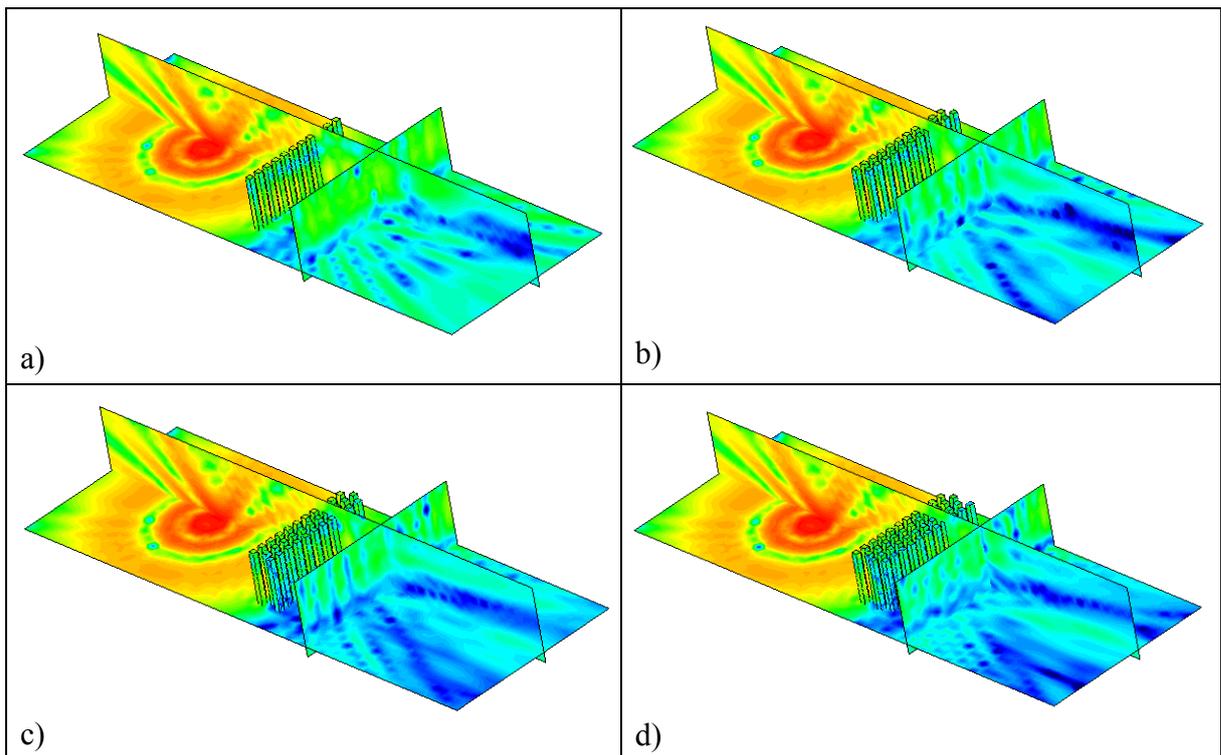


Figura 5.7 - Representação esquemática dos resultados obtidos para barreiras compostas com paralelepípedos dispersores e para uma frequência de 1000Hz: a) Barreira com 1 fila de paralelepípedos; b) Barreira com 2 filas de paralelepípedos; c) Barreira com 3 filas de paralelepípedos; d) Barreira com 4 filas de paralelepípedos

Tal como foi feito para as configurações anteriores, foram sendo acrescentadas mais filas, e consequentemente mais elementos, à barreira inicial constituída por 11 paralelepípedos espaçados entre si. Através da figura anterior é possível verificar um aumento significativo dos níveis de atenuação sonora acompanhado do aumento do número de elementos da barreira.

### 5.1.6 Diferentes composições da barreira

Considerando agora quatro tipologias diferentes, compararam-se os resultados obtidos, para uma frequência emitida de 1000Hz, por forma a verificar qual a configuração que se augura mais eficaz. A Figura 5.8 apresenta os resultados para uma barreira tradicional de 5 metros de comprimento, para uma barreira constituída por 3 filas de cilindros dispersores, para uma barreira com 3 filas de meios cilindros e ainda para uma barreira de 3 filas de paralelepípedos.

