



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Pedro Miguel Alves Matias

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE BARREIRAS  
ACÚSTICAS SUSTENTÁVEIS COM BASE NO CONCEITO  
DE CRISTAIS SÓNICOS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções, orientada pelo Professor Doutor Luís Manuel Cortesão Godinho e pelo Professor Doutor Paulo Jorge Rodrigues Amado Mendes e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Julho de 2020



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

Pedro Miguel Alves Matias

# **Estudo do comportamento de barreiras acústicas sustentáveis com base no conceito de cristais sónicos**

**Study of the behavior of sustainable acoustic barriers based on the concept of sonic crystals**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções,  
orientada pelo Professor Doutor Luís Manuel Cortesão Godinho e pelo Professor Doutor Paulo Jorge Rodrigues Amado Mendes

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Julho de 2020

## AGRADECIMENTOS

Concluída esta etapa, não poderia deixar de agradecer a todas as pessoas que, de uma ou outra forma, contribuíram para o seu sucesso.

Ao Professor Doutor Luís Godinho e ao Professor Doutor Paulo Amado Mendes, por toda a dedicação, interesse e disponibilidade ao longo destes meses.

A todos os professores e funcionários do DEC com os quais contactei diariamente nos últimos anos.

A todos os amigos que levo desta cidade que estiveram sempre presentes nos melhores e piores momentos.

Ao Mário e ao Ruben, amigos e colegas de casa, que estiveram sempre presentes e foram a “família” com quem vivi estes anos.

A toda a minha família, em especial aos meus pais, avós e Daniel, por fazerem de mim a pessoa que sou e por sempre acreditarem em mim e me apoiarem incondicionalmente. Ao avô Manel que estaria orgulhoso de mim.

À Bia, por ser a pessoa especial que dá mais sentido a todas as minhas conquistas.

---

## RESUMO

Ao longo dos últimos anos têm sido desenvolvidos vários trabalhos para estudar a atenuação sonora provocada por estruturas periódicas, às quais se dá o nome de cristais sónicos.

Os cristais sónicos consistem na distribuição periódica de elementos semelhantes ao longo de duas ou três direções, formando uma matriz que se repete no espaço. Por efeito de combinação construtiva/destrutiva de ondas sonoras, é gerada atenuação sonora em intervalos de frequência específicos, aos quais se dá o nome de *band gap*. Alterando a distribuição destes elementos e/ou a sua geometria, é possível fazer variar o intervalo de frequências em que se verifica essa atenuação sonora.

Pretende-se, aqui, aprofundar o estudo da aplicação deste conceito em barreiras acústicas para atenuação sonora, procurando-se definir novas geometrias de barreiras para a mitigação do ruído de tráfego. Pretende-se contribuir para o desenvolvimento de um conceito que possa ser materializado com soluções construtivas simples, usando, por exemplo, troncos de madeira, provenientes de operações de limpeza de florestas, como dispersores do cristal sónico.

Neste trabalho são avaliadas diversas geometrias utilizando um modelo numérico de elementos finitos, testando diferentes possibilidades como a associação de ressoadores de Helmholtz a cristais sónicos ou o uso de dispersores não simétricos, avaliando o efeito da sua rotação. De modo a verificar a validade dos modelos utilizados, realizaram-se ainda ensaios experimentais em escala reduzida em câmara semi-anecoica existente no DEC-FCTUC. Por fim é sugerida uma ideia/método para a conceção desta tecnologia.

Tendo por base a análise de estudos já realizados e os resultados apresentados neste trabalho, pode-se afirmar que as barreiras acústicas com cristais sónicos se apresentam potencial para o desenvolvimento de boas soluções para, a curto/médio prazo, virem a ser utilizadas na mitigação do ruído de tráfego.

**Palavras-chave:** Barreira Acústica, Cristal Sónico, Atenuação Sonora

---

Esta tese foi desenvolvida no âmbito do Projeto POCI-01-0247-FEDER-033691 – HLS - *Hybrid Log Shield*, financiado por fundos FEDER, através do programa Portugal-2020 (PT2020), no âmbito do sistema SII&DT, e pelo programa POCI.

Esta tese foi igualmente apoiada pela FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito da unidade de investigação “*Institute for sustainability and innovation in structural engineering - ISISE*” (UIDP/04029/2020), e através do Programa Operacional Regional CENTRO2020, no âmbito do projeto CENTRO-01-0145-FEDER-000006 (SUSpENsE).

**FCT** Fundação para a Ciência e a Tecnologia

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR



---

## ABSTRACT

Over the past few years, several studies have been developed to study the sound attenuation caused by periodic structures, which are called sonic crystals.

Sonic crystals consist of periodic distributions of similar elements along two or three directions, forming a matrix that is repeated in space. As a result of the constructive / destructive combination of sound waves, sound attenuation is generated at specific frequency intervals, which are called “*band gaps*”. By changing the distribution of these elements and / or their geometry, it is possible to vary the frequency range in which this sound attenuation occurs.

It is intended, here, to deepen the study of the application of this concept in acoustic barriers for sound attenuation, seeking to define new barrier geometries for the mitigation of traffic noise. It is intended to contribute to the development a concept that can be materialized with simple construction solutions, using, for example, wood logs, from forest cleaning operations, as sonic crystal scatterers.

In this work, several geometries are evaluated using a finite element numerical model, testing different possibilities such as the association of Helmholtz resonators with sonic crystals or the use of non-symmetric scatterers, evaluating the effect of their rotation. In order to verify the validity of the models used, experimental tests were also carried out on small scale in a semi-anechoic chamber at DEC-FCTUC. Finally, a possible strategy for the implementation of this technology is suggested.

Based on the analysis of studies already carried out and the results presented in this work, it can be said that the acoustic barriers with sonic crystals present potential for the development of good solutions for the short / medium term to be used to mitigate traffic noise.

**Key words:** Acoustic Barrier, Sonic Crystal, Sound Attenuation

---

This work was developed within the scope of the project with reference POCI-01-0247-FEDER-033691 – HLS - Hybrid Log Shield, supported by FEDER funds, through Portugal-2020 (PT2020) Programme, within the scope of SII&DT System, and by POCI Programme.

This work was also financed by FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., within the scope of the research unit “Institute for sustainability and innovation in structural engineering - ISISE” (UIDP/04029/2020), and by the Regional Operational Programme CENTRO2020 within, the scope of project CENTRO-01-0145-FEDER-000006 (SUSpENsE).

**FCT** Fundação para a Ciência e a Tecnologia

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR



---

## ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Enquadramento geral.....	1
1.2 Objetivos da dissertação .....	2
1.3 Estrutura da Dissertação .....	3
2 ESTADO DA ARTE.....	4
2.1 Considerações iniciais .....	4
2.2 Cristais sônicos aplicados a barreiras acústicas .....	7
3 MODELAÇÃO NUMÉRICA .....	19
3.1 Formulação .....	19
3.1.1 Conceitos fundamentais sobre a propagação sonora em fluidos.....	19
3.1.2 Método dos elementos finitos (FEM).....	20
3.2 Aspetos gerais relativos às simulações realizadas .....	22
3.3 Simulação do desempenho das barreiras acústicas - Influência da geometria do cristal sónico .....	23
3.3.1 Influência da variação do raio dos elementos .....	24
3.3.2 Influência da variação do espaçamento entre os elementos.....	27
3.3.3 Influência do número de elementos.....	29
3.4 Simulação do desempenho das barreiras acústicas - Influência da forma dos elementos do cristal sónico .....	31
3.4.1 Elementos com forma de semicírculo.....	31
3.4.2 Elementos triangulares.....	33
3.4.3 Elementos quadrados.....	35
3.4.4 Elementos U .....	40
3.4.5 Elementos HEB .....	41
3.5 Simulação do desempenho das barreiras acústicas - Influência da aplicação de ressoadores de Helmholtz nos elementos do cristal sónico.....	43
3.5.1 Elementos quadrados .....	44
3.5.2 Elementos com forma circular .....	48
4 ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	52
4.1 Objetivo .....	52
4.2 Equipamento utilizado.....	52
4.3 Amostras .....	53
4.4 Procedimento de Ensaio .....	54
4.5 Definição da configuração de ensaio.....	57
4.6 Resultados.....	61

---

4.6.1 Configuração do Cristal Sónico composto por três elementos espaçados a 2,83cm .....	62
4.6.2 Configuração do Cristal Sónico composto por quatro elementos espaçados a 2,83cm .....	63
4.6.3 Configuração do Cristal Sónico composto por três elementos espaçados a 3,33cm .....	64
4.6.4 Configuração do Cristal Sónico composto por quatro elementos espaçados a 3,33cm .....	65
4.7 Discussão dos resultados .....	66
5 SOLUÇÃO CONSTRUTIVA .....	68
6 CONCLUSÕES .....	73
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	75

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação esquemática do funcionamento de uma barreira acústica (adaptado de Martins, 2014).....	4
Figura 2.2 – Propagação do ruído rodoviário devido uma fonte pontual ou linear (adaptado de Martins, 2014). .....	6
Figura 2.3 – Escultura de Eusebio Sempere, em exposição na Fundação Juan March em Madrid, 1995 (adaptado de Martínez-Sala <i>et al.</i> , 1995).....	7
Figura 2.4 – Resultados do ensaio realizado por Martínez-Sala <i>et al.</i> na escultura de Eusebio Sempere (adaptado de Martínez-Sala <i>et al.</i> , 1995).....	8
Figura 2.5 – Diferentes tipos de cristais sônicos tendo em conta o seu arranjo periódico (adaptado de Martins, 2014).....	8
Figura 2.6 – a) Cristal sónico com configuração quadrada; b) Cristal sónico com configuração triangular (adaptado de Martins <i>et al.</i> , 2013). .....	9
Figura 2.7 – Mapas de nível sonoro para uma frequência de 1500Hz com cristais sônicos com dispersores com diferentes formas (adaptado de Chong, 2012).....	10
Figura 2.8 – Curvas IL dos cristais sônicos apresentados na figura anterior (adaptado de Chong, 2012). .....	11
Figura 2.9 – Curvas IL de cristais sônicos com características diferentes: *D = 15,35cm e ff = 0,046; O D = 15,35cm e ff = 0,09; Δ D = 30,70cm e ff = 0,046 (adaptado de Jean e Defrance, 2015). .....	12
Figura 2.10 – Influência do número de fiadas de dispersores do cristal sónico na atenuação sonora (adaptado de Morandi <i>et al.</i> , 2016).....	13
Figura 2.11 – Exemplos de ressoadores de Helmholtz estudado por Lee <i>et al.</i> (adaptado de Lee <i>et al.</i> , 2018).....	14
Figura 2.12 – Curvas IL de cristais sônicos com diversas espessuras no revestimento aplicado nos dispersores comparadas com a curva IL de uma barreira acústica tradicional (adaptado de Sánchez-Dehesa <i>et al.</i> , 2011). .....	15
Figura 2.13 – Configuração da “barreira composta” (adaptado de Koussa <i>et al.</i> , 2013).....	15
Figura 2.14 – Dispersores utilizados nas diversas “barreiras compostas” (adaptado de Koussa <i>et al.</i> , 2013).....	16
Figura 2.15 – Curvas IL de cada uma das “barreiras compostas” (adaptado de Koussa <i>et al.</i> , 2013). .....	16
Figura 2.16 – Barreira acústica com cristais sônicos ensaiada por Amado Mendes <i>et al.</i> (adaptado de Amado Mendes <i>et al.</i> , 2016).....	17
Figura 3.1 – Representação de uma onda plana incidente. ....	22
Figura 3.2 – Exemplo de geometria e respetiva malha de elementos finitos. ....	23

---



---

Figura 3.3 – a) Cristal sónico em avaliação composto por dois círculos de raio 4cm espaçados a 17cm; b) Curva IL obtida ao avaliar o desempenho deste cristal sónico. ....	24
Figura 3.4 – a) Cristal sónico em avaliação composto por dois círculos de raio 6cm espaçados a 17cm; b) Curva IL obtida ao avaliar o desempenho deste cristal sónico. ....	25
Figura 3.5 – a) Cristal sónico em avaliação composto por dois círculos de raio 8cm espaçados a 17cm; b) Curva IL obtida ao avaliar o desempenho deste cristal sónico. ....	26
Figura 3.6 – Curvas IL obtidas ao simular o desempenho dos elementos circulares de raio variável e espaçamento constante de 17cm. ....	27
Figura 3.7 – a) Cristal sónico em avaliação composto por dois círculos de raio 6cm espaçados a 15cm; b) Curva IL obtida ao avaliar o desempenho deste cristal sónico. ....	28
Figura 3.8 – a) Cristal sónico em avaliação composto por dois círculos de raio 6cm espaçados a 17cm; b) Curva IL obtida ao avaliar o desempenho deste cristal sónico. ....	28
Figura 3.9 – Curvas IL obtidas ao simular o desempenho dos elementos circulares com espaçamento variável e raio 6cm. ....	29
Figura 3.10 – Geometria dos cristais sónicos avaliados nestas simulações. ....	30
Figura 3.11 – Curvas IL obtidas ao simular o desempenho de elementos circulares iguais, variando apenas o número de elementos. ....	30
Figura 3.12 – a) Geometria do cristal sónico de referência composto por três elementos circulares de raio 6cm espaçados a 17cm; b) Curva IL do cristal sónico de referência. ....	31
Figura 3.13 – a) Geometria dos elementos semicirculares com a face plana voltada para a fonte; b) Geometria dos elementos semicirculares com a face plana voltada para o recetor. ....	32
Figura 3.14 – Curvas IL que representam o desempenho dos cristais sónicos com elementos de forma semicircular e do cristal sónico de referência. ....	32
Figura 3.15 – a) Geometria dos elementos triangulares com a face voltada para a fonte; b) Geometria dos elementos com a face voltada para o recetor. ....	34
Figura 3.16 – Curvas IL que representam o desempenho dos cristais sónicos com elementos de forma triangular e do cristal sónico de referência. ....	34
Figura 3.17 – a) Geometria dos elementos quadrados com 12cm de lado, Quad12; ....	36
b) Geometria dos elementos com forma de losango que resulta da rotação do Quad12; ....	36
c) Geometria dos elementos com forma de losango com 12cm de diagonal, Losango12. ....	36
Figura 3.18 – Curva IL do cristal sónico com os elementos quadrados com 12cm de lado com os vértices voltados para a fonte e os recetores. ....	36
Figura 3.19 – Curvas IL que representam o desempenho dos cristais sónicos com elementos de forma quadrada com 12cm tanto de lado como diagonal e do cristal sónico de referência. ....	37
Figura 3.20 – a) Geometria dos elementos quadrados com 10cm de lado: Quad10; ....	38
b) Geometria dos elementos que resultam da rotação do Quad10: Quad10//rodado; ....	38
c) Geometria dos elementos com forma de losango com 10cm de diagonal: Losango10. ....	38

---

Figura 3.21 – Curvas IL que representam o desempenho dos cristais sônicos com elementos de forma quadrada com 10cm, tanto de lado como diagonal, e do cristal sônico de referência...	39
Figura 3.22 – a) Elementos com a abertura voltada para a fonte, U10;.....	40
b) Elementos rodados 90°, U10//90; c) Elementos com a abertura voltada para os recetores, U10//180; d) Elementos rodados 270°, U10//270.....	40
Figura 3.23 – Curvas IL que representam o desempenho dos cristais sônicos com elementos em forma de U.....	41
Figura 3.24 – a) Elementos HEB120; b) Elementos HEB120 rodados.....	42
Figura 3.25 – Curvas IL que representam o desempenho dos cristais sônicos com elementos HEB120.....	42
Figura 3.26 – a) Geometria do cristal sônico “Solução Mista”; b) Curva IL do cristal sônico “Solução Mista” em comparação com a curva IL do cristal sônico de referência.....	43
Figura 3.27 – Geometria dos cristais sônicos com elementos quadrados com ressoadores de Helmholtz com a cavidade interior de 5cmx5cm e respetivas dimensões do gargalo.....	44
Figura 3.28 – Geometria dos cristais sônicos com elementos quadrados com ressoadores de Helmholtz, com a cavidade interior de 6cmx6cm e respetivas dimensões do gargalo.....	45
Figura 3.29 – Avaliação da influência da largura do gargalo do ressoador na curva IL.....	45
Figura 3.30 – Avaliação da influência do comprimento do gargalo do ressoador na curva IL.....	46
Figura 3.31 – Avaliação da influência do volume de ar no ressoador na curva IL.....	47
Figura 3.32 – Geometria dos cristais sônicos com elementos circulares com 6cm de raio com ressoadores de Helmholtz aplicados e as respetivas dimensões do gargalo. Em a) a cavidade circular tem 4cm de raio enquanto em b) a cavidade circular tem 5cm de raio.....	48
Figura 3.33 – Avaliação da influência da largura do gargalo do ressoador na curva IL.....	49
Figura 3.34 – Avaliação da influência do comprimento do gargalo do ressoador na curva IL.....	50
Figura 3.35 – Avaliação da influência do volume de ar no ressoador na curva IL.....	50
Figura 4.1 – Equipamentos utilizados nas medições: a) amplificador; b) fonte sonora;.....	52
c) microfone; d) Symphonie; e) computador portátil com software dBBatii32 (adaptado de Dias, 2014). .....	52
Figura 4.2 – a) Amostra de barreira acústica com cristais sônicos sem espuma acústica; .....	53
b) Amostra de barreira acústica com cristais sônicos com espuma acústica.....	53
Figura 4.4 – Câmara semi-anecoica do DEC.....	54
Figura 4.5 – Configuração esquemática de ensaio.....	55
Figura 4.6 – Calibração do microfone.....	56
Figura 4.7 – Curva IL obtida com a configuração inicial.....	57
Figura 4.8 – a) Amostra com espuma absorvente entre os seus elementos; b) Avaliação do efeito da adição de espumas absorventes entre os elementos.....	58

---

Figura 4.9 – Adição de placas de espuma nas partes laterais da amostra. ....	58
Figura 4.10 – Avaliação do efeito da adição das placas de espuma nas partes laterais da amostra. ....	59
Figura 4.11 – Amostra com configuração tipo “Túnel”.....	59
Figura 4.12 – a) Amostra com configuração tipo “Túnel”.....	60
Figura 4.13 – Avaliação do efeito da maior discretização. ....	61
Figura 4.14 – Configuração geométrica da barreira acústica com três fiadas de elementos espaçados a 2,83cm.....	62
Figura 4.15 – Curva IL experimental da barreira acústica com três fiadas de elementos espaçados a 2,83cm e a respetiva curva IL obtida no modelo numérico. ....	62
Figura 4.16 – Configuração geométrica da barreira acústica com quatro fiadas de elementos espaçados a 2,83cm.....	63
Figura 4.17 – Curva IL experimental da barreira acústica com quatro fiadas de elementos espaçados a 2,83cm e a respetiva curva IL obtida no modelo numérico. ....	63
Figura 4.18 – Configuração geométrica da barreira acústica com três fiadas de elementos espaçados a 3,33cm.....	64
Figura 4.19 – Curva IL experimental da barreira acústica com três fiadas de elementos espaçados a 3,33cm e a respetiva curva IL obtida no modelo numérico. ....	64
Figura 4.20 – Configuração geométrica da barreira acústica com quatro fiadas de elementos espaçados a 3,33cm.....	65
Figura 4.21 – Curva IL experimental da barreira acústica com quatro fiadas de elementos espaçados a 3,33cm e a respetiva curva IL obtida no modelo numérico. ....	65
Figura 5.1 – Vista esquemática do espaçador a adotar para o posicionamento dos elementos da barreira .....	68
Figura 5.2 – Arrumação do camião em fase de transporte.....	69
Figura 5.3 – a) Espaçador com apoios quadrados nos cantos; b) Espaçador com apoios retangulares centrados.....	70
Figura 5.4 – a) Esquemática de duas fundações consecutivas da barreira acústica, às quais se representam a traço mais escuro as fixações de um espaçador. ....	70
Figura 5.5 – Espaçador a colocar no topo da barreira.....	71

## SIMBOLOGIA

$c$  - velocidade de propagação do som no ar  
 $cm$  - centímetros  
 $D$  - diâmetro  
 $dB$  – decibel  
 $dB(A)$  – decibel ponderado para a audição humana  
 $ff$  – fator de enchimento, do inglês *filling factor*  
 $h$  - hora  
 $Hz$  – Hertz  
 $IL$  – Perda por Inserção, do inglês *Insertion Loss*  
 $kg$  - quilograma  
 $L_{den}$  – indicador de ruído diurno-entardecer-noturno  
 $m$  – metro  
 $m^2$  – metro quadrado  
 $m^3$  – metro cúbico  
 $mm$  – milímetros  
 $p$  - pressão  
 $Pa$  – Pascal  
 $rad$  – radianos  
 $s$  - segundos  
 $\rho$  – densidade  
 $\omega$  – frequência de excitação do som

## **ABREVIATURAS**

BEM – Método dos elementos de fronteira (do inglês *Boundary Element Method*)

DEC – Departamento de Engenharia Civil

EPS – poliestireno expandido

FEM – Método dos elementos finitos (do inglês *Finite Element Method*)

freq – frequência

MFS – Método das soluções fundamentais (do inglês *Method of Fundamental Solutions*)

OMS – Organização Mundial de Saúde (do inglês WHO, World Health Organization)

RGR – Regulamento Geral do Ruído

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento geral

A história da humanidade mostra que o Homem procura sempre melhorar a sua qualidade de vida e encontrar novas e melhores soluções para todos os problemas com que este se confronta no seu quotidiano. O conforto acústico foi quase ignorado durante muitos anos, no entanto nas últimas décadas, com a descoberta das consequências que os níveis elevados do ruído podem ter na saúde, tem-se verificado um grande crescimento no interesse em trabalhar para proteger as populações neste campo.

Todas as atividades humanas e equipamentos a elas associadas produzem som. O som pode ser criado de forma propositada e com o objetivo de melhorar a vida das pessoas, como, por exemplo na música; no entanto também pode ser uma consequência indesejável de uma outra atividade benéfica, como, por exemplo, o som produzido por um carro em movimento. Neste segundo caso, quando o nível sonoro não ultrapassa certos limites, o som pode até ser considerado útil e/ou tolerável, como, por exemplo, termos a percepção da aproximação de um veículo quando queremos atravessar uma passadeira, no entanto, se este perturba o bem-estar e/ou a saúde das pessoas já será considerado ruído.

O ruído de tráfego rodoviário é então um dos tipos de ruído que mais afeta as populações e tem vindo a aumentar principalmente devido ao aumento do número de veículos em circulação. A Organização Mundial de Saúde (OMS) afirma que, entre 2007 e 2010, o número de veículos registados no Mundo aumentou 15% (WHO, 2013).

Para além da degradação da qualidade de vida da população exposta ao ruído de tráfego, têm vindo a aumentar também alguns problemas de saúde que podem estar relacionados com a exposição ao ruído de tráfego, como: cansaço, perda de audição, insónias, capacidade de concentração, entre outras. As consequências da exposição ao ruído de tráfego não afeta toda a população da mesma forma e depende de alguns fatores, como o tempo de exposição ou a distância à fonte.

O Regulamento Geral do Ruído (RGR) é o documento que estipula os valores limite de exposição ao ruído. Este regulamento indica 55 dB(A) como valor limite para o parâmetro  $L_{den}$ .

Este indicador representa a média ponderada do ruído ao longo das 24h do dia com diferentes pesos, consoante ocorra no período diurno, do entardecer ou noturno.

Já em 1999 a OMS apresenta um relatório em que estima que 40% da população da União Europeia estaria exposta a níveis de ruído de tráfego rodoviário superiores a 55dB(A) de dia e o mesmo se verificava com cerca de 30% da mesma população durante a noite.

Deste modo surgiu a necessidade de implementação de medidas que protegessem a população do ruído de tráfego. Há diversas formas de atuar na redução do ruído: podemos atuar diretamente na fonte, no meio de propagação ou no recetor, no entanto deve atuar-se na fonte sempre que possível. Relativamente à mitigação do ruído de tráfego, as medidas a aplicar na fonte têm como objetivo principal reduzir o ruído produzido pelo motor dos veículos e reduzir o ruído provocado na interação entre os pneus e o pavimento. Quanto a medidas a aplicar no recetor, destaca-se o melhoramento do isolamento acústico das fachadas dos edifícios.

As barreiras acústicas enquadram-se nas medidas para reduzir o ruído de tráfego entre a fonte e o recetor, ou seja, no meio de propagação. Na presença de fontes lineares, por exemplo uma via de tráfego, a distância entre a fonte e o recetor é um fator importante a ter em conta, uma vez que nestas situações, a energia sonora é reduzida para metade quando a distância à fonte aumenta para o dobro. Este fenómeno é tido em conta na conceção de novas infraestruturas, mas para infraestruturas já existentes, as barreiras acústicas são uma boa solução, uma vez que já sabemos que estas provocam bons níveis de redução sonora.

As barreiras acústicas com cristais sónicos apresentam-se como uma nova solução para a mitigação do ruído de tráfego, uma vez que estas estruturas periódicas impedem a propagação do som em determinados intervalos de frequência.

## **1.2 Objetivos da dissertação**

Este trabalho foi realizado no âmbito de uma dissertação de mestrado em Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra e tem como principal objetivo avaliar a atenuação acústica por parte de barreiras acústicas de cristais sónicos tendo em conta a geometria dos mesmos. O trabalho insere-se num projeto de investigação mais vasto (projeto “HLS – *Hybrid Log Shield*”), onde se procura desenvolver um sistema construtivo

---

completo, aplicável em contexto real, baseado no conceito de cristal sónico e fazendo uso de troncos de madeira.

Numa primeira fase, é feito um estudo numérico em que é avaliada a atenuação sonora para diversas geometrias dos elementos que constituem os cristais sónicos. Este estudo é realizado recorrendo a um modelo numérico de elementos finitos.

Numa segunda fase, foram construídas barreiras acústicas de cristais sónicos à escala geométrica 1/6, para a realização de ensaios experimentais com o objetivo de validar os resultados obtidos no estudo numérico.

Por fim, é apresentada uma proposta de solução construtiva para estas barreiras acústicas sustentáveis com base no conceito de cristais sónicos.

### **1.3 Estrutura da Dissertação**

A presente dissertação apresenta-se dividida em seis capítulos.

O primeiro capítulo apresenta um enquadramento geral do tema, os objetivos do presente trabalho e a estruturação do mesmo.

No segundo capítulo aborda-se o estado da arte onde são descritos os mais recentes desenvolvimentos relativos à aplicação de cristais sónicos em barreiras acústicas para mitigação do ruído de tráfego.

O terceiro capítulo apresenta os resultados obtidos através do estudo numérico onde são apresentados os resultados obtidos das diversas geometrias avaliadas.

No quarto capítulo é descrito o ensaio experimental realizado para validar o modelo numérico utilizado neste trabalho e são apresentados os resultados do mesmo.

No quinto capítulo é apresentada uma possível solução construtiva para esta tecnologia.

Por último, no sexto capítulo, estão apresentadas as principais conclusões obtidas ao longo da realização da dissertação.



