



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

Atenuação Sonora de Barreiras Acústicas

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Território e Gestão do Ambiente

Autor

Rui Pedro Ribeiro Gonçalves

Orientadores

Julieta Maria Pires António (DEC-FCTUC)

António José Barreto Tadeu (DEC-FCTUC)

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

Colaboração institucional



Coimbra, Outubro, 2014

AGRADECIMENTOS

A conclusão do meu percurso académico e em especial desta dissertação, não teria sido possível, sem a colaboração e acompanhamento de um conjunto de pessoas que sempre se fizeram presentes e disponíveis a ajudar no que fosse necessário. Deste modo, os meus sinceros agradecimentos:

A Deus pelo Dom da minha vida e por me ter dado força e alento para fazer de cada queda o ponto de partida, para um novo e mais forte recomeço.

Aos meus orientadores, que sempre estiveram presentes e disponíveis para, com toda a paciência do mundo, me ensinar e ajudar no que fosse preciso.

Ao Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção - ITeCons, pela utilização dos recursos computacionais disponibilizados para o cálculo dos exemplos apresentados, sem os quais, este trabalho não tinha viabilidade.

Aos colegas e amigos, em especial aos “irmãos”, pela alegria que foi partilhar com vocês tantos momentos de amizade e companheirismo ao longo deste percurso académico.

À minha família, em especial aos meus Pais, não só pelo esforço de terem apostado na minha formação académica, mas principalmente pelos exemplos que me deram ao longo da vida, que me permitiram construir quem sou hoje.

Por fim, mas não menos importante, à minha irmã e à Rita, por todo o acompanhamento, preocupação demonstrada e conselhos preciosos, dados nas horas certas, que contribuíram para que não baixasse os braços perante as adversidades e me fizeram manter focado no essencial.

RESUMO

De acordo com a agência T&E, na UE, morrem todos os anos cerca de 50 mil pessoas devido a problemas cardíacos e a 200 mil são diagnosticadas novas doenças que podem ser associadas à exposição de níveis excessivos de ruído, o que representa um custo anual de mais de 40 bilhões de euros.

A atenuação de ruído no exterior pode ser feita através da utilização de barreiras acústicas. As barreiras acústicas têm uma função importante, uma vez que permitem reduzir os níveis de ruído e, por isso, promover a qualidade de vida da população.

Neste trabalho aplica-se uma formulação dual do Método dos Elementos de Fronteira, em três dimensões, para simular a propagação do som na proximidade de barreiras acústicas tridimensionais. Fazem-se variar as dimensões das barreiras, as propriedades de absorção sonora das barreiras e a frequência do som incidente, ou a existência de outros fatores externos como outras barreiras acústicas ou planos refletores nas imediações. Apresentam-se resultados no domínio do tempo, que permitem acompanhar a propagação sonora das ondas, na presença de obstáculos, e observar os fenómenos físicos associados. Calcula-se, no domínio da frequência, a atenuação conferida pela barreira num determinado plano de recetores. Adicionalmente, calcula-se a alteração do nível sonoro obtida, do lado da fonte, pela introdução, na face exposta da barreira, de um coeficiente de absorção sonora diferente de zero. Pela observação dos resultados, verifica-se que o modelo é adequado para a simulação dos exemplos selecionados.

Palavras-chave: Atenuação, barreiras acústicas, ruído, Método dos Elementos de Fronteira.

ABSTRACT

According to T & E agency in the EU, each year, die about 50 thousand people due to heart problems and 200 000 are diagnosed new diseases that may be associated with exposure to excessive noise levels, which represents an annual cost of more than 40 billion euros.

The noise attenuation outside may be made through the use of acoustic barriers. Noise barriers have an important role, since it will reduce the levels of noise and therefore improve the quality of life of population.

In this work we apply a dual formulation of the Boundary Element Method, in three dimensions, to simulate the propagation of sound in the vicinity of three-dimensional acoustic barriers. Ranging the dimensions of the barriers, the sound absorption properties of the barriers and the frequency of the incident sound, or razing, too, the existence of other external factors such as noise barriers or other flat reflectors in the vicinity. The results are presented in the time domain, to monitoring the sound wave propagation in the presence of obstacles, and observe the associated physical phenomena. It is estimated, too, in the frequency domain, the attenuation afforded by the barrier at a given plan receivers. Additionally, we calculate the change of the sound level afforded in the font side, by the introduction on the exposed face of the barrier, one nonzero coefficient of sound absorption. The observing of results it's clear that the model is adequate for the simulation of this selected examples.

Keywords: Attenuation; acoustic barriers, noise, Boundary element method.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
SIMBOLOGIA	xi
ABREVIATURAS.....	xii
1.INTRODUÇÃO	1
1.1.Enquadramento e Motivação	1
1.2.Objetivos.....	3
1.3.Estrutura do Documento	3
2.PROPAGAÇÃO DO SOM NO EXTERIOR.....	5
2.1.Introdução	5
2.2.Fatores que Condicionam a Propagação do Som.....	8
2.2.1.Tipo de Fonte Emissora	8
2.2.2.Distância à Fonte	10
2.2.3.Absorção Atmosférica e Humidade	11
2.2.4.Absorção do Solo.....	12
2.2.5.Vento e Temperatura.....	13
2.2.6.Obstáculos	15
2.3.Fatores que Influenciam o Desempenho de Uma Barreira.....	20
2.3.1.Geometria	20
2.3.2.Altura	22
2.3.3.Comprimento	23
2.3.4.Distância à Fonte/Recetor	24
2.3.5.Frequência do Som	24
2.3.6.Transmissão	25
2.4.Tipos de Barreiras Acústicas	26
2.5.Modelos de Cálculo.....	30
3.FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	35
3.1.Introdução	35
3.2.Fonte Sonora.....	35
3.3.Campo de Pressões Incidentes	35
3.4.Formulação Integral de Fronteira.....	36

3.4.1. Formulação do Método dos Elementos de Fronteira (BEM)	36
3.4.2. Equação Integral Normal Derivativa (TBEM)	37
3.4.3. Formulação Dual BEM e TBEM	38
3.5. Simulação da Absorção Sonora	38
3.6. Sistema de Equações	39
3.7. Integração Analítica de Integrais Singulares e Hipersingulares	40
3.7.1. Integrais Singulares Aplicados à Equação (25)	40
3.7.2. Integrais Hipersingulares Aplicados à Equação (26)	42
3.8. Verificação do Modelo	43
3.8.1. Coeficiente de Absorção $\alpha = 0$	43
3.8.2. Coeficiente de Absorção $\alpha = 1$	47
4. APLICAÇÕES	48
4.1. Introdução	48
4.2. Geometria dos Casos de Estudo	48
4.2.1. Caso 1	49
4.2.2. Caso 2	50
4.2.3. Caso 3	50
4.2.4. Caso 4	51
4.3. Resultados no Domínio do Tempo	52
4.4. Resultados no Domínio da Frequência	67
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Espectro sonoro (APA, 2004).	6
Figura 2.2 – Curvas isofónicas (António, 2012).	6
Figura 2.3 – Nível sonoro equivalente (Bruel e Kjaer, 2001).	7
Figura 2.4 – Propagação do som por uma fonte pontual (Adaptado de António, 2012).	9
Figura 2.5 – Propagação do som por uma fonte linear (Adaptado de António, 2012).	10
Figura 2.6 – Variação da absorção atmosférica com a humidade relativa a 15°C (Larsson,1997).	11
Figura 2.7 – Variação da absorção atmosférica com a humidade relativa a 0°C (Larsson, 1997).	12
Figura 2.8 – Atenuação do solo e frequência (Adaptado de Bruel e Kjaer, 2001).	13
Figura 2.9 – Perfil da velocidade do som a variar em altura (António, 2012).	14
Figura 2.10 – Curvatura convexa das ondas sonoras em situação de efeito descendente (Adaptada de Leissing, 2007, citando Piercy,1977).	14
Figura 2.11 – Curvatura côncava das ondas sonoras em situação de efeito ascendente, e zona sombra (Adaptada de Leissing, 2007 citando Piercy,1977).	15
Figura 2.12 – Propagação de uma onda sonora através de um obstáculo (Adaptado de FHWA@,2014).	16
Figura 2.13 – Duas situações (1 e 2) que representam os percursos das ondas diretas e difratadas, com duas localizações relativas, da fonte e do recetor, diferentes (Adaptado de Knauer <i>et al.</i> , 2000).	17
Figura 2.14 – Determinação de δ em barreiras duplas (Adaptado de ISO 9613-2).	19
Figura 2.15 – Configurações de topo (Adaptado de Watts, 2002).	22
Figura 2.16 – Dimensionamento de barreira acústica, segundo FHWA (Adaptado de Knauer <i>et al.</i> , 2000).	23
Figura 2.17 – Exemplificação do comprimento de uma barreira acústica em alternativa ao método de FHWA (Adaptado de Knauer <i>et al.</i> , 2000).	24
Figura 2.18 – Relação da frequência e absorção sonora para diferentes soluções construtivas (Adaptado de Watts, 2002).	27
Figura 2.19 – Barreira em forma de “T” com revestimento de material absorvente na parte superior (Adaptado de Watson, 2006).	28
Figura 2.20 – Barreiras sobrepostas (Adaptado de Knauer <i>et al.</i> , 2000)	30
Figura 3.1 – Geometria dos elementos de fronteira.	40
Figura 3.2 – Geometria usada na verificação do modelo ($\alpha = 0$).	45

Figura 3.3 – Pressão sonora nos recetores ao longo do eixo x	46
Figura 3.4 – Pressão sonora nos recetores paralelos ao eixo z	46
Figura 3.5 – Verificação do modelo para $\alpha = 1$: a) Geometria; b) Campo de pressão sonora no instante $t = 13,0$ ms.....	47
Figura 4.1 – Geometria do Caso 1.....	49
Figura 4.2 – Geometria do Caso 2.....	50
Figura 4.3 – Geometria do Caso 3.....	51
Figura 4.4 – Geometria do Caso 4.....	52
Figura 4.5 – Pressão sonora para uma frequência característica de 250 Hz, registada em duas grelhas de recetores (planos vertical e horizontal), no instante $t = 2,1$ ms para o Caso 1: a) $\alpha = 0$, b) $\alpha = 0,5$ (na face voltada para a fonte).....	53
Figura 4.6 – Pressão sonora para uma frequência característica de 250 Hz, registada em duas grelhas de recetores (planos vertical e horizontal), no instante $t = 5,0$ ms para o Caso 1: a) $\alpha = 0$, b) $\alpha = 0,5$ (na face voltada para a fonte).....	54
Figura 4.7 – Pressão sonora para uma frequência característica de 250 Hz, registada em duas grelhas de recetores (planos vertical e horizontal), no instante $t = 10,1$ ms para o Caso 1: a) $\alpha = 0$, b) $\alpha = 0,5$ (na face voltada para a fonte).....	55
Figura 4.8 – Pressão sonora para uma frequência característica de 250 Hz, registada em duas grelhas de recetores (planos vertical e horizontal), no instante $t = 13,0$ ms para o Caso 1: a) $\alpha = 0$, b) $\alpha = 0,5$ (na face voltada para a fonte).....	56
Figura 4.9 – Pressão sonora para uma frequência característica de 250 Hz, registada em três grelhas de recetores (dois planos verticais e um plano horizontal), no instante $t = 2,1$ ms para o Caso 3: a) $\alpha = 0$, b) $\alpha = 0,5$ (na face voltada para a fonte).....	57
Figura 4.10 – Pressão sonora para uma frequência característica de 250 Hz, registada em três grelhas de recetores (dois planos verticais e um plano horizontal), no instante $t = 5,0$ ms para o Caso 3: a) $\alpha = 0$, b) $\alpha = 0,5$ (na face voltada para a fonte).....	58
Figura 4.11 – Pressão sonora para uma frequência característica de 250 Hz, registada em três grelhas de recetores (dois planos verticais e um plano horizontal), no instante $t = 13,0$ ms para o Caso 3: a) $\alpha = 0$, b) $\alpha = 0,5$ (na face voltada para a fonte).....	59
Figura 4.12 – Pressão sonora para uma frequência característica de 250 Hz, registada em três grelhas de recetores (dois planos verticais e um plano horizontal), no instante $t = 28,0$ ms para o Caso 3: a) $\alpha = 0$, b) $\alpha = 0,5$ (na face voltada para a fonte).....	60
Figura 4.13 – Pressão sonora para uma frequência característica de 250 Hz, registada em duas grelhas de recetores (planos vertical e horizontal), no instante $t = 2,1$ ms para o Caso 4: a) $\alpha = 0$, b) $\alpha = 0,5$ (na face voltada para a fonte).....	62
Figura 4.14 – Pressão sonora para uma frequência característica de 250 Hz, registada em duas grelhas de recetores (planos vertical e horizontal), no instante $t = 5,0$ ms para o Caso 4: a) $\alpha = 0$, b) $\alpha = 0,5$ (na face voltada para a fonte).....	63