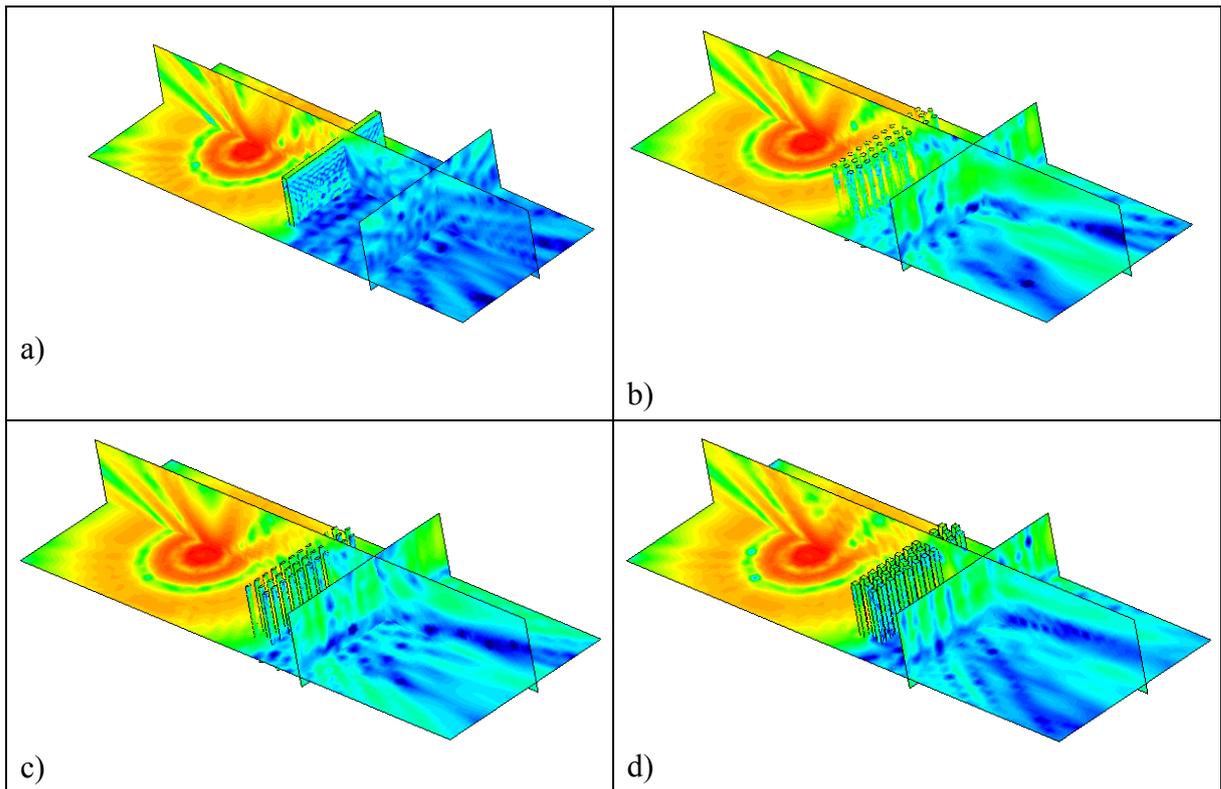


Figura 5.8 - Representação esquemática dos resultados obtidos para uma frequência de 1000Hz: a) Barreira convencional de 5 metros; b) Barreira com 3 filas de cilindros; c) Barreira com 3 filas de meios cilindros; d) Barreira com 3 filas de paralelepípedos

Como é possível visualizar, a barreira acústica tradicional de 5 metros afigura-se como a que gera uma maior atenuação acústica, de entre as quatro tipologias consideradas.

Considerando agora apenas as barreiras com estrutura periódica, a barreira composta por cilindros completos parece ser a mais eficaz, no entanto tanto a barreira com meios cilindros como com paralelepípedos apresentam resultados satisfatórios.