## 2 ESTADO DA ARTE

### 2.1 Considerações iniciais

O progressivo aumento do tráfego rodoviário ao longo dos anos veio trazer perturbações às populações provocadas pelo ruído produzido. Sabe-se que a exposição ao ruído de tráfego afeta a saúde das pessoas, sendo este um tema já bastante debatido. Com o objetivo de proteger as populações que residem perto de vias com elevado tráfego rodoviário, têm sido tomadas medidas para proteger as mesmas. Têm sido aplicadas medidas de mitigação nos veículos (fonte), como a redução de ruído criado pelo funcionamento dos motores e na interação pneu/pavimento, nos edifícios (recetores), como o isolamento de fachadas, no entanto a construção de barreiras acústicas é a medida mais comum, uma vez que protege uma grande envolvente, não reduzindo a sua atenuação a edifícios individuais (Fredianelli *et al.*, 2019).

As barreiras acústicas tradicionais funcionam como obstáculo à propagação das ondas sonoras e, na Figura 2.1, é feita uma representação esquemática dos aspetos gerais do seu funcionamento, onde se mostra que a atenuação sonora provocada por uma barreira acústica tradicional resulta da conjugação de fenómenos de absorção, transmissão direta, reflexão e difração. Este tipo de barreira acústica tem um comportamento de atenuação praticamente homogéneo ao longo do espectro de emissão de tráfego (Garai e Guidorzi, 2000).

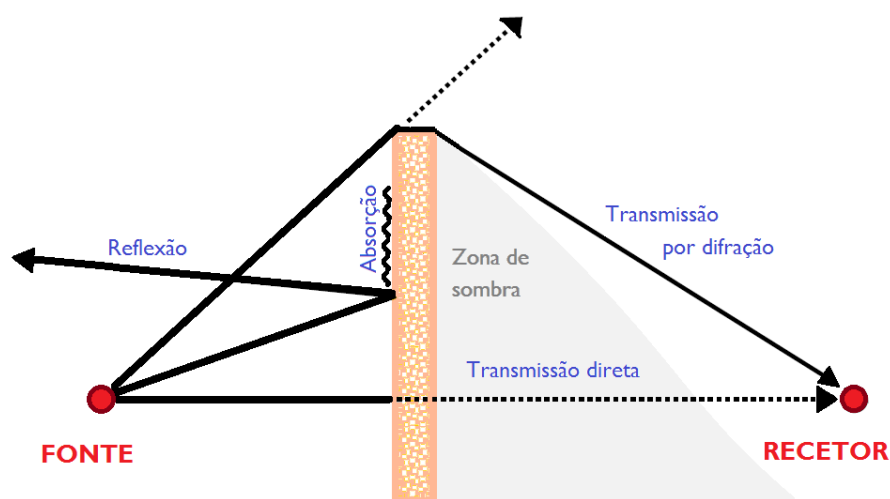


Figura 2.1 – Representação esquemática do funcionamento de uma barreira acústica (adaptado de Martins, 2014).

---

A grande desvantagem das barreiras acústicas tradicionais é a difração pelas extremidades da mesma, no entanto, há outros problemas apontados pelas populações a este tipo de equipamento. Muitos residentes em zonas onde foi colocada este tipo de barreira acústicas, queixam-se que, devido ao seu tamanho, este tipo de estrutura limita o campo de visão e reduz a luz natural, para além de impedir o fluxo natural do ar (Fredianelli *et al.*, 2019). Sabemos ainda que, se a superfície das barreiras não for absorvente, a energia sonora refletida de volta para a via de tráfego, irá afetar os recetores no lado oposto da mesma (Lee *et al.*, 2015).

Com o objetivo de evitar alguns dos problemas descritos anteriormente e de maximizar o desempenho das barreiras acústicas, tem vindo a ser estudada a possibilidade de se utilizarem cristais sônicos em barreiras acústicas para mitigação do ruído de tráfego.

Os cristais sônicos são estruturas periódicas artificiais em que os seus elementos, que podem ser chamados dispersores, têm uma impedância elevada em relação ao meio envolvente (Gupta, 2014). O arranjo periódico dos dispersores provoca uma atenuação sonora num determinado intervalo de frequência, o qual é usualmente designado como *band gap*. Sabe-se ainda que qualquer alteração no arranjo dos dispersores irá provocar alterações na *band gap*, tanto a nível da sua localização no espetro como no valor da atenuação sonora provocada. As principais características geométricas dos cristais sônicos que têm influência no seu comportamento acústico são o tamanho e a forma dos elementos, a distribuição espacial dos mesmos e ainda as propriedades acústicas dos elementos, como a absorção sonora na superfície (Amado Mendes *et al.*, 2015). Tendo em conta a possibilidade de poder controlar a localização da *band gap* no espetro, tem-se trabalhado para encontrar o arranjo periódico otimizado para a mitigação do ruído de tráfego. Para isso, os investigadores sabem que têm de otimizar a atenuação do cristal sónico para perto dos 1000Hz, uma vez que as frequências predominantes do ruído de tráfego se situam entre os 500Hz e os 1500Hz e o seu pico é geralmente perto dos 1000Hz (Amado Mendes *et al.*, 2015). A possibilidade de usar barreiras acústicas com cristais sônicos apresenta, logo à partida, várias vantagens; as barreiras acústicas seriam muito mais leves e de relativa facilidade construção, necessitando de menos material para a sua construção e ainda apresentariam algum nível de transparência, reduzindo assim o seu impacto visual (Dias, 2014).

A atenuação sonora provocada por barreiras acústicas pode também ser designada por perda por inserção, que é uma tradução do termo inglês *Insertion Loss* (IL), e que traduz a capacidade da barreira acústica em reduzir o nível sonoro entre o emissor e o recetor. Esta grandeza é obtida através da medida da diferença de níveis sonoros num recetor, na presença e ausência de uma barreira acústica. A IL é definida em função da frequência e é obtida pela equação (2.1), podendo ser definida tanto em termos de pressões sonoras ( $p_s$  e  $p_c$  [Pa]) como em termos de

---

níveis sonoros ( $L_{p,s}$  e  $L_{p,c}$  [dB]), em que os índices  $c$  e  $s$  representam, respetivamente, a presença ou ausência de barreira acústica (Martins, 2014).

$$IL = 20 \cdot \log\left(\frac{p_s}{p_c}\right) = L_{p,s} - L_{p,c} \quad [dB] \quad (2.1)$$

Há diversos fatores relacionados com a forma como o som se propaga que podem influenciar o desempenho de uma barreira acústica. O tipo de tráfego que irá percorrer a via na qual se irá instalar determinada barreira acústica irá ter uma grande influência no tipo de ondas sonoras geradas, como podemos verificar na Figura 2.2.

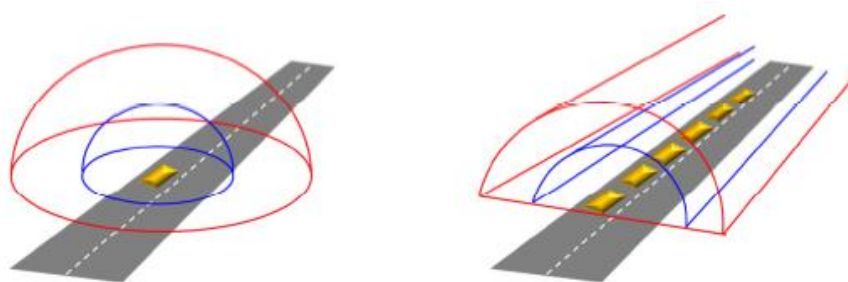


Figura 2.2 – Propagação do ruído rodoviário devido uma fonte pontual ou linear (adaptado de Martins, 2014).

No primeiro caso apresentado na Figura 2.2, está representada a circulação de um veículo isolado, sendo por isso considerado uma fonte pontual, enquanto no segundo caso temos um conjunto de veículos a circular a velocidades semelhantes, sendo assim considerada uma fonte linear. O facto de estarmos perante diferentes tipos de fontes, influencia a atenuação acústica provocada por uma determinada barreira acústica, uma vez que sabemos que na presença de diferentes tipos de fontes sonoras, teremos diferentes variações do nível sonoro com o aumento da distância. Sabemos que ao aumentar uma determinada distância à fonte, no caso de termos uma fonte pontual iremos ter o dobro da redução do nível da pressão sonora comparativamente a uma fonte linear, em circunstâncias iguais (Martins, 2014).

## 2.2 Cristais sónicos aplicados a barreiras acústicas

Há cerca de 30 anos, o estudo da atenuação sonora recorrendo a cristais sónicos despertou um grande interesse junto da comunidade científica. Em 1995, uma equipa de investigadores espanhóis, liderada por Martínez-Sala (Martínez-Sala *et al.*, 1995), conseguiu confirmar a teoria de que a distribuição periódica de dispersores de ondas num espaço tridimensional provoca uma atenuação na propagação de ondas sonoras em regiões específicas do espetro, não tendo nenhum efeito noutras regiões do mesmo. Para provar esta teoria, Martínez-Sala realizaram ensaios em condições não controladas ao ar livre, com o objetivo de calcular a atenuação sonora provocada por uma escultura de Eusebio Sempere (Figura 2.3) que estava instalada na Fundação Juan March, em Madrid. Esta escultura era composta por uma distribuição periódica bidimensional de tubos metálicos que estavam fixos numa plataforma rotacional circular com 4m de diâmetro.

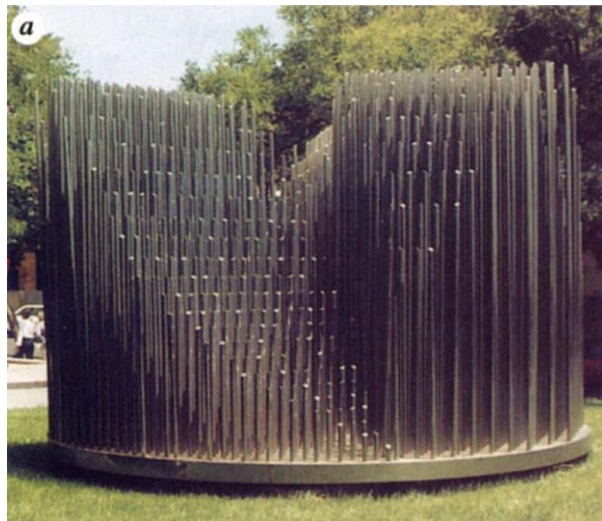


Figura 2.3 – Escultura de Eusebio Sempere, em exposição na Fundação Juan March em Madrid, 1995 (adaptado de Martínez-Sala *et al.*, 1995).

Os resultados do ensaio (Figura 2.4) confirmaram a atenuação em alguns intervalos de frequência do espetro, aos quais se dá o nome de *band gaps*. O pico de absorção acontece para os 1670Hz e a primeira *band gap* está localizada sensivelmente entre os 1500Hz e os 2000Hz. Este trabalho é reconhecido como o primeiro trabalho experimental sobre a atenuação sonora provocada por uma estrutura periódica.

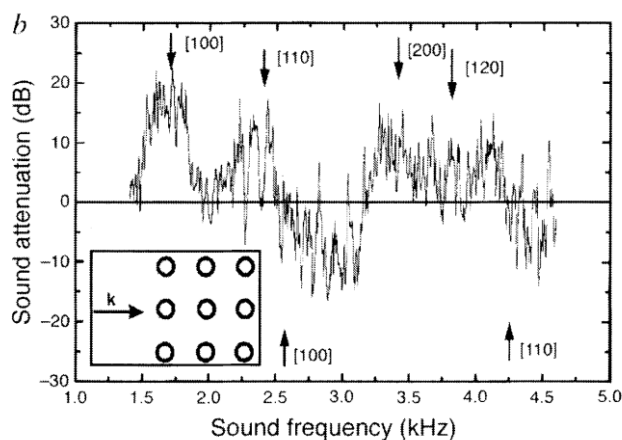


Figura 2.4 – Resultados do ensaio realizado por Martínez-Sala *et al.* na escultura de Eusebio Sempere (adaptado de Martínez-Sala *et al.*, 1995).

Os cristais sônicos são divididos em três categorias principais: 1D, 2D e 3D. Na Figura 2.5 estão representadas as três categorias principais de cristais sônicos. Os cristais sônicos 1D são vulgarmente placas dispostas num fluido, os cristais sônicos 2D representam elementos verticais, por exemplo cilindros ou paralelepípedos, espalhados periodicamente num plano enquanto os cristais sônicos 3D são sólidos, por exemplo cubos ou esferas, dispersos de forma regular ao longo de um determinado volume (Fredianelli *et al.*, 2019). Segundo a definição já apresentada, os dispersores de qualquer tipo de cristal sónico devem ser feitos a partir de um material com impedância acústica superior ao meio envolvente.

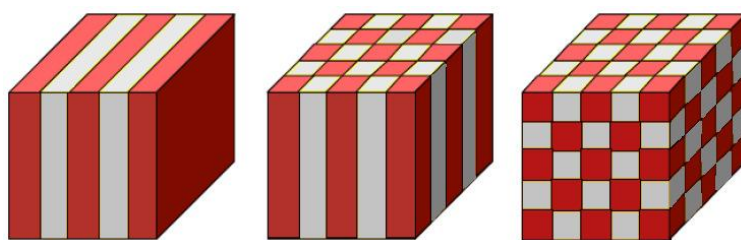


Figura 2.5 – Diferentes tipos de cristais sônicos tendo em conta o seu arranjo periódico (adaptado de Martins, 2014).

Para aplicação em barreiras acústicas, estamos frequentemente na presença de cristais sônicos 2D, uma vez que o cristal sónico é formado por elementos verticais dispostos periodicamente num plano, o solo.

Os cristais sónicos, em barreiras acústicas, para mitigação do ruído de tráfego, podem adotar diversas configurações, no entanto as configurações mais vulgares são a quadrada e a triangular, respetivamente apresentadas na Figura 2.6.

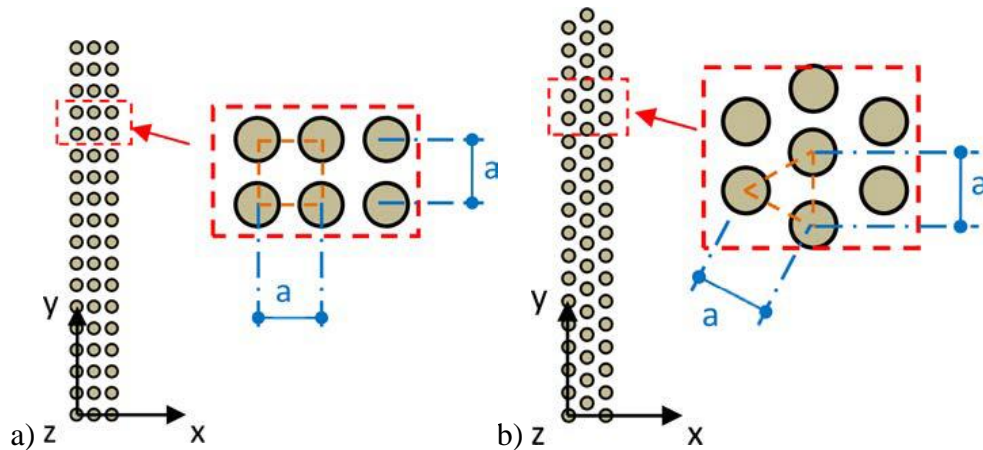


Figura 2.6 – a) Cristal sónico com configuração quadrada; b) Cristal sónico com configuração triangular (adaptado de Martins *et al.*, 2013).

Alguns autores defendem que a distribuição de cristais sónicos com configuração triangular apresenta um melhor desempenho na mitigação do ruído de tráfego. Martins *et al.* (2013), mostram que a configuração triangular apresenta uma melhor resposta à mudança do ângulo de incidência da onda sonora no cristal sónico. O facto da configuração triangular apresentar uma melhor adaptabilidade ao ângulo de incidência da onda sonora, mostra que este tipo de configuração pode ser mais adequado para aplicação de cristais sónicos a barreiras acústicas para mitigação do ruído de tráfego, uma vez que a alteração do ângulo de incidência da onda sonora, será consequência do movimento dos veículos ao longo da via e da barreira acústica.

Um parâmetro importante para classificar os cristais sónicos é o seu fator de preenchimento ( $ff$ ), do inglês *filling factor*. Este parâmetro define a relação entre área ocupada pelos dispersores e a área total ocupada pelo cristal sónico e é dado, para configurações quadradas, pela equação (2.2), em que  $a$  representa a distância entre o centro dos elementos, Figura 2.6, e  $r$  representa o raio dos dispersores.

$$ff = \frac{\pi r^2}{a^2} \quad (2.2)$$

A distância dos recetores à barreira é um factor que não é alvo de grandes estudos e/ou avaliações. Isto porque é facilmente compreensível que os recetores mais distantes estão menos protegidos das ondas incidentes na barreira acústica uma vez que os mesmos recebem uma contribuição superior da energia difratada pelo topo da barreira (Godinho *et al.*, 2019).

Relativamente à forma dos dispersores, os primeiros estudos focaram-se no uso de elementos circulares, no entanto, mais tarde realizaram-se trabalhos em que foram avaliadas outras formas geométricas para os difusores. Foi estudado o comportamento de diversas formas para os dispersores, por exemplo: quadrados, retangulares e triangulares; contudo não é possível realizar uma comparação direta entre resultados uma vez que cada autor utilizou condições de ensaio/simulação diferentes. No entanto (Chong, 2012) fez uma análise, utilizando o método dos elementos finitos, em que avaliou e comparou a curva IL relativa a barreiras acústicas com diferentes geometrias e orientações para os dispersores do cristal sónico. O autor (Chong, 2012) inicialmente realizou simulações com diferentes orientações para dispersores com a mesma forma e, posteriormente, selecionou uma configuração para cada forma dos dispersores para realizar uma comparação entre os mesmos, e desta forma tentar concluir qual a forma dos dispersores que provoca uma atenuação sonora superior. Na Figura 2.7 estão representados os cristais sónicos escolhidos para cada uma das formas dos elementos; em cima, à esquerda, está representado um cristal sónico com dispersores triangulares e, à direita, um com dispersores elípticos enquanto em baixo, à esquerda, os dispersores são quadrados e, à direita, são circulares.

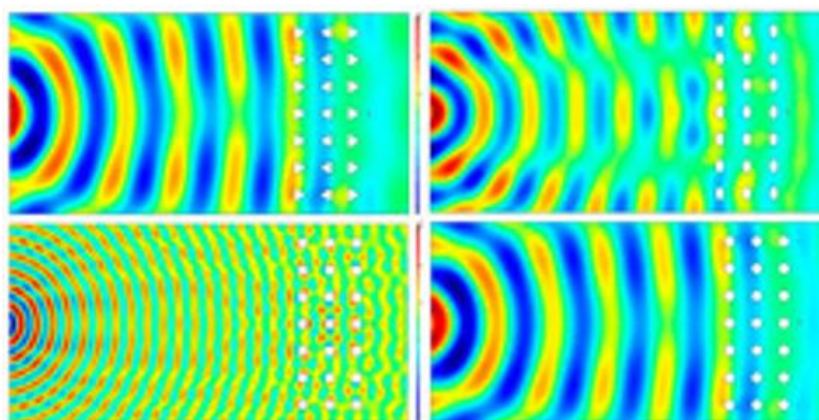


Figura 2.7 – Mapas de nível sonoro para uma frequência de 1500Hz com cristais sónicos com dispersores com diferentes formas (adaptado de Chong, 2012).

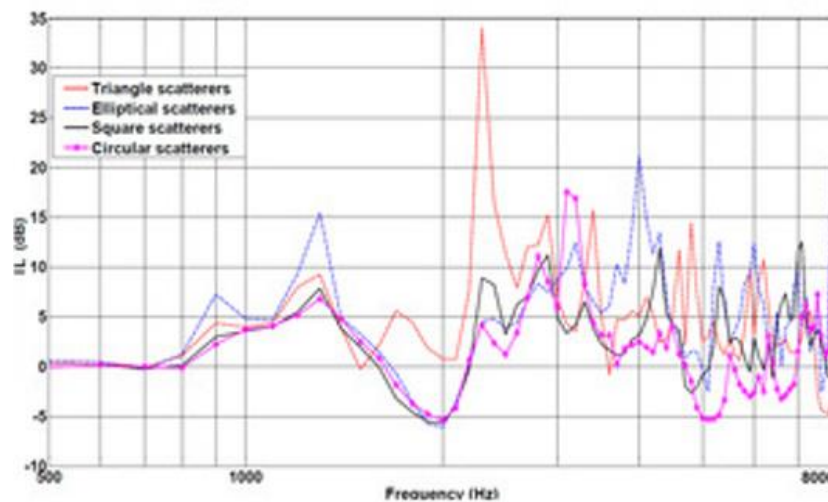


Figura 2.8 – Curvas IL dos cristais sônicos apresentados na figura anterior (adaptado de Chong, 2012).

As curvas IL obtidas na simulação do desempenho dos cristais sônicos estão representadas na Figura 2.8. O pico de atenuação sonora mais elevado é conseguido com os elementos do cristal sônico triangulares numa frequência superior a 2000Hz. Tendo em conta que os valores de pico do ruído de tráfego acontecem perto dos 1000Hz, este cristal sônico com elementos triangulares não se apresenta como uma solução ótima para aplicar na mitigação do ruído de tráfego. O cristal sônico com elementos elípticos, com o lado maior voltado para a fonte, é o que apresenta resultados mais interessantes para aplicar na mitigação do ruído de tráfego.

Relativamente à dimensão dos dispersores, sabe-se que esta tem influência na atenuação provocada pelo cristal sônico. Jean e Defrance (2015) mostram a influência de aumentar o diâmetro e o *filling factor* para o dobro, estando uma das suas conclusões apresentadas na Figura 2.9. No seu trabalho, avaliaram o desempenho de um cristal sônico com dispersores circulares com 0,15m de diâmetro e  $ff=0,046$ , curva IL com \*. Esta curva IL é comparada com outras curvas IL relativas a cristais sônicos com o dobro do diâmetro, curva IL  $\Delta$ , e com o dobro do  $ff$ , curva IL com O.

Analisando as curvas IL presentes na Figura 2.9, concluíram que o aumento do diâmetro dos elementos, mantendo constante o  $ff$ , provoca um aumento superior na atenuação do cristal sônico comparando com o aumento, também para o dobro, do  $ff$ , mantendo constante o diâmetro dos elementos. No entanto, devemos ter em atenção que perto dos 1000Hz, ambos os cristais sônicos provocaram uma atenuação sonora semelhante.



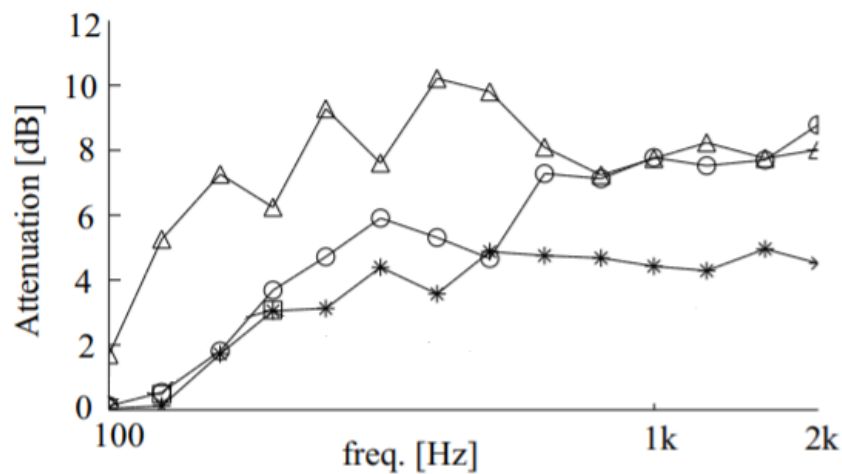


Figura 2.9 – Curvas IL de cristais sônicos com características diferentes: \*D = 15,35cm e ff = 0,046; O D = 15,35cm e ff = 0,09;  $\Delta$  D = 30,70cm e ff = 0,046 (adaptado de Jean e Defrance, 2015).

Martins *et al.* (2013) avaliam a influência que pequenas variações no diâmetro dos elementos do cristal sônico provocam na curva IL. Os dispersores podem ser feitos a partir de recursos naturais, como troncos de madeira, o que significa que os mesmos podem ter pequenos desvios no seu diâmetro devido a defeitos de fabrico. Tendo por base um cristal sônico com elementos com 20cm de diâmetro e espaçados a 40cm, é avaliado o efeito de variações aleatórias, entre os 10% e os 20%, do diâmetro de referência (20cm). Martins *et al.* (2013) concluíram que mesmo com uma variação de 20% em alguns elementos, os valores de IL têm variações máximas inferiores a 0,5dB ao longo do intervalo de frequências analisado, entre os 630Hz e os 1600Hz.

Relativamente ao número de fiadas do cristal sônico em que se otimiza o desempenho da barreira acústica, ainda não se chegou a uma solução ideal. Martins *et al.* (2013) defendem que, para mitigação de ruído rodoviário, duas fiadas de dispersores são melhores que três, num cristal sônico com pelo menos 40 dispersores, na linha de desenvolvimento da barreira acústica. Por outro lado, Morandi *et al.* (2016) mostram que, para o intervalo de frequências entre os 600Hz e os 1000Hz, num cristal sônico com uma configuração quadrada, o aumento de fiadas de dispersores provoca um aumento na atenuação sonora, como podemos verificar na Figura 2.10. A partir destes resultados, verificamos que, após a quarta fiada de dispersores deixamos de ter um aumento significativo da atenuação sonora. Godinho *et al.* (2019) também confirmam a “saturação” a partir das quatro fiadas de elementos do cristal sônico.

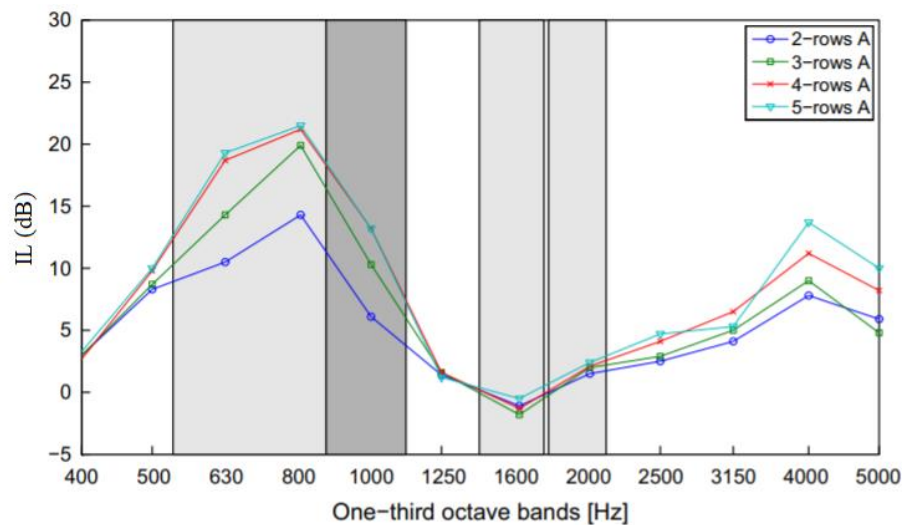


Figura 2.10 – Influência do número de fiadas de dispersores do cristal sônico na atenuação sonora (adaptado de Morandi *et al.*, 2016).