Figura 4.15 – Pressão sonora para uma frequência característica de 250 Hz, registada em duas grelhas de recetores (planos vertical e horizontal), no instante $t = 10,1$ ms para o Caso 4: a) $\alpha = 0$, b) $\alpha = 0,5$ (na face voltada para a fonte).....	64
Figura 4.16 – Pressão sonora para uma frequência característica de 250 Hz, registada em duas grelhas de recetores (planos vertical e horizontal), no instante $t = 16,1$ ms para o Caso 4: a) $\alpha = 0$, b) $\alpha = 0,5$ (na face voltada para a fonte).....	65
Figura 4.17 – Pressão sonora para uma frequência característica de 250 Hz, registada em duas grelhas de recetores (planos vertical e horizontal), no instante $t = 27,0$ ms para o Caso 4: a) $\alpha = 0$, b) $\alpha = 0,5$ (na face voltada para a fonte).....	66
Figura 4.18 – Atenuação sonora, IL, (dB) calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, para a frequência de 125 Hz, para o Caso 1: a) $\alpha = 0$; b) $\alpha = 0,2$; c) $\alpha = 0,5$; d) $\alpha = 0,8$	69
Figura 4.19 – Atenuação sonora, IL, (dB) calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, para a frequência de 250 Hz, para o Caso 1: a) $\alpha = 0$; b) $\alpha = 0,2$; c) $\alpha = 0,5$; d) $\alpha = 0,8$	70
Figura 4.20 – Atenuação sonora, IL, (dB) calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, para a frequência de 500 Hz, para o Caso 1: a) $\alpha = 0$; b) $\alpha = 0,2$; c) $\alpha = 0,5$; d) $\alpha = 0,8$	71
Figura 4.21 – Atenuação sonora, IL, (dB) calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, para a frequência de 125 Hz, para o Caso 2: a) $\alpha = 0$; b) $\alpha = 0,2$; c) $\alpha = 0,5$; d) $\alpha = 0,8$	72
Figura 4.22 – Atenuação sonora, IL, (dB) calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, para a frequência de 250 Hz, para o Caso 2: a) $\alpha = 0$; b) $\alpha = 0,2$; c) $\alpha = 0,5$; d) $\alpha = 0,8$	73
Figura 4.23 – Atenuação sonora, IL, (dB) calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, para a frequência de 500 Hz, para o Caso 2: a) $\alpha = 0$; b) $\alpha = 0,2$; c) $\alpha = 0,5$; d) $\alpha = 0,8$	74
Figura 4.24 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 125 Hz, quando $\alpha = 0,2$, Caso 1.....	75
Figura 4.25 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 125 Hz, quando $\alpha = 0,5$ Caso 1.....	75
Figura 4.26 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 125 Hz, quando $\alpha = 0,8$ Caso 1.....	76
Figura 4.27 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 250 Hz, quando $\alpha = 0,2$ Caso 1.....	77

Figura 4.28 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 250 Hz, quando $\alpha = 0,5$ Caso 1.....	77
Figura 4.29 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 250 Hz, quando $\alpha = 0,8$ Caso 1.....	78
Figura 4.30 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 500 Hz, quando $\alpha = 0,2$ Caso 1.....	78
Figura 4.31 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 500 Hz, quando $\alpha = 0,5$ Caso 1.....	79
Figura 4.32 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 500 Hz, quando $\alpha = 0,8$ Caso 1.....	79
Figura 4.33 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 125 Hz, quando $\alpha = 0,2$ Caso 2.....	80
Figura 4.34 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 125 Hz, quando $\alpha = 0,5$ Caso 2.....	81
Figura 4.35 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 125 Hz, quando $\alpha = 0,8$ Caso 2.....	81
Figura 4.36 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 250 Hz, quando $\alpha = 0,2$ Caso 2.....	82
Figura 4.37 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 250 Hz, quando $\alpha = 0,5$ Caso 2.....	82
Figura 4.38 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 250 Hz, quando $\alpha = 0,8$ Caso 2.....	83
Figura 4.39 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 500 Hz, quando $\alpha = 0,2$ Caso 2.....	83
Figura 4.40 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 500 Hz, quando $\alpha = 0,5$ Caso 2.....	84

Figura 4.41 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 500 Hz, quando $\alpha = 0,8$ Caso 2.....	84
---	----

SIMBOLOGIA

Pa – Pascal

μ Pa – Micro Pascal

dB – Decibel

dB (A) - Decibel com ponderação da curva A.

W – Watt

kg – Quilograma

m^3 - Metro cúbico

m^2 – Metro quadrado

m – Metro

s – Segundo

ms – Milissegundo

Hz – Hertz

δ – Diferença de percursos entre as ondas difratada e direta

λ - Comprimento de onda da onda sonora

c – Velocidade do som

f – Frequência

N – Número de Fresnel

ABREVIATURAS

IL – Perda por inserção, do inglês *insertion lost*

FHWA – Federal Highway Administration

TL – Transmission Loss

UE – União Europeia

T&E – Agência Transport & Environment

OMS – Organização Mundial de Saúde

ITeCons - Instituto de Investigação e Desenvolvimento em Ciências da Construção

BEM – Boundary Element Method

TBEM – Tracing Boundary Element Method

FEM – Finite Element Method

FDM – Finite Difference Method

MOI - Method of Images

FDTD - Finite-Difference Time-Domain

TLM - Transfer Line Matrix

TMM - Transfer Matrix Method

EULER - Linearized Eulerian Model

GTPE - Generalized Terrain Parabolic Equation Method

FFP - Fast Field Program

CRAYL - Straight-ray model for a non-refracting atmosphere, using a linearized sound-profile

STAT - Statistical scattering models

ΔL - Diferença de nível sonoro

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento e Motivação

A poluição sonora é um problema que afeta cada vez mais pessoas em todo o mundo, tendo origem nas mais diversas fontes sonoras. Estas fontes estão associadas a atividades industriais, de transporte e atividades relacionadas com o lazer. São os centros urbanos os grandes focos de poluição sonora, onde, devido ao crescente número de habitantes, existe uma tendência de expansão dos mesmos. Esta expansão, que muitas vezes sendo desordenada e pouco sustentável, leva ao aumento dos níveis de ruído, por exemplo, pela crescente necessidade de meios de transporte da população que sobrecarrega as vias de tráfego e promove o congestionamento do trânsito.

Granadeiro, 2008 citando um estudo do mesmo ano da organização ambiental Transport & Environment (T&E), refere que na União Europeia (UE), onde 75% da população vive em meios urbanos, morrem todos os anos 50 mil pessoas devido a problemas cardíacos, relacionados com o excesso de ruído a que estão expostas e a cerca de 200 mil são diagnosticadas doenças do coração. Verifica-se, também que 40% da população Europeia está sujeita a níveis sonoros mais elevados que os recomendados pela Organização Mundial de Saúde (OMS), de 55 decibéis (dB). Deste facto resultam complicações de saúde que têm um custo total anual, para a UE, superior a 40 biliões de euros.

O ruído tem diversos efeitos nocivos na saúde Humana, consoante o tempo de exposição, a intensidade, a distância à fonte, o facto de o ruído ser temporário ou permanente ou a própria sensibilidade do indivíduo que ouve. As implicações no ser humano podem estar relacionadas com efeitos físicos pela perda de audição, efeitos fisiológicos como a alteração da pressão sanguínea, do ritmo cardíaco ou das tensões musculares e efeitos psicológicos pela alteração de comportamentos, dificuldades de comunicação, ansiedade, *stress*, irritabilidade (APA, 2004), etc..

Apesar de a poluição sonora ser um problema que está já previsto na agenda da União Europeia há mais de 30 anos (Granadeiro, 2008), existe ainda um grande caminho a percorrer, uma vez que a legislação não tem sido aplicada da forma mais eficiente. Existe legislação Europeia, como a Diretiva nº 2002/49/CE do Parlamento Europeu e Conselho, de 25 de Junho de 2002, transposta para a legislação Portuguesa pelo Decreto-Lei 146/2006 de 31 de Julho,

que prevê uma linha orientadora comum para os estados-membro, de modo a promover a redução e prevenção do ruído ambiente através da elaboração de mapas de ruído ou de planos de ação para prevenção do mesmo. Existe outra legislação nacional adicional como o Decreto-Lei nº 9/2007 de 17 de Janeiro (Regulamento Geral do ruído), que visa a preservação da vida e saúde Humana e o bem-estar da população em termos de ruído. Fixa os valores de exposição de ruído para as diferentes zonas contempladas nos mapas de ruído, i.e. as zonas sensíveis e mistas e prevê também que os planos municipais de ordenamento do território devem assegurar o cumprimento dos valores limites impostos pela legislação em vigor.

No que respeita à redução do ruído, esta pode ser feita atuando num ou mais dos seguintes três pontos: na fonte, no meio de propagação ou no recetor (Bies e Hansen, 2003). Na fonte sonora é possível implementar, por exemplo para o ruído de tráfego rodoviário, um conjunto de medidas de carácter político e estratégico, de modo a reduzir o ruído em determinadas zonas. Poderá ser exemplo a coordenação de semáforos, criando uma “onda verde”, de modo a evitar o “para-arranca”; a implementação de restrições de circulação numa via a veículos com uma determinada idade ou tecnologia; ou o tratamento acústico de um pavimento. Durante a propagação existe a hipótese de intervir ao nível do trajeto do som entre a fonte e o recetor, aumentando a distância, ou colocando um obstáculo entre estes que impeça total ou parcialmente a passagem do som, por exemplo a aplicação de barreiras acústicas. Ao nível do recetor é possível melhorar o isolamento acústico; na fase de projeto orientar a habitação de modo a ficar protegida do ruído; ou implementar outras medidas como a troca dos sistemas de ventilação de uma habitação (APA, 2004).

Relativamente às barreiras acústicas existem diversos fatores capazes de influenciar o seu desempenho. Entre esses fatores pode-se destacar o perfil, a altura, o comprimento, a distância à fonte e ao recetor, a frequência do som e a perda de transmissão do som através da barreira, fator que está relacionado com o tipo de material que a compõe. Existem diversos tipos de barreiras acústicas: inclinadas, com painéis de materiais tratados acusticamente, de vegetação, com diferentes configurações de topo, desencontradas ou naturais. No entanto, aquando da sua implementação, é necessário fazer uma análise custo/benefício à mesma, dado que as barreiras acústicas poderão ter desvantagens como o custo de montagem e manutenção, o impacto visual ou a promoção do aumento do nível sonoro na via ou em edifícios altos.

A fase de projeto de uma barreira é muito importante, pois permite escolher materiais e definir configurações que permitam atingir a atenuação requerida. A previsão da atenuação terá necessariamente de ser efetuada através do recurso a modelos que podem ser mais simplificados ou mais complexos. É de extrema importância a escolha do modelo para garantir resultados razoáveis.

1.2. Objetivos

O presente estudo trata da propagação de ondas sonoras, geradas por fontes tridimensionais, na proximidade de barreiras acústicas tridimensionais. Avalia-se, ainda, a atenuação sonora conferida pelas mesmas. Esta dissertação, tem como principal objetivo a aplicação de um modelo numérico, desenvolvido pelos orientadores, que permite a simulação de barreiras tridimensionais e a atribuição de diferentes coeficientes de absorção sonora à superfície das mesmas. O modelo utiliza uma formulação integral de fronteira dual, usando o método dos elementos de fronteira clássico e o método que utiliza a equação integral derivada. Esta metodologia permite modelar barreiras com espessuras reduzidas. Durante as várias fases do trabalho, foi possível cumprir objetivos parciais que contribuiriam para atingir o objetivo principal desta dissertação:

- Efetuar a validação do modelo, verificar as limitações em termos de dimensões das barreiras e frequências de cálculo, impostas pelos constrangimentos computacionais e aplicar o modelo a diversos casos de estudo.
- Simular as barreiras implantadas num meio fluido semi-infinito permitindo a modelação do pavimento.
- Introduzir variáveis, nos casos de estudo, como a dimensão da barreira, o número de barreiras, a proximidade de fachadas e a absorção das superfícies da barreira.
- Visualizar a propagação das ondas sonoras, ao longo do tempo, na proximidade das barreiras e identificar os vários fenómenos físicos envolvidos.
- Calcular, também, no domínio da frequência, a atenuação conferida pela barreira e a influência da existência de absorção sonora na superfície da barreira do lado da fonte na diminuição do nível sonoro próximo da fonte.

1.3. Estrutura do Documento

A presente dissertação está organizada em seis capítulos estruturados de acordo com a descrição que se segue.

No capítulo primeiro (o presente), “*Introdução*”, apresenta-se um enquadramento do tema relacionado com a problemática do ruído na sociedade e com as possíveis soluções para a sua mitigação. Apresentam-se, também, os objetivos do trabalho e descreve-se a estrutura da dissertação.

No capítulo segundo, “*Propagação do som no exterior*”, é feita uma análise de alguma literatura relacionada com os fatores que afetam a propagação do som no exterior, e o projeto acústico das barreiras. Referem-se também os tipos de barreiras que existem.

No capítulo terceiro, “*Formulação do Problema*”, é apresentada a formulação do modelo numérico usado no cálculo. Neste capítulo também se apresenta a metodologia usada para fazer a verificação do modelo numérico.

No capítulo quarto, “*Aplicações*”, aplica-se um algoritmo computacional, baseado na formulação descrita no terceiro capítulo, para a simulação de vários exemplos de estudo. Neste capítulo é descrita a geometria dos vários exemplos. São definidas as variáveis introduzidas e as frequências de cálculo. Apresentam-se resultados obtidos para o campo de pressões sonoras, no domínio do tempo, e resultados para a atenuação sonora e diferença de níveis sonoros, no domínio da frequência.

No capítulo quinto, “*Considerações Finais*”, são elaboradas as principais considerações sobre o trabalho e apresentadas algumas conclusões e referidas algumas possibilidades de trabalho que permitam complementar o presente estudo.