## 5.2 Para a mesma configuração da barreira variando a frequência

Com o intuito de procurar visualizar da melhor forma o impacto que a frequência gerada pela fonte gera no comportamento da barreira, apresenta-se agora um estudo comparativo entre os resultados obtidos para as diferentes frequências estudadas (400Hz, 500Hz, e 1000Hz) considerando a mesma configuração da barreira. Inicialmente, apenas foram consideradas as frequências de 500Hz e de 1000Hz, no entanto, no seguimento dos estudos realizados que apontavam para a existência de uma “bandgap” na banda de frequências dos 400Hz, repetiu-se o mesmo procedimento para esta frequência no caso de algumas configurações.

### 5.2.1 Barreira tradicional de 10 metros de comprimento

Para o caso da barreira tradicional, optou-se por comparar os resultados obtidos para as diferentes frequências para a configuração intermédia (10 metros). Os resultados obtidos são apresentados na Figura 5.9.

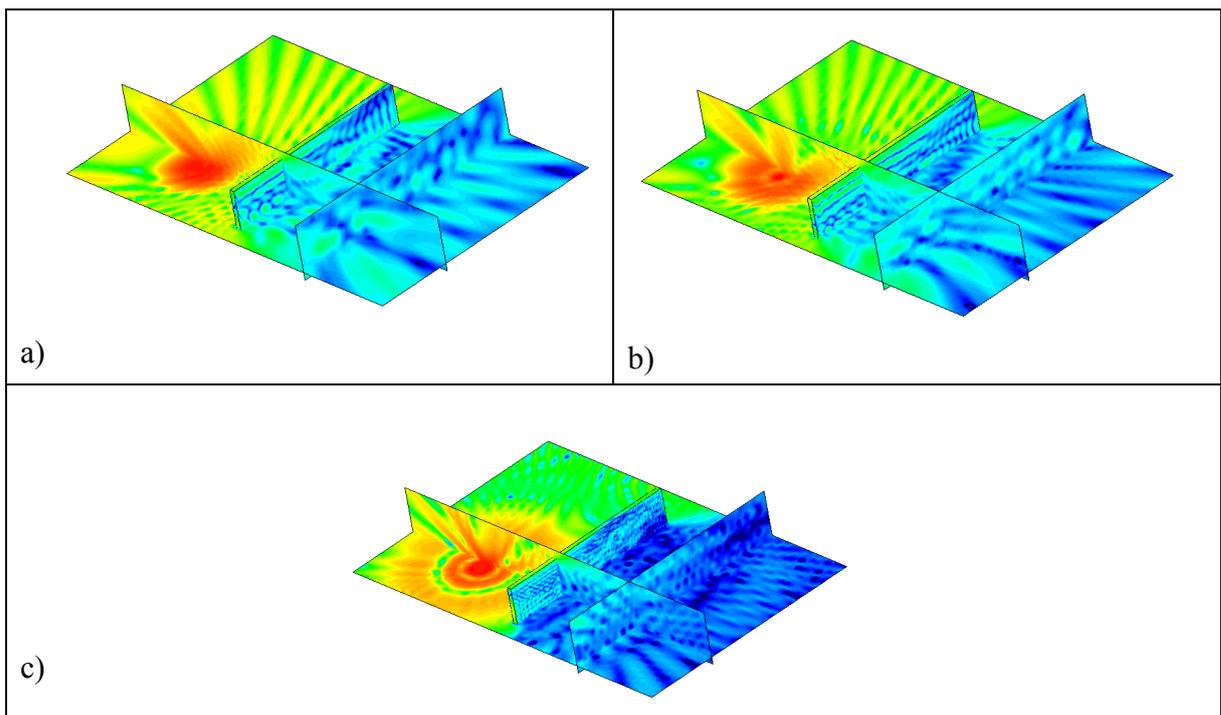


Figura 5.9 - Representação esquemática dos resultados obtidos para uma barreira tradicional de 10 metros de comprimento: a) Para uma frequência de 400Hz; b) Para uma frequência de 500Hz; c) Para uma frequência de 1000Hz

Os resultados mostram que uma barreira acústica tradicional é capaz de gerar níveis de atenuação sonora significativos. Sendo que, aumentando a frequência emitida, aumenta também a atenuação gerada.