Santos *et al.* (2014) estudaram o efeito da ausência de alguns dispersores e/ou de uma fiada completa na curva IL obtida ao simular o desempenho de um cristal sônico. Os autores concluíram que, com estas alterações ao cristal sônico, na presença de uma configuração quadrada, a tendência da curva IL se mantém apesar de alguns picos de atenuação alterarem ligeiramente a sua frequência enquanto que, para configurações triangulares, se verifica um comportamento totalmente diferente ao retirar elementos ao cristal sônico. Sabe-se então que, na presença de um cristal sônico com configuração quadrada podemos retirar dispersores aleatórios ao cristal sônico, sem provocar uma perda significativa de atenuação sonora. Esta teoria é também confirmada por Koussa *et al.* (2013).

A introdução de elementos ressonantes na estrutura do cristal sônico tem vindo a ser estudada por alguns autores. Desta forma, concluiu-se que a introdução deste tipo de elementos ao cristal sônico combina a atenuação esperada do cristal sônico com a ressonância desses elementos individuais. Os ressoadores de Helmholtz são um tipo específico de ressoador e são formados por uma peça oca com uma pequena abertura que liga o meio externo com a cavidade interior, e na Figura 2.11 podemos observar alguns destes elementos estudados por Lee *et al.* (2018). Esta abertura deve ser pequena quando comparada com o comprimento de onda.

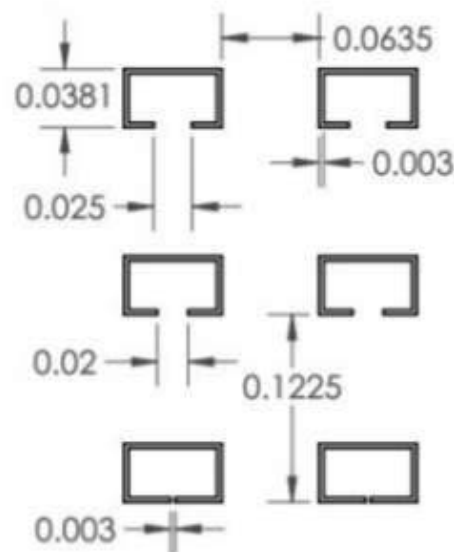


Figura 2.11 – Exemplos de ressoadores de Helmholtz estudado por Lee *et al.* (adaptado de Lee *et al.*, 2018).

Outra alteração aos cristais sônicos que tem vindo a ser estudada é o revestimento dos dispersores com material poroso. A introdução destes revestimentos com superfícies absorventes dissipam alguma energia das ondas sonoras incidentes podendo aumentar a atenuação acústica ao longo de todo o espectro. Martins *et al.* (2013) afirmam que, quanto maior o coeficiente de absorção acústica do revestimento, maior é a possibilidade de aumentar a atenuação acústica do cristal sónico entre os 600Hz e os 1600Hz. Sánchez-Dehesa *et al.* (2011) estudaram o efeito da aplicação de um revestimento com borracha reciclada aos dispersores de cristais sónicos. O autor comparou as curvas IL obtidas ao avaliar o desempenho de três cristais sónicos, com uma configuração triangular, com três fiadas de elementos com 8cm de diâmetro e 1m de altura. A cada um dos cristais sónicos foi aplicado o revestimento com diferentes espessuras. Na Figura 2.12 estão apresentados os resultados que obteve para espessuras do revestimento de 2cm, 3cm e 4cm comparados com a curva IL de uma barreira acústica tradicional com 30cm de espessura e 1m de altura. Os resultados confirmam que, até em baixas frequências a atenuação sonora do cristal sónico aumenta com a aplicação da borracha reciclada. Os autores acrescentam que, para o cristal sónico com um revestimento de 2cm, se conseguiram valores três vezes superiores, para as frequências da *band gap*, comparativamente ao cristal sónico original sem qualquer revestimento.

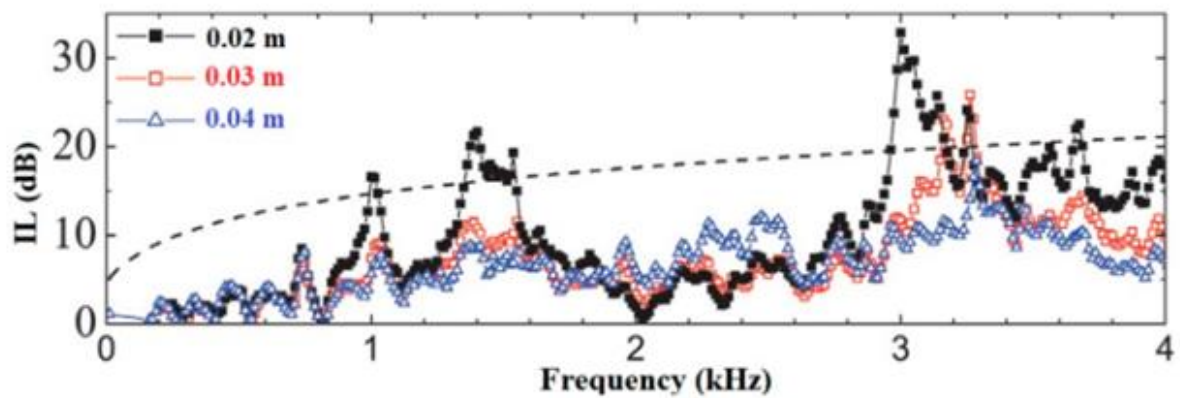


Figura 2.12 – Curvas IL de cristais sônicos com diversas espessuras no revestimento aplicado nos dispersores comparadas com a curva IL de uma barreira acústica tradicional (adaptado de Sánchez-Dehesa *et al.*, 2011).

Koussa *et al.* (2013) combinaram alguns dos efeitos descritos anteriormente e criaram um tipo de “barreira composta”. Estas barreiras eram formadas por um cristal sónico inicial, (do lado em que a onda incide) com dispersores de pequena dimensão e com um pequeno espaçamento entre os mesmos, seguido de um cristal sónico intermédio com elementos de maior dimensão e mais espaçados, e por fim uma barreira acústica tradicional. As dimensões desta “barreira composta” são apresentadas na Figura 2.13.

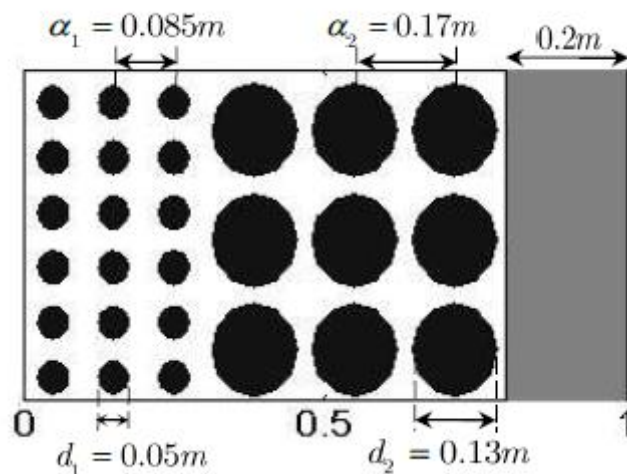


Figura 2.13 – Configuração da “barreira composta” (adaptado de Koussa *et al.*, 2013).

Os autores criaram três barreiras deste género, cada uma delas com diferentes tipos de dispersores. Uma tinha dispersores rígidos sem qualquer alteração, a segunda tinha dispersores

que funcionavam como ressoadores de Helmholtz e a terceira continha dispersores semelhantes à anterior, no entanto a sua cavidade interior foi revestida com lã de vidro. Na Figura 2.14 estão representados estes três tipos de dispersores.

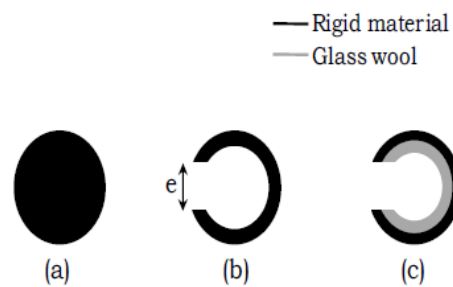


Figura 2.14 – Dispersores utilizados nas diversas “barreiras compostas” (adaptado de Koussa *et al.*, 2013).

De seguida, na Figura 2.15, são apresentados alguns resultados obtidos por Koussa *et al.* (2013) em que a curva IL 1 corresponde a uma barreira acústica com os dispersores rígidos, a curva IL 2 aos dispersores ressonantes e a curva IL 3 aos dispersores ressonantes com a cavidade revestida com lã de vidro.

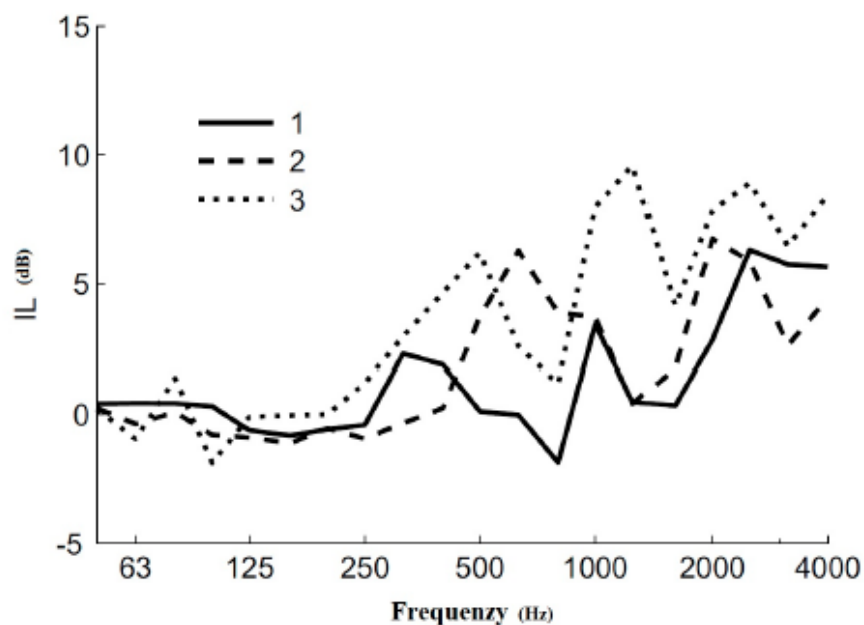


Figura 2.15 – Curvas IL de cada uma das “barreiras compostas” (adaptado de Koussa *et al.*, 2013).

Os autores concluíram que em alguns casos, este tipo de “barreira composta”, consegue atingir cerca de 6dB a mais nos valores de atenuação sonora, comparativamente a uma barreira acústica tradicional com as mesmas dimensões. O efeito, que já foi referido, de amplificação do ruído no lado oposto da via devido à parte da onda sonora refletida, também é atenuado com esta configuração de barreira acústica.

O conceito de economia verde e circular tem influenciado alguns autores a explorar a sua aplicabilidade às barreiras acústicas com cristais sônicos. Godinho *et al.* (2016) e Amado Mendes *et al.* (2015) são alguns dos investigadores que têm vindo a trabalhar na utilização de troncos de madeira provenientes de operações de limpeza das florestas, como elementos de barreiras acústicas de cristais sônicos. Na maioria dos estudos realizados, são apenas efetuadas simulações usando amostras construídas à escala, no entanto Amado Mendes *et al.* (2016) realizaram ainda ensaios usando uma amostra à escala real, representada na Figura 2.15. Os resultados positivos e animadores dos estudos já realizados apontam para a possibilidade da utilização dos troncos de madeira como dispersores em barreiras acústicas com cristais sônicos.



Figura 2.16 – Barreira acústica com cristais sônicos ensaiada por Amado Mendes *et al.* (adaptado de Amado Mendes *et al.*, 2016).

Amado Mendes *et al.* (2015) defendem que as grandes vantagens da utilização dos troncos de madeira, provenientes de operações de limpeza das florestas, são: a possibilidade destes poderem ser aplicados praticamente na sua forma natural, não necessitando de grandes intervenções de transformação; serem um material abundante e económico proveniente da

limpeza das florestas que é muitas vezes desperdiçado; e o baixo impacto visual e ambiental que os troncos de madeira têm comparativamente a outros materiais.

Quanto à estabilidade estrutural de uma barreira acústica tradicional, o principal carregamento é a ação do vento. No caso de barreiras acústicas com cristais sônicos, esta ação já não terá grandes implicações, uma vez que, neste tipo de estrutura a ação do vento será muito menor, evitando assim a necessidade de construir grandes fundações, que são essenciais para suportar as barreiras acústicas tradicionais, no entanto deve ser feita uma avaliação do efeito do vento numa estrutura periódica.

## 3 MODELAÇÃO NUMÉRICA

### 3.1 Formulação

Existem várias metodologias de análise para o cálculo da atenuação sonora provocada por barreiras acústicas. Esta variedade de metodologias estende-se desde modelos analíticos simples e intuitivos, como o modelo de Maekawa (Maekawa, 1968), até modelos de simulação numérica, entre os quais se destacam o FEM, o BEM e os MFS. Os modelos analíticos apesar da sua grande vantagem, a simplicidade da sua aplicação, são bastante limitados na sua gama de aplicabilidade, uma vez que não são capazes de representar configurações de barreiras otimizadas. Devido a esta limitação dos modelos analíticos foi essencial partir para a análise numérica que permite analisar e estudar casos com geometrias mais complexas.

#### 3.1.1 Conceitos fundamentais sobre a propagação sonora em fluidos

O fluido em causa neste estudo é o meio gasoso e o mesmo é composto por um conjunto homogéneo de moléculas em equilíbrio na ausência de perturbações. A perturbação que altera o seu estado de equilíbrio pode ser a energia libertada por uma fonte sonora que irá provocar alterações no meio envolvente, alternando os valores das suas variáveis de estado, como por exemplo a pressão, a temperatura ou a massa específica ou densidade ( $\rho$ ).

Tendo em conta a Lei da Conservação da Massa, a variação da massa de um sistema tem de ser igual à diferença entre o fluxo de massa que entra e sai do sistema. Pierce (1981) com base neste princípio, Equação (3.1), verificou a possibilidade de expressar a variação da densidade do sistema ao longo do tempo em relação à variação da velocidade de uma partícula, assumindo que não há variação de volume, em que  $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$ .

$$\frac{\partial \rho}{\partial t'} + \nabla \cdot (\rho \vec{\mu}) = 0 \quad (3.1)$$

A segunda Lei de Newton mostra que a derivada do momento linear é igual à força aplicada sobre um corpo. Se considerarmos um fluido ideal podemos simplificar a equação do momento linear, obtendo a Equação de Euler (3.2), uma vez que o fluido ideal tem viscosidade nula.

$$\rho \frac{\partial \vec{\mu}}{\partial t'} = -\nabla p \quad (3.2)$$



Como já foi referido, o fluido em questão neste trabalho é o ar. No ar podemos designar a pressão estática e a densidade do mesmo, no seu estado de repouso, por  $p_0$  e  $\rho_0$ , respetivamente. Quando sujeito a uma perturbação, por exemplo o som, a pressão passa a ser igual à soma da pressão no estado de repouso mais a variação da pressão ( $p'$ ) provocada pela perturbação, obtendo  $p = p_0 + p'$ . Em relação à massa volúmica do ar o fenómeno pode ser descrito de forma semelhante:  $\rho = \rho_0 + \rho'$ , em que  $\rho'$  representa a variação da massa volúmica provocada pela perturbação. Sabemos ainda que estas variações ( $p'$  e  $\rho'$ ), quando provocadas pelo som, são de ordens de grandeza muito inferior às respetivas grandezas no estado de repouso, por isso podemos assumir  $p' \ll p_0$  e  $\rho' \ll \rho_0$ . Quanto à velocidade de propagação do som no ar ( $c$ ), pode ser descrita pela relação representada na Equação (3.3).

$$\frac{\partial p'}{\partial \rho'} = c^2 \quad (3.3)$$

Derivando a equação da Lei da Conservação da Massa (3.1) em relação ao tempo e aplicando o operador  $\nabla$  à equação de Euler (3.2), ao combinar os resultados obtemos a Equação da Onda (3.4). A Equação da Onda, deduzida por Lagrange, em 1762, descreve a forma como a pressão sonora varia no tempo e ao longo do espaço.

$$\nabla^2 p' - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} = 0 \quad (3.4)$$

Ao considerar ondas planas e harmónicas, Brandão (2008), temos a seguinte igualdade:  $p' = \tilde{p}(x, y, t) \cdot e^{i\omega t}$ , em que  $\tilde{p}(x, y, t)$  representa a pressão acústica complexa no espaço. Desta forma, conclui-se que a Equação (3.4) se torna na Equação de Helmholtz (3.5), em que  $k = \frac{\omega}{c}$ , representa o número de onda, e  $\omega$  é a frequência angular [rad/s]:

$$\nabla^2 p' + k^2 p' = 0 \quad (3.5)$$

### 3.1.2 Método dos elementos finitos (FEM)

O método dos elementos finitos foi inicialmente desenvolvido com o objetivo de facilitar a análise de estruturas complexas, no entanto foi posteriormente adaptado para poder ser usado na análise de outros problemas físicos, representados por equações diferenciais parciais.

Os problemas de acústica e vibrações podem ser analisados tendo em conta as equações de movimento da estrutura que vibra e as equações de movimento do meio acústico recorrendo a técnicas de elementos finitos. Os modelos de elementos finitos representam um sistema

contínuo com infinitos graus de liberdade combinado com um sistema discreto com um número finito de graus de liberdade. O número de graus de liberdade deste sistema discreto irá influenciar a exatidão da solução. Em modelos de elementos finitos aplicados a problemas de acústica, quanto maior a frequência em análise, maiores serão os graus de liberdade necessários para a discretização do problema. Esta é a razão pela qual o método dos elementos finitos é apenas usado em análises com frequências baixas.

Em acústica, o método dos elementos finitos é descrito pela equação (3.6), em que  $K_e$  representa a matriz elementar de rigidez,  $C_e$  é a matriz elementar de amortecimento,  $M_e$  é a matriz elementar de massa,  $j$  é o número imaginário igual a  $\sqrt{-1}$ ,  $p$  é o vetor de pressão acústica e  $f(\omega)$  corresponde à velocidade da partícula.

$$(K_e + j\omega C_e - \omega^2 M_e)\{p\} = \{f(\omega)\} \quad (3.6)$$

Atalla (2015) defende que o método FEM pode ser dividido em 8 passos. Segundo o autor, inicialmente, deve ser identificado o problema e de seguida feita uma formulação integral fraca. De seguida, devemos realizar um “*Meshing*”, isto é, deve ser gerada a malha da geometria. Já com a malha da geometria devemos aproximar as variáveis independentes e realizar a aproximação nodal da forma fraca do integral, calculando as matrizes elementares. Posto isto, devemos fazer a montagem, isto é, a montagem das matrizes globais para finalmente inverter as matrizes e realizar o cálculo do campo de pressão.

Esta é considerada a maior vantagem do modelo FEM em relação aos restantes, a sua formulação não é muito complicada para além da possibilidade de estudar materiais homogéneos e não-homogéneos, isotrópicos e anisotrópicos, lineares e não lineares. Outra vantagem é a possibilidade de ajustar a malha da geometria de acordo com a simulação. Algumas das desvantagens deste método são as fronteiras abertas, onde não é conhecida a formulação analítica da impedância, ou a dificuldade em modelar as malhas com geometrias muito complexas.

As simulações realizadas recorrendo ao FEM são simulações 2D, o que implica que a altura da barreira acústica é considerada infinita. A simulação consiste em avaliar o desempenho da barreira acústica na qual incide uma onda plana. Atentando na Figura 3.1, considera-se que a onda plana incide na base do retângulo. Os recetores estão colocados numa faixa, entre os 1,20m e os 1,40m da base deste retângulo, e realizam as medições necessárias que permitem calcular a curva IL proporcionada pela barreira acústica. No topo deste mesmo retângulo assume-se uma condição de impedância ( $z$ ), em que  $z = \rho_{ar} \cdot c$  e sabemos que  $\rho_{ar} = 1.21 \text{ kg/m}^3$  e  $c=343\text{m/s}$ . Durante a simulação assumimos que os contornos dos elementos do cristal sónico têm velocidade nula, tal como os contornos laterais do retângulo também têm velocidade nula, e

desta forma estamos a garantir que estamos a simular o comportamento de uma barreira acústica infinita na direção perpendicular à direção de propagação da onda incidente.

Na Figura 3.1 está a representação de uma onda plana que se propaga no espaço sem limitações, no caso deste estudo, na ausência de qualquer barreira acústica. Relativamente à Figura 3.1, o gráfico à esquerda representa a parte real da onda enquanto o gráfico à direita representa a parte imaginária da onda. Este tipo de representação das ondas, corresponde à representação de um fenómeno com comportamento oscilatório no plano complexo. A parte imaginária surge de uma função seno enquanto a parte real é representada pela função cosseno correspondente. As ondas planas são representadas pela equação (3.7) em que:  $\hat{p}$  representa a amplitude da oscilação e  $\phi$  a constante de fase.

$$p(x, t) = \hat{p}e^{j(-kx+\phi)}e^{j\omega t} \quad (3.7)$$

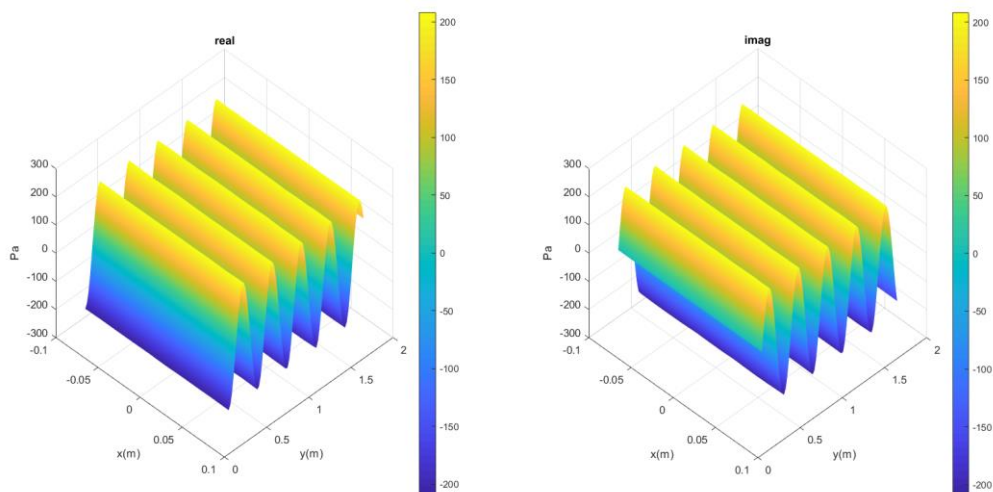


Figura 3.1 – Representação de uma onda plana incidente.

### 3.2 Aspetos gerais relativos às simulações realizadas

Neste trabalho é avaliado o efeito da influência de algumas características geométricas da estrutura como o espaçamento entre elementos e a dimensão dos mesmos, a influência da forma dos elementos, recorrendo a elementos mais simples como círculos e semicírculos, triângulos e quadrados e também será avaliado o desempenho de figuras mais complexas como perfis

HEB e perfis U. É ainda avaliado o efeito da influência da presença de ressoadores de Helmholtz em algumas destas geometrias mais simples, como os quadrados e os círculos.

Para cada uma das simulações foi criada uma geometria e criada a respetiva malha de elementos finitos. Na Figura 3.2, podemos ver o exemplo da geometria e respetiva malha de elementos finitos de um cristal sónico composto por três elementos circulares, correspondendo esta a uma barreira acústica com comprimento infinito e composta por 3 fiadas de dispersores. Em relação à geometria, de forma a garantir a simetria necessária, a largura do retângulo é igual ao espaçamento entre os elementos de cada geometria. Quanto à malha de elementos finitos, composta por elementos triangulares, esta tem pelo menos 8 elementos por cada comprimento de onda. Para garantir os 8 elementos por cada comprimento de onda, estando a realizar simulações até aos 2000Hz, os lados dos triângulos têm no máximo 2cm de lado.

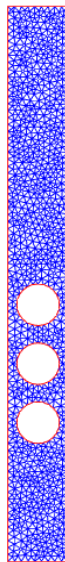


Figura 3.2 – Exemplo de geometria e respetiva malha de elementos finitos.

### 3.3 Simulação do desempenho das barreiras acústicas - Influência da geometria do cristal sónico

Neste capítulo, será realizada uma avaliação do desempenho de cristais sónicos formados apenas por dois elementos circulares com o objetivo de determinar a influência da variação do raio dos elementos e do espaçamento entre os mesmos, na atenuação sonora provocada e na localização e abrangência da *band gap*. Será ainda feita uma análise à influência do número de

elementos que constituem o cristal sónico. Todas estas simulações serão realizadas para avaliar o desempenho das barreiras acústicas com cristais sónicos até aos 2000Hz.

### 3.3.1 Influência da variação do raio dos elementos

As simulações foram realizadas mantendo o espaçamento de 17cm constante, entre os elementos do cristal sónico, variando o raio dos mesmos. Os raios adotados foram de 4cm ( $r4//17$ ), 6cm ( $r6//17$ ) e 8cm ( $r8//17$ ). Deve referir-se que os espaçamentos adotados, neste caso os 17cm, se referem à distância entre os centros geométricos dos elementos.

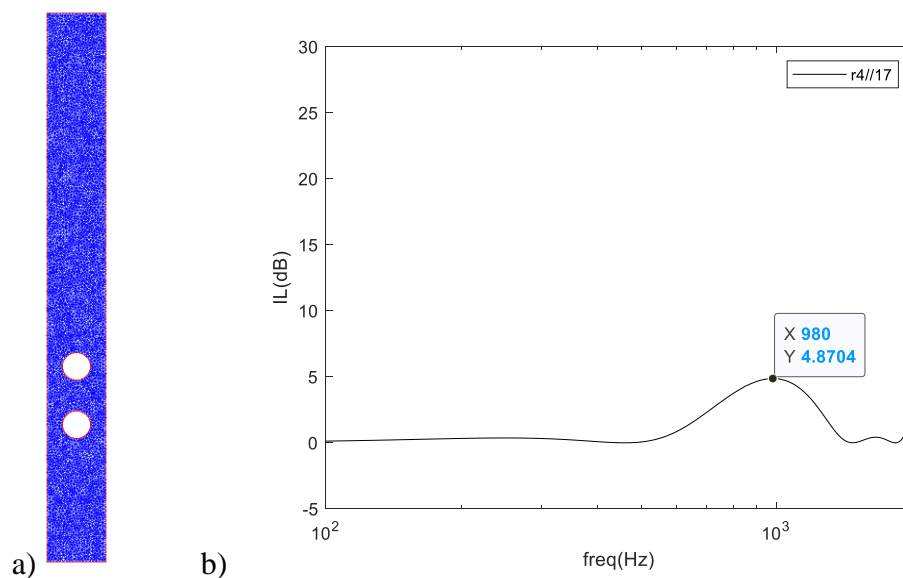


Figura 3.3 – a) Cristal sónico em avaliação composto por dois círculos de raio 4cm espaçados a 17cm; b) Curva IL obtida ao avaliar o desempenho deste cristal sónico.