No capítulo sexto, “*Referências Bibliográficas*”, indicam-se todas as fontes de informação consultadas no decorrer da presente dissertação

2. PROPAGAÇÃO DO SOM NO EXTERIOR

2.1. Introdução

Com o estilo de vida imposto, nos dias de hoje, as populações estão cada vez mais expostas a elevados níveis de ruído. Os sons indesejáveis provêm de tudo o que fazemos no dia-a-dia, desde o sair de casa para ir para o trabalho até ao regressar ao fim do dia. Cada vez há uma maior consciencialização e preocupação do Homem na sua proteção perante os elevados níveis sonoros, dada a quantidade de malefícios que a exposição prolongada ao ruído pode promover.

Pode-se caracterizar o som como a variação da pressão atmosférica pela vibração de um determinado material que promove a agitação das moléculas do meio, que por sua vez é detetável pelo ouvido Humano (FHWA@, 2014). O nível sonoro é traduzido por uma relação logarítmica entre a pressão sonora no meio em Pascals (Pa) e a pressão sonora de referência que corresponde ao limiar mínimo da audição Humana, em dB, como explicitado na equação (1) (Bies e Hansen, 2003).

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0} \quad (1)$$

onde, L_p representa o nível de pressão sonora em dB, p a pressão sonora em Pa e p_0 a pressão sonora de referência, ou seja $p_0 = 20 \times 10^{-6}$ Pa.

Quando o som se torna desagradável a quem o ouve de modo a provocar incomodidade ou promover risco para a saúde Humana designa-se por ruído. O som pode ser caracterizado em termos de frequência por baixa frequência para sons graves (infra-sons), média frequência e alta frequência para sons agudos (ultra-sons), ou em termos de amplitude da onda sonora. No entanto o ser Humano só deteta sons entre os 20 Hz e os 2000 Hz, como exemplificado na Figura 2.1.

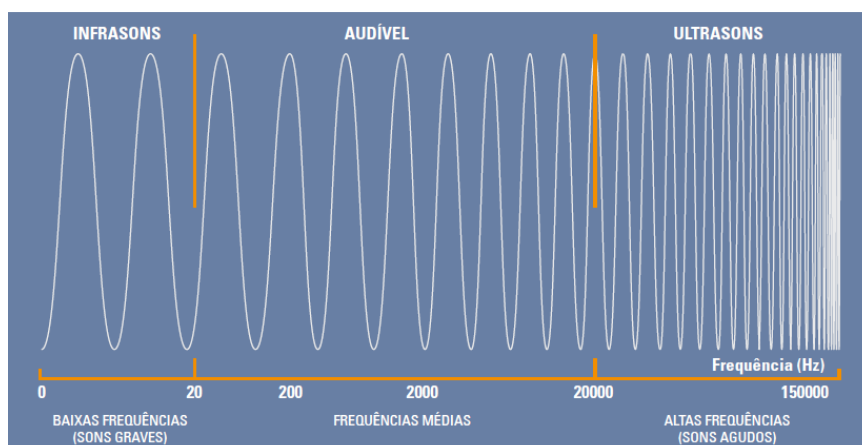


Figura 2.1 – Espectro sonoro (APA, 2004).

O ouvido Humano deteta sons numa pressão sonora limitada na gama dos 20 μPa aos 20 Pa (APA, 2004), não detetando de igual modo todas as frequências dentro dessa gama. Para diferenciar o modo como o ouvido deteta o som na gama do audível foram realizados testes que tiveram por base a comparação da audibilidade de um som, com uma determinada frequência e amplitude, com um som puro de referência de 1000 Hz. Onde se pedia a um conjunto de indivíduos que indicassem se o som ouvido era mais alto, baixo ou igual ao som de referência, obtendo-se as curvas isofónicas, conforme a Figura 2.2.

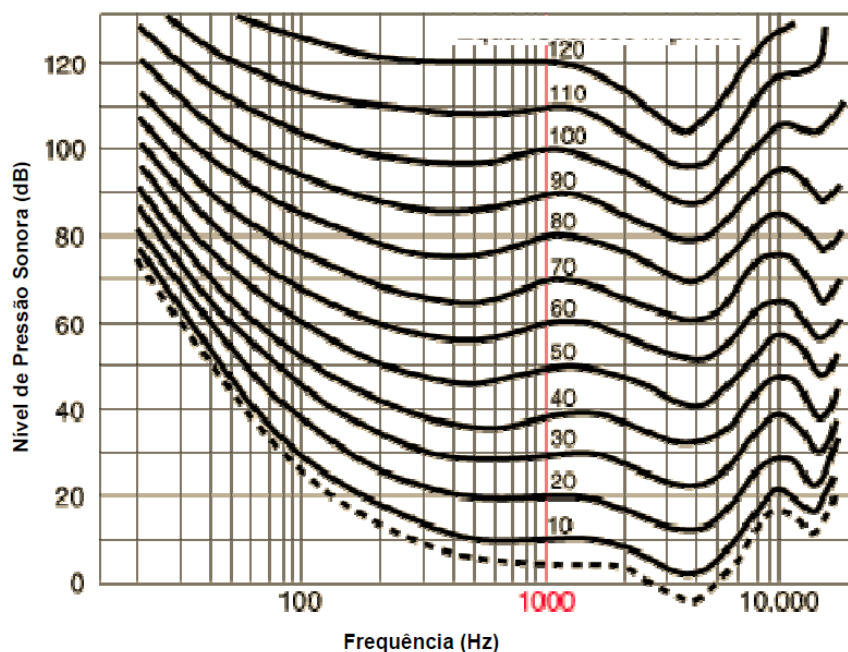


Figura 2.2 – Curvas isofónicas (António, 2012).

As curvas isofónicas traduzem para diferentes pontos da mesma curva, iguais sensibilidades auditivas, mostrando maior capacidade de perceção, do ouvido Humano ao som, a altas frequências quando comparada com baixas frequências. Para baixas frequências o nível de pressão sonora tem de subir mais para que o som seja perceptível a uma intensidade igual à do som de referência.

Os aparelhos de medida como os sonómetros, registam o som como ele é na realidade. São instrumentos particularmente úteis, por exemplo, na medição do impacte ambiental que tem um determinado ruído, para a qual existem filtros que tentam reproduzir, mecanicamente a forma como o ouvido Humano ouve e a partir daí verificar, se realmente o som é prejudicial à saúde ou não. Os filtros assumem a designação de curvas de ponderação A, B, C, etc., sendo a curva de ponderação A, a que melhor se aproxima à incomodidade sentida pelo ouvido Humano.

Pelo facto de o ruído não ser constante ao longo do tempo (Figura 2.3), torna-se necessário, para efeitos de medições para um período de tempo T, criar um nível sonoro equivalente, que traduz a “média” sonora para esse período. O nível sonoro equivalente pode ser determinado pela equação (2).

$$L_{Aeq,T} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{p_A(t)}{p_0} \right)^2 dt \right] \quad (2)$$

sendo $L_{Aeq,T}$ o nível sonoro contínuo equivalente, com ponderação A, para o período T, em dB (A); p_A a pressão sonora instantânea, ponderada em A, expressa em Pa; e p_0 a pressão sonora de referência, ou seja $p_0 = 20 \times 10^{-6}$ Pa.

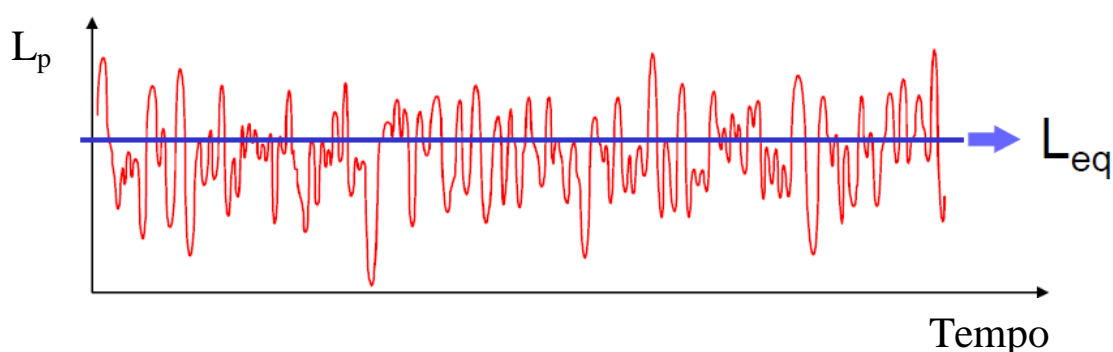


Figura 2.3 – Nível sonoro equivalente (Bruel e Kjaer, 2001).

2.2. Fatores que Condicionam a Propagação do Som

A propagação do som passa por 3 estágios: a geração pela fonte, a propagação através do meio e a receção pelo destinatário. Quando se pretende reduzir o nível sonoro, a intervenção deve ser feita numa (ou mais) destas fases de modo a poder obter uma redução mais significativa do ruído (Watts, 2002).

No que respeita à geração ou receção do som existem medidas que se podem tomar de acordo com o tipo de fonte e recetor de ruído, como a construção de equipamentos mais silenciosos, a alteração da localização da fonte, a utilização de dispositivos de proteção pessoais ou de compartimentos, a manutenção de equipamentos ou a substituição por equipamentos menos ruidosos (Bies e Hansen, 2003). Do mesmo modo, também é possível intervir na fase da propagação do som colocando, por exemplo, obstáculos como de barreiras acústicas entre o recetor e o emissor.

Durante a normal propagação do som existem um conjunto de fenómenos, que vão promovendo uma redução do nível sonoro, pelo que é importante ter em consideração os fatores mais importantes que afetam a propagação. O desempenho de uma barreira acústica varia ao alterarem-se fatores como o tipo de fonte, a distância à fonte, fatores atmosféricos e as suas variáveis (absorção, humidade, vento e temperatura), a absorção do solo, e os obstáculos no caminho da propagação (Brueel e Kjær, 2001).

2.2.1. Tipo de Fonte Emissora

Existem dois tipos de fontes geradoras de ruído, as fontes pontuais e as fontes lineares. As fontes pontuais caracterizam-se por serem pequenas quando comparadas com a distância ao recetor, como é, por exemplo um cortador de relva em funcionamento. A sua energia propaga-se de forma esférica e o nível de pressão sonora, estando à mesma distância da fonte, é o mesmo. As fontes lineares podem ser representadas pelo conjunto de várias fontes pontuais, propagando-se no meio cilíndricamente devido ao facto de serem alongadas numa direção e estreitas noutra, à semelhança de uma estrada movimentada (Brueel e Kjær, 2001).

Dependendo se a fonte é pontual ou linear o modo de propagação do som é feito segundo superfícies esféricas ou cilíndricas, como representado, respetivamente, nas Figuras 2.4 e 2.5 onde W representa a potência da fonte sonora, I a intensidade sonora e r o raio.

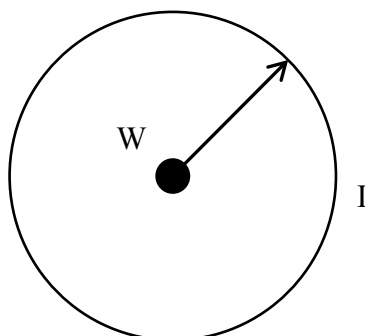


Figura 2.4 – Propagação do som por uma fonte pontual (Adaptado de António, 2012).

A intensidade sonora (em W/m^2) pode ser determinada através da equação (3):

$$I = \frac{p^2}{\rho c} = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (3)$$

Tendo em conta que ρ representa a massa volúmica do fluído (kg/m^3), c a velocidade do som (m/s) e que a área da superfície (S) da esfera é dada por $S = 4\pi r^2$, sendo r a distância entre a fonte e o recetor (m), que corresponde ao raio. Pode-se obter o nível de pressão sonora para este caso, pela equação (4) (António, 2012),

$$L_P = L_W - 20 \log(r) - 10 \log\left(\frac{W_{ref} \rho c}{p_{ref}^2 4\pi}\right) \quad (dB) \quad (4)$$

onde L_W representa o nível de potência sonora em dB, r a distância à fonte (m), W_{ref} a potência sonora de referencia (W) e p_{ref} o valor eficaz da pressão à distância r (Pa).

As fontes lineares prolongam-se por grandes distâncias quando comparadas com as distâncias de medição, daí que não geram ondas com superfícies do tipo esférica, mas sim, do tipo cilíndrica. Que podem ser encaradas como um conjunto de fontes pontuais ao longo de um eixo x .

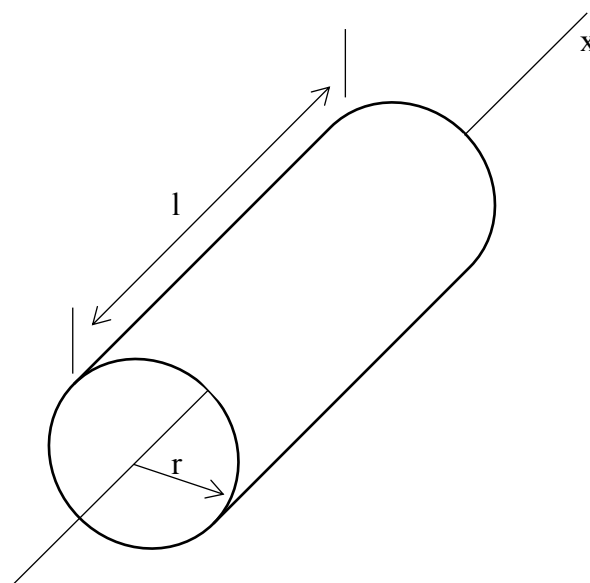


Figura 2.5 – Propagação do som por uma fonte linear (Adaptado de António, 2012).