### 5.2.2 Barreiras compostas por 3 filas de cilindros

Estudou-se agora a barreira constituída 3 filas de cilindros dispersores, para as frequências de 400Hz, 500Hz e 1000Hz. Os resultados obtidos estão presentes na Figura 5.10.

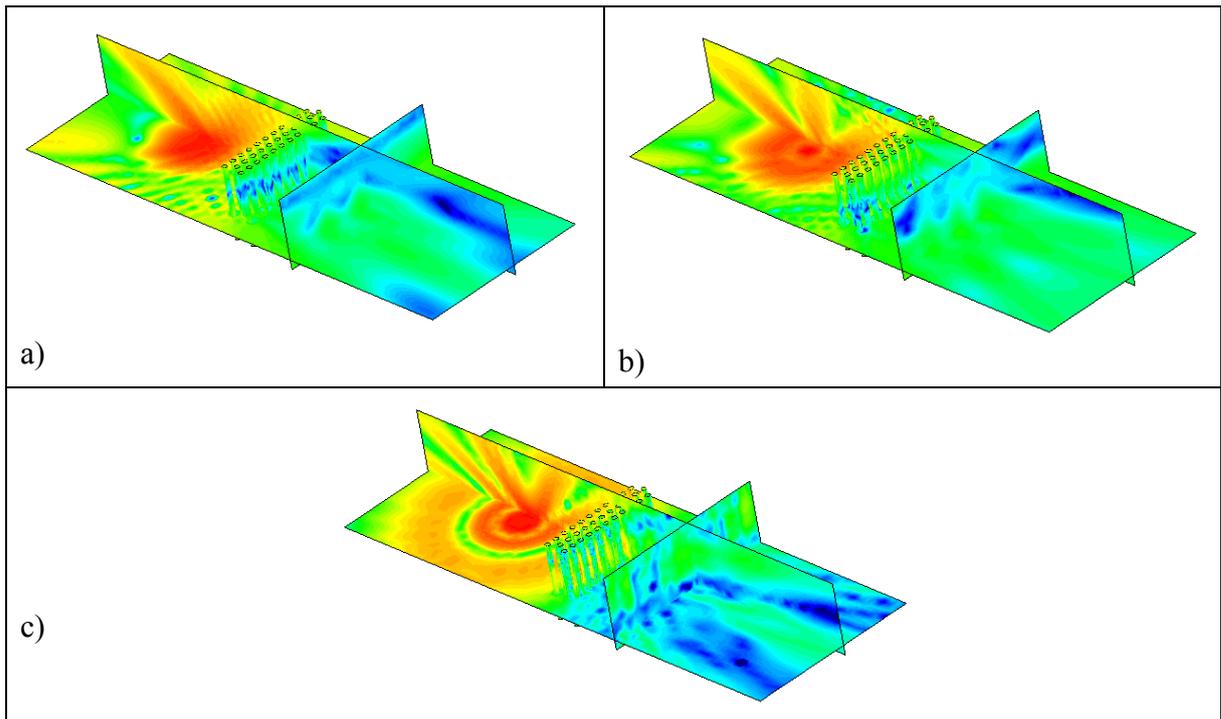


Figura 5.10 - Representação esquemática dos resultados obtidos para uma barreira com 3 filas de cilindros: a) Para uma frequência de 400Hz; b) Para uma frequência de 500Hz; c) Para uma frequência de 1000Hz

A configuração considerada nutre especial interesse no que diz respeito a averiguar se e existência de uma “bandgap” na gama de frequência dos 400Hz revelada em estudos realizados anteriormente era notória também aqui. Assim, comparando as situações para 400Hz e 500Hz podemos verificar que efetivamente existe uma maior atenuação sonora para 400Hz do que para 500Hz. Observando ainda, a configuração para 1000Hz é visível que a barreira gera níveis de atenuação sonora superiores quando comparadas com as restantes frequências em estudo, sendo assim provável a existência de uma “bandgap” também para esta banda de frequências.