Na Figura 3.3, em a) podemos observar a geometria do cristal sónico que está a ser avaliado enquanto em b) temos a curva IL que mostra o seu desempenho. O esquema do cristal sónico representado mostra a estrutura periódica para o qual, na avaliação do desempenho da barreira acústica, se assume que este se repete de forma infinita formando uma barreira acústica, uma pequena aproximação no cálculo, uma vez que sabemos que uma barreira acústica *in situ* tem início e fim.

Analisando a curva IL obtida ao simular o desempenho do cristal sónico formado por dois elementos circulares de raio 4cm espaçados a 17cm, confirmamos que o cristal sónico não tem qualquer interferência numa significativa zona do espectro da onda sonora incidente, até perto

dos 500Hz. Nesta zona do espetro, perto dos 500Hz, verificamos o aparecimento da primeira *band gap*, localizada entre os 500Hz e os 1400Hz, tendo esta o seu pico nos 980 Hz com uma atenuação sonora de 4.9 dB. Este resultado parece à partida uma solução bem-adaptada à mitigação do ruído de tráfego em termos da localização da *band gap*, no entanto o seu pico de atenuação sonora não parece ser suficiente para se tornar uma solução de mercado competitiva. Na Figura 3.4, ao analisar a curva IL referente ao cristal sónico formado por dois elementos circulares de raio 6cm espaçados a 17cm, verifica-se o aumento do pico de atenuação sonora obtendo um valor do IL de 11,8dB. Este aumento é previsível uma vez que, ao aumentar o raio dos elementos, temos consequentemente o aumento do *filling factor*. Em relação à primeira *band gap*, esta aparece numa frequência ligeiramente mais baixa, perto dos 400Hz, no entanto esta estende-se até perto dos 1500Hz. O pico de atenuação também desce ligeiramente para os 900Hz. Nesta simulação verificamos ainda que se observa o aparecimento da segunda *band gap* antes dos 2000Hz, no entanto esta não tem grande importância no âmbito deste trabalho, uma vez que o objetivo deste trabalho é otimizar a atenuação sonora para a mitigação do ruído de tráfego que, tal como já foi referido anteriormente, se localiza predominantemente entre os 500Hz e os 1500Hz tendo o seu pico perto dos 1000Hz.

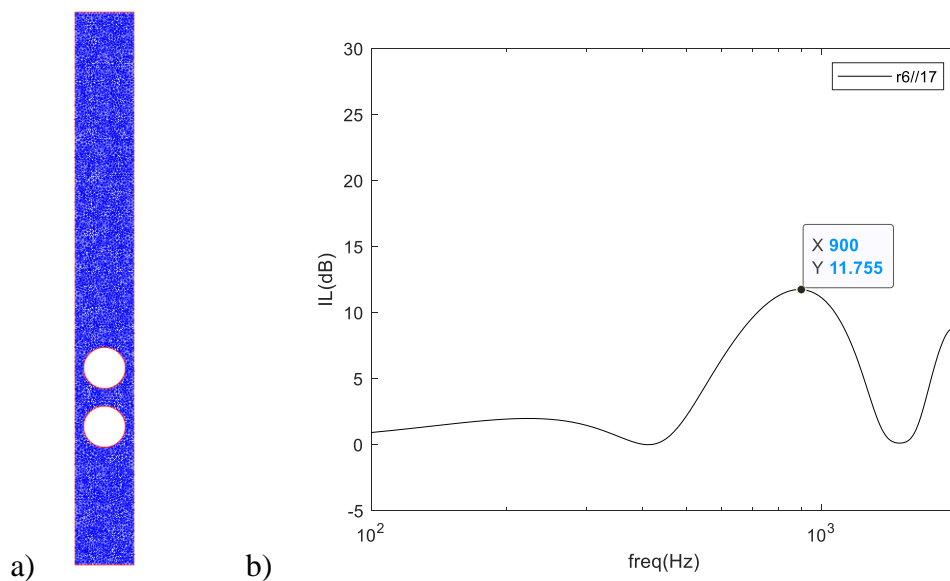


Figura 3.4 – a) Cristal sónico em avaliação composto por dois círculos de raio 6cm espaçados a 17cm; b) Curva IL obtida ao avaliar o desempenho deste cristal sónico.

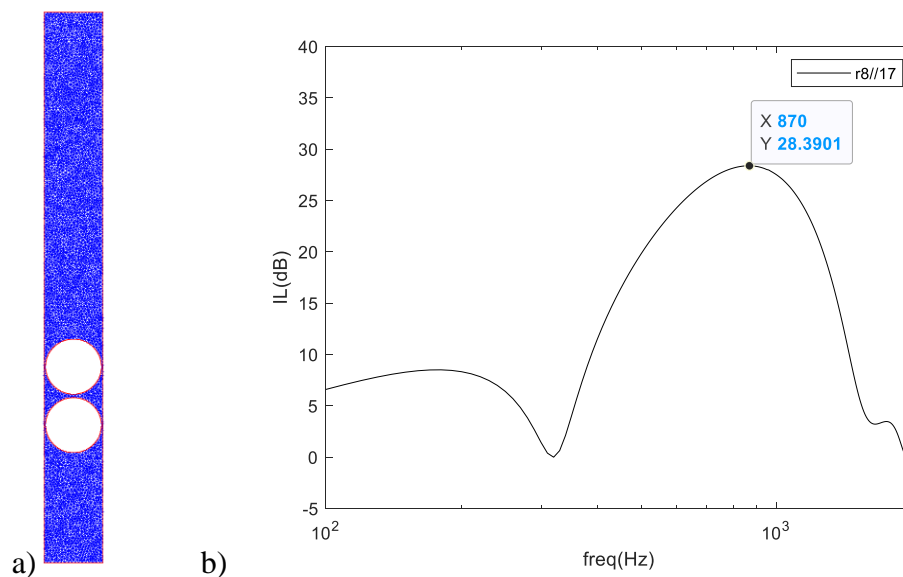


Figura 3.5 – a) Cristal sónico em avaliação composto por dois círculos de raio 8cm espaçados a 17cm; b) Curva IL obtida ao avaliar o desempenho deste cristal sónico.

Esta última simulação, com o objetivo de avaliar a influência da variação do raio dos elementos do cristal sónico, realizada com dois elementos circulares de raio 8cm espaçados também a 17cm, como se pode ver na Figura 3.5 a), destaca-se das anteriores por diversos fatores, principalmente pelo valor significativamente mais elevado do seu pico que atinge os 28.4dB para a frequência de 870Hz. À primeira vista esta solução parece ter um desempenho bastante superior às anteriores, até pela abrangência da *band gap*, que se localiza entre os 300Hz e os 1700Hz, no entanto, se realizarmos uma análise mais cuidada, encontramos uma diferença bastante significativa relativamente às duas simulações anteriores. A particularidade desta última simulação é facilmente observada na Figura 3.6, até ao aparecimento da primeira *band gap* verificamos que a barreira acústica provoca uma atenuação sonora significativa, superior até ao valor de pico obtido da primeira simulação em que o cristal sónico é formado pelos elementos menores. Esta atenuação sonora mostra que esta barreira acústica se está a comportar como uma barreira tradicional nesta zona do espetro. Este comportamento é explicado pelo espaçamento muito pequeno entre os elementos do cristal sónico, Figura 3.5 a), uma vez que os elementos têm 8cm de raio e o espaçamento entre os seus centros geométricos é de 17cm, o espaçamento entre as faces dos elementos será apenas de 1cm. Esta proximidade explica então este comportamento tipo barreira, no entanto esta solução não será adequada aos objetivos deste trabalho, uma vez que contraria algumas das vantagens da tecnologia em estudo, como, por exemplo, a possibilidade de não afetar os ventos e/ou impacte visual reduzido.

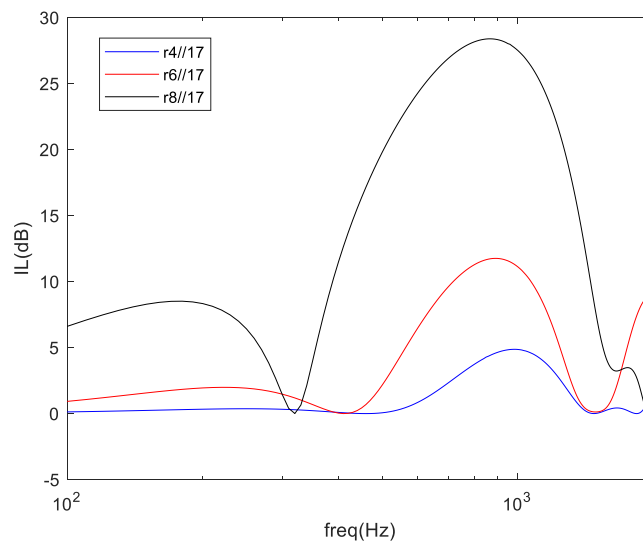


Figura 3.6 – Curvas IL obtidas ao simular o desempenho dos elementos circulares de raio variável e espaçamento constante de 17cm.

Como verificamos na Figura 3.6, a solução com os elementos de maiores dimensões é a que apresenta melhor desempenho, no entanto, pelas razões já referidas, não se enquadra neste trabalho. A solução com os elementos de 6cm de raio, apresenta resultados interessantes, tanto em termos de IL como de abrangência da *band gap*, e será mais tarde usada neste trabalho como termo de comparação.

### 3.3.2 Influência da variação do espaçamento entre os elementos

As simulações foram realizadas mantendo o raio de 6cm dos elementos constante, variando o espaçamento entre os elementos. Os espaçamentos adotados foram de 15cm, 17cm e, desta forma, pretende-se mostrar o efeito que a aproximação dos elementos do cristal sônico tem na atenuação sonora atingida.



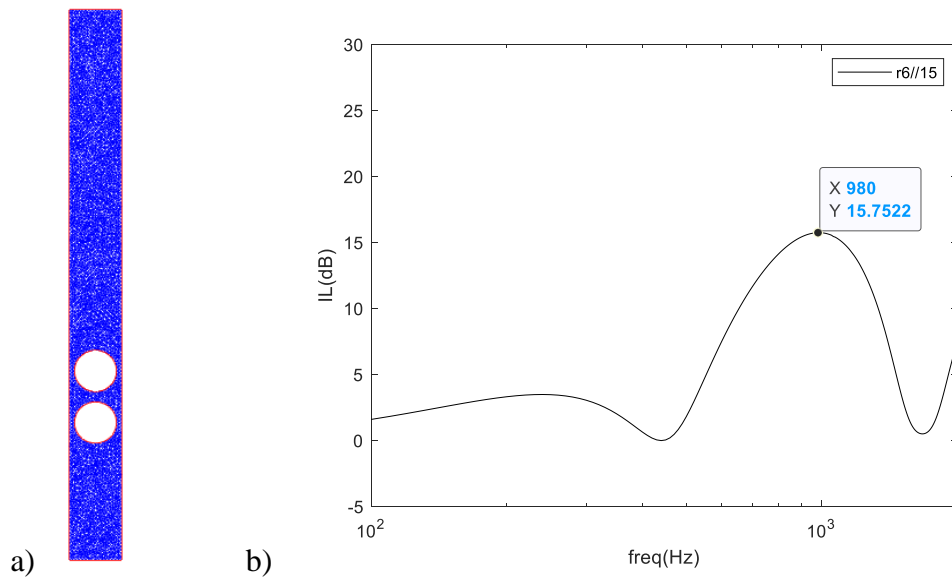


Figura 3.7 – a) Cristal sónico em avaliação composto por dois círculos de raio 6cm espaçados a 15cm; b) Curva IL obtida ao avaliar o desempenho deste cristal sónico.

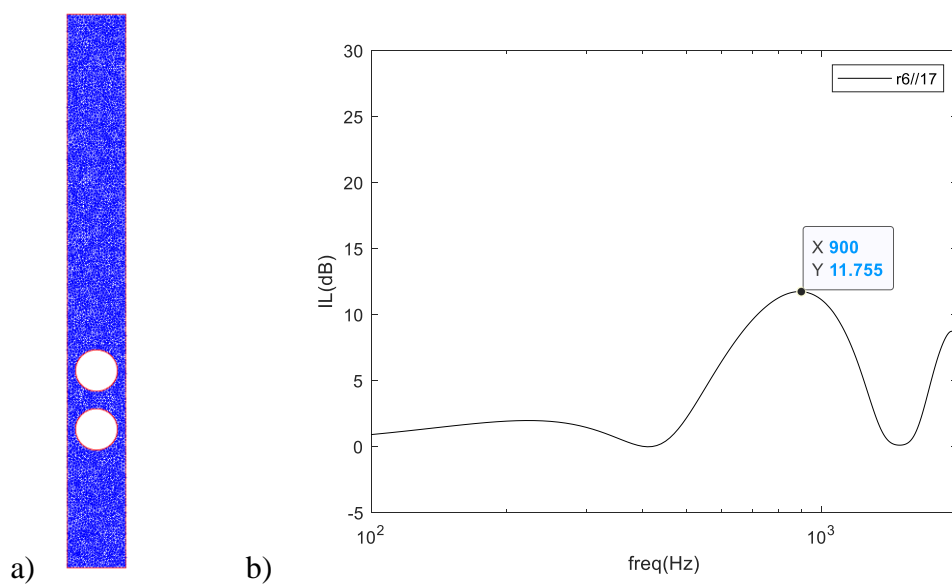


Figura 3.8 – a) Cristal sónico em avaliação composto por dois círculos de raio 6cm espaçados a 17cm; b) Curva IL obtida ao avaliar o desempenho deste cristal sónico.

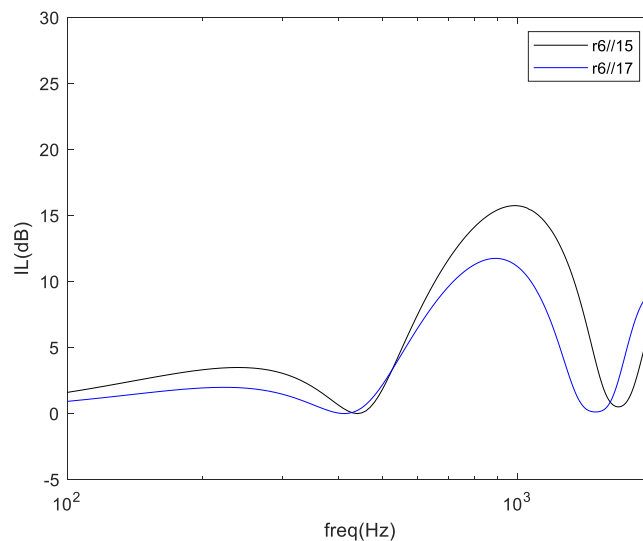


Figura 3.9 – Curvas IL obtidas ao simular o desempenho dos elementos circulares com espaçamento variável e raio 6cm.

Na Figura 3.9 verificamos que a aproximação dos elementos do cristal sônico provoca o aumento do valor de pico de IL, uma consequência esperada pela mesma razão do aumento do raio no subcapítulo anterior, ambas as situações provocam o aumento do *filling factor*. Nesta análise verificamos ainda, para além de conseguirmos uma *band gap* um pouco mais abrangente, também conseguimos identificar uma atenuação nas frequências mais baixas causada pelo “efeito barreira”, já observado anteriormente quando se aumentou o raio dos elementos para os 8cm com o espaçamento de 17cm, que acontece pela excessiva aproximação dos elementos do cristal sônico. No entanto, a *band gap* correspondente à curva IL do cristal sônico com espaçamento de 15cm entre os seus elementos, para além da maior abrangência e do maior pico de atenuação, tem uma característica interessante e importante para a mitigação do ruído de tráfego: o seu pico acontece praticamente nos 1000Hz.

### 3.3.3 Influência do número de elementos

As simulações foram realizadas variando o número de elementos do cristal sônico, no entanto, as características geométricas dos elementos foram constantes ao longo de todas as simulações, com elementos com 6cm de raio espaçados a 17cm. As configurações geométricas testadas são apresentadas na Figura 3.10.

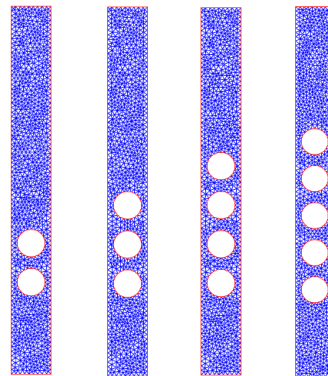


Figura 3.10 – Geometria dos cristais sônicos avaliados nestas simulações.

Analisando as curvas IL apresentadas na Figura 3.11, concluímos que o aumento do número de fiadas de elementos no cristal sónico provoca um aumento no valor de pico de atenuação na *band gap* perto dos 1000Hz. Para além do aumento deste pico de atenuação, verifica-se ainda que o aumento de fiadas de elementos do cristal sónico, faz com que a *band gap* se inicie em frequências ligeiramente mais altas enquanto não aparenta ter influência na frequência em que essa mesma *band gap* termina. Uma vez que o cristal sónico composto por três fiadas de elementos já apresenta um desempenho razoável, em que o valor de pico de atenuação é superior a 20dB, este cristal sónico será usado como referência nas comparações que serão apresentadas ao longo deste capítulo.

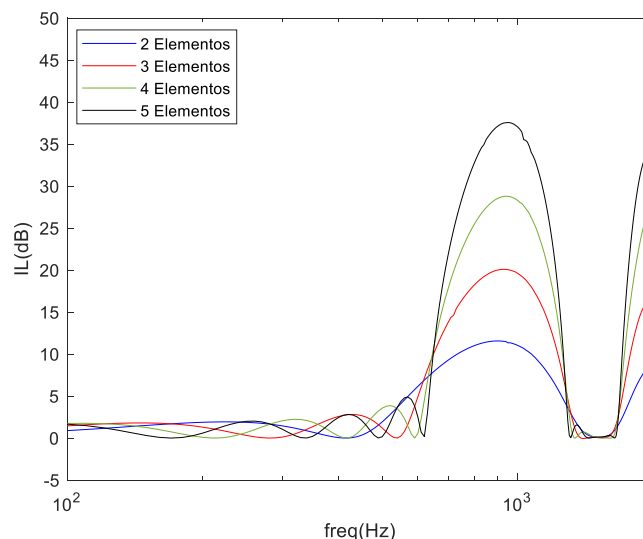


Figura 3.11 – Curvas IL obtidas ao simular o desempenho de elementos circulares iguais, variando apenas o número de elementos.

### 3.4 Simulação do desempenho das barreiras acústicas - Influência da forma dos elementos do cristal sônico

Neste capítulo iremos avaliar o desempenho de várias geometrias dos elementos que formam o cristal sônico, de forma a poder conhecer como é que estas geometrias influenciam o pico de atenuação sonora e a localização e abrangência da *band gap*. Os cristais sônicos em estudo serão compostos por três elementos com a geometria em estudo e o seu desempenho será comparado a um cristal sônico de referência, composto por três elementos circulares de raio 6cm espaçados a 17cm. A geometria e respetiva curva IL deste cristal sônico de referência, que será usado como termo de comparação, estão representadas na Figura 3.12. Este cristal sônico provoca uma atenuação sonora máxima de 20,4dB para uma frequência de 930Hz e tem uma *band gap* com início perto dos 500Hz e se estende até perto dos 1400Hz.

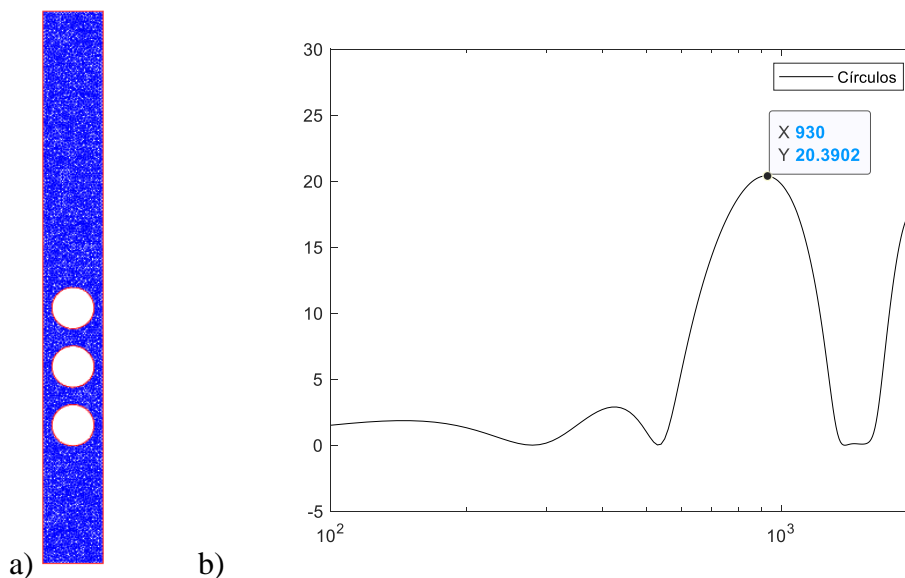


Figura 3.12 – a) Geometria do cristal sônico de referência composto por três elementos circulares de raio 6cm espaçados a 17cm; b) Curva IL do cristal sônico de referência.

#### 3.4.1 Elementos com forma de semicírculo

No estudo realizado para avaliar o desempenho do cristal sônico com elementos de forma semicircular, foram efetuadas duas simulações com elementos de dimensões iguais, semicírculos de raio 6cm espaçados a 17cm, mas com uma orientação diferente, como podemos verificar na Figura 3.13. Na Figura 3.13 a) temos os elementos com a face plana voltada para a fonte sonora enquanto em b) temos a face plana voltada para os recetores.

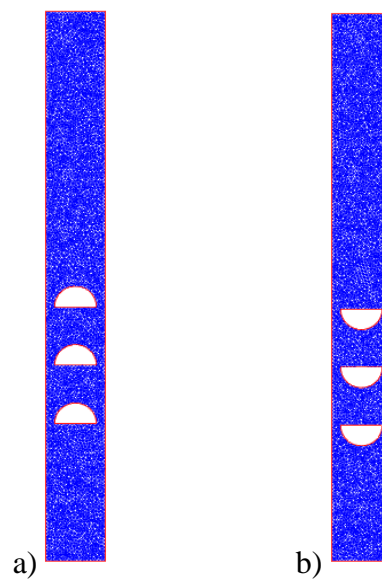


Figura 3.13 – a) Geometria dos elementos semicirculares com a face plana voltada para a fonte; b) Geometria dos elementos semicirculares com a face plana voltada para o recetor.

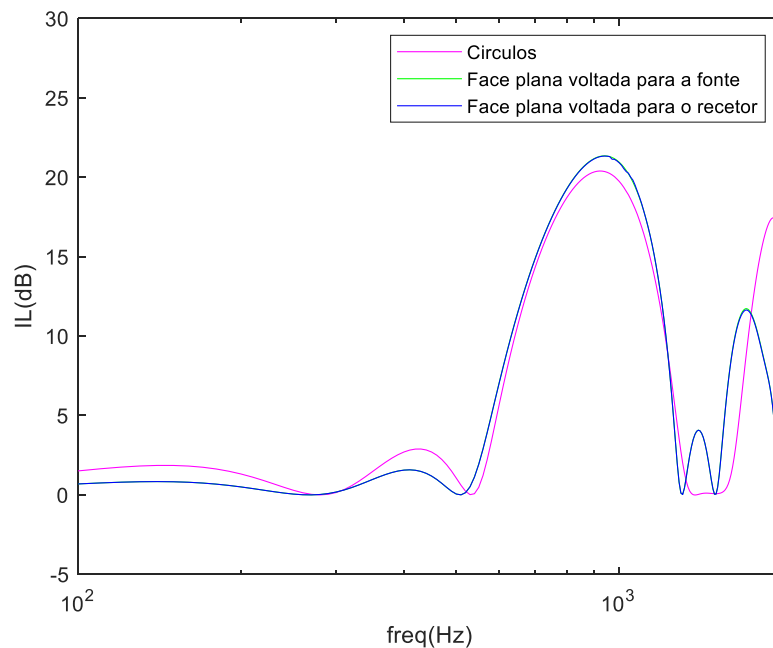


Figura 3.14 – Curvas IL que representam o desempenho dos cristais sónicos com elementos de forma semicircular e do cristal sónico de referência.

Analisando os resultados das simulações realizadas, concluímos que a orientação da face plana dos elementos de forma semicircular, para a fonte ou para o recetor, não tem praticamente influência na curva IL obtida até aos 2000Hz, uma vez que os gráficos a azul e a verde, na Figura 3.14, são quase coincidentes.

Comparando o desempenho dos cristais sônicos com elementos de geometria semicircular com o desempenho do cristal sónico de referência, verificamos que o pico de atenuação sonora e a *band gap* na zona dos 1000Hz são muito semelhantes, com um desempenho ligeiramente melhor para os cristais sônicos em estudo. Os cristais sônicos têm todos um comportamento muito semelhante nas frequências abaixo dos 500Hz, no entanto o comportamento do cristal sónico em estudo, após a *band gap* principal que termina perto dos 1400Hz, é diferente uma vez que se verifica o aparecimento de outras *band gaps* de menor intensidade. Tendo em conta apenas o desempenho acústico de ambas as geometrias, a solução usando cristais sônicos com elementos de forma semicircular, seria uma solução muito mais competitiva para aplicar no mercado, uma vez que obtemos um desempenho acústico muito semelhante usando apenas metade da matéria-prima, no entanto há outros aspetos a ter em conta como a estabilidade estrutural dos elementos e a sua durabilidade, bem como os custos de transformação.

### 3.4.2 Elementos triangulares

No estudo realizado para avaliar o desempenho do cristal sónico com elementos de forma triangular, foram efetuadas duas simulações com elementos de dimensões iguais, mas com orientação diferente, como se pode verificar na Figura 3.15. Na Figura 3.15 a) temos os elementos triangulares com uma face plana voltada para a fonte enquanto em b) temos uma face plana voltada para os recetores. Os triângulos que constituem estes cristais sônicos em estudo, são triângulos com 12cm de base e altura e estão espaçados a 17cm, com o objetivo de serem comparáveis ao cristal sónico de referência, que é composto por elementos circulares de raio 6cm espaçados a 17cm.

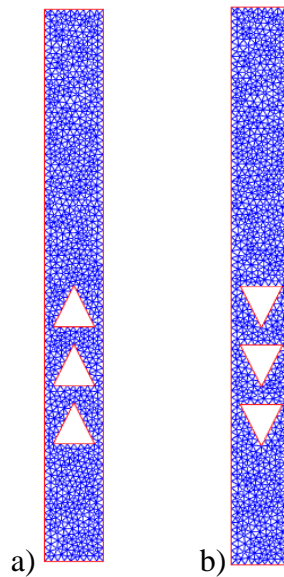


Figura 3.15 – a) Geometria dos elementos triangulares com a face voltada para a fonte; b) Geometria dos elementos com a face voltada para o recetor.