No caso das fontes lineares, a Intensidade máxima a uma determinada distância obtém-se, tendo em conta a área da superfície (S) do cilindro, dada por $S = 2\pi r l$, com l a representar o comprimento do cilindro, ou seja da fonte linear, pela equação (5) (António, 2012)

$$I = \frac{W}{S} = \frac{W}{2\pi r l} \quad (5)$$

Obtendo-se a diferença dos níveis de intensidade para diferentes distâncias, pela equação (6) onde a fonte linear é considerada, para efeitos de simplificações, como uma fonte muito longa (António, 2012).

$$\Delta L = L_1 - L_2 = 10 \log \frac{I_1}{I_{ref}} - 10 \log \frac{I_2}{I_{ref}} = 10 \log \frac{I_1}{I_2} = 10 \log \frac{r_1}{r_2} \quad (6)$$

em que ΔL representa a diferença de níveis de intensidade sonora (dB), L_1 e L_2 os níveis de intensidade sonora (dB) às distâncias r_1 e r_2 (m).

2.2.2. Distância à Fonte

À medida que o som se propaga e se afasta da fonte, as ondas sonoras vão sendo progressivamente amortecidas devido a todos os fatores que influenciam a propagação do som. As frequências mais elevadas são amortecidas mais rapidamente, e portanto, atingem

uma distância menor (Arbetarskyddsfonden, 1986). É por esse motivo que a buzina dos navios tem um som característico grave, ou seja, de baixa frequência.

Para fontes sonoras pontuais existe um decaimento do nível sonoro de 6 dB a cada vez que a distância à fonte duplica, enquanto que numa fonte sonora linear esse decaimento é de 3 dB ao dobrar a mesma distância, associado à divergência geométrica, isto é, ao aumento da superfície de frente de onda.

2.2.3. Absorção Atmosférica e Humidade

A absorção atmosférica depende da frequência do som, da humidade relativa do meio, da temperatura e da pressão atmosférica aumentando linearmente com a distância. Larsson, 1997 refere que durante o fenómeno de propagação do som uma parte da onda sonora se perde no meio, enquanto que a outra parte é transferida para as moléculas do ar pela indução de vibrações (Wakefield Acoustics Ltd, 2012). Estes fatores surgem da relação com os fenómenos físicos que ocorrem durante a propagação do som e influenciam a absorção atmosférica. A propagação do som está sujeita a fenómenos físicos que estão relacionados com as condições do meio de propagação, como os movimentos de rotação e vibração das moléculas associados à viscosidade do meio, que as fazem chocar umas com as outras, a condutividade térmica e a difusão térmica (Leissing, 2007). Pode-se observar a dependência da absorção atmosférica em função da humidade relativa e da temperatura nas Figuras 2.6 e 2.7

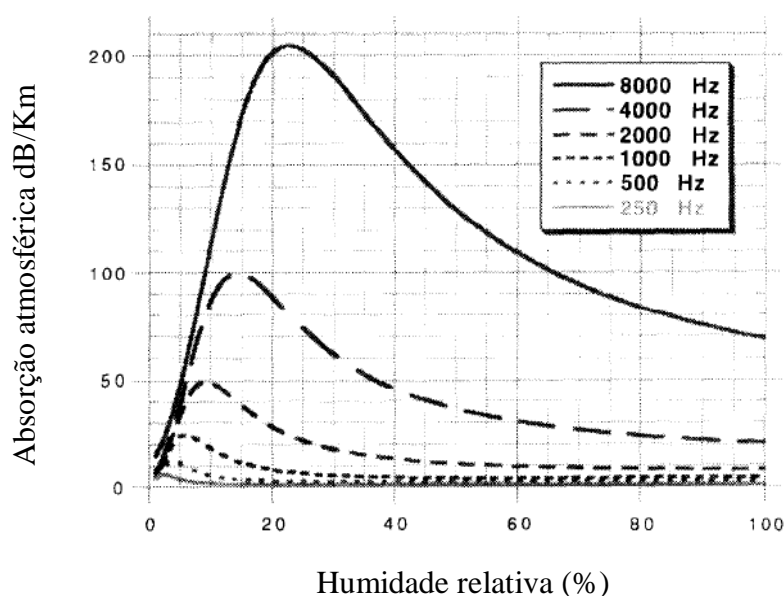


Figura 2.6 – Variação da absorção atmosférica com a humidade relativa a 15°C (Larsson, 1997).

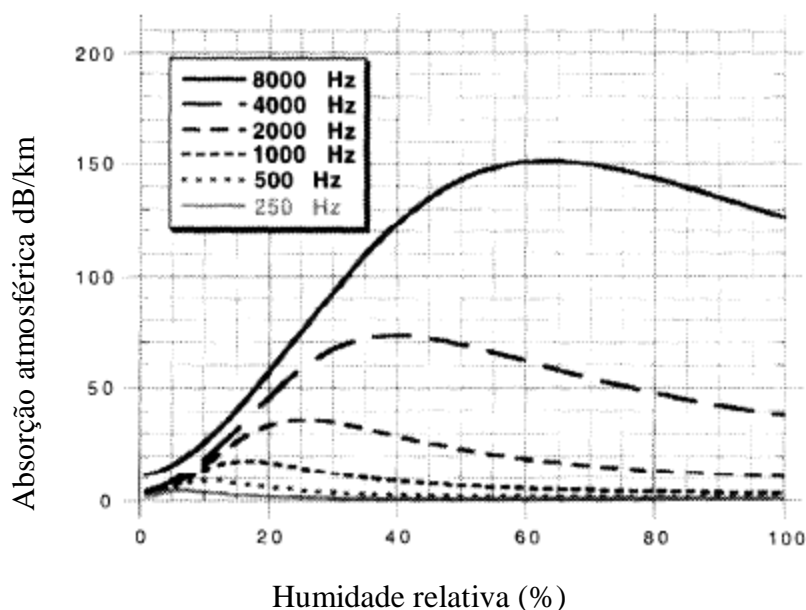


Figura 2.7 – Variação da absorção atmosférica com a humidade relativa a 0°C (Larsson, 1997).

Verifica-se que à temperatura de 15°C existe uma maior atenuação sonora para valores de humidade relativa baixos, na ordem dos 20%, e frequências altas. Enquanto à temperatura de 0°C a absorção dá-se mais em frequências altas quando existe uma humidade relativa na ordem dos 50%. Por comparação das Figuras 2.6 e 2.7 percebe-se que para temperaturas mais baixas a absorção é, também, mais baixa, possivelmente devido à menor movimentação das moléculas do ar, característica da ausência de calor.

Arbetarskyddsfonden, 1986 e Maijala, 2011 referem que, como comprovado pelas figuras anteriores, as frequências mais baixas são mais afetadas pelo efeito do vento e da turbulência, enquanto, que as frequências mais altas são afetadas por parâmetros como a temperatura e a humidade.

A absorção atmosférica é um efeito pouco representativo numa cidade (Wakefield Acoustics Ltd, 2012) devido às distâncias limitadas entre a fonte e o recetor, podendo até em condições “normais” de temperatura e humidade, ser desprezável para distâncias curtas e frequências baixas.

2.2.4. Absorção do Solo

A absorção do solo deve-se a sucessivos fenómenos de reflexão (Chen e Maher, 2004), que ocorrem durante a propagação a baixa altitude através das várias interações com a superfície.

Quando a fonte sonora e o recetor estão ambos próximos ao solo, a onda emitida ao ser refletida no solo criará interferências com a onda de incidência direta, originando um fenómeno chamado *ground effect*, caracterizado por uma onda combinada, composta pela onda de incidência direta e pela refletida (Leissing, 2007), que consoante a absorção e rigidez da superfície poderá promover um aumento ou diminuição da amplitude final da onda (António, 2012). Ou seja, se a superfície for refletora promover-se-á um aumento da pressão sonora final, enquanto, que se a superfície for porosa, existirá uma diminuição da pressão sonora final devido à absorção sonora induzida pelo solo. Deste modo a criação de jardins em zonas ruidosas de cidades poderá ser encarada como um método de controlo e atenuação do ruído (Wakefield Acoustics Ltd, 2012), dado que a vegetação pode promover uma superfície mais porosa, e portanto, mais absorvente (Attenborough, 2002). Nos solos mistos e porosos nota-se mais este efeito para as frequências na ordem dos 200-600 Hz, conforme mostra a Figura 2.8

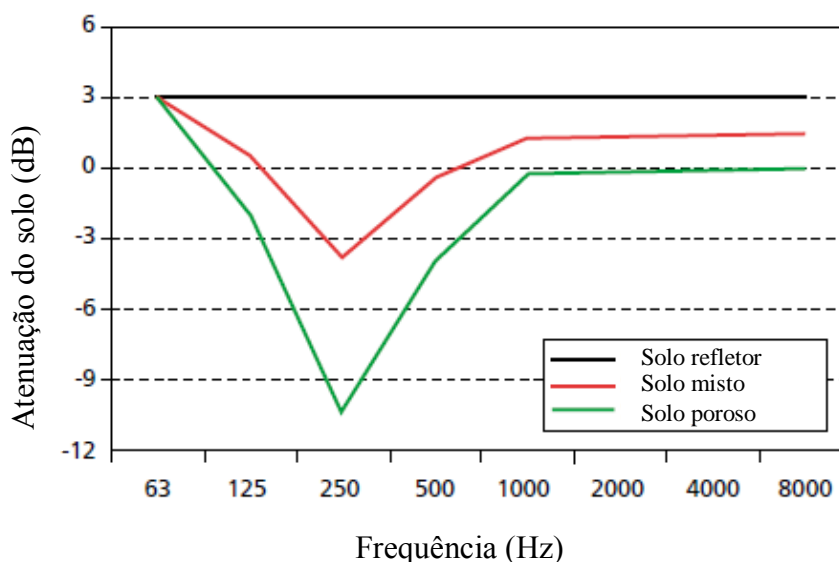


Figura 2.8 – Atenuação do solo e frequência (Adaptado de Bruel e Kjaer, 2001).

2.2.5. Vento e Temperatura

A propagação do som pode ser fortemente afetada pelas componentes do vento e da temperatura. Estas componentes podem alterar a perceção humana da intensidade sonora do ruído, por exemplo, aquela que uma unidade industrial emite, durante o dia e durante a noite, parecendo que, em determinadas condições, o nível de ruído é maior durante a noite (Wakefield Acoustics Ltd, 2012).

Devido às ações do vento e da temperatura é possível observar na propagação sonora dois efeitos: o efeito descendente e o efeito ascendente (António, 2012), que são devidos a fenómenos de refração. Verifica-se ocorrer o efeito descendente quando o vento toma a direção da propagação do som (António, 2012), e devido à resistência promovida pela superfície, cria-se um perfil de velocidades, em que a velocidade do som junto ao solo é menor, e em altitude maior, podendo-se estabelecer um paralelismo com um fluxo de vetores (Chen e Maher, 2004) como exemplificado na Figura 2.9.

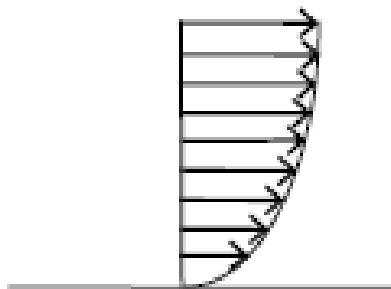


Figura 2.9 – Perfil da velocidade do som a variar em altura (António, 2012).

Devido à velocidade do som ser menor junto ao solo e maior em altitude existe uma curvatura convexa das ondas sonoras em direção ao solo, como mostra a Figura 2.10.

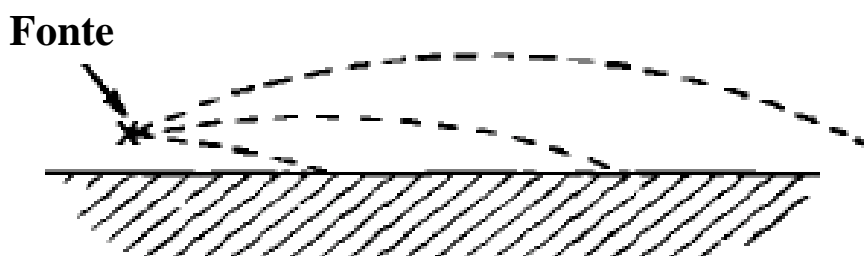


Figura 2.10 – Curvatura convexa das ondas sonoras em situação de efeito descendente (Adaptada de Leissing, 2007, citando Piercy, 1977).

Este efeito promove uma série de reflexões no solo (Leissing, 2007) que podem ter como consequências a amplificação do *ground effect* ou o aumento da pressão sonora no recetor.

Relativamente ao efeito ascendente, este, ocorre em condições de vento contrárias ao caso descrito anteriormente, ou seja, quando a velocidade do vento diminui com a altitude origina uma curvatura côncava das ondas na direção da atmosfera. Segundo Attenborough, 2002 e Leissing, 2007, esta situação promove um gradiente de velocidade do som negativo. Que provoca o efeito ascendente e a criação de uma zona, junto à superfície, onde a pressão sonora

desce mais rápido que o esperado para a mesma distância (zona sombra), a uma distância que depende desse gradiente (ver Figura 2.11).

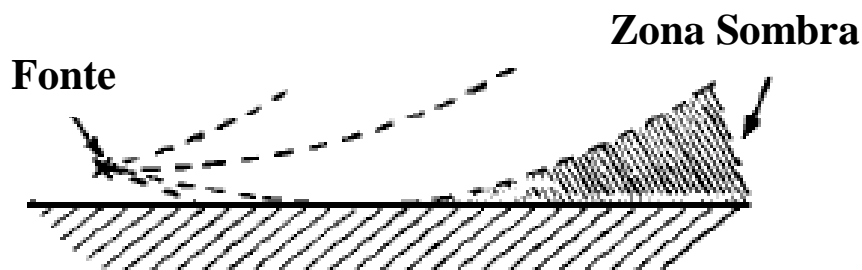


Figura 2.11 – Curvatura côncava das ondas sonoras em situação de efeito ascendente, e zona sombra (Adaptada de Leissing, 2007 citando Piercy, 1977).