### 5.2.3 Barreiras constituídas por meios cilindros

Voltando agora à configuração de uma barreira constituída por meios cilindros. Mais uma vez se estudaram as duas soluções consideradas anteriormente, com a parte reta ou com a parte curva direcionada para a fonte. A Figura 5.11 revela os resultados obtidos para as duas configurações e para as bandas de frequência dos 500Hz e de 1000Hz.

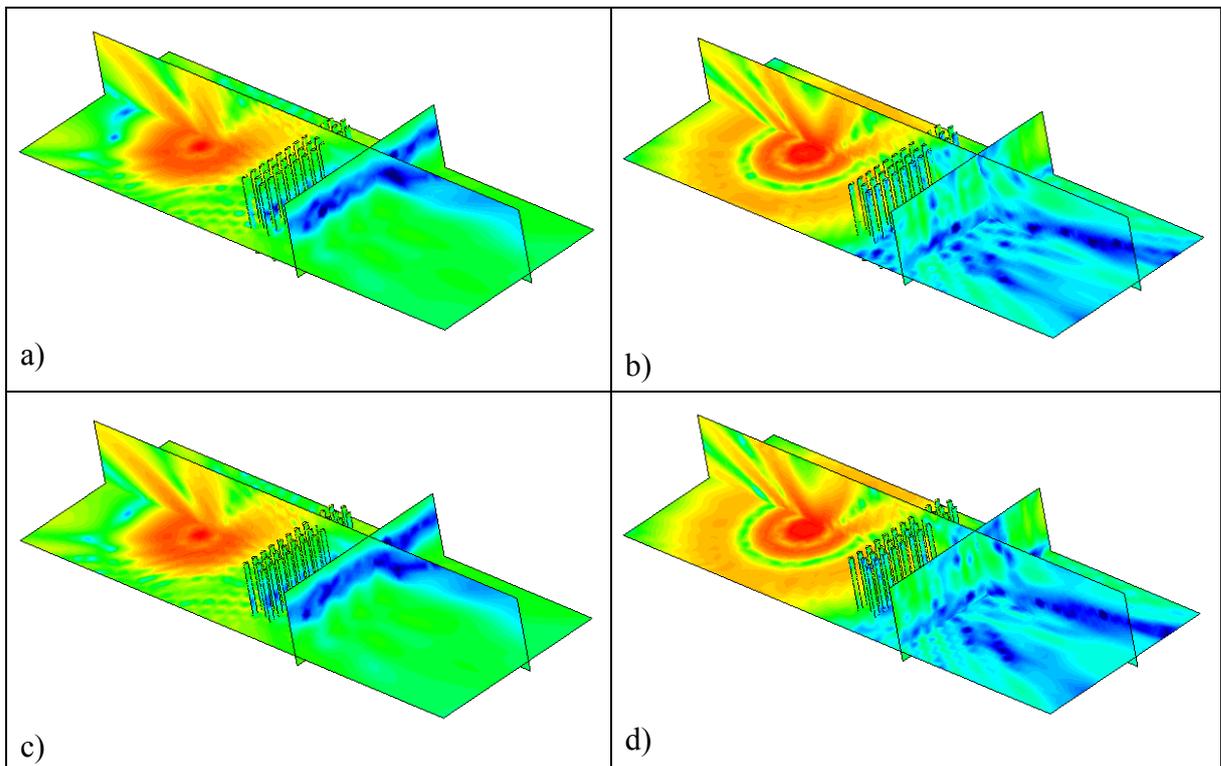


Figura 5.11 - Representação esquemática dos resultados obtidos para barreiras compostas por meios cilindros dispersores: a) Barreira com 3 filas de meios cilindros com a face reta para a fonte para uma frequência de 500Hz; b) Barreira com 3 filas de meios cilindros com a face reta para a fonte para uma frequência de 1000Hz; c) Barreira com 3 filas de meios cilindros com a face curva para a fonte para uma frequência de 500Hz; d) Barreira com 3 filas de meios cilindros com a face curva para a fonte para uma frequência de 1000Hz

Como é possível verificar através da figura anterior, a forma da face que está direcionada para a fonte não afeta de maneira significativa os resultados obtidos. Fazendo uma comparação entre as duas frequências adotadas para esta configuração, é notório que a banda dos 1000Hz gera um nível de atenuação muito superior à banda dos 500Hz.