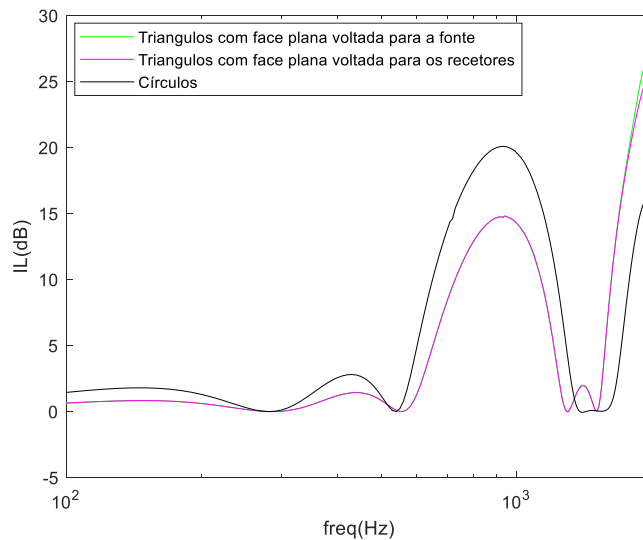


Figura 3.16 – Curvas IL que representam o desempenho dos cristais sônicos com elementos de forma triangular e do cristal sônico de referência.

Após a análise das curvas IL que resultaram das simulações com os cristais sônicos compostos por elementos triangulares, concluímos que a orientação de uma face plana para a fonte ou para recetor não terá influência na curva IL obtida, tal como concluímos na avaliação dos cristais sônicos formados por elementos semicirculares, uma vez que as curvas a verde e rosa, na Figura 3.16, são coincidentes até muito perto dos 2000Hz.

Comparando o desempenho dos cristais sônicos com elementos de geometria triangular com o desempenho do cristal sônico de referência, verificamos que o pico de atenuação é menor no cristal sônico em estudo e a *band gap* perto dos 1000Hz é também menos abrangente. Tal como foi verificado na análise anterior com os elementos semicirculares, nas frequências mais baixas, ambos os cristais sônicos têm comportamentos semelhantes, no entanto para as frequências perto dos 2000Hz verificamos que há uma segunda *band gap* e que a atenuação sonora provocada pelos cristais sônicos com elementos triangulares é bastante mais significativa que nos cristais sônicos de referência. Tendo em conta o objetivo para os quais estes cristais sônicos seriam aplicados, mitigação do ruído de tráfego, a solução de referência provoca uma atenuação superior entre os 500Hz e os 1500Hz uma vez que, para além da *band gap* mais abrangente, tem também um valor IL de pico superior numa frequência perto dos 1000Hz, para além da maior facilidade de preparação para aplicação *in situ*, fruto da pequena intervenção que os elementos circulares necessitam e das boas características estruturais já conhecidas.

### 3.4.3 Elementos quadrados

No estudo realizado para avaliar o desempenho do cristal sônico com elementos de forma quadrada, foram efetuadas várias simulações. Inicialmente, foi testado o desempenho do cristal sônico com elementos quadrados com 12cm de lado e, posteriormente, foi explorada a influência que a rotação destes elementos pode ter na curva IL obtida. As geometrias que foram criadas para realizar estas simulações, em que, mais uma vez, o espaçamento entre os elementos é de 17cm, estão representadas na Figura 3.17. Na Figura 3.17 a) temos o cristal sônico Quad12 que representa os elementos quadrados de lado 12cm na posição em que temos as faces voltadas para a fonte e para os recetores enquanto na Figura 3.17 b) temos os elementos do cristal sônico com as mesmas dimensões do cristal sônico anterior mas com os vértices voltados para a fonte e os recetores e, na Figura 3.17 c), temos um cristal sônico com elementos de dimensões menores em que são as suas diagonais a ter 12cm e tem também os vértices voltados para a fonte e os recetores. Desta forma, temos o objetivo de avaliar o desempenho dos cristais sônicos com elementos quadrados e esperamos concluir qual a melhor posição para aplicar estes elementos de forma a maximizar o seu desempenho. No entanto, o resultado do cristal sônico representado na Figura 3.17 b) não será usado na comparação uma vez que se verifica o efeito de barreira, que já foi falado anteriormente, devido ao espaço quase inexistente entre os elementos. Desta forma, a curva IL obtida mostra um comportamento diferente deste cristal sônico, como podemos ver na Figura 3.18.



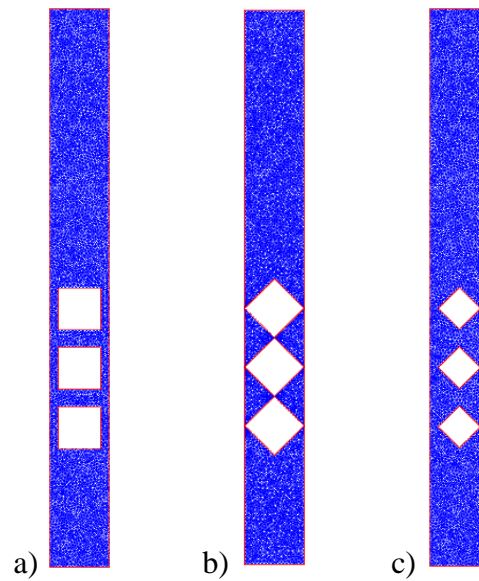


Figura 3.17 – a) Geometria dos elementos quadrados com 12cm de lado, Quad12;  
b) Geometria dos elementos com forma de losango que resulta da rotação do Quad12;  
c) Geometria dos elementos com forma de losango com 12cm de diagonal, Losango12.

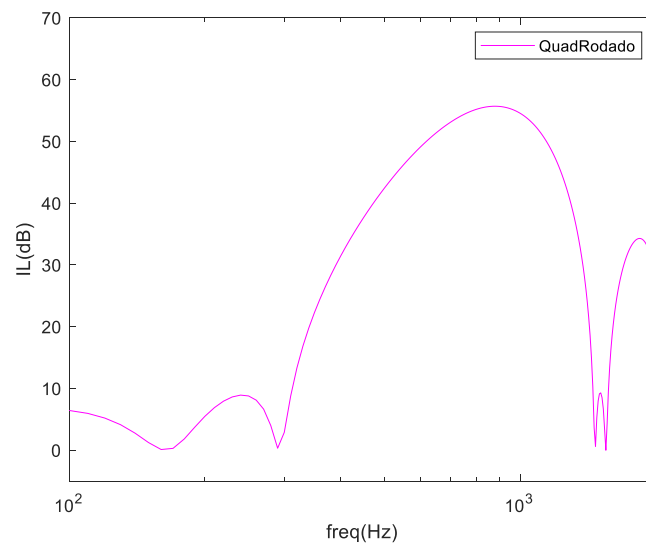


Figura 3.18 – Curva IL do cristal fónico com os elementos quadrados com 12cm de lado com os vértices voltados para a fonte e os recetores.

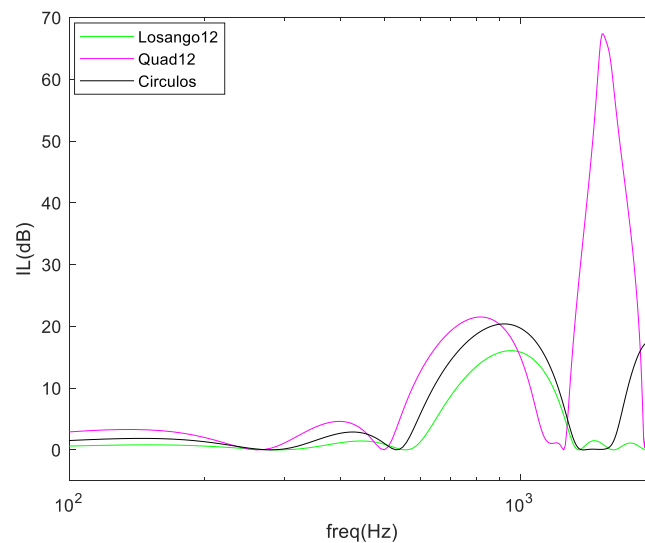


Figura 3.19 – Curvas IL que representam o desempenho dos cristais sônicos com elementos de forma quadrada com 12cm tanto de lado como diagonal e do cristal sônico de referência.

Analisando as curvas IL presentes na Figura 3.19, que resultaram das simulações realizadas com os cristais sônicos com elementos quadrados, concluímos que o cristal sônico com quadrados de lado 12cm espaçados a 17cm, tem um comportamento semelhante ao cristal sônico de referência até ao final da primeira *band gap*. A *band gap* na zona dos 1000Hz tem uma abrangência bastante semelhante e o valor IL de pico é praticamente igual, no entanto o cristal sônico de referência tem a vantagem de o seu IL de pico ser para uma frequência mais próxima dos 1000Hz. Nas frequências mais baixas, todos os cristais sônicos têm desempenhos praticamente iguais, no entanto, a partir dos 1500Hz, verifica-se que o cristal sônico Quad12 tem uma segunda *band gap* com pouca abrangência e um pico de atenuação sonora muito significativo. Esta segunda *band gap* não terá grande interesse para a mitigação do ruído de tráfego, pela sua localização no espectro, no entanto este tipo de *band gap* é semelhante à que obtemos quando se aplicam ressoadores de Helmholtz aos elementos do cristal sônico e será explorada mais à frente, no entanto poderá ser trabalhada com mais atenção de forma a conseguir atenuação sonora noutras regiões do espectro. Tendo em conta que o cristal de referência tem, no geral, um desempenho ligeiramente superior ao cristal sônico Quad12, para além de ter um *filling factor* menor e de necessitar de menos processo de preparação, será então uma melhor solução.

O cristal sônico Losango12, tem também um desempenho interessante apesar das menores dimensões, por isso, de forma a poder conseguir tirar conclusões concretas da influência do posicionamento dos elementos quadrados, foram realizadas simulações com elementos tendo

como base cristais sónicos com elementos quadrados com 10cm, tanto de lado como de diagonal, pois desta forma podemos comparar todas as geometrias mencionadas.

Para estas simulações com cristais sónicos com elementos quadrados também espaçados a 17cm e com 10cm, tanto de lado como de diagonal, foram criadas as geometrias apresentadas na Figura 3.20. Na Figura 3.20 a) temos o cristal sónico Quad10 com os elementos quadrados de lado 10cm na posição em que temos as faces voltadas para a fonte e para os recetores enquanto na Figura 3.20 b) temos os elementos do cristal sónico com as mesmas dimensões do cristal sónico anterior mas é rodado e tem os vértices voltados para a fonte e os recetores e, na Figura 3.20 c), temos um cristal sónico com elementos de dimensões menores em que são as suas diagonais a ter 10cm e tem também os vértices voltados para a fontes e os recetores. Assim, pretendemos concluir qual a posição dos elementos do cristal sónico que maximiza a sua atenuação sonora, uma vez que não foi possível comparar todas as geometrias nas simulações anteriores.

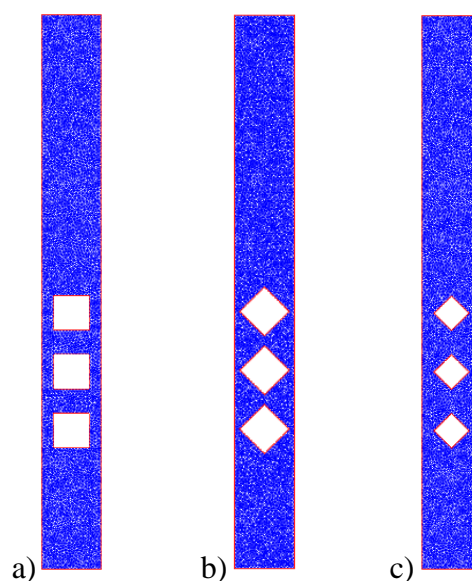


Figura 3.20 – a) Geometria dos elementos quadrados com 10cm de lado: Quad10;  
b) Geometria dos elementos que resultam da rotação do Quad10: Quad10//rodado;  
c) Geometria dos elementos com forma de losango com 10cm de diagonal: Losango10.

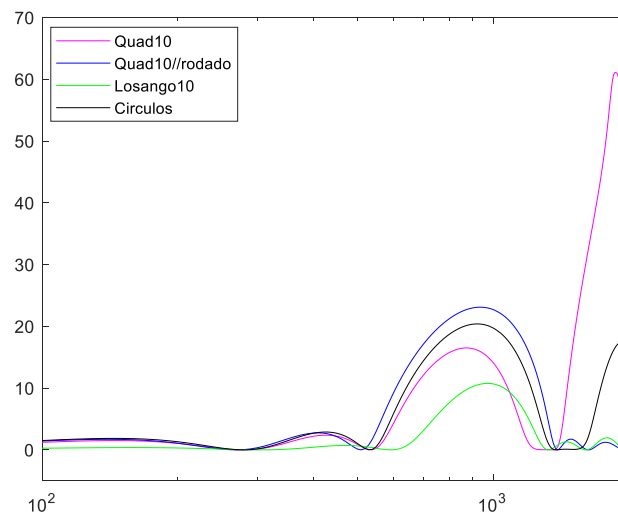


Figura 3.21 – Curvas IL que representam o desempenho dos cristais sônicos com elementos de forma quadrada com 10cm, tanto de lado como diagonal, e do cristal sónico de referência.

Analisando as curvas IL presentes na Figura 3.21, que representam a atenuação sonora provocada pelos cristais sônicos com elementos quadrados com 10cm, tanto de lado como de diagonal, e espaçados mais uma vez a 17cm, concluímos que todos têm um comportamento bastante semelhante em termos da forma da curva IL até perto dos 1500Hz. A conclusão mais interessante que retiramos da análise destas curvas IL é a influência da rotação dos elementos quadrados com 10cm de lado. Comparando a curva IL do cristal sónico Quad10 e a curva IL do cristal sónico Quad10//rodado, concluímos que, apesar destes elementos terem as mesmas dimensões, o facto de termos os vértices voltados para a fonte e para os recetores, faz com que a *band gap* obtida seja mais abrangente, indo desde perto dos 500Hz até perto dos 1500Hz, e para além de conseguirmos um valor IL de pico mais elevado, este IL de pico está ainda mais perto dos 1000Hz, isto é, temos uma *band gap* mais centrada perto dos 1000Hz. Este cristal sónico, Quad10//rodado, apesar das dimensões mais reduzidas, apresenta um desempenho superior ao cristal sónico de referência. Nas frequências mais baixas, até perto dos 500Hz, podemos assumir que todos os cristais sônicos se comportam da mesma forma. Nas frequências mais altas, após os 1500Hz, voltamos a verificar o aparecimento de uma *band gap* pouco abrangente e com um IL de pico muito elevado no cristal sónico Quad10. O cristal sónico Losango10, pelas suas dimensões significativamente mais reduzidas, tem um desempenho inferior ao longo de todo o espectro em análise, até aos 2000Hz.

#### A3.4.4 Elementos U

No estudo realizado para avaliar o desempenho dos cristais sónicos com elementos em forma de U, foram efetuadas simulações com elementos de dimensões iguais, mas com orientação diferente, como se pode verificar na Figura 3.22. Na Figura 3.22 a) temos os elementos em forma de U com a abertura voltada para a fonte enquanto em c) temos a abertura voltada para os recetores. Em b) e d) temos a abertura voltada para o lado, em que a abertura está na linha da barreira acústica formada pelos respetivos cristais sónicos. Os elementos que constituem estes cristais sónicos eram originalmente quadrados com 10cm de lado nos quais foi feita uma abertura de forma a que os elementos tenham 3cm de espessura. Estes elementos estão, mais uma vez, espaçados a 17cm.

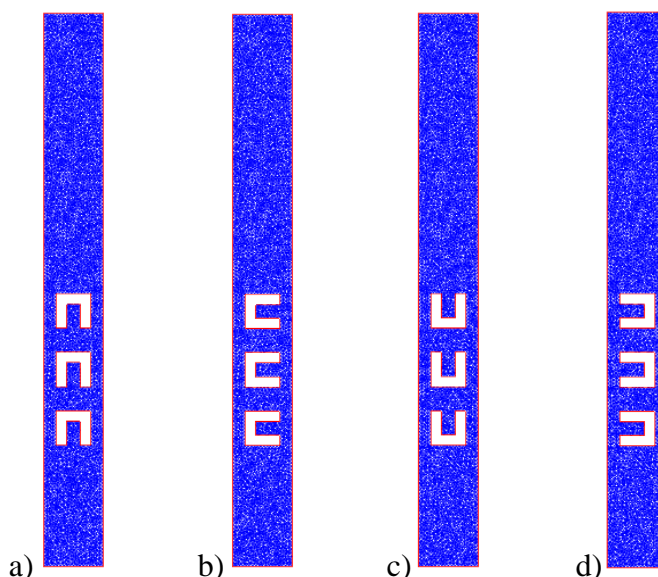


Figura 3.22 – a) Elementos com a abertura voltada para a fonte, U10;

- b) Elementos rodados 90°, U10//90; c) Elementos com a abertura voltada para os recetores, U10//180; d) Elementos rodados 270°, U10//270.

Analisando as curvas IL obtidas ao simular o desempenho dos cristais sónicos com elementos em forma de U, representadas na Figura 3.23, concluímos que a orientação da abertura para a fonte ou para recetor não terá influência na curva IL obtida e que o mesmo acontece quando a abertura está alinhada com a barreira acústica em ambas as situações, uma vez as curvas IL obtidas nos respetivos ensaios, são coincidentes. O desempenho destes elementos em forma de U é bastante superior quando estes têm a sua abertura voltada para a fonte ou para os recetores, uma vez que se verifica uma atenuação sonora superior ao longo de um intervalo de frequências maior e o valor IL de pico é também significativamente superior.

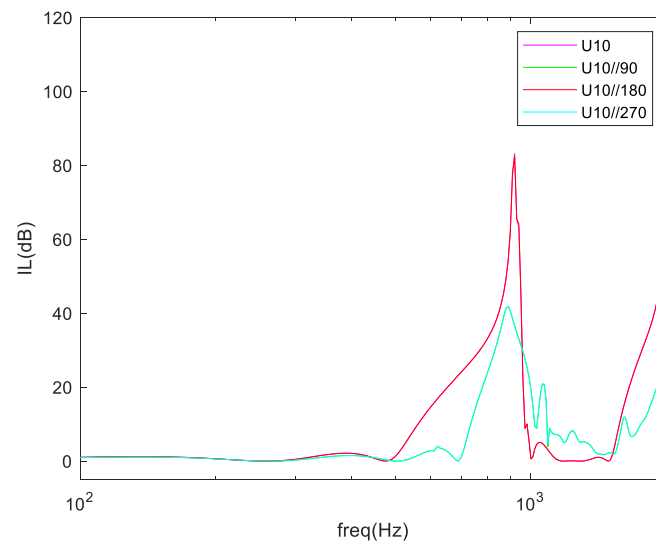


Figura 3.23 – Curvas IL que representam o desempenho dos cristais sônicos com elementos em forma de U.

### 3.4.5 Elementos HEB

Foram feitas simulações para avaliar o desempenho do cristal sônico formado por elementos com as dimensões dos perfis comerciais HEB120. Os perfis foram colocados em duas posições distintas, como pode ser verificado na Figura 3.24, estando os perfis afastados, mais uma vez, a 17cm. Na Figura 3.24 a) os perfis estão com as faces planas, os banzos, voltados para a fonte e para os recetores enquanto em b) estão rodados de 90° ficando, desta forma, com a alma alinhada com a barreira acústica. Desta forma pretende-se avaliar a influência do posicionamento dos perfis comerciais HEB120.

As curvas IL obtidas nas simulações realizadas com os perfis comerciais HEB120, representadas na Figura 3.25, mostram um comportamento distinto para cada posição em que os perfis foram colocados, mostrando que o posicionamento dos elementos com esta forma influencia claramente a curva IL obtida. O intervalo de frequências em que o cristal sônico com os elementos nos quais os banzos estão voltados para a fonte e os recetores, provocam atenuação sonora em frequências mais altas, acima dos 1000Hz, enquanto o cristal sônico com os elementos rodados, em que temos a alma dos perfis alinhada com a linha formada pela barreira acústica, provoca atenuação sonora em frequências mais baixas, com maior IL abaixo dos 1000Hz, mas, neste caso, a atenuação sonora estende-se até perto dos 1600Hz. Apesar dos cristais sônicos em estudo atuarem em intervalos distintos, ambos têm um valor IL de pico semelhante. Perto dos 1000Hz, onde sabemos que acontece o pico do ruído de tráfego, ambos os cristais sônicos têm um desempenho muito inferior ao seu pico de atenuação.

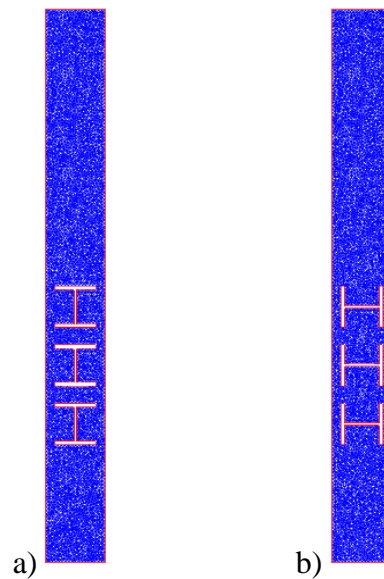


Figura 3.24 – a) Elementos HEB120; b) Elementos HEB120 rodados.

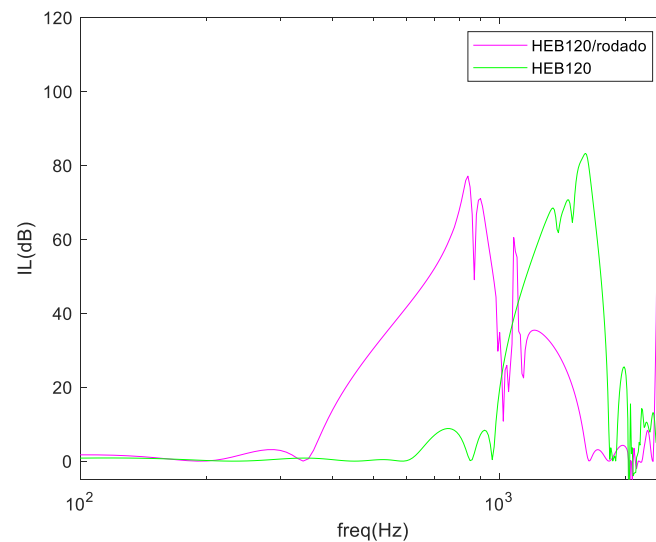


Figura 3.25 – Curvas IL que representam o desempenho dos cristais sônicos com elementos HEB120.

Tendo em conta os resultados obtidos com os perfis comerciais HEB120, em que cada cristal sónico tinha uma atenuação sonora significativa num intervalo de frequências distinto, foi realizada uma simulação com um cristal sónico, o qual irá ser tratado com “Solução Mista”. A geometria deste cristal sónico está representada na Figura 3.25 a) e, como pode ser observado,

é composto por três perfis comerciais HEB120, em que o primeiro e o terceiro elementos estão com os banzos voltados para a fonte e os recetores e o elemento intermédio se encontra rodado.

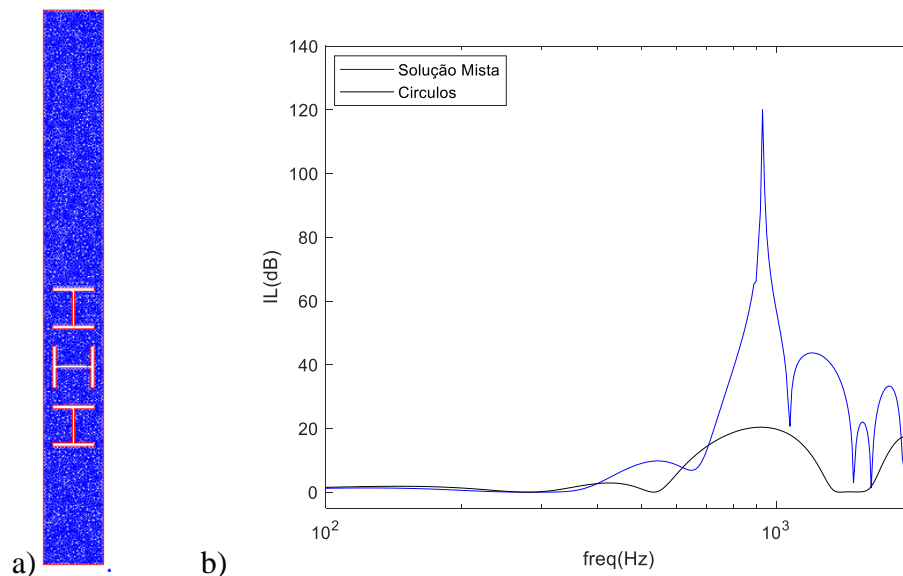


Figura 3.26 – a) Geometria do cristal sónico “Solução Mista”; b) Curva IL do cristal sónico “Solução Mista” em comparação com a curva IL do cristal sónico de referência.

A curva IL obtida na simulação realizada com o cristal sónico “Solução Mista”, está representada na Figura 3.26 b), mostra que a combinação dos perfis comerciais HEB120 com posições distintas no mesmo cristal sónico provoca uma atenuação sonora potencialmente mais interessante em relação à atenuação sonora obtida nos ensaios em que todos os perfis tinham a mesma posição. A curva IL mostra que o cristal sónico “Solução Mista” provoca uma atenuação sonora superior em relação ao cristal sónico de referência ao longo de praticamente todo o espectro até aos 2000Hz, o que mostra o potencial desta solução. O IL de pico assim obtido é semelhante ao obtido com a aplicação de ressoadores de Helmholtz, como vai ser explorado mais à frente neste trabalho, uma vez que se obtém uma atenuação sonora muito elevada num intervalo de frequências muito curto, mostrando que acontece uma ressonância nas frequências perto dos 900Hz.

### 3.5 Simulação do desempenho das barreiras acústicas - Influência da aplicação de ressoadores de Helmholtz nos elementos do cristal sónico

Neste capítulo será realizada uma avaliação do desempenho de cristais sónicos formados por três elementos, inicialmente quadrados e depois circulares, e tem o objetivo de avaliar a



influência da introdução de ressoadores de Helmholtz nos elementos dos cristais sônicos e a avaliação do efeito de algumas das características geométricas dos ressoadores (área e comprimento do gargalo e volume interior) na curva IL obtida. Os ressoadores de Helmholtz serão introduzidos em geometrias para as quais já conhecemos a curva IL obtida. Todas estas simulações serão realizadas até aos 2000Hz para avaliar o desempenho das barreiras acústicas com cristais sônicos, com ressoadores de Helmholtz aplicados nos seus elementos.

### 3.5.1 Elementos quadrados

Para o estudo da influência da aplicação de ressoadores de Helmholtz nos elementos quadrados dos cristais sônicos foram criadas as geometrias apresentadas nas Figuras 3.27 e 3.28. Os ressoadores apresentados na Figura 3.27 têm uma cavidade interior com área de 5cmx5cm enquanto os ressoadores apresentados na Figura 3.28 têm uma cavidade interior com área de 6cmx6cm e todos estão aplicados em elementos de um cristal sónico formado por três fiadas de elementos quadrado com 10cm de lado. Durante este subcapítulo a curva IL correspondente ao cristal sónico com elementos quadrados com 10 cm de lado, nos quais serão introduzidos os ressoadores, será tratada como curva IL original. O objetivo desta análise foi avaliar a influência da aplicação de ressoadores de Helmholtz nos elementos do cristal sónico e ainda avaliar a influência de algumas características geométricas na curva IL obtida. As características geométricas dos ressoadores analisadas foram a largura e o comprimento dos gargalos dos ressoadores e o volume de ar no interior dos mesmos.