O efeito do vento não tem uma influência significativa no nível sonoro medido até uma distância de 50 m da fonte emissora, tendo um efeito considerável para distâncias maiores (Bruel e Kjaer, 2001).

A relação entre o perfil de velocidade de propagação do som, $c(z)$, o perfil das temperaturas, $T(z)$, e o perfil da velocidade do vento, $u(z)$, na direção da propagação do som é dada pela equação (7) (Attenborough, 2002).

$$c(z) = c(0) \sqrt{\frac{T(z)+273.15}{273.15}} + u(z) \quad (7)$$

Em condições normais, durante o dia a temperatura da superfície é maior que a temperatura do ar envolvente promovendo a ocorrência do efeito ascendente, enquanto, que durante a noite ocorre o contrário e há uma promoção de um efeito descendente. Estes efeitos podem alterar a percepção das pessoas em relação à intensidade sonora de uma determinada fonte, porque se existir o efeito descendente, há um aumento da pressão sonora no recetor (Wakefield Acoustics Ltd, 2012).

2.2.6. Obstáculos

A propagação do som é afetada pela presença de obstáculos, que impedem a passagem do som total ou parcialmente. São usualmente usados para atenuação sonora em zonas sensíveis na proximidade de faixas de rodagem em zonas residenciais, hospitais, lares etc. Na sua instalação (quando artificiais) é necessário algum critério, na medida em que podem causar

problemas, como acontece por vezes com as barreiras acústicas paralelas sem tratamento com material absorvente, que promovem o aumento do nível sonoro na faixa de rodagem devido a fenómenos de sucessivas reflexões (Daigle,1999), reduzindo o desempenho das barreiras. Nestes casos, para barreiras já existentes será necessário a substituição de painéis simples por painéis com propriedades absorventes (Watson, 2006 e Watts, 1996a).

A onda sonora, ao ser emitida pela fonte e ao ser interceptada pelos obstáculos, leva a que ocorram uma série de fenómenos de reflexão, difração, absorção e transmissão, entre o emissor sonoro e o recetor, conforme a Figura 2.12.

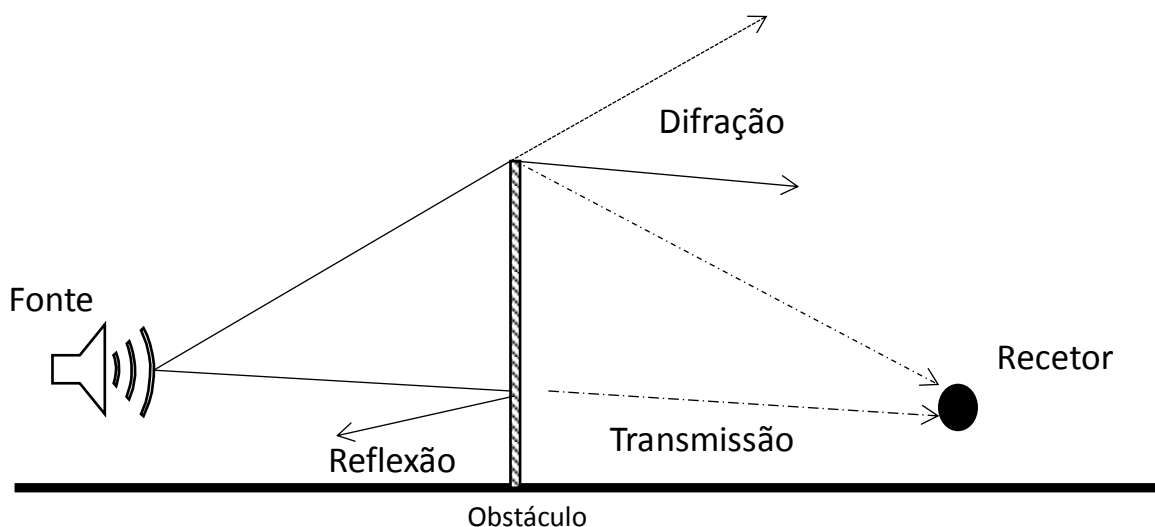


Figura 2.12 – Propagação de uma onda sonora através de um obstáculo (Adaptado de FHWA@,2014).

Ao embater na barreira, parte da onda sonora é refletida para o lado oposto ao sentido da onda incidente, outra parte absorvida pela barreira, sendo que quanto mais absorvente for o material de que é composta, maior a absorção sonora por ela promovida, e ainda uma parte que é transmitida através da barreira, devido à vibração dos materiais. Por outro lado, se a onda incide no topo da barreira, ocorrerá a difração da mesma, ou seja conforme o ângulo de incidência, a configuração de topo da barreira e o comprimento de onda da onda sonora (FHWA@, 2014), esta irá ser curvada também com diferentes ângulos no sentido do recetor (Xavier, 2009). O recetor apenas é afetado diretamente pelas ondas transmitidas e difratadas (Freitas e Trabulo, 2007).

Relativamente à difração, esta não é igual para todo o tipo de sons, devido ao comprimento da onda sonora, à distância da fonte à barreira e à configuração de topo da barreira. As ondas com frequências mais elevadas têm um comprimento de onda mais pequeno, e por isso são mais dificilmente difratadas para o lado do recetor que as ondas sonoras com baixas

frequências. As ondas com baixas frequências, devido aos seus elevados comprimentos de onda têm facilidade em ultrapassar a barreira acústica, difratando as ondas sonoras com um ângulo de difração maior para a zona sombra (FHWA@, 2014 e Hendriks *et al.*, 2013). As barreiras acústicas são mais eficientes na atenuação de frequências elevadas do que na atenuação de frequências baixas (Hendriks *et al.*, 2013).

Através do ângulo de difração é introduzido o conceito de diferença de percursos (δ) entre as ondas difratada e direta, que com recurso à Figura 2.13, se pode traduzir pela expressão (8).

$$\delta = a + b - c \quad (8)$$

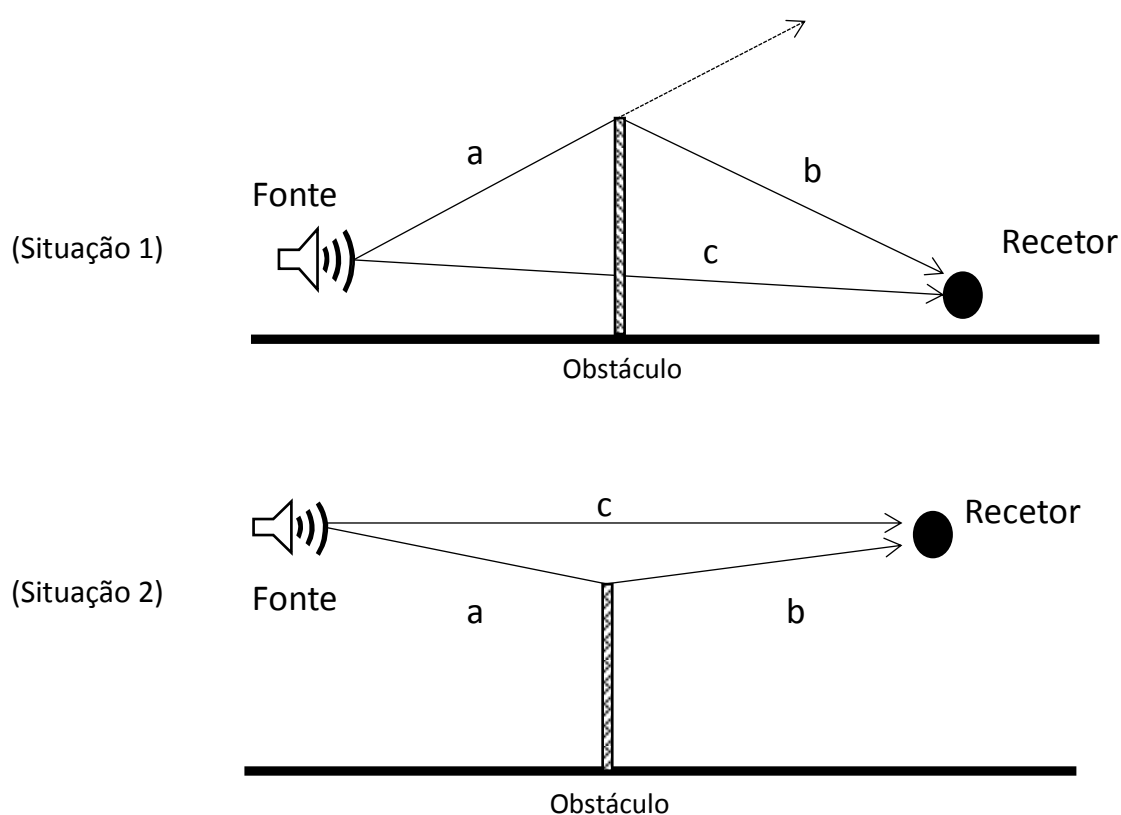


Figura 2.13 – Duas situações (1 e 2) que representam os percursos das ondas diretas e difratadas, com duas localizações relativas, da fonte e do recetor, diferentes (Adaptado de Knauer *et al.*, 2000).

É possível relacionar δ com o comprimento de onda da onda sonora (λ) pelo número de Fresnel (N), um número adimensional utilizado na determinação da atenuação de uma barreira acústica (Foss, 1975 e Knauer, 2000). Assim como obter N em função da equação que define o comprimento de onda, onde c e f traduzem a velocidade e frequência da onda sonora, respetivamente, como exemplificado na equação (9).

$$N = \pm 2 \frac{\delta}{\lambda} = \pm 2 \frac{f\delta}{c} \quad (9)$$

A atenuação sonora de uma barreira depende, como já referido, da distância da fonte e do recetor à barreira, da frequência do som e da velocidade do mesmo, dependendo esta última, do meio onde a fonte sonora está inserida. Na equação do número de Fresnel o sinal pode ser positivo ou negativo, conforme a “linha direta” (traduzida pela letra c na Figura 2.13) entre a fonte e o recetor se posiciona acima ou abaixo do ponto de difração, respetivamente.

Pela observação da Figura 2.13 pode-se notar que, em ambas as situações exemplificadas, a barreira se encontra entre o emissor sonoro e o recetor, variando apenas a localização destes relativamente à barreira. Ou seja, na situação 1, a fonte e o recetor estão de tal modo posicionados que não existe a possibilidade de o som chegar ao recetor sem que seja interceptado pela barreira, o que não acontece na situação 2, onde o som emitido pode ser detetado pelo recetor sem qualquer interferência da barreira. Foss, 1975 refere que na situação 1, a barreira efetivamente é eficaz na atenuação sonora, promovendo uma atenuação positiva, e sendo o número de Fresnel, também, positivo, enquanto, que na situação 2, existirá, devido a reflexões no topo da barreira, um N negativo, podendo produzir ou não atenuação sonora. Este fenómeno, segundo Hendriks *et al.*, 2013 acontece quando o percurso do som direto está a 1,52 m acima do topo da barreira, para as distâncias médias usuais entre fontes de tráfego e o recetor em ambientes próximos das vias de tráfego.

O melhor indicador do desempenho de uma barreira acústica é a perda por inserção (IL da sigla inglesa de *Insertion Loss*), que traduz a capacidade de uma barreira atenuar o ruído (Daigle, 1999). Em termos simples a IL é a diferença de níveis sonoros antes e após a barreira ter sido construída. Depende da altura da barreira, da distância fonte/recetor à barreira, da frequência, do comprimento de onda do som e do coeficiente de absorção do material da barreira (Daigle, 2010). Hendriks *et al.*, 2013 quando se referem à atenuação de uma barreira acústica, apenas consideram as reduções do nível sonoro devido a fenómenos de difração ao longo de todo o seu comprimento, ou seja, uma barreira têm maior ou menor atenuação consoante o nível sonoro é reduzido no momento da difração. Quando se referem à perda por inserção consideram a atenuação, as mudanças nas alturas dos caminhos de propagação, as alterações associadas aos efeitos do solo, a ruídos marginais e outras fontes de ruído. A perda por inserção pode ser obtida pela diferença do nível sonoro medido no recetor, nas condições da barreira presente e da barreira ausente (ISO 9613-2). É apresentado na ISO 9613, como proposta de cálculo da perda por inserção a expressão (10)

$$IL = 10 \log_{10} \left[3 + \left(20 \frac{c_2}{\lambda} \right) C_3 \delta K_{met} \right] \quad (10)$$

onde C_2 é igual a 20 considerando as reflexões no pavimento, ou igual a 40 se estas não forem consideradas; δ representa a diferença de percursos entre as ondas difratada e direta; K_{met} é a componente que permite introduzir neste cálculo uma correção meteorológica; λ o comprimento de onda da onda sonora; e C_3 igual a 1 para barreiras com difracção finas ou obtido pela expressão (11) para casos em que a difracção é dupla.

$$C_3 = \frac{\left[1 + \left(\frac{5\lambda}{e}\right)^2\right]}{\left[\frac{1}{3} + \left(\frac{5\lambda}{e}\right)^2\right]} \quad (11)$$

em que e traduz a distância entre os dois locais onde ocorre a difracção (no caso de ser dupla), como melhor exemplificado pela Figura 2.14.