#### 5.2.4 Barreiras constituídas por 3 filas de paralelepípedos

Considerando, uma vez mais, a configuração da barreira constituída por dispersores paralelepípedicos comparam-se os resultados obtidos para as gamas de frequência dos 500Hz e

dos 1000Hz. A Figura 5.12 apresenta a representação esquemática do comportamento da barreira para as frequências consideradas.

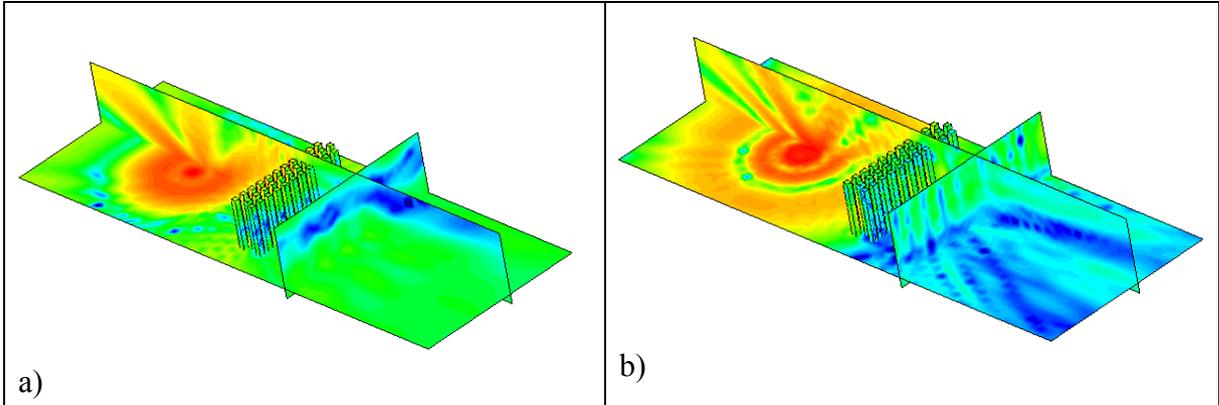


Figura 5.12 - Representação esquemática dos resultados obtidos para barreiras constituídas 3 filas de paralelepípedos: a) Para 500Hz; b) Para 1000Hz

À semelhança das soluções consideradas anteriormente, também para esta é notório que a barreira gera níveis de atenuação superiores para a frequência de 1000Hz.

## 6 CONCLUSÃO

Vários estudos têm sido realizados tendo em vista uma otimização de dispositivos de atenuação do ruído de tráfego. A escolha de barreiras acústicas tradicionais é o método de mitigação de ruído de tráfego mais comum. No entanto estas apresentam algumas desvantagens, tais como o impacto visual e ambiental que geram ou até mesmo o facto de a falta de manutenção poder gerar uma degradação precoce da barreira, diminuindo assim os seus níveis de eficácia.

Nas últimas décadas, têm sido alvo de intensos estudos barreiras acústicas baseadas no conceito de cristal sónico. Este tipo de barreiras apresenta uma estrutura periódica constituída por um arranjo de dispersores espaçados entre si.

Uma barreira com estrutura periódica tem como principal vantagem o facto de ter a capacidade de inibir a propagação do som em determinadas bandas de frequências, denominadas “bandgaps”. Ao conseguir identificar as bandas de frequência que são inibidas para cada arranjo de dispersores será possível obter um dispositivo de atenuação sonora mais eficaz para a banda de frequência que se pretende inibir, continuando a possibilitar a passagem das ondas sonoras nas restantes bandas.

Na presente dissertação, foram estudadas as barreiras acústicas com estrutura periódica em duas fases.

Numa primeira fase foram realizados ensaios experimentais. No interior de um espaço semianecóico foram colocados cilindros dispersores de PVC, numa escala de 1/10, e foram arranjados segundo uma disposição triangular e retangular. Para cada disposição foram ainda estudadas algumas variantes, que consistiram principalmente na subtração de cilindros da fila intermédia da barreira. Os ensaios foram realizados na presença e na ausência da barreira para assim ser possível obter o gráfico de perda por inserção.