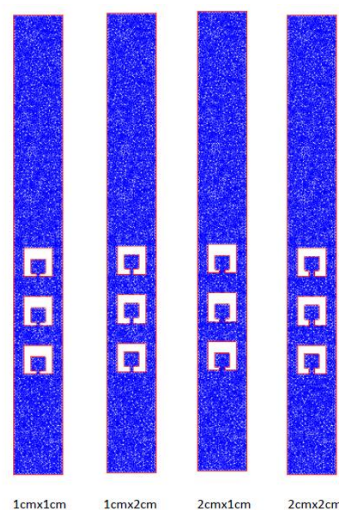


Figura 3.27 – Geometria dos cristais sônicos com elementos quadrados com ressoadores de Helmholtz com a cavidade interior de 5cmx5cm e respetivas dimensões do gargalo.

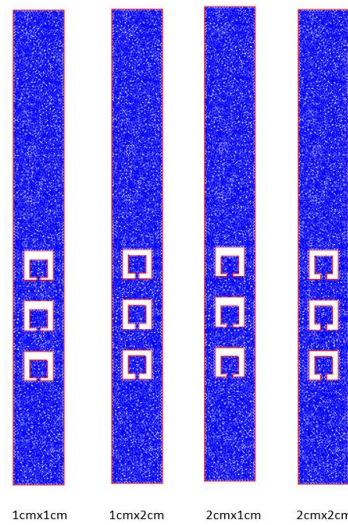


Figura 3.28 – Geometria dos cristais sônicos com elementos quadrados com ressoadores de Helmholtz, com a cavidade interior de 6cmx6cm e respetivas dimensões do gargalo.

Inicialmente, foi avaliada a influência da largura do gargalo dos ressoadores na curva IL obtida ao simular o desempenho das barreiras acústicas. Para analisar a influência desta propriedade geométrica, foi simulado o desempenho de diversos cristais sônicos. Na Figura 3.29 a) temos a comparação entre a curva IL original (preto) e outras duas curvas IL correspondentes aos cristais sônicos em que as cavidades interiores dos ressoadores têm 5cmx5cm de área e os seus gargalos têm 1cm de comprimento, variando entre estes a largura do gargalo, num temos um gargalo com 1cm de largura (vermelho) e no outro temos um gargalo com 2cm de largura (azul). Na Figura 3.29 b) as curvas IL representam cristais sônicos semelhantes, no entanto, as cavidades interiores têm 6cmx6cm de área.

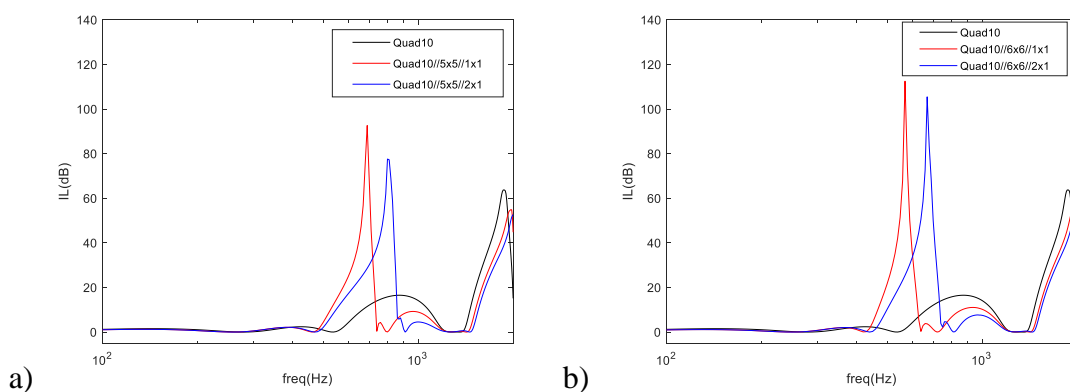


Figura 3.29 – Avaliação da influência da largura do gargalo do ressoador na curva IL.

Atentando na Figura 3.29, verifica-se que na presença de ressoadores com gargalos mais estreitos, a frequência de ressonância tem um valor mais alto e acontece em frequências mais baixas. As considerações relativas às alterações na *band gap* na zona dos 1000Hz serão feitas após a apresentação de todas as análises da influência de algumas das características geométricas dos ressoadores

De seguida, foi avaliada a influência do comprimento do gargalo dos ressoadores nas curvas IL. Para analisar a influência desta propriedade geométrica, foi simulado o desempenho de diversos cristais sônicos. A forma de apresentar os resultados é semelhante à anterior, mas, neste caso, as curvas IL a vermelho representam os ressoadores em que o gargalo tem 1cm de comprimento e as curvas IL a azul representam os ressoadores em que o gargalo tem 2cm de comprimento.

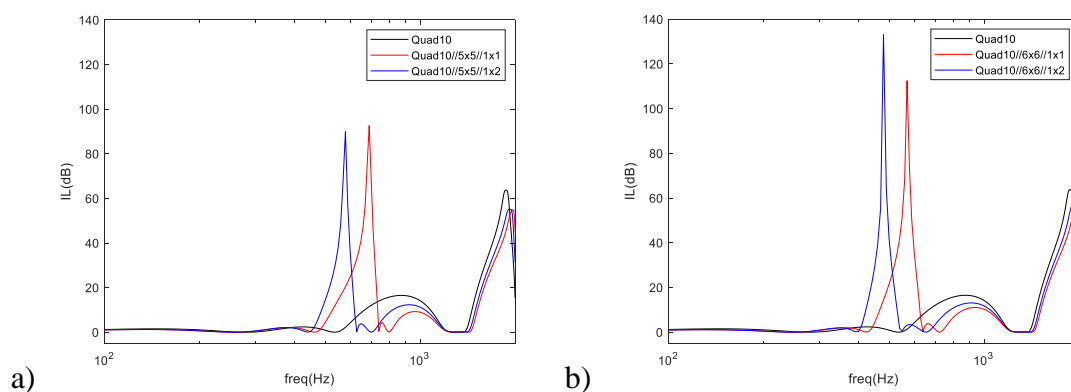


Figura 3.30 – Avaliação da influência do comprimento do gargalo do ressoador na curva IL.

Analisando as curvas IL presentes na Figura 3.30, estas não nos permitem tirar conclusões em relação à influência do comprimento do gargalo no valor de atenuação na frequência de ressonância. No entanto, verifica-se que, com gargalos mais longos, a frequência de ressonância será mais baixa.

Por fim, foi avaliada a influência do volume de ar no interior dos ressoadores nas curvas IL. Para analisar a influência desta propriedade geométrica, foi simulado o desempenho de diversos cristais sônicos. Foi mais uma vez usada a mesma forma de apresentar os resultados, no entanto, neste caso, as curvas IL a vermelho representam os ressoadores em que a cavidade interior tem 5cmx5cm de área e as curvas IL a azul representam os ressoadores em que a cavidade interior tem 6cmx6cm de área.

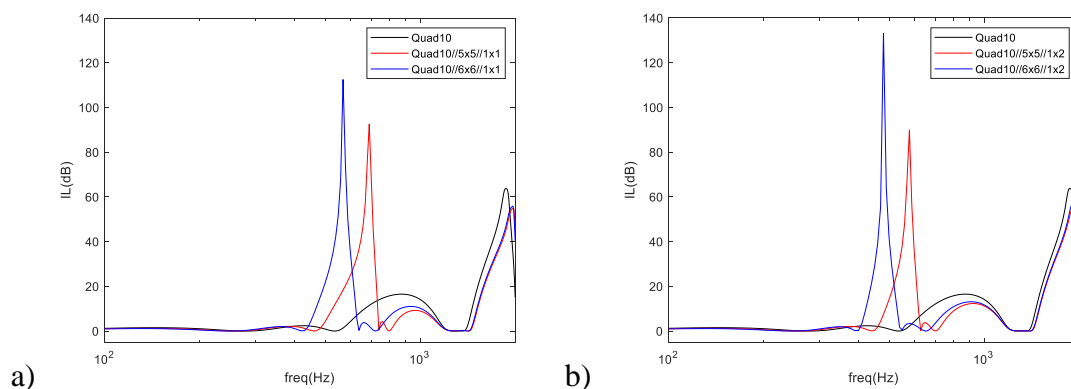


Figura 3.31 – Avaliação da influência do volume de ar no ressonador na curva IL.

Comparando as curvas IL presentes na Figura 3.31, a frequência de ressonância será mais alta em ressonadores com cavidades menores, no entanto o seu valor de atenuação na frequência de ressonância será mais baixo.

Atendendo agora ao comportamento das *band gap* na zona dos 1000Hz, conclui-se então que, independentemente das características geométricas analisadas, dos ressoadores de Helmholtz, a introdução dos mesmos em elementos de cristais sônicos, diminuiu o desempenho dos mesmos. A introdução dos ressoadores provoca um abaixamento do valor de pico da *band gap* na zona dos 1000Hz, comparativamente à curva IL original. Verificamos ainda que a introdução dos ressoadores faz com que esta *band gap* se inicie em frequências ligeiramente mais altas comparando com a curva IL original, não tendo influência na frequência em que esta mesma *band gap* termina, frequência a partir da qual o comportamento de todas as curvas IL é muito semelhante.

Tabela 3.1 – Frequências de ressonância

Área da cavidade (cm <sup>2</sup> )	Dimensões Gargalo (cm)	Frequência Ressonância (Hz)	
		Matlab	Analicamente
5x5	1x1	690	691
5x5	1x2	580	584
5x5	2x1	800	772
5x5	2x2	710	691
6x6	1x1	570	575
6x6	1x2	480	486
6x6	2x1	670	643
6x6	2x2	590	575

Na Tabela 3.1 estão apresentadas as frequências de ressonância de cada ressoador, tendo em conta as suas dimensões, obtidas pela modelação FEM através da simulação do desempenho das barreiras acústicas em comparação com os valores previstos analiticamente.

Os valores das frequências de ressonância previstos analiticamente, para cada ressoador de Helmholtz, foram obtidos através da equação (3.8), na qual  $\omega$  representa a frequência angular,  $c$  representa a velocidade do som no ar,  $s$  a área do gargalo,  $L'$  o comprimento efetivo do gargalo e  $V$  o volume de ar no ressoador.

$$\omega = c \sqrt{\frac{s}{VL'}} \quad (3.8)$$

Verifica-se que os valores calculados pela modelação FEM vão ao encontro dos previstos analiticamente. Ao analisar e comparar estes valores, verifica-se que, nos ressoadores com uma abertura mais larga obtemos um desvio maior entre estes valores.

### 3.5.2 Elementos com forma circular

No estudo da influência da aplicação de ressoadores de Helmholtz em elementos circulares dos cristais sônicos foram criadas as geometrias apresentadas na Figura 3.32. As geometrias apresentadas na Figura 3.32 a) representam os cristais sônicos com 3 fiadas de elementos circulares com 6cm de raio aos quais foram adicionados ressoadores com cavidades também circulares com 4cm de raio, enquanto na Figura 3.32 b) a cavidade tem 5cm de raio. Tal como foi realizado no subcapítulo anterior, também aqui iremos avaliar a influência da largura e do comprimento dos gargalos dos ressoadores, e o volume de ar no seu interior, nas curvas IL obtidas.

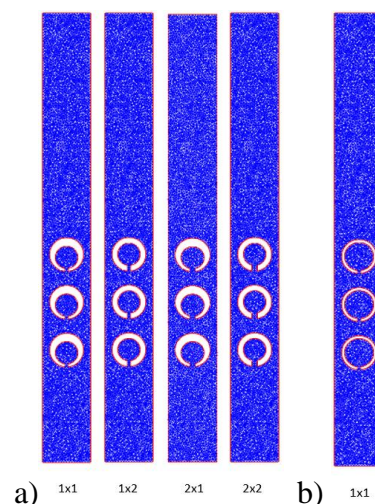


Figura 3.32 – Geometria dos cristais sônicos com elementos circulares com 6cm de raio com ressoadores de Helmholtz aplicados e as respetivas dimensões do gargalo. Em a) a cavidade circular tem 4cm de raio enquanto em b) a cavidade circular tem 5cm de raio.

Inicialmente, foi avaliada a influência da largura do gargalo dos ressoadores na curva IL obtida ao simular o desempenho das barreiras acústicas. Na Figura 3.33 temos a comparação entre a curva IL original (preto) e outras duas curvas IL correspondentes aos cristais sónicos em que as cavidades dos ressoadores são circulares com 4cm de raio e os seus gargalos têm 1cm de comprimento, variando entre as mesmas a largura do gargalo dos ressoadores. Uma das curvas IL representa um cristal sónico em que os ressoadores presentes nos seus elementos têm gargalos com 1cm de largura (vermelho) e na outra temos gargalos com 2cm de largura (azul).

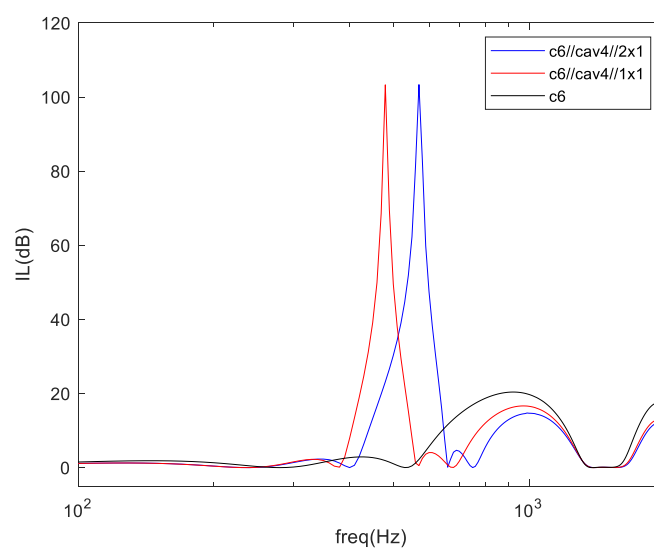


Figura 3.33 – Avaliação da influência da largura do gargalo do ressoador na curva IL.

Atentando na Figura 3.33, verificamos que, tal como nos ressoadores quadrados, na presença de gargalos mais estreitos a frequência de ressonância é menor.

De seguida, foi avaliada a influência do comprimento do gargalo dos ressoadores nas curvas IL. A forma de apresentar os resultados é semelhante à anterior, mas, neste caso, a curva IL a vermelho representa os ressoadores em que o gargalo tem 1cm de comprimento e a curva IL a azul representa os ressoadores em que o gargalo tem 2cm de comprimento.

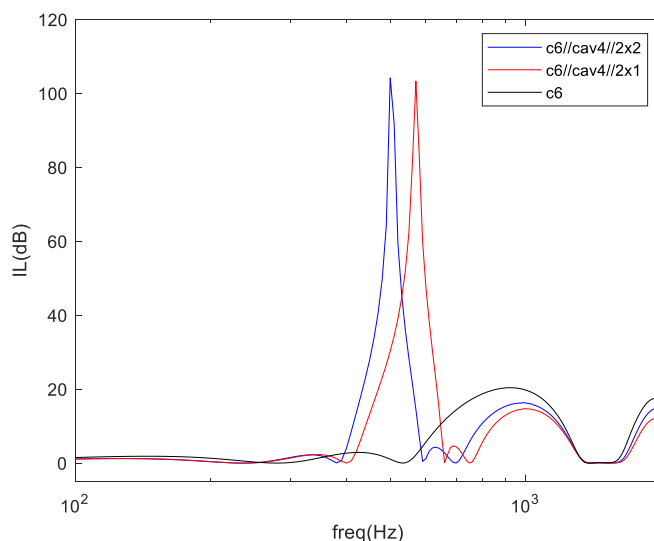


Figura 3.34 – Avaliação da influência do comprimento do gargalo do ressoador na curva IL.

Analisando as curvas IL presentes na Figura 3.34, verificamos, mais uma vez, que, na presença de gargalos mais longos, a frequência de ressonância será mais baixa.

Por fim, foi avaliada a influência do volume de ar no interior dos ressoadores nas curvas IL. Foi, mais uma vez, usada a mesma forma de apresentar os resultados, no entanto, neste caso, a curva IL a vermelho representa os ressoadores em que a cavidade circular tem 4cm de raio e a curva IL a azul representa os ressoadores em que a cavidade circular tem 5cm de raio.

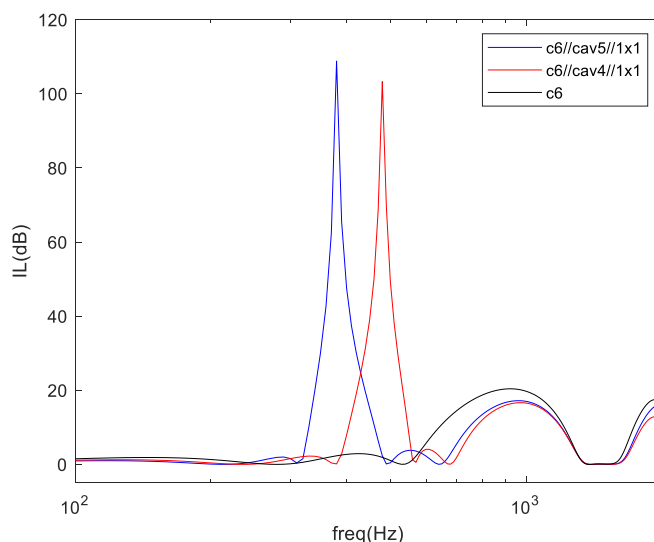


Figura 3.35 – Avaliação da influência do volume de ar no ressoador na curva IL.

Comparando as curvas IL presentes na Figura 3.35, a frequência de ressonância será mais alta em ressoadores com cavidades menores.

Atendendo agora no comportamento das *band gap* na zona dos 1000Hz, as conclusões são semelhantes às obtidas no subcapítulo anterior com ressoadores quadrados. A introdução de ressoadores em elementos de cristais sônicos, diminuiu o desempenho dos mesmos. A introdução dos ressoadores provoca um abaixamento do valor de pico da *band gap* na zona dos 1000Hz, comparativamente à curva IL original. Verificamos ainda que a introdução dos ressoadores faz com que esta *band gap* se inicie em frequências ligeiramente mais altas comparando com a curva IL original, não tendo, no entanto, influência na frequência em que esta mesma *band gap* termina.



## 4 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

### 4.1 Objetivo

Estes ensaios foram realizados com o objetivo de verificar a validade do modelo de elementos finitos utilizado para simular o desempenho das geometrias criadas para os cristais sónicos. O parâmetro que queremos calcular será parâmetro o IL que, como já foi referido anteriormente, representa a diferença de nível sonoro num determinado ponto, na presença e ausência da barreira acústica composta por cristais sónicos.

### 4.2 Equipamento utilizado

Quanto ao equipamento necessário para realizar os ensaios, fazer o registo das medições e o tratamento dos dados foram utilizados os seguintes dispositivos, que estão também representados na Figura 4.1:

- uma fonte sonora Alpha – 100 da marca RTO;
- um microfone com um pré-amplificador do tipo 26 AK da marca “G.R.A.S. Sound & Vibration”;
- um analisador portátil modelo Symphonie da marca “01dB”;
- um amplificador;
- um computador portátil equipado com o programa dBati32 da marca “01dB”.



Figura 4.1 – Equipamentos utilizados nas medições: a) amplificador; b) fonte sonora; c) microfone; d) Symphonie; e) computador portátil com software dBati32 (adaptado de Dias, 2014).

### 4.3 Amostras

Para a realização dos ensaios foram construídas barreiras acústicas à escala 1/6 utilizando três materiais. No lugar dos cristais sônicos foram colocados tubos VD com 20mm de diâmetro e 60cm de altura. Para posicionar e manter a verticalidade dos tubos VD foram usadas placas de poliestireno expandido (EPS) nas extremidades dos mesmos. Os tubos VD, originalmente com 3m de comprimento, foram cortados em peças com 60cm e cravados nas placas EPS em posições previamente definidas, tendo em conta a configuração geométrica a testar e, assim garantir o correto espaçamento entre os mesmos, Figura 4.2 a). De forma a evitar a reflexão das ondas sonoras nas placas EPS, estas foram ainda envolvidas com uma espuma acústica com o objetivo de provocar a absorção das ondas sonoras incidentes, Figura 4.2 b).

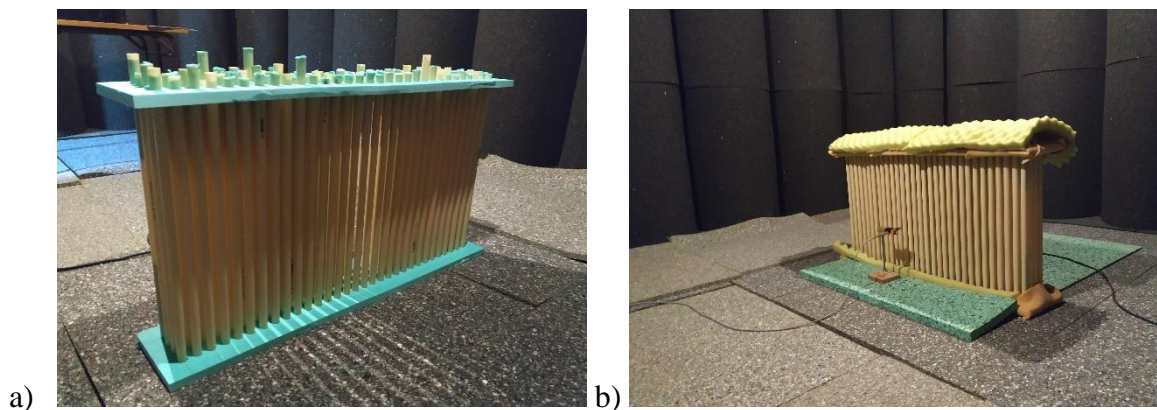


Figura 4.2 – a) Amostra de barreira acústica com cristais sônicos sem espuma acústica;  
b) Amostra de barreira acústica com cristais sônicos com espuma acústica.

Foram ensaiadas quatro configurações geométricas. Em todas as configurações geométricas foram usados tubos VD com 20mm de diâmetro. Sendo as amostras construídas à escala 1/6, estes tubos representam elementos dos cristais sônicos com 12cm de diâmetro. Duas das amostras representam cristais sônicos com 20cm de espaçamento entre os seus elementos e as outras duas amostras representam os cristais sônicos com espaçamento de 17cm entre os seus elementos. Foram feitas duas amostras com cada espaçamento, uma vez que em ambos os casos, uma das amostras tem 3 fiadas de elementos e a outra tem 4 fiadas de elementos. As diversas configurações ensaiadas estão representadas na Figura 4.3. Nas duas amostras em que os elementos estão espaçados a 2,83cm cada fiada tem 34 elementos enquanto nas duas amostras em que os elementos estão espaçados a 3,33cm cada fiada tem 31 elementos.

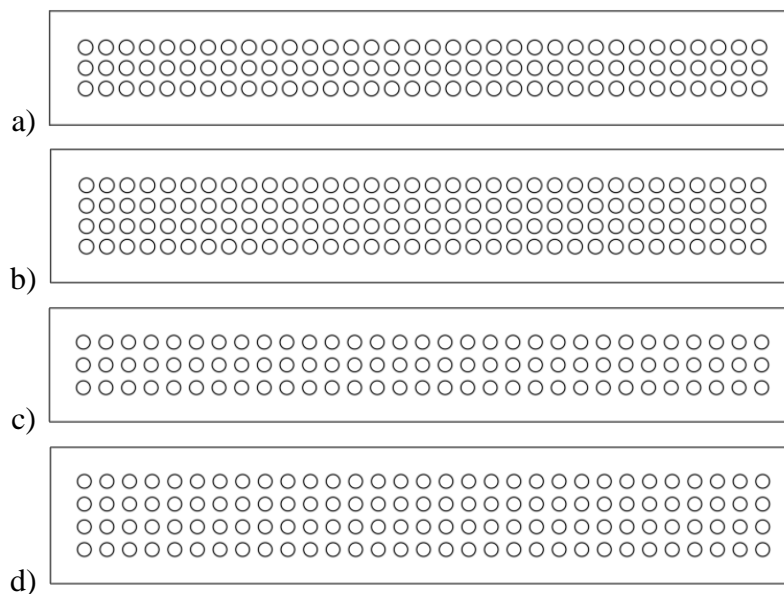


Figura 4.3 – a) Amostra com três fiadas espaçadas a 2,83cm; b) Amostra com quatro fiadas espaçadas a 2,83cm; c) Amostra com três fiadas espaçadas a 3,33cm; d) Amostra com quatro fiadas espaçadas a 3,33cm.

#### 4.4 Procedimento de Ensaio

Os ensaios foram realizados na câmara semi-anecoica do DEC da Universidade de Coimbra. Esta câmara tem dimensões úteis de 4,20x3,50x2,35 m<sup>3</sup> e está representada na Figura 4.4.



Figura 4.4 – Câmara semi-anecoica do DEC.

A configuração esquemática foi igual para todos os ensaios e está representada na Figura 4.5, mudando apenas a amostra com a respetiva configuração geométrica da barreira em teste. As medidas apresentadas são baseadas na norma de ensaio EN 1793-6, relativa a métodos de ensaio de equipamentos para mitigação do ruído de tráfego. Sendo o ensaio realizado à escala 1/6 as medidas propostas na norma são divididas por 6. Tal como representado na Figura 4.5, o microfone ficou então posicionado a 17cm da face do elemento central da primeira fiada de tubos da barreira acústica sujeita ao ensaio. Pode ainda verificar-se que são feitas 9 medições, representadas pelas 9 posições do microfone espaçadas a 6,7cm, e que os três pontos de medição mais próximos da barreira se encontram a 4,2cm da mesma.

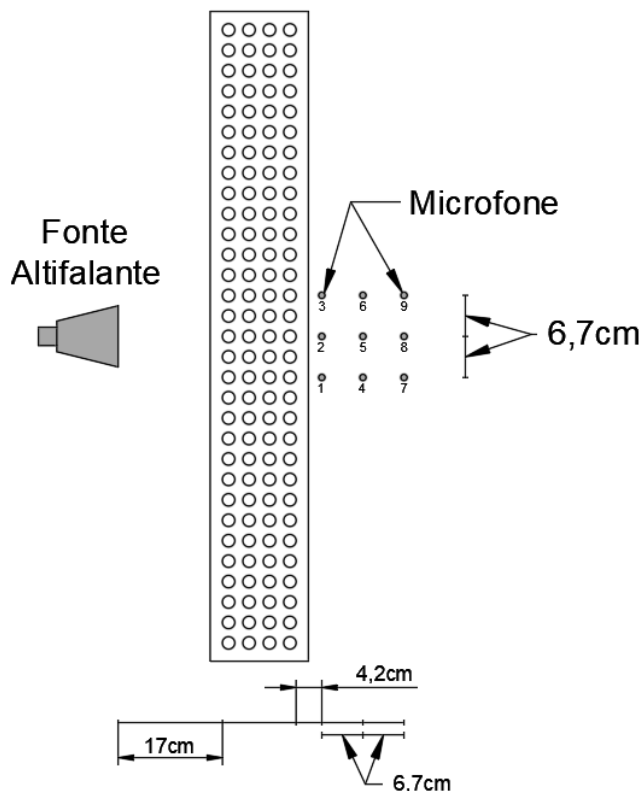


Figura 4.5 – Configuração esquemática de ensaio.