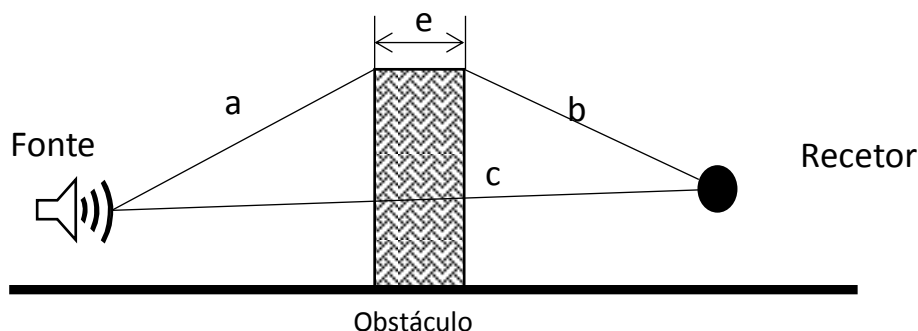


Figura 2.14 – Determinação de δ em barreiras duplas (Adaptado de ISO 9613-2).

A utilização de barreiras acústicas também é possível em espaços interiores em que seja necessário criar zonas de privacidade ou de conversação, como poderá acontecer, por exemplo, numa exposição ou num banco. António *et al.*, 2013 analisaram o desempenho de barreiras acústicas para diferentes geometrias e posições relativas a paredes laterais, concluindo que a perda por inserção obtida dos espaços acústicos entre as barreiras varia consoante a localização dos recetores, a frequência, sendo esta maior para frequências mais elevadas, e a forma das barreiras, obtendo os valores mais baixos para este indicador perto dos extremos das barreiras.

É possível relacionar o número de Fresnel com a perda de inserção, através de um gráfico que Maekawa apresentou em 1968, e que ainda hoje é dos métodos mais utilizados no cálculo da atenuação sonora e da perda por inserção de barreiras acústicas (Menounou, 2001). Verifica-se que desde que o número de Fresnel seja negativo, a atenuação promovida pela barreira decresce (Kwok-Leung, 2008). Crocker, 2007 cita, com base no estudo de Maekawa, 1968, a equação (12) obtida por Kurze e Anderson, 1971 capaz de conferir uma maior fiabilidade que o gráfico de Maekawa no cálculo da atenuação sonora, quando $N > 1$.

$$Att = 5 + 20 \log \frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh \sqrt{2\pi N}} \quad (12)$$

2.3. Fatores que Influenciam o Desempenho de Uma Barreira

Para além dos fatores externos que influenciam o desempenho das barreiras acústicas, na propagação do som, anteriormente abordados (capítulo 2, secção 2.2), existem uma série de outros fatores relacionados com as características da própria barreira que também afetam o seu desempenho. Estes fatores, ao longo dos anos, têm vindo a ser alvo de estudos por parte de investigadores por todo o mundo. Fujiwara, 1997, 2003, Watts, 2001, 2006 ou Crombie e Hothersall, 1995 são apenas alguns exemplos de estudos que se debruçaram na análise das mais diferentes e variadas configurações de topo que definem o perfil que uma barreira pode tomar, de modo a tentar perceber qual destas é a que maior atenuação confere. Outros dos fatores são: a altura da barreira estudada por Daigle, 1999, Clum, 1997 e Menge *et al.*, 1998; o comprimento examinado por Hendriks, 2013 ou Bies e Hansen, 2003; a distância da barreira à fonte e ao recetor por Bies e Hansen, 2003, Brown e Hall, 1978 e Attenborough, 2002; a frequência por Bies e Hansen, 2003; e a transmissão por Attenborough, 2002.

2.3.1. Geometria

Tadeu *et al.*, 2012 estudaram a propagação do som na vizinhança de barreiras acústicas 3D colocadas em paralelo com fachadas de edifícios, de modo a mitigar a geração de ruído. Simularam diferentes geometrias longitudinais e transversais para as barreiras e avaliaram a influência destas características na atenuação sonora. Concluindo, assim que a interação entre as ondas incididas diretamente nos recetores, as ondas difratadas no topo da barreira e as refletidas no pavimento, conduz a uma diminuição do desempenho da barreira. Enquanto que a utilização de barreiras onduladas longitudinalmente promove um ligeiro aumento da atenuação sonora (Tadeu *et al.*, 2012).

A configuração de topo de uma barreira interfere muito na propagação do som, daí que poderá ser uma boa opção manipular essa configuração de modo a perturbar a normal difusão do som. Estudos realizados por Crombie *et al.*, 1995, Daigle, 1999, Ishizuka e Fujiwara, 2004 ou Watts *et al.*, 2003 comprovam que as barreiras com configurações de topo aumentam substancialmente a atenuação sonora de uma barreira, aquando comparadas com simples barreiras verticais. Fujiwara, 1998, ou Ishizuka e Fujiwara, 2004 mediram a perda por inserção para barreiras com diferentes configurações e materiais de topo e diferentes espessuras, concluindo que modificações na altura e espessura da barreira tem vantagens pouco expressivas quando comparadas com vantagens obtidas de alterações de configurações de topo. Fujiwara *et al.*, 2003 e Watts *et al.*, 2003 comparam a perda por inserção para

diferentes configurações de topo, concluindo que a forma “T” é a que maior perda por inserção proporciona, independentemente da frequência. Watson, 2006 verificou que, entre as opções analisadas, era a forma “T” com revestimento na parte superior do topo que mais se destaca. Concluiu que a junção de uma configuração de topo com o tratamento com um tipo de material absorvente pode ajudar a reduzir o nível sonoro em 2 a 3 dB, o que traduzindo para uma hipotética redução de altura equivaleria a uma redução 0,61 m a 1,5 m na altura da barreira.

Watts, 2002 mediu a perda por inserção adicional, relativamente a uma barreira vertical de 2 m para estudar várias alterações em termos de alturas de barreiras e de configurações de topo e perceber qual dos conjuntos confere maior perda de inserção. As configurações incluíam barreiras em forma de “T”, com “abas” e *designs* comerciais, conforme a Figura 2.15 que também apresenta os resultados para as perdas de inserção relativas. Definiu como barreira base para comparação, uma barreira vertical de 2 m simples, i.e. sem materiais absorventes. Verificou que é possível obter uma perda por inserção adicional de 3,6 dB se aumentar a altura da barreira de 2 para 3 m, o que em termos práticos nem sempre é possível. Relativamente às barreiras com a configuração em forma de “T” reparou que a que melhor desempenho oferece é a barreira (f), com uma parte superior de 2 m, tratada com material absorvente, de modo a diminuir ao máximo o fenómeno de difração, o que resulta numa perda por inserção adicional de 3,1 dB. Nas barreiras com configurações de topo com “abas”, é a barreira (j) a que maior perda por inserção confere, i.e. uma perda por inserção adicional de 2,7 dB numa barreira em que as “abas” distam de 2m uma da outra e o topo da barreira central é tratado com materiais absorventes. As barreiras com configurações comerciais são as que menor perda por inserção relativa conferem.

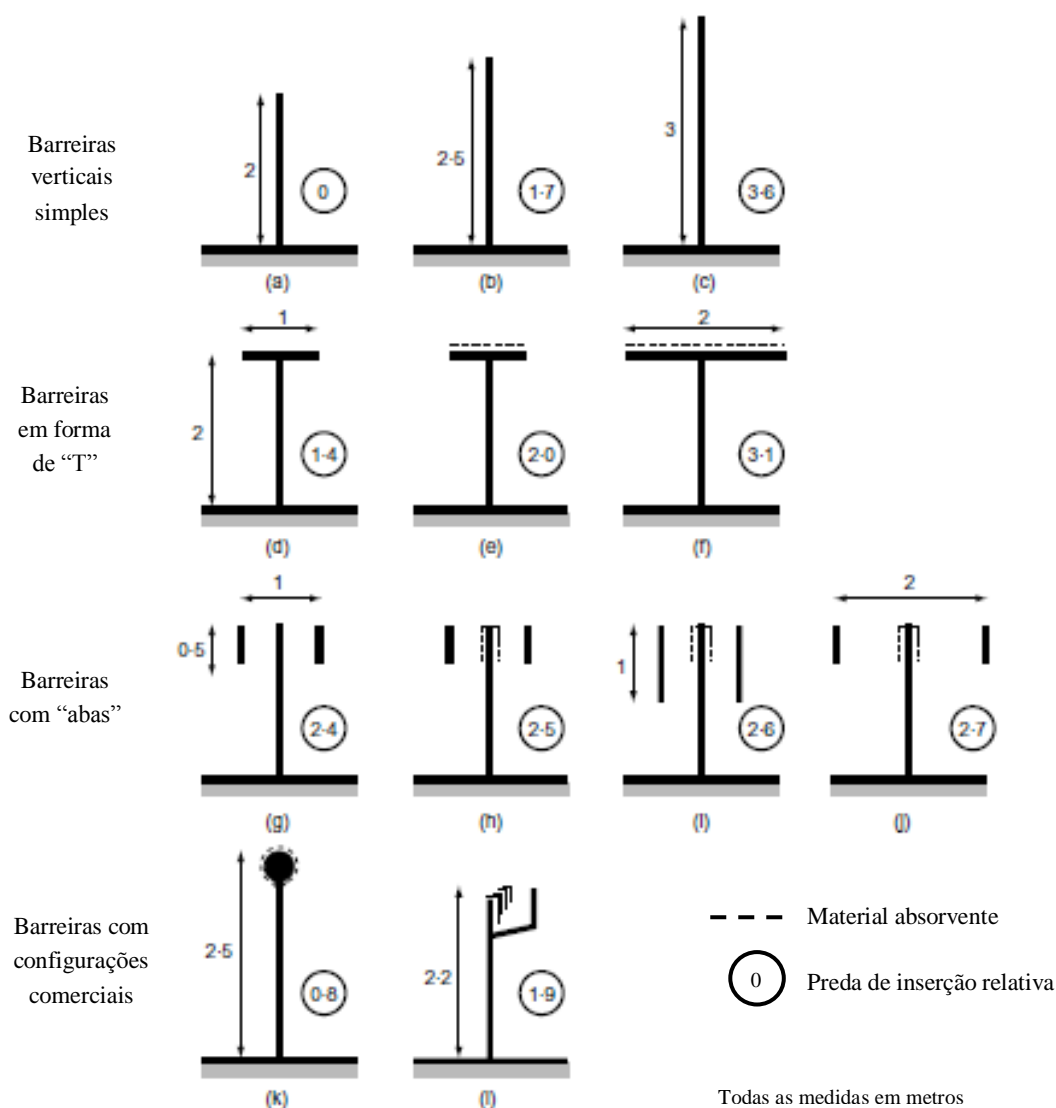


Figura 2.15 – Configurações de topo (Adaptado de Watts, 2002).

2.3.2. Altura

A altura de uma barreira é fundamental para o seu bom desempenho acústico. E apesar de, segundo Hendriks *et al.*, 2013, não existir uma relação linear da atenuação com a altura, quanto mais alta for a barreira, maior é a diferença entre os caminhos percorridos pelas ondas direta e difratada (δ), que o som tem de percorrer desde a fonte ao recetor, e portanto, a equação de Fresnel sugere que a atenuação sonora será maior (Daigle, 1999). A altura é influenciada por vários fatores dependendo do custo associado, da estética, dos requisitos necessários à construção das fundações, da topografia do terreno ou da atenuação sonora que

se pretende (Knauer *et al.*, 2000). O impacto visual da barreira pode ser atenuado através de estratégias como a decoração das barreiras, ou a variação das suas alturas ao longo de todo o comprimento (Simpson, 1976).

É possível relacionar a atenuação sonora promovida pela barreira com a sua altura através de um método proposto pela FHWA (Federal Highway Administration) que permite o cálculo da perda por inserção (Knauer *et al.*, 2000). Pode-se esperar que uma barreira atenuo o som em 5 dB para recetores cuja linha de visão é bloqueada apenas pela barreira. Como regra geral considera-se que cada metro de barreira adicional, acima da linha de visão promove uma atenuação na ordem dos 1.5 dB, como exemplificado pela Figura 2.16.

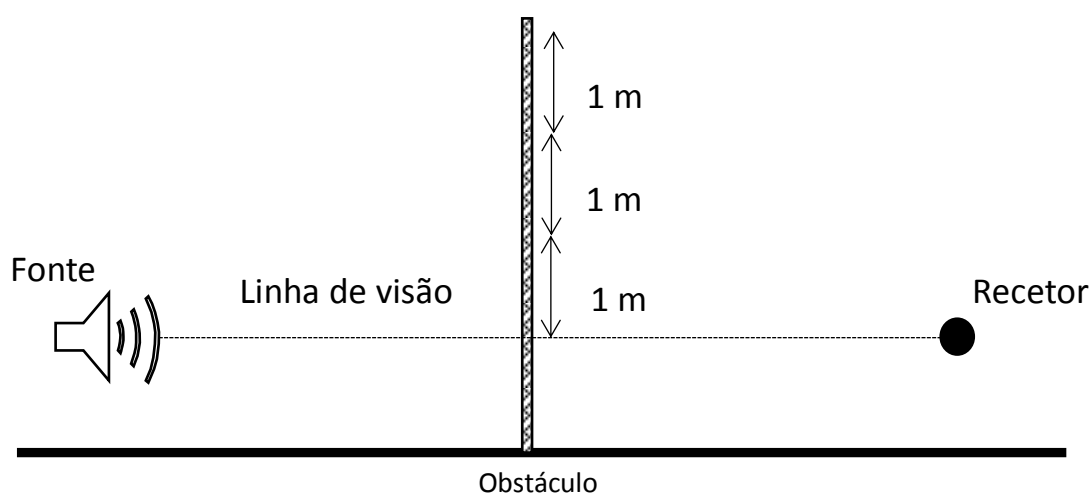


Figura 2.16 – Dimensionamento de barreira acústica, segundo FHWA (Adaptado de Knauer *et al.*, 2000).