Os resultados obtidos experimentalmente foram então comparados com os resultados obtidos por modelos de cálculo numérico 2D e 3D. Através dos gráficos gerados pelo código implementado em Matlab foi possível concluir que para a maioria das configurações testadas era visível a existência de uma “bandgap” numa banda de frequências em torno dos 4000Hz.

Desta primeira fase foi ainda possível averiguar de que forma a configuração da barreira influenciava a atenuação sonora gerada pela barreira. Neste ponto concluiu-se que, como era expectável, um menor número de cilindros dispersores conduziu também a uma menor eficácia da barreira uma vez que a estrutura continha menos obstáculos à propagação das ondas sonoras.

Concluiu-se ainda que os níveis de atenuação sonora gerados por uma configuração triangular da barreira eram superiores aos da configuração retangular.

Numa segunda fase, com o auxílio do software GID e do código efetuado em Matlab, foi realizado um estudo paramétrico de diferentes soluções de barreiras acústicas baseadas no conceito de cristal sónico.

Nesta fase, partindo do conceito de cristal sónico foram projetadas diferentes configurações de barreiras acústicas que diferiam entre si, não só no número de dispersores mas também na sua configuração geométrica. Não foram apenas consideradas barreiras com dispersores cilíndricos, sendo testados também dispersores paralelepípedicos e em forma de cilindro ressoador. É de realçar que foram também sujeitas ao mesmo estudo as barreiras acústicas ditas tradicionais. Estas barreiras foram discretizadas em malhas quadriculares e foram realizadas simulações computacionais.

Através dos resultados obtidos pela modelação é possível retirar algumas conclusões, não só pela comparação das diferentes configurações das barreiras mas também pela comparação dos resultados obtidos para as três diferentes frequências emitidas, 400Hz, 500Hz e 1000Hz.

Primeiramente, fez-se um estudo comparativo da atenuação gerada pela barreira para uma mesma frequência, 1000Hz. Neste ponto foi possível concluir que a atenuação gerada pela barreira estava diretamente relacionada com o número de elementos dispersores que continha, verificando-se uma maior eficácia para os casos onde o número de filas de elementos era superior.

Fazendo uma comparação entre os diversos tipos geometrias dos elementos dispersores, e considerando também as barreiras acústicas tradicionais, para a frequência de 1000Hz, concluiu-se que a barreira dita tradicional se afigura como a que gera maiores atenuações sonoras. No que diz respeito às barreiras acústicas baseadas no conceito de cristal sónico, a configuração cilíndrica é aquela que se apresenta mais eficaz.

Por forma a verificar se a existência de uma “bandgap” era também notada através da modelação foram testadas as barreiras para diferentes frequências. Tal como era previsto, considerando os estudos realizados anteriormente, a banda de frequência dos 400Hz gerou níveis de atenuação sonora superiores aos registados para os 500Hz. Foi ainda possível

visualizar uma maior atenuação gerada para a frequência dos 1000Hz comparativamente com os 500Hz.

Para dar continuidade ao trabalho desenvolvido, seria interessante efetuar um estudo para as mesmas configurações da barreira acústica presentes nesta dissertação, variando o tipo de material que constitui os dispersores verticais, por exemplo, adotando um material mais absorvente.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aa, B. v. d. e Forssén, J., 2013. "Upward refraction of sound propagating outdoors by a graded index sonic crystal noise barrier". *Applied Acoustics*, Volume 74, pp. 89-101.

Babino, A., Carabedo, F. e Rodriguez, J., s.d. "Medición de la brecha entre bandas de un cristal sónico".

CETUR, 1980. "Prevision des niveaux sonores".

Chen, Y.-Y. e Ye, Z., 2001. "Acoustic Attenuation by Two-dimensional Arrays of Rigid Cylinders".

FHWA, 1998. The original FHWA Traffic Noise Model.

Freitas., E. F. e Trabulo, L., 2007. "Desempenho de Barreiras Acústicas – dois métodos de avaliação".