Com a amostra a ensaiar posicionada, define-se a colocação da fonte sonora e marcam-se os nove pontos de medição, onde se irá colocar o microfone e procede-se então ao registo das medições. Como já foi referido, o registo das medições é feito recorrendo ao software dBati32. Sendo utilizado apenas um microfone em diversas posições, apenas teremos um equipamento para configurar. Com o auxílio de um calibrador, procede-se à calibração do microfone a utilizar, Figura 4.6. Em todos os ensaios experimentais foi utilizado, para avaliar o desempenho da barreira acústica, um ruído branco em terço de oitava com a duração de 5 segundos.

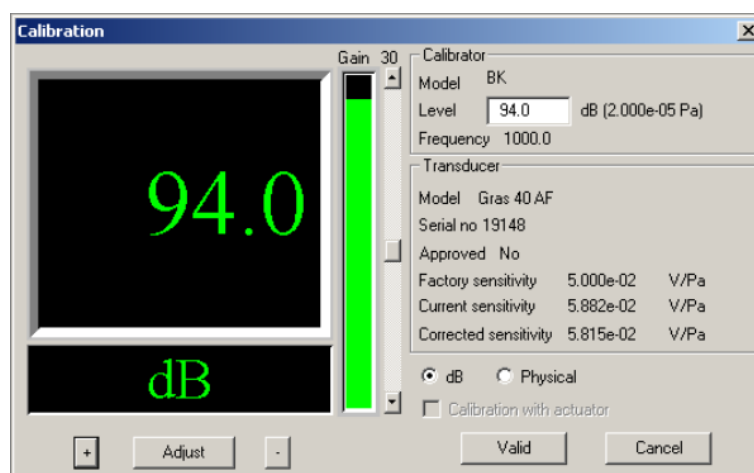


Figura 4.6 – Calibração do microfone.

Após registar as nove medições no software dBati32, estes dados são exportados e analisados numa rotina implementada em Matlab. A curva IL é obtida através da diferença entre o nível de pressão sonora medido na presença e ausência da amostra a ensaiar, fazendo a média das nove medições. A curva IL é calculada até aos 20kHz, usando uma banda estreita de 100Hz.

#### 4.5 Definição da configuração de ensaio

Após ensaiar a primeira amostra, a amostra com quatro fiadas e com os elementos espaçados a 3,33cm, foi obtida a curva IL representada na Figura 4.7. Note-se que, de forma a permitir a comparação direta, os resultados obtidos experimentalmente foram transpostos para a escala dos modelos simulados, considerando frequências 6 vezes menores do que as efetivamente medidas. Em todos os gráficos apresentados nesta análise foi adoptada esta estratégia. Como já foi referido, e pode ser confirmado na Figura 4.2, esta amostra tinha a parte exterior das placas EPS forradas com espuma absorvente. Ao analisar a curva IL obtida verificamos que o ensaio não está a replicar eficazmente as condições simuladas no modelo de elementos finitos. O comportamento da curva IL até aos 500Hz não vai ser alvo de análise, uma vez que sabemos que a câmara semi-anecoica, onde foram realizados os ensaios, não é fidedigna em frequências mais baixas, inferiores a 400Hz. Para além de o valor de pico ficar longe do pico simulado no modelo numérico, também verificamos a presença de uma quebra no interior da *band gap*.

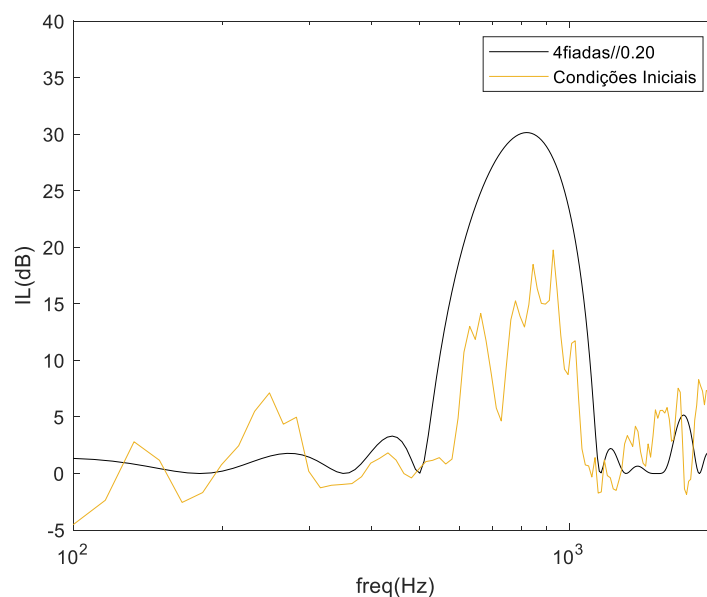


Figura 4.7 – Curva IL obtida com a configuração inicial.

Com o objetivo de tentar controlar as reflexões na placa de EPS entre os elementos da barreira acústica, foi introduzida uma espuma absorvente entre os mesmos, como pode ser confirmado na Figura 4.8 a). Atentando na comparação entre a curva IL obtida na configuração anterior e a curva IL obtida após a introdução das espumas entre os elementos, Figura 4.8 b), verifica-se que a quebra de desempenho no interior na *band gap* se mantém, no entanto, verifica-se também que a curva IL tem um comportamento mais constante, com menos oscilações.

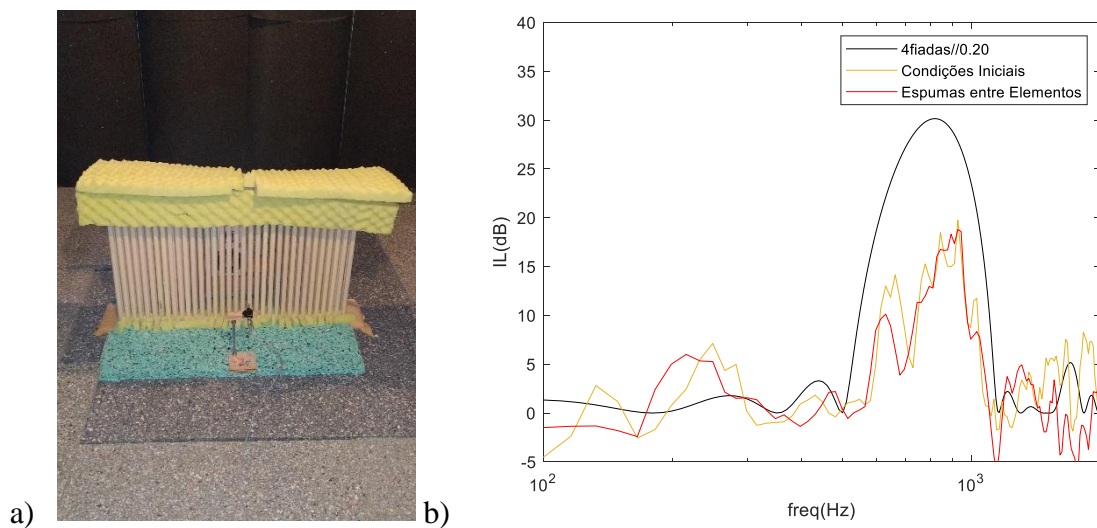


Figura 4.8 – a) Amostra com espuma absorvente entre os seus elementos; b) Avaliação do efeito da adição de espumas absorventes entre os elementos.

No entanto, considerou-se que a introdução das espumas absorventes não foi suficiente para evitar todas as perturbações no ensaio. Desta forma, com o objetivo de controlar a difração pelas partes laterais da barreira, foram colocadas placas de espuma nas partes laterais da amostra, Figura 4.9, de forma a tentar replicar o efeito de barreira infinita, uma vez que sabemos que, no modelo numérico, é simulado o desempenho de uma barreira infinita, não sendo considerada qualquer difração pelas partes laterais da barreira acústica.



Figura 4.9 – Adição de placas de espuma nas partes laterais da amostra.

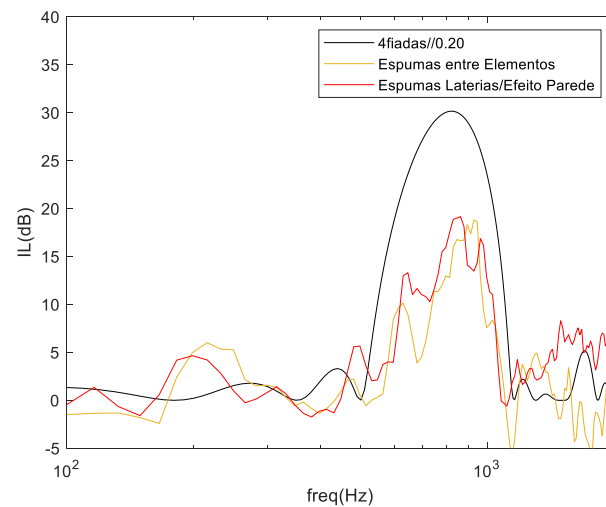


Figura 4.10 – Avaliação do efeito da adição das placas de espuma nas partes laterais da amostra.

Comparando as curvas IL presentes na Figura 4.10, verifica-se que a adição de placas de espuma nas partes laterais da amostra controla a difração pelas partes laterais da amostra, uma vez que a curva IL obtida ensaiando esta última amostra, apresenta um melhor desempenho ao longo de praticamente toda a *band gap* e um comportamento/tendência mais semelhante à curva IL obtida pelo modelo numérico. A curva IL obtida neste ensaio mostra um desempenho superior nas frequências mais altas, em relação à *band gap*, uma vez que, como já foi referido, no modelo numérico é considerada uma barreira acústica infinita, que não irá ter efeito considerável nestas frequências mais altas, tal como mostra a sua curva IL. Ao adicionar estas espumas, estamos a impedir a progressão da onda sonora nestas zonas, e assim aparece algum efeito nestas zonas. Uma vez que o grande objetivo deste estudo é avaliar o comportamento da *band gap*, é aceite este comportamento na gama de frequências mais altas.



Figura 4.11 – Amostra com configuração tipo “Túnel”.



Sendo o modelo numérico para uma análise 2D, a altura é considerada infinita, então, por último, de forma a controlar a difração pelo topo da barreira, foi testada uma configuração tipo “Túnel”, Figura 4.11, onde se controla tanto a difração pelo topo da barreira como a difração pelas partes laterais. Na Figura 4.12, temos a curva IL obtida neste ensaio comparada com as curvas IL obtidas no ensaio anterior e pelo modelo numérico de elementos finitos. Verifica-se que a difração pelo topo da barreira não tem grande efeito no ensaio, uma vez que ambas as curvas apresentam um comportamento/tendência semelhante.

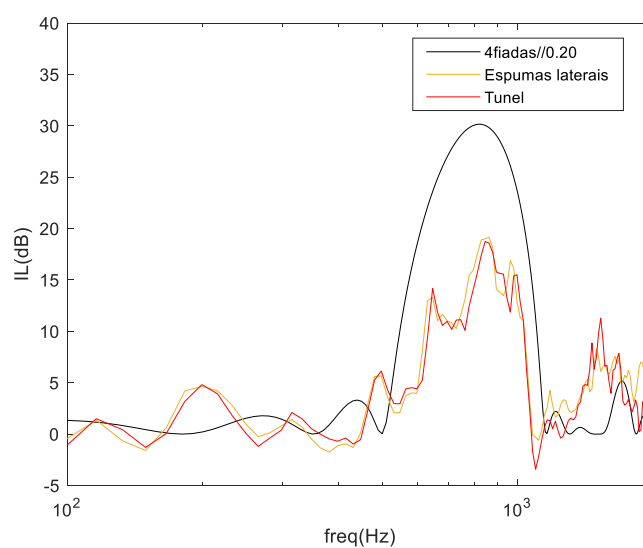


Figura 4.12 – a) Amostra com configuração tipo “Túnel”.

No entanto, apesar do efeito da difração pelo topo da barreira não ser significativo, optou-se por esta configuração de ensaio, uma vez que esta configuração mantém todas as precauções tidas em conta anteriormente, como as espumas entre os elementos para evitar a reflexão nas placas de EPS e impede também a difração pelas partes laterais da barreira acústica. A facilidade de construção desta configuração de ensaio foi outro fator a favor pela opção por esta configuração tipo “Túnel”.

O tratamento dos dados, como já foi referido, é feito recorrendo a uma rotina de cálculo implementada em Matlab, onde é obtida uma curva IL em banda estreita. Procurou-se avaliar também o efeito da largura desta banda estreita, realizando o cálculo para larguras de banda de 10 Hz e 100 Hz. Na Figura 4.13, comparam-se os resultados destes dois tipos de tratamento dos dados experimentais. Dado o maior detalhe (designadamente no que respeita ao valor de pico) da banda mais estreita, opta-se por manter este tipo de tratamento nos resultados que se apresentam daqui para a frente.

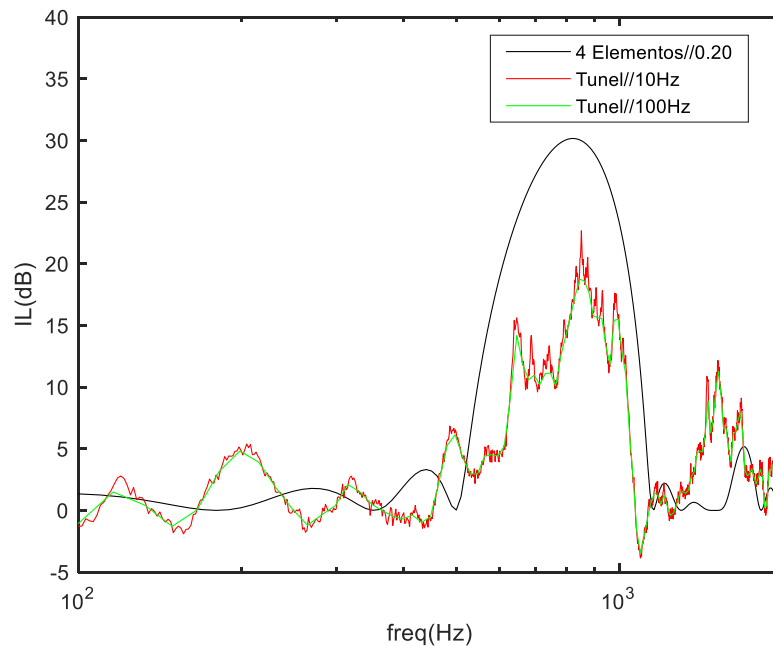


Figura 4.13 – Avaliação do efeito da maior discretização.

## 4.6 Resultados

Os equipamentos utilizados para a aquisição de dados já foram referenciados anteriormente. Também já foi referido que o objetivo do trabalho é avaliar o desempenho das barreiras acústicas na mitigação do ruído de tráfego, em que a gama de frequências mais relevante se situa entre os 500Hz e os 1500Hz com pico perto dos 1000Hz. No entanto, no capítulo anterior foi feita uma análise até aos 2000Hz. Assim, uma vez que os ensaios foram realizados à escala 1/6, os resultados terão de ser analisados até aos 12000Hz.

De seguida serão apresentadas as curvas IL obtidas ao avaliar o desempenho das barreiras acústicas nos ensaios laboratoriais e as mesmas serão comparadas com o desempenho simulado pelo modelo numérico da respetiva configuração geométrica.

#### 4.6.1 Configuração do Cristal Sónico composto por três fiadas espaçadas a 2,83cm

Neste ensaio, o cristal sónico é composto por três fiadas de elementos espaçados a 2,83cm e a sua configuração está representada na Figura 4.14. Cada fiada tem 34 elementos e o espaço livre entre a face dos mesmos é de 0,83cm.

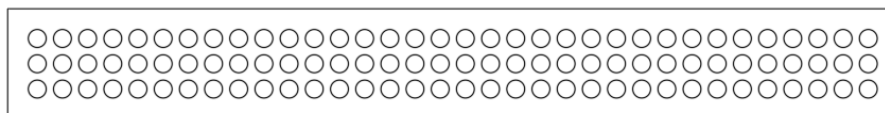


Figura 4.14 – Configuração geométrica da barreira acústica com três fiadas de elementos espaçados a 2,83cm.

As medições com esta amostra foram realizadas com a configuração “Túnel”, já descrita anteriormente. Foram realizadas as nove medições, tal como esquematizado na Figura 4.5, e os dados foram exportados e analisados no Matlab. Na Figura 4.15, apresenta-se a comparação entre as curvas IL obtidas experimentalmente (vermelho) e através do modelo numérico (preto).

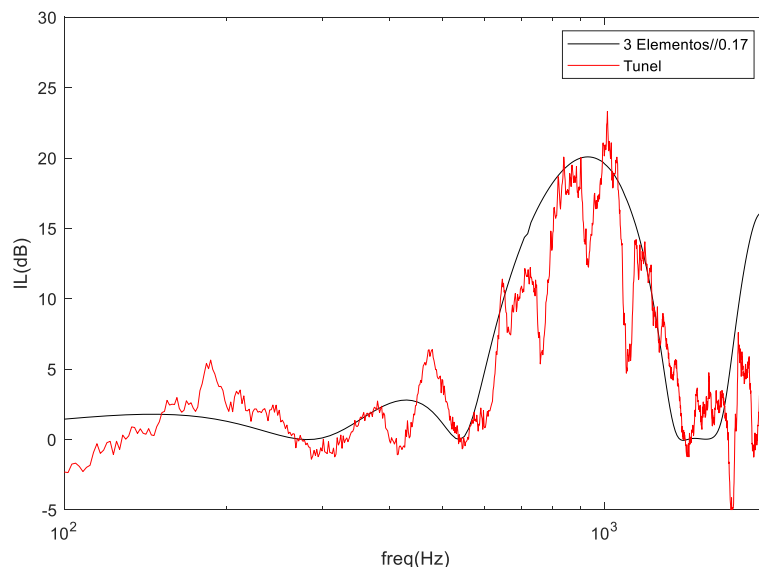


Figura 4.15 – Curva IL experimental da barreira acústica com três fiadas de elementos espaçados a 2,83cm e a respetiva curva IL obtida no modelo numérico.

No intervalo de frequências que se pretende analisar, até aos 2000Hz, obtém-se uma boa combinação entre os resultados teóricos e experimentais. Em ambas as curvas IL verificamos a presença da *band gap* no mesmo intervalo de frequências, no entanto a *band gap* experimental apresenta algumas quebras. O valor de pico das curvas IL são semelhantes apesar da curva IL

experimental apresentar um valor de pico ligeiramente superior, apesar de uma das quebras desta mesma curva estar localizada muito perto da frequência de pico da curva IL obtida no modelo numérico.

No capítulo 4.7 será efetuada uma análise mais geral dos ensaios realizados e dos seus resultados.

#### 4.6.2 Configuração do Cristal Sónico composto por quatro fiadas de elementos espaçados a 2,83cm

Neste ensaio, o cristal sónico é composto por quatro fiadas de elementos espaçados a 2,83cm e a sua configuração está representada na Figura 4.16. Nesta amostra cada fiada tem 34 elementos e o espaço livre entre a face dos mesmos é de 0,83cm.

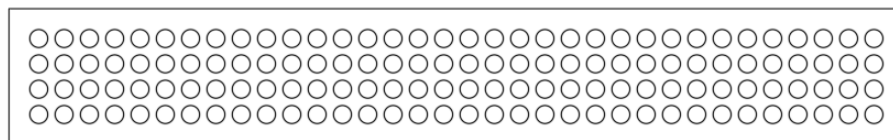


Figura 4.16 – Configuração geométrica da barreira acústica com quatro fiadas de elementos espaçados a 2,83cm.

Foram mantidas as condições de ensaio e, na Figura 4.17, apresentamos a comparação entre as curvas IL obtidas experimentalmente (vermelho) e através do modelo numérico (preto).

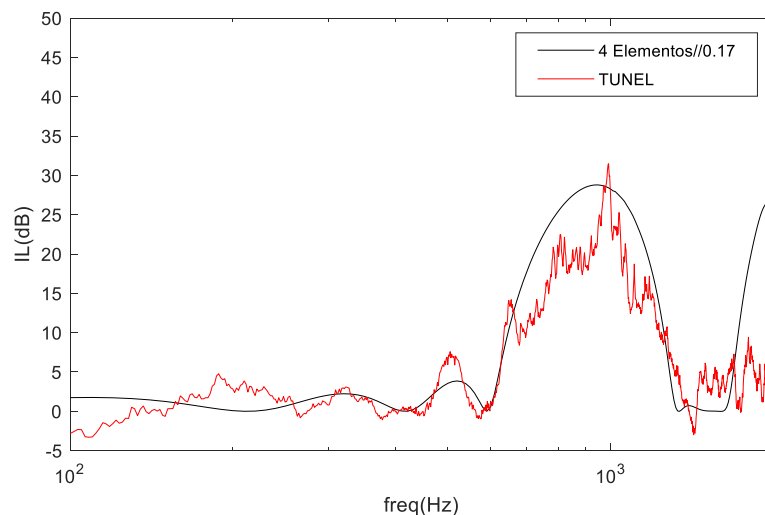


Figura 4.17 – Curva IL experimental da barreira acústica com quatro fiadas de elementos espaçados a 2,83cm e a respetiva curva IL obtida no modelo numérico.

Neste ensaio, verifica-se uma concordância quase perfeita, entre as curvas IL, das frequências do início e do final da *band gap*, com pico perto dos 1000Hz. Esta *band gap* não apresenta as quebras que estavam presentes no exemplo anterior, no entanto, tal como no exemplo anterior, o valor de pico da curva IL experimental é ligeiramente superior em relação à curva IL obtida no modelo numérico.

#### 4.6.3 Configuração do Cristal Sónico composto por três fiadas espaçadas a 3,33cm

Neste ensaio, o cristal sónico é composto por três fiadas de elementos espaçados a 3,33cm e a sua configuração está representada na Figura 4.18. Nesta amostra cada fiada tem 31 elementos e o espaço livre entre a face dos mesmos é de 1,33cm.

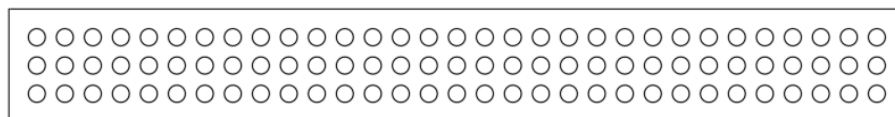


Figura 4.18 – Configuração geométrica da barreira acústica com três fiadas de elementos espaçados a 3,33cm.

Na Figura 4.19, temos a comparação entre as curvas IL obtidas experimentalmente (vermelho) e através do modelo numérico (preto).

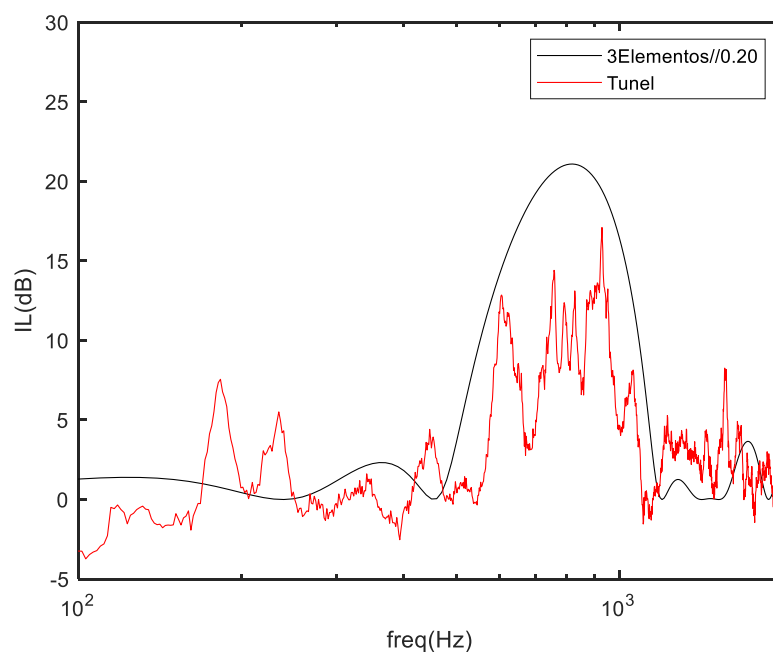


Figura 4.19 – Curva IL experimental da barreira acústica com três fiadas de elementos espaçados a 3,33cm e a respetiva curva IL obtida no modelo numérico.

Nesta configuração geométrica, a concordância entre a *band gap* das curvas não é tão perfeita como no caso anterior, no entanto, em ambos os casos, é evidente a sua presença em torno dos 1000Hz. A curva IL experimental apresenta ainda algumas quebras e o seu valor de pico é inferior em relação ao valor de pico da curva IL obtida no modelo numérico.

#### 4.6.4 Configuração do Cristal Sónico composto por quatro fiadas de elementos espaçados a 3,33cm

Neste ensaio, o cristal sónico é composto por quatro fiadas de elementos espaçados a 3,33cm e a sua configuração está representada na Figura 4.20. Cada uma das fiadas da amostra tem 31 elementos e o espaço livre entre a face dos mesmos é de 1,33cm.

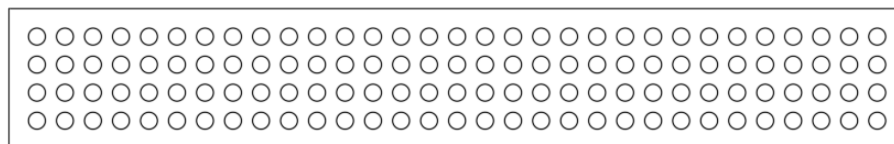


Figura 4.20 – Configuração geométrica da barreira acústica com quatro fiadas de elementos espaçados a 3,33cm.

Na Figura 4.21, temos a comparação entre as curvas IL obtidas experimentalmente (vermelho) e através do modelo numérico (preto).

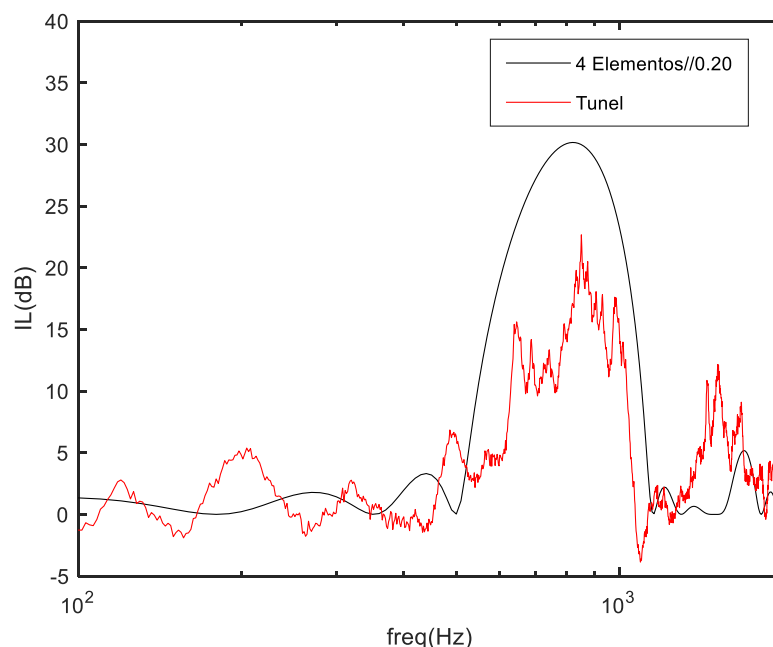


Figura 4.21 – Curva IL experimental da barreira acústica com quatro fiadas de elementos espaçados a 3,33cm e a respetiva curva IL obtida no modelo numérico.