É referido em Simpson, 1976 que é possível obter facilmente atenuações de 10 dB através de barreiras simples. Nos casos em que se pretende obter reduções de 15 dB já é necessário pensar em estruturas mais complexas, com alturas elevadas e preocupações em termos de detalhes de construção como a transmissão através da barreira.

Observam-se pelo mundo barreiras maioritariamente com alturas médias na ordem dos 2 a 6 m, capazes de induzir uma perda por inserção entre 5 e 12 dB. No entanto encontra-se também alturas de 1 m e de mais de 7 m (Daigle, 1999).

2.3.3. Comprimento

O comprimento de uma barreira acústica é de tal modo importante que pode promover uma diminuição significativa da eficiência da barreira, devendo ser longo o suficiente para conferir

a proteção sonora desejada ao recetor (Hendriks, 2013). A FHWA citando Knauer *et al.*, 2000, apresenta um método empírico que permite de modo simples determinar o comprimento que a barreira deverá ter. A distância entre um recetor e a extremidade da barreira deve ser pelo menos quatro vezes a distância perpendicular desse recetor à barreira. Uma alternativa a este método, que implica barreiras longas são as barreiras como exemplificado na Figura 2.17.

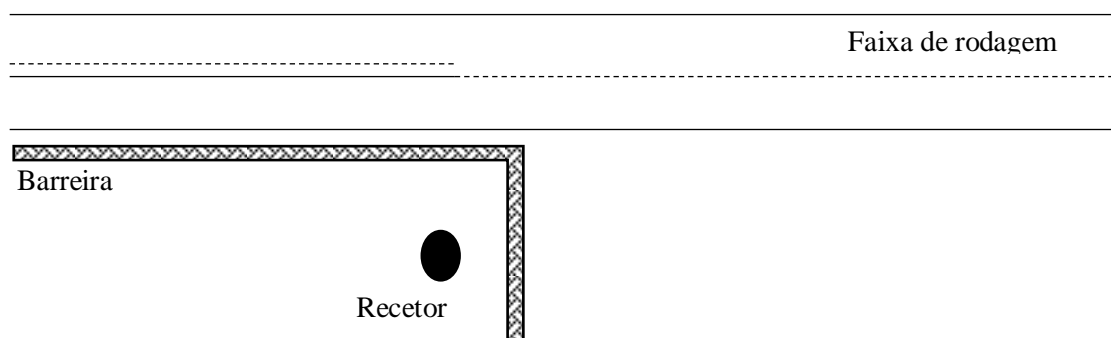


Figura 2.17 – Exemplificação do comprimento de uma barreira acústica em alternativa ao método de FHWA (Adaptado de Knauer *et al.*, 2000).

Ao invés de grandes comprimentos, têm-se barreiras mais pequenas, sob pena, de poderem existir problemas como seja a expropriação de terrenos, ou a definição de responsabilidade na manutenção das mesmas (Hendriks, 2013).

2.3.4. Distância à Fonte/Recetor

Xavier, 2009 citando Crocker, 2007 refere que apesar de não existir, teoricamente, uma alteração de atenuação promovida pela barreira consoante a sua posição em relação à fonte ou ao recetor na prática essa alteração verifica-se. De tal modo, que é conveniente posicionar a barreira acústica o mais perto possível da fonte sonora, para que a distância que as separa (fonte-barreira) não seja superior à altura da barreira. Também se verifica uma maior eficácia na utilização destes dispositivos se se dispuserem perto do recetor. A opção que menor atenuação promove, segundo Hendriks, 2013 é a meio caminho entre a fonte e o recetor.

2.3.5. Frequência do Som

A frequência com que o som incide numa barreira também influencia a forma como esta se vai comportar, em termos de atenuação sonora, tendo um desempenho mais elevado para sons com um comprimento de onda pequeno, e um desempenho mais baixo para sons com comprimentos de onda maiores. O som de frequência baixa, com comprimentos de onda

grandes passa facilmente ao redor da barreira. A quantidade de som difratado depende do comprimento de onda e do tamanho do objeto. Comprimentos de onda que se aproximam do tamanho da barreira são facilmente difratados, o que em termos de atenuação sonora, não é bom. Pelo contrário com frequências altas, os comprimentos de onda são mais pequenos, quando comparados com o tamanho dos objetos, e assim são difratados com mais dificuldade (Hendriks, 2013). Em Hendriks, 2013, é referido que uma onda sonora com uma frequência de 16 Hz e um comprimento de onda de cerca 21 m tende a ultrapassar obstáculos até aproximadamente 5 m de altura. Assim como também é referido que o ruído de tráfego emite ondas sonoras na gama dos 250 a 2000 Hz com comprimentos de onda de 0,2 m e 1,4 m, o constitui uma vantagem porque permite que as barreiras acústicas possam ser relativamente baixas.

A frequência também pode ser relacionada com a atenuação da barreira através do número de Fresnel, anteriormente abordado. Quanto maior a frequência, maior é o número de Fresnel e portanto maior a atenuação que a barreira confere.

2.3.6. Transmissão

A energia sonora na presença de uma barreira acústica pode ser refletida, transmitida através da barreira ou difratada pelo topo e laterais da barreira. A maneira como o som se comporta em cada uma dessas situações vai definir se a barreira é boa ou não. É importante que uma barreira acústica minimize a transmissão sonora e aumente a perda por transmissão (TL da sigla inglesa de *Transmission Loss*), de modo a torná-la mais eficiente. A TL é um indicador de desempenho da barreira, que se traduz pela perda de energia sonora que a barreira confere (não considerando a difração e a reflexão), sendo obtida pela aplicação da equação (13) (Knauer *et al.*, 2000).

$$TL = 10 \log \left[\frac{10^{SPL_S/10}}{10^{SPL_T/10}} \right] \quad (13)$$

em que SPL_S e SPL_T traduz o nível de pressão sonora, medido na barreira do lado da fonte e do lado do recetor, respetivamente (Knauer *et al.*, 2000).

A TL é função em primeira instância, da própria barreira, dependendo da densidade, espessura e tipo de material, e em segunda, pela frequência sonora, que é induzida pelo tipo de som emitido (Hendriks *et al.*, 2013 e Department of the army and the air force, 1995) sendo maior, para frequências mais elevadas (Bies e Hansen, 2003). Estas características devem ser tais, que minimizem a transmissão sonora através da barreira.

Qualquer material pode ser pensado como possível barreira acústica, desde que confira uma TL de pelo menos 10 dB a mais do que a redução desejada (Hendriks *et al.*, 2013). Ou seja, dando-se o caso de uma barreira ser projetada para reduzir o nível de ruído em 8 dB (A), a TL deve ser de pelo menos 18 dB (A). Assim a transmissão através da barreira pode ser desprezada, devido a assumir um peso muito baixo no nível sonoro, quando comparado com o ruído transmitido por difração (Government of Hong Kong, 2003). Sendo de igual modo aconselhável, em Hendriks *et al.*, 2013, que o material de uma barreira tenha uma massa por unidade de área de 19,5 kg/m².

É também importante o cuidado constante na manutenção das barreiras, dado que a existência de folgas entre esta e o pavimento, ou a existência de fissuras na mesma, são fatores que condicionam a eficiência da mesma (Daigle, 1999).

2.4. Tipos de Barreiras Acústicas

Vários investigadores têm vindo a dar o seu contributo para a melhoria da qualidade de vida em ambientes ruidosos, procurando soluções que se adaptem a cada caso específico. Bragança *et al.*, 2006 referem que os materiais usados na construção das barreiras e a sua forma têm uma grande influência na sua eficiência. No que respeita ao ruído do tráfego rodoviário (mas não só), por exemplo, têm vindo a ser feitos estudos sobre qual o tipo de barreira acústica que mais se adequa na redução deste tipo de ruído, uma vez que nem sempre se utilizam as soluções mais indicadas.

As barreiras simples aplicadas paralelamente estudadas, por exemplo, por Hendriks *et al.*, 2013, são um desses casos de ineficiência, dado o facto de estarem dispostas frente-a-frente, levam a que ocorram uma série de reflexões entre estas, e promovam um aumento do nível sonoro na faixa de rodagem. Neste sentido, Hendriks *et al.*, 2013, indicaram como possíveis soluções para o aumento do nível sonoro entre barreiras, a substituição de painéis simples por painéis com propriedades absorventes, a utilização de barreiras inclinadas e o posicionamento de barreiras entre os dois eixos rodoviários. Concluíram que para uma distância de 35 m entre barreiras, uma inclinação de 10° seria suficiente para que o ruído refletido seja deflectido suficientemente para cima, de modo a que não ocorram fenómenos sucessivos de reflexões, promovendo a dispersão sonora de tal modo que o nível sonoro na faixa de rodagem não seja demasiado elevado (Watts, 2002). É, também, necessário ter em conta, nestes casos, a possível interferência de efeitos meteorológicos que, dadas determinadas condições, poderão levar a que ocorram reflexões ao nível do pavimento. É importante o impacto que uma barreira inclinada poderá ter num edifício alto, onde devido a fenómenos de reflexão pela barreira o nível sonoro poderá aumentar (Watts, 2002). A aplicação deste tipo de barreiras enquanto alternativas às barreiras paralelas pode constituir uma desvantagem, em termos

económicos, uma vez que existem custos associados ao desmonte das barreiras paralelas e à montagem de barreiras inclinadas. O mesmo não acontece com as barreiras tratadas com materiais absorventes, que podem surgir de uma barreira simples, sem tratamento, onde é aplicado o material absorvente, sem que sejam necessárias grandes intervenções (Crombie *et al.* 1995).

Uma barreira absorvente é uma barreira que incorpora materiais capazes de absorver a parte do som incidente com frequência compatível com o material (Watts, 2002). Qualquer barreira tratada é mais eficaz que a sua homóloga sem tratamento (Morgan *et al.*, 1998) e é capaz de promover uma atenuação sonora adicional de 8 dB (Bies e Hansen, 2003).

Watts, 2002 expõe três tipos de sistemas usados em barreiras absorventes. Os sistemas de caixa oca com material fibroso (por exemplo fibra de vidro ou madeira); sistemas que usam painéis construídos com materiais porosos; e sistemas com cavidades ressoadoras. Ou seja, as barreiras absorventes estão dependentes do modo como os materiais que as constituem se comportam perante sons com uma determinada frequência. Egan *et al.*, 2006 referem que materiais como a madeira dura tratada termicamente ou outros materiais podem ser usados na substituição de betão, plástico ou alumínio. Na Figura 2.18 pode-se ver para cada solução construtiva a relação entre a frequência e o coeficiente de absorção sonora.

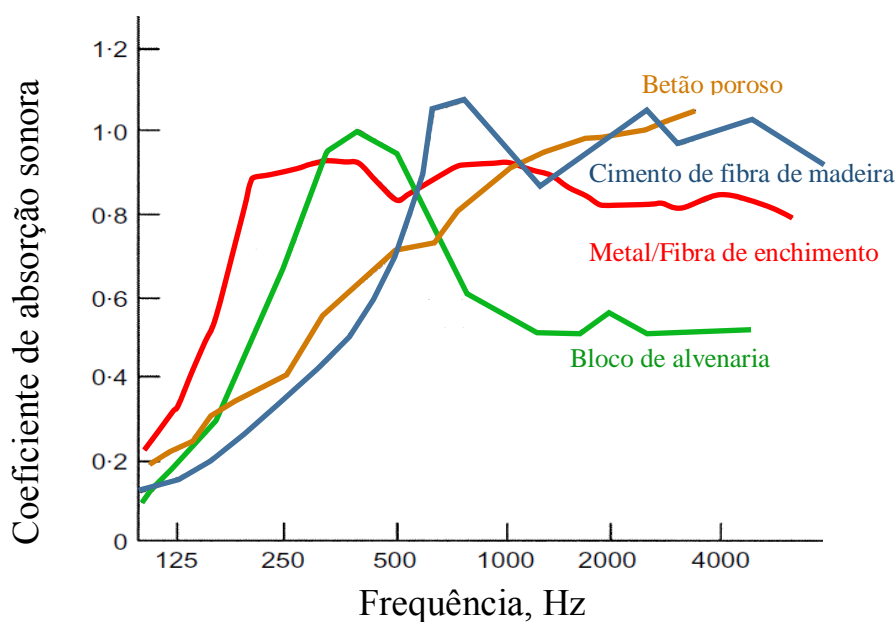


Figura 2.18 – Relação da frequência e absorção sonora para diferentes soluções construtivas (Adaptado de Watts, 2002).

Verifica-se que as absorções sonoras das soluções construtivas, aqui apresentadas, têm comportamentos diferentes consoante a frequência com que o ruído é emitido. Repara-se que o cimento de fibra de madeira é a solução que, numa maior gama de frequências, é eficiente.

Do mesmo modo que tanto o cimento de fibra de madeira como o metal/fibra de enchimento, devido ao seu elevado rendimento para frequências na gama dos 250 a 2000 Hz (Hendriks *et al.*, 2013), são materiais que podem ser utilizados na construção de uma barreira acústica que tenha como função a atenuação de ruído rodoviário. A aplicação de barreiras com material absorvente, segundo Watson, 2006, promove o menor tamanho das barreiras, uma redução substancial do ruído refletido e a redução do ruído transmitido através da barreira. No entanto, têm um custo mais elevado devido ao material absorvente ser mais caro que outras soluções e à manutenção que este material requer.