Fuster-Garcia, E., Romero-García, V., Sánchez-Pérez, J. V. e García-Raff, L. M., 2007. "Targeted band gap creation using mixed sonic crystal arrays including resonators and rigid scatterers". *Applied Physics Letters*, Volume 90.

Gajardo, C. P., Godinho, L., Amado-Mendes, P. e Morillas, J. M. B., 2015. "Numerical Analysis of Acoustic Barriers with a Diffusive Surface Using a 2.5D Boundary Element Model". *Journal of Computational Acoustics*, Volume 23.

García-Chocano, V. M., Cervera, F., Cabrera, S. e Sánchez-Dehesa, J., 2015. "Acoustic barriers based on lattices of absorptive cylinders". *Noise and Vibration - Emerging Technologies*, pp. 1-9.

Godinho, L., Amado-Mendes, P., Santos, P. G. e Cordeiro, M., 2015. "An efficient and accurate numerical model for the 3D analysis of sonic crystals" *ICSV22*, pp. 12-16.

Godinho, L., António, J. e Tadeu, A., 2002. "Sound propagation around rigid barriers laterally confined by tall buildings". *Applied Acoustics*, pp. 595-609.

Kessissoglou, N. et al., 2015. "Acoustic Performance of sonic crystal noise barriers using a quasi-periodic boundary element technique". *Noise and Vibration - Emerging Technologies*, pp. 1-11.

Kim, K. H. & Yoon, G. H., 2014. "Optimal rigid and porous material distribution for noise barrier by acoustic topology optimization". *Journal of Sound and Vibration*.

Li, F.-L., Wang, Y.-S., Zhang, C. e Yu, G.-L., 2013. "Bandgap calculations of two-dimensional solid–fluid phononic crystals with the boundary element method". *Wave Motion*, Volume 50, pp. 525-541.

Martínez-Sala, R. et al., 2006. "Control of noise by trees arranged like sonic crystals". *Journal of Sound and Vibration*, Volume 291, pp. 100-106.

Martínez-Sala, R. et al., 1995. "Sound attenuation by sculpture". Volume 378.

Martins, M. et al., 2013. "Insertion loss provided by a periodic structure - Numerical and experimental evaluation". *Tecni Acustica*.

Oldham, D. J. e Egan, C. A., 2015. "A Parametric investigation of tge performance of multiple edge higway noise barriers and proposals for design guidance". *Applied Acoustics* , pp. 139-152.

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

Sánchez-Dehesa, J. et al., 2011. "Noise control by sonic crystal barriers made of recycled materials". *The Journal of the Acoustical Society of America*, Volume 129, pp. 1173-1183.

Sánchez-Perez, J. V. et al., 2015. "Noise certification of a Sonic Crystal Acoustic Screen designed using a triangular lattice according to the Standards EN 1793 ( -1 ; -2 ; -3 ):1997". *NAG*, Volume 1793, pp. 2357-2361.

Sanchez-Perez, J. V. et al., 2002. "Acoustic barriers based on periodic arrays of scatterers". *Applied Physics Letters*, Volume 81, pp. 5240-5242.

Santos, P. et al., 2014. "Insertion Loss Provided by sonic crystal type barrier - Experimental and numerical evaluaton on a reduce scale model". *Tecni Acustica*.

Santos, P. G., Carbajo, J., Godinho, L. e Ramis, J., 2014. "Sound Propagation Analysis on Sonic Crystal Elastic Structures using the Method of Fundamental Solutions (MFS)". pp. 1-28.

Tadeu, A. et al., 2010. "Acústica Aplicada". Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

Watts, G. & Morgan, P., 2007. "Measurement of airborne sound insulation of timber noise barriers: Comparison of in situ method CEN/TS 1793-5 with laboratory method EN 1793-2". *Applied Acoustics*, Volume 68, pp. 421-436.

Watts, G. R., 1997. "In Situ Method for Determining the Transmission Loss of Noise Barriers". *Applied Acoustics* , pp. 421-438.

WHO, 2000. "Transport, Environment and Health". Genebra

WHO, 2011. "Burden of disease from environmental noise". Genebra