Nesta configuração geométrica, não se verifica, mais uma vez, uma concordância perfeita entre as *band gap*, no entanto é mais uma vez evidente a existência de uma *band gap* perto dos 1000Hz. A *band gap* da curva IL experimental não apresenta grandes quebras, mas não atinge o valor de pico da curva IL obtida pelo modelo numérico.

#### 4.7 Discussão dos resultados

Tratando-se de ensaios experimentais, e apesar de todos terem sido realizados nas mesmas condições, são sempre cometidos alguns erros e há sempre condições que não são possíveis de simular perfeitamente, o que pode afetar os resultados.

Devemos ter em conta, por exemplo, o facto de o modelo numérico de elementos finitos simular o desempenho da barreira acústica realizando uma análise 2D para uma barreira acústica que é considerada infinita. Logo à partida, verificamos grandes diferenças entre a simulação numérica e os ensaios experimentais, uma vez que as amostras ensaiadas não são infinitas e têm uma altura definida. No entanto, tentou-se controlar e adaptar o ensaio de forma a simular da melhor forma possível as condições assumidas no modelo numérico de elementos finitos, utilizando a configuração “Túnel” com controlo da difração do som pelas partes laterais e pelo topo da barreira.

De um modo geral, os resultados experimentais condizem com os resultados teóricos, exceto nas baixas frequências (até cerca dos 500Hz). Esta diferença, até perto dos 500Hz, pode ser explicada pelas características da própria câmara de ensaio e pelo seu desempenho nas baixas frequências. No caso da amostra composta por quatro fiadas com espaçamento de 2,83cm entre os elementos, neste intervalo de frequências, ambas as curvas IL apresentam uma tendência semelhante, havendo uma primeira *band gap* de menor intensidade que se identifica em ambas as curvas IL antes dos 500Hz. O comportamento das curvas IL, depois dos 1500Hz, não é avaliado por não ser o objetivo deste estudo.

A partir da observação e análise de todos os resultados obtidos, podemos concluir que o cristal sónico composto por quatro fiadas de elementos espaçados a 3,33cm é o que apresenta uma maior aproximação entre as curvas IL obtidas pelo modelo teórico e pelo ensaio experimental. Por outro lado, o cristal sónico composto por três fiadas de elementos espaçados a 3,33cm é o que apresenta uma menor concordância entre as curvas IL obtidas no ensaio experimental e pelo modelo numérico.

Também é possível observar que, em ambos os cristais sônicos em que o espaçamento entre os elementos é de 2,83cm, o valor de pico de ambas as curvas IL é bastante semelhante, o que não se verifica nos cristais sônicos em que o espaçamento entre os elementos é de 3,33cm.

Outra conclusão que se retira da análise dos resultados obtidos diz respeito às *band gap*. As *band gap* de todas as curvas IL apresentam uma boa concordância, principalmente nos cristais sônicos em que os elementos estão espaçados a 2,83cm, em que a concordância entre as *band gap* das curvas IL é quase perfeita, no que toca à frequência do seu início e do seu final, enquanto nos cristais sônicos em que os elementos estão espaçados a 3,33cm a concordância entre as *band gap* das curvas IL não é tão perfeita, sendo na mesma evidente a sua identificação. Em relação à “forma” das *band gap*, podemos afirmar que, nos cristais sônicos compostos por quatro fiadas de elementos, independentemente do espaçamento entre os mesmos, as *band gap* apresentam uma “forma” mais concordante entre as curvas IL, enquanto nos cristais sônicos compostos por três fiadas de elementos verifica-se a presença de quebras dentro das *band gap*, mais evidentes no cristal sónico composto por quatro fiadas de elementos espaçados a 3,33cm.



## 5 SOLUÇÃO CONSTRUTIVA

No âmbito deste trabalho, apresenta-se também uma possível solução construtiva para a futura implementação destas barreiras acústicas. Dado o âmbito do projeto em que esta tese se desenvolve (projeto HLS), pressupõe-se aqui a utilização de uma solução sustentável com base em troncos de madeira. A solução será apresentada neste capítulo, acompanhada de algumas considerações que tentam explicar os fatores tidos em conta que conduziram a esta solução. A solução apresentada consiste numa estrutura metálica modular que servirá de apoio aos elementos de madeira que compõem o cristal sónico.

Esta tecnologia de barreiras acústicas com cristais sônicos consiste numa estrutura periódica que tem como objetivo a atenuação sonora para mitigação de ruído de tráfego. O arranjo dos elementos do cristal sónico influencia o intervalo de frequências em que a barreira acústica impede a propagação das ondas sonoras. Qualquer alteração no posicionamento dos elementos do cristal sónico, irá alterar o desempenho da barreira acústica, por isso é essencial garantir o correto posicionamento dos elementos do cristal sónico. A aplicação dos elementos do cristal sónico em obra, pode conduzir a erros no posicionamento dos elementos do cristal sónico, desta forma idealizou-se uma peça que garanta o correto posicionamento dos mesmos. A peça idealizada tem como objetivo garantir o correto posicionamento dos elementos do cristal sónico, sendo a mesma produzida em fábrica. Na Figura 5.1, podemos ver um exemplo desta peça, à qual foi dado o nome de espaçador, que serve para uma barreira acústica composta por três fiadas de elementos circulares com 12cm de diâmetro espaçados a 17cm, podendo ser adaptada para qualquer cristal sónico.

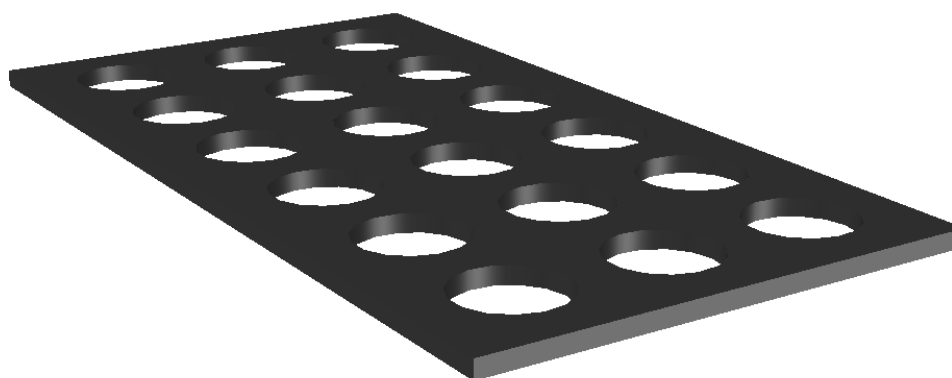


Figura 5.1 – Vista esquemática do espaçador a adotar para o posicionamento dos elementos da barreira

O espaçador apresentado na Figura 5.1 foi idealizado para a barreira acústica já referenciada. Uma vez que a barreira acústica tem três fiadas, nesse lado do espaçador, não há possibilidade de escolher a dimensão do mesmo, no entanto a opção por 6 fiadas na direção da barreira acústica não foi tomada ao acaso. Analisando as dimensões padrão dos camiões, verificamos que, tanto um camião médio como um grande têm cerca de 2,40m de largura e os seus comprimentos são de 5,90m e 8,50m, respetivamente. Desta forma, pensou-se em adaptar os espaçadores a estas dimensões para possibilitar um eficiente transporte das peças entre o local de produção e o local onde serão posteriormente aplicadas, como está ilustrado na Figura 5.2.

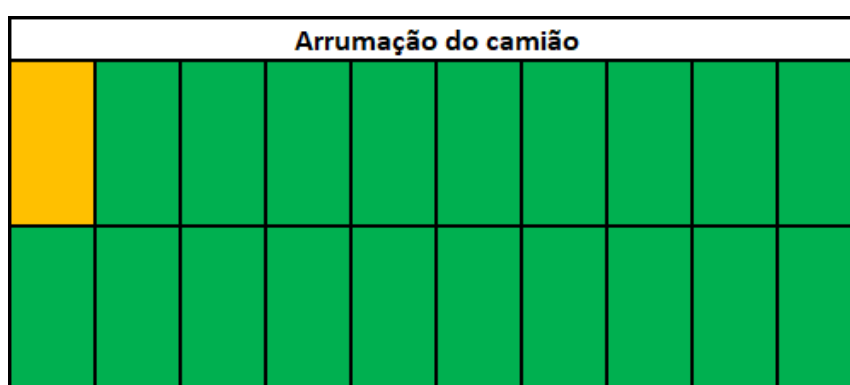
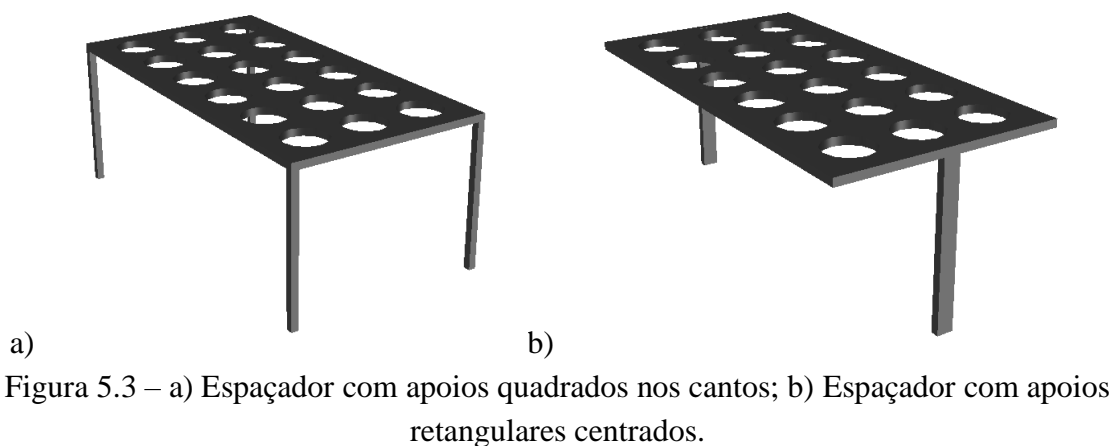


Figura 5.2 – Arrumação do camião em fase de transporte.

Para que, ao longo da largura do camião, cerca de 2,40m, pudessem ser colocados dois espaçadores, a opção foram espaçadores de 6 fiadas na direção da barreira acústica, resultando um espaçador com 1,07mx0,56m.

Estes espaçadores necessitam de apoios para permitir a fixação dos mesmos ao solo. Foram idealizadas duas alternativas de apoios para os espaçadores, Figura 5.3. A primeira alternativa consiste em apoios quadrados (0,02mx0,02m) colocados nos quatro cantos do espaçador enquanto a segunda alternativa consiste em apoios retangulares (0,04mx0,02m) centrados no lado menor do espaçador.



Também foram pensadas duas soluções para a ligação dos apoios ao espaçador, a primeira em que temos peças independentes e a segunda em que os apoios são fixos ao espaçador em fábrica, no entanto, em ambas as soluções, a altura sugerida para os apoios é de 0,40m. Na primeira alternativa, com peças independentes, os apoios seriam inicialmente fixos a uma estrutura de suporte no solo e, posteriormente, o espaçador seria colocado sobre os apoios e fixo aos mesmos. Na segunda opção, os apoios seriam dobráveis para permitir condições de transporte mais eficientes, e desta forma, teríamos uma peça única que, em obra, apenas teria de ser fixa a uma estrutura de suporte no solo. Estes apoios seriam dobráveis colocando uma dobradiça na ligação entre o espaçador e os apoios. A opção com os apoios centrados no lado menor da peça tem a vantagem de apenas ter dois pontos de fixação ao solo, enquanto que, na solução em que os apoios estão nos quatro cantos do espaçador, são necessários quatro pontos de fixação.

A segunda alternativa, em que temos o espaçador com apoios dobráveis totalmente produzida em fábrica, foi a alternativa escolhida para a solução a apresentar. A fixação da peça ao solo deve ser devidamente dimensionada, no entanto, a sugestão é uma ligação semelhante à de uma estrutura metálica a uma fundação. Na Figura 5.4 está ilustrada a possibilidade de, numa mesma fundação podermos fixar peças consecutivas da barreira acústica.

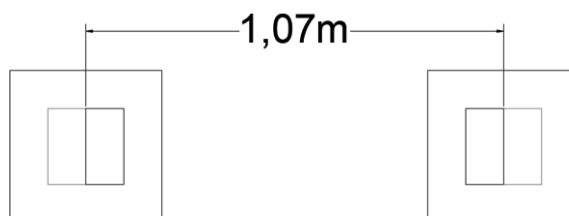


Figura 5.4 – a) Esquemática de duas fundações consecutivas da barreira acústica, às quais se representam a traço mais escuro as fixações de um espaçador.

Após a fixação dos espaçadores à estrutura de suporte, ao longo da barreira acústica, devem ser colocados os elementos do cristal sónico. Para a solução apresentada, estes elementos serão troncos de madeira com 12cm de diâmetro. Como já foi referido, estes troncos, provenientes de operações de limpeza de florestas, serão sujeitos a um processo de transformação e tratamento. Nestas operações de transformação, os elementos serão cortados de acordo com a altura necessária para determinada barreira acústica. Após esta fase, os troncos deverão ser transportados para o local onde decorre a construção da barreira acústica, para serem colocados nos espaçadores.

Com os troncos já colocados, surge a necessidade de garantir o espaçamentos e verticalidade dos mesmos. Para assegurar o correto espaçamento entre os elementos do cristal sónico e a verticalidade dos mesmos, será colocado um novo espaçador no topo da barreira. O espaçador a colocar no topo da barreira, terá as mesmas dimensões do espaçador colocado inicialmente, e podemos ver a sua configuração na Figura 5.5.

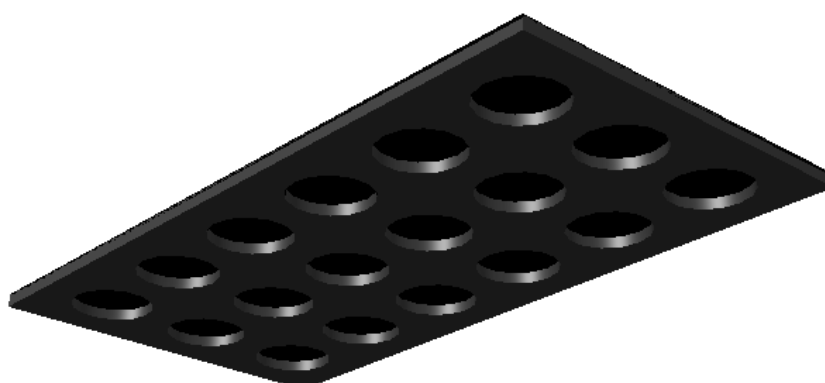


Figura 5.5 – Espaçador a colocar no topo da barreira.

Este segundo espaçador será colocado no topo da barreira e encaixará no topo dos elementos do cristal sónico. Este espaçador, para além de garantir a verticalidade dos elementos e o correto espaçamento entre os mesmos, irá impedir a penetração de água nos troncos de madeira através da superfície de corte no topo da barreira, garantindo assim uma maior durabilidade destes elementos.

A solução apresentada permite dividir a montagem da barreira acústica em etapas, permitindo assim a formação de equipas de trabalho que podem até trabalhar simultaneamente. As estruturas de suporte no solo devem estar previamente preparadas para receber a barreira acústica. A primeira fase de montagem da barreira acústica é a fixação das peças, formadas pelo

espaçador com os apoios, à estrutura de suporte. A fase seguinte consiste na colocação dos elementos de madeira nos espaçadores. A montagem desta barreira acústica fica concluída com a colocação do segundo espaçador, que garante a verticalidade dos elementos, no topo da barreira.

Na solução apresentada é privilegiada a produção em fábrica, reduzindo ao máximo a mão de obra, que apenas será necessária para a montagem da solução proposta para a barreira acústica com cristais sónicos. Todas as dimensões foram sugeridas sem realizar nenhuma análise estrutural, por isso, caso esta ideia de solução para construção destas barreiras acústicas com cristais sónicos seja considerada interessante, deve ser feita uma análise estrutural cuidada da solução apresentada.

## 6 CONCLUSÕES

Os trabalhos realizados nos últimos anos têm tido o objetivo de tentar otimizar a aplicação de cristais sónicos em barreiras acústicas para mitigação do ruído de tráfego. No entanto, esta tecnologia ainda não está preparada para ser colocada no mercado e a escolha continua a ir ao encontro das barreiras acústicas tradicionais.

Há um grande interesse nestas barreiras acústicas com cristais sónicos uma vez que estas apresentam diversas vantagens quando comparadas com as barreiras acústicas tradicionais. As barreiras acústicas com cristais sónicos são estruturas muito mais leves, com um impacto visual menor e de fácil construção e permitem ainda a passagem do vento, reduzindo assim os esforços nas fundações. Por outro lado, a desvantagem mais evidente é a necessidade de ter diversas fiadas de elementos no cristal sónico para que este possa provocar uma atenuação sonora significativa comparando com as barreiras acústicas tradicionais. Isto faz com que estas barreiras acústicas com cristais sónicos apresentem elevadas espessuras, necessitando de espaço para serem construídas, o que algumas vezes não é fácil de conseguir, por exemplo em meio urbano.

Este trabalho esteve essencialmente focado na utilização de troncos de madeira como dispersores do cristal sónico, tornando estas barreiras acústicas uma solução sustentável e com base no conceito de economia circular, uma vez que os troncos de madeira são provenientes de operações de limpeza das florestas.

As barreiras acústicas com cristais sónicos, resultam da distribuição de dispersores de forma periódica ao longo de um plano horizontal, o solo, e provocam uma atenuação sonora em determinados intervalos de frequência. O arranjo dos dispersores do cristal sónico, em termos de geometria destes elementos e/ou espaçamento entre os mesmos, irá influenciar o intervalo de frequência em que o cristal sónico irá provocar atenuação sonora. A este intervalo de frequência dá-se o nome de *band gap*. Desta forma, sabe-se que, ao alterar as características geométricas do cristal sónico, podemos otimizar o desempenho do cristal sónico para o tipo de ruído que se pretende mitigar. O ruído de tráfego situa-se no espectro essencialmente entre os 500Hz e os 1500Hz, tendo o seu pico perto dos 1000Hz. Desta forma, ao longo deste trabalho, foi simulado o desempenho de diversas geometrias, de forma a tentar encontrar uma geometria otimizada para cristais sónicos para mitigação do ruído de tráfego.

No decurso deste trabalho foi avaliado o desempenho de uma grande variedade de geometrias dos cristais sónicos e dos elementos que os compõem. Relativamente à forma dos dispersores, conseguiram-se alguns resultados interessantes. Os resultados mostram que os semicírculos apresentam desempenhos ligeiramente superiores a círculos com o mesmo diâmetro, utilizando metade da matéria prima. No caso de estarmos perante um cristal sónico com dispersores quadrados, sabemos que, ao voltarmos os vértices para a fonte e para os recetores, é a forma de conseguir uma maior atenuação sonora.

Foram também realizadas simulações numéricas com elementos com a forma de perfis comerciais HEB e U, que abrem caminho a trabalhos mais aprofundados utilizando estas formas geométricas, com o objetivo de poder conseguir otimizar estas geometrias para a mitigação do ruído de tráfego.

As simulações com cristais sónicos em que se aplicaram ressoadores de Helmholtz nos dispersores permitiram avaliar a influência de algumas características geométricas na curva IL. A otimização deste tipo de cristal sónico e a sua combinação com outros materiais, por exemplo materiais com elevado coeficiente de absorção, pode ser uma boa alternativa para conseguir desempenhos bastante competitivos.

Os ensaios experimentais validaram o modelo de análise numérica 2D, uma vez que se conseguiram resultados bastante concordantes apesar de as condições de ensaio não serem totalmente iguais às condições assumidas no modelo. Para além de o modelo realizar uma análise 2D, em que a altura da barreira não é considerada, o modelo assume ainda uma barreira acústica infinita e as amostras analisadas tinham apenas cerca de 1m de comprimento.

Foi ainda apresentada uma sugestão de uma solução construtiva para esta tecnologia. A solução construtiva apresentada não foi alvo de nenhuma análise de viabilidade económica nem de uma análise estrutural cuidada, o objetivo foi apresentar uma ideia de conceção para estas barreiras acústicas que deve ser estudada com mais pormenor.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amado Mendes, P., Godinho L., Dias A., Santos P., "On the use of periodic arrays of timber logs as a sustainable noise mitigation solution," in Proceedings of ICSV22, 2015
- Amado Mendes, P.; Godinho, L.; Santos, P.G.; Dias, A.G.; Martins, M. Laboratory and full-scale experimental evaluation of the acoustic behavior of sonic crystal noise barriers. In Proceedings of the International Congress on Acoustics, Buenos Aires, Argentina, 5–9 September 2016.
- Atalla N., Sgard, F.. Finite Element and Boundary Methods in Structural Acoustics and Vibration
- Brandão, E.. Aplicação de absorvedores tipo membrana em cavidades e filtros acústicos. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina no Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica., 2008.
- Cordeiro, M. (2015). “Estudo numérico e experimental do desempenho de barreiras acústicas com estrutura periódica”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, Coimbra.
- Chong, Y. (2012). Sonic Crystal Noise Barriers. Ph.D. Thesis, The Open University, Milton Keynes, UK.
- Dias A., Godinho L., Santos P., Amado Mendes P.. (2014). "Low visual impact sound reduction wood barriers," in Proceedings of WCTE 2014.
- Dias, R. (2014). “Comportamento de barreiras acústicas – a aplicação do conceito de “cristal sónico” à atenuação do ruído de tráfego”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, Coimbra.
- Fredianelli, L.; Del Pizzo, A.; Licitra, G. (2019). Recent Developments in Sonic Crystals as Barriers for Road Traffic Noise Mitigation. *Environments*, 6, 14.
- Garai, M., Guidorzi, P. (2000). European methodology for testing the airborne sound insulation characteristics of noise barriers in situ: Experimental verification and comparison with laboratory data. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 108(3), 1054.



- García, D. (2010). “On the control of propagating acoustic waves in sonic crystals: analytical, numerical and optimization techniques”. Tese de Doutorado, Departamento de Física Aplicada da Universidade Politécnica de Valência, Valência.
- Godinho, L.; Santos, P.G.; Amado Mendes, P.; Pereira, A.; Martins, M. Experimental and numerical analysis of sustainable sonic crystal barriers based on timber logs. In Proceedings of the EuroRegio2016, Porto, Portugal, 13–15 June 2016.
- Godinho, L.; Soares, D., Jr.; Santos, P.G. Efficient analysis of sound propagation in sonic crystals using an ACA–MFS approach. *Eng. Anal. Bound. Elem.* 2016, 69, 72–85.
- Godinho, L.; Redondo, J.; Amado Mendes, P. The method of fundamental solutions for the analysis of infinite 3D sonic crystals. *Eng. Anal. Bound. Elem.* 2019, 98, 172–183.
- Gupta, A. (2014). A review on sonic crystal, its applications and numerical analysis techniques. *Acoustical Physics*, 60(2), 223–234.
- Jean, P.; Defrance, J. Sound propagation in rows of cylinders of infinite extent: Application to sonic crystals and thickets along roads. *Acta Acust. United Acust.* 2015, 101, 474–483.
- Koussa, F.; Defrance, J.; Jean, P.; Blanc-Benon, P. Acoustical efficiency of a sonic crystal assisted noise barrier. *Acta Acust. United Acust.* 2013, 99, 399–409.
- Lee, J.; Kim, J.; Park, T.; Chang, S.; Kim, I. Reduction Effects of Shaped Noise Barrier for Reflected Sound. *J. Civ. Environ. Eng.* 2015, 5, 1.
- Lee, H.M.; Lim, K.M.; Lee, H.P. Environmental and sound divergence effects on the performance of rectangular sonic crystals with Helmholtz resonators. *J. Vib. Control* 2018, 24, 2483–2493.
- Maekawa, Z.. Noise reduction by screens. *Applied Acoustics*, 1(3):157–173,1968
- Martínez-Sala, R., Sancho, J., Sánchez, J.V., Gómez, V., Llinares, J., Meseguer, F. (1995) “Sound attenuation by sculpture”, *Nature* 378, 241,
- Martins, M.; Godinho, L.; Picado-Santos, L.. Numerical evaluation of sound attenuation provided by periodic structures. *Arch. Acoust.* 2013, 38, 503–516.
-

- Martins, M. (2014). “Contribuição para o estudo da atenuação seletiva do ruído de tráfego rodoviário”. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, Coimbra.
- Morandi, F.; Miniaci, M.; Marzani, A.; Barbaresi, L.; Garai, M. Standardised acoustic characterisation of sonic crystals noise barriers: Sound insulation and reflection properties. *Appl. Acoust.* 2016, 114, 294–306.
- Peiró-Torres, M.P.; Redondo, J.; Bravo, J.M.; Pérez, J.S. Open noise barriers based on sonic crystals. *Advances in noise control in transport infrastructures. Transp. Res. Procedia* 2016, 18, 392–398.
- Pierce, A.D.. *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications*. Acoustical Society of America, 1981.
- RGR - "Regulamento Geral do Ruído", aprovado pelo Decreto-lei nº 9/2007 de 17 de janeiro.
- Sánchez-Dehesa, J.; Garcia-Chocano, V.M.; Torrent, D.; Cervera, F.; Cabrera, S.; Simon, F. Noise control by sonic crystal barriers made of recycled materials. *J. Acoust. Soc. Am.* 2011, 129, 1173–1183.
- Santos, P.; Carbajo, J.; Rui, D.; Godinho, L.; Amado Mendes, P.; Soriano, J.R. Insertion loss provided by sonic crystal type barrier—Experimental and numerical evaluation on a reduced scale model. In *Proceedings of the 45\_ Congreso Espanol de Acustica, Murcia, Spain, 29–31 October 2014*.
- Sharma, G.S.; Skvortsov, A.; MacGillivray, I.; Kessissoglou, N. Acoustic performance of periodic steel cylinders embedded in a viscoelastic medium. *J. Sound Vib.* 2018.
- Tadeu, A., Mateus, D., António, J., Godinho, L., Amado Mendes, P. (2010). "Acústica Aplicada". Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Van der Aa, B.; Forssén, J. Shape-optimal design of graded index sonic crystal formations using natural cubic splines. *Appl. Acoust.* 2014, 78, 98–111.
-

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

WHO (1999). [www.who.int/docstore/peh/noise/introduction.htm](http://www.who.int/docstore/peh/noise/introduction.htm), data da consulta: maio de 2020.