Nem sempre as condições que influenciam a intensidade do som se mantêm constantes, podendo acontecer mudanças do volume de tráfego ou a construção de zonas habitacionais nas imediações de estradas, e assim, tornar-se necessário, mesmo em locais onde já existem barreiras acústicas, aumentar a redução do nível sonoro promovida por essas barreiras. É possível aumentar o desempenho de uma barreira acústica, entre outros modos, pela aplicação de painéis com propriedades absorventes (como já referido anteriormente) ou pelo melhoramento da barreira através de uma configuração de topo mais eficiente (Crombie *et al.*, 1995). As barreiras com configurações de topo são adequadas para situações em que é necessário melhorar o desempenho de uma barreira sem alterar a sua altura, devido ao impacto visual que esta alteração pode provocar (Watts, 1996b), assim como para situações em que existe a necessidade de reduzir a quantidade de som difratado para o lado do recetor (Watts, 2002, Watts *et al.*, 2003).

Watson, 2006, concluiu no seu estudo que as barreiras com maior potencial de redução do nível sonoro são as barreiras em forma de “T” revestidas com material absorvente na parte superior, à semelhança da Figura 2.19.

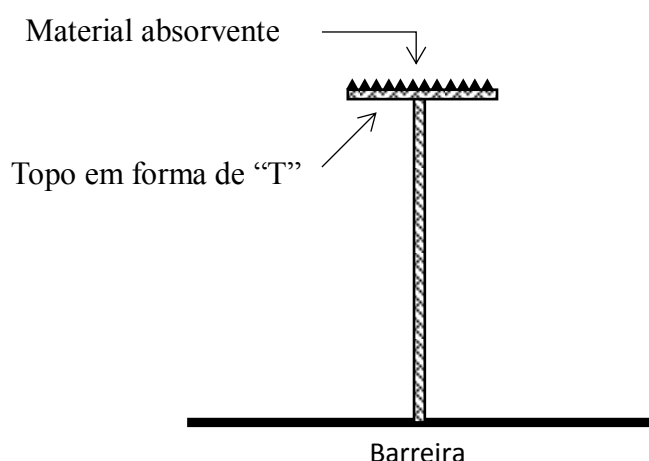


Figura 2.19 – Barreira em forma de “T” com revestimento de material absorvente na parte superior (Adaptado de Watson, 2006).

Este tipo de barreiras devido à sua configuração e ao tratamento com material absorvente reduz o ruído, absorvendo uma parte e evitando que outra sofra fenômenos de reflexão ou de difração (Watson, 2006). O mesmo autor conclui ainda que este tipo de barreiras, devido a serem tendencialmente mais pequenas que as barreiras simples verticais têm a capacidade de promover um aumento da visibilidade e de reduzir sombras em propriedades adjacentes, minimizando impactes negativos. Não obstante têm um maior custo tanto na construção como na manutenção, que deve obedecer a uma certa periodicidade, uma vez que existe a possibilidade da deposição de sedimentos no topo, e assim reduzir a eficiência da barreira. Sofrem também um maior efeito do vento quando comparada com uma barreira simples vertical (Watson, 2006).

Estudos revelam que uma barreira com uma configuração de topo em forma de “T” promove uma perda por inserção igual a uma barreira simples quando a diferença entre as suas alturas é igual à largura do topo. Sendo que quando têm a mesma altura, a barreira em forma de “T” produz uma perda por inserção adicional de 2,5 dB (A) em relação à convencional (Knauer *et al.*, 2000). Outros tipos de configurações de topo foram estudados, como configurações em forma de “Y” ou cilíndricas, sendo que todas se revelaram melhores que a barreira simples, mas não tão eficientes como a barreira em forma de “T” (Knauer *et al.*, 2000).

Outro tipo de barreiras que podem ser consideradas, ainda que não tão eficientes como as últimas apresentadas, são as barreiras naturais. Sendo pensadas numa fase de projeto, de modo a tirar partido da topografia do terreno ao adaptar o traçado da fonte sonora (como é exemplo uma estrada) a essa topografia, permite reduzir os custos (Government of Hong Kong, 2003). São um tipo de barreiras adequadas para situações em que podem existir reflexões múltiplas (Simpson, 1976) e poderão ser, em alguns casos, visualmente atrativas e úteis para outros fins como a agricultura. Promovem, ainda, a perda de visibilidade sobre a paisagem e a existência de sombras sobre propriedades adjacentes (Watson, 2006). Podem ser combinadas com soluções de barreiras convencionais de modo a conferir uma atenuação extra (Simpson, 1976).

Por vezes surge a necessidade de criar numa faixa de rodagem, zonas de segurança afastadas da estrada ou zonas que permitam aos peões o atravessamento da mesma, surgindo deste modo, as barreiras sobrepostas. Caracterizam-se pela existência de duas barreiras desencontradas e sobrepostas uma à outra, possibilitando a passagem entre estas e promovendo a minimização do impacto acústico causado pelo facto de a barreira acústica não ser continua. Knauer *et al.*, 2000 propõe uma razão entre a distância de sobreposição e a distância entre barreiras, como exemplifica a Figura 2.20.

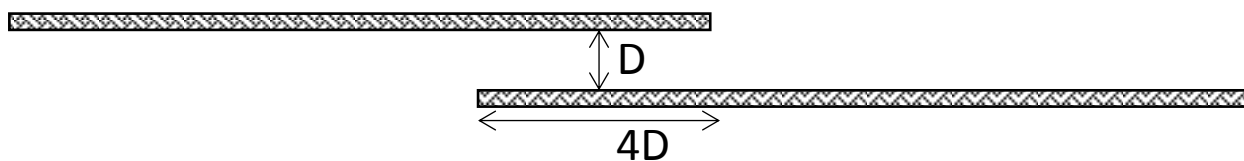


Figura 2.20 – Barreiras sobrepostas (Adaptado de Knauer *et al.*, 2000)

É recomendado que esta relação entre a distância de sobreposição e a distância entre barreiras seja 4:1. Se esta relação não promover uma atenuação satisfatória, as partes sobrepostas devem ser revestidas com material absorvente (Knauer *et al.*, 2000).

2.5. Modelos de Cálculo

A previsão da atenuação conferida por barreiras acústicas deve ter em conta os fenómenos físicos que interferem na propagação do som como a distância à fonte, a absorção atmosférica, o vento e a temperatura, a topografia entre outros fatores já estudados na presente dissertação, de modo a obter uma melhor aproximação à realidade. Existem dois tipos de modelos de previsão da atenuação sonora para barreiras acústicas, os modelos analíticos, compostos pelos modelos teóricos e empíricos que não requerem a discretização do meio e os modelos numéricos que requerem a discretização do meio em estudo. Dos primeiros estudos realizados, os mais influentes foram os modelos empíricos desenvolvidos por Maekawa e de Kurze e Anderson, que criaram técnicas de previsão da perda por inserção para barreiras acústicas em função do número de Fresnel. Fresnel calculou a atenuação sonora com base no comprimento de onda e na diferença entre as distâncias percorridas pelas ondas diretas e difratadas. Maekawa usou uma fonte de dispersão esférica de curta duração para medir o som difratado, numa barreira fina rígida, para a zona sombra considerando várias frequências e localizações do emissor e recetor (Suh *et al.*, 2001) e Kurze e Anderson traduziram sob equação o gráfico de Maekawa, conferindo-lhe uma maior fiabilidade no cálculo. Estes métodos são construídos com base numa série de dados experimentalmente obtidos, daí que exprimem bem a realidade desde que as situações estudadas estejam contempladas dentro dos limites do modelo (Daigle, 1999).

Os modelos teóricos são suportados pela capacidade matemática de descrever situações reais e em geral são baseados na teoria da difração e na geometria das ondas, podendo prever a amplitude do campo sonoro ou calcular a fase do campo sonoro de modo a estudar os fatores que interferem na propagação do som. Como são exemplos os modelos Keller, 1962, Embleton, 1980 ou Hadden e Pierce, 1981.

É importante conhecer as limitações dos modelos para se optar pelo uso daquele que *à priori* mais se aproxima da situação estudada assim como manter um espírito crítico relativamente aos resultados recorrendo ao uso de outros modelos para comparação de resultados. Os modelos têm falhas porque não contemplam todos os fatores que condicionam a propagação do som, como por exemplo a curvatura do som devido à refração ou aos efeitos do vento e temperatura, o que leva a que por vezes ocorram desvios entre os valores obtidos na fase de projeto da barreira e os medidos após a sua construção (Daigle, 1999). Não obstante, para produzir previsões com configurações mais complicadas em termos de configurações de topo ou contemplação na barreira de materiais absorventes, por exemplo, já é necessário recorrer a modelos numéricos, como os modelos do *boundary element method* (BEM), o *traction boundary element method* (TBEM), o *finite element method* (FEM) ou o *finite difference method* (FDM) que são modelos que conseguem discretizar com mais precisão as geometrias estudadas (António *et al.*, 2013). Estes modelos são baseados na discretização do espaço em elementos, conseguindo calcular o campo sonoro de qualquer cenário acústico com uma precisão tal que depende apenas do número de restrições impostas computacionalmente. O FEM e o FDM são chamados de métodos de domínio base porque todo o espaço a ser estudado necessita de ser discretizado, enquanto o BEM apenas discretiza os limites do domínio, e por conseguinte, reduz o número de cálculos. Por isso o FEM é usualmente aplicado em domínios estruturais e o BEM em domínios infinitos (Kaiser, 2011). Egan *et al.*, 2006 referem que Gerges e Calza, 2002 compararam os modelos analíticos de Maekawa, Kurze e Anderson e Pierce com os modelos numéricos, concluindo que os modelos numéricos tinham vantagens em termos de flexibilidade de aplicação.

O *boundary element method*, BEM, é uma ferramenta que se tornou num importante e útil método numérico aplicado a problemas acústicos, particularmente útil para resolver problemas acústicos de modelação do som gerado por uma fonte ou no estudo da dispersão sonora (Brooks e Morgans, 2005). O BEM tem por base a reformulação da equação de Helmholtz numa equação integral de fronteira matematicamente equivalente, de onde resultam dois integrais, um que é definido no limite do domínio e outro que relaciona a solução limite com os pontos do campo sonoro. Ou seja, a reformulação representa o campo acústico como sendo a sobreposição de campos sonoros de várias fontes elementares localizadas na fronteira de domínio (Kaiser, 2011). Existem dois tipos de formulações BEM que podem ser distinguidas: as diretas e as indiretas. As formulações diretas assentam sobre o uso da equação integral de Helmholtz e as indiretas são baseadas numa formulação integral assumindo que o campo sonoro refletido pode ser representado por uma combinação linear de uma distribuição de monopólios e uma distribuição de dipolos (Koussa *et al.*, 2012).

O BEM pode ser aplicado a um vasto conjunto de problemas desde problemas de radiação e dispersão sonora até problemas de bioacústica, aero-acústica ou ser usado na análise de um produto, como por exemplo um megafone, em que através da análise dos resultados poderá

ocorrer um redesenhar desse mesmo produto (Kaiser, 2011). Este método pode ser considerado um método flexível, na medida em que, pela definição adequada do tamanho dos elementos a discretizar é possível representar diversas formas de superfícies (Daigle, 1999), podendo assim, serem estudados diversos tipos de barreiras acústicas. O que constitui uma vantagem, dado que têm uma grande capacidade de adaptação a qualquer tipo de configuração. O BEM também é mais preciso que outros métodos analíticos, uma vez que estes apresentam soluções aproximadas (Suh *et al.* 2001). Pode-se apontar como possível desvantagem da utilização deste método o facto de poder ter um elevado tempo de computação, porque dependendo da frequência que se pretender analisar, os elementos a discretizar serão maiores ou menores, uma vez que são função do comprimento de onda do som. Assim, se os elementos forem muito pequenos ou o objeto a discretizar muito grande existe a possibilidade de o modelo ficar muito pesado e portanto com um elevado tempo de computação associado. Constata-se este fenómeno, por exemplo, na modelação de barreiras acústicas em 3D, onde os elementos variam tanto ao longo do comprimento como da secção transversal (Daigle, 1999). Outra fragilidade do BEM é o facto de não contemplar efeitos atmosféricos, e por isso, os seus resultados apenas podem ser tidos em conta para situações em que a atmosfera está em repouso (Daigle, 1999).

Para a modelação acústica de barreiras, o BEM é um dos métodos que confere mais vantagens de utilização em domínios infinitos ou semi-finitos, porque satisfaz automaticamente as condições de radiação de campo distante. Fard *et al.*, 2013 usaram o BEM para prever a perda por inserção de uma barreira, discretizando-a em pequenos elementos e medindo a pressão sonora em cada elemento. Suh *et al.* 2001 referem que Sez nec, 1980 estudou o uso de técnicas com discretização dos elementos de fronteira em barreiras com diferentes configurações, que permitem avaliar o campo de pressões acústicas criado devido à difração pela barreira.

Quando a barreira é muito fina, ou seja, a sua espessura tende para zero, a formulação do problema usando a equação integral de fronteira na sua forma clássica não é válida, uma vez que isso produz um sistema que degenera. Para obter um sistema bem condicionado a solução passa por usar uma formulação dual, ou seja, uma formulação combinada da equação integral de fronteira e a equação integral hipersingular de fronteira, uma de cada lado da barreira (António *et al.*, 2013). Como alternativa ao método anterior pode-se usar o TBEM, que permite ao obstáculo ser descrito através de uma única linha de elementos de fronteira, e reduzir o tamanho do sistema em relação à formulação dual BEM (Tadeu *et al.*, 2012).

O TBEM é um método que consiste na aplicação da equação integral hipersingular de fronteira na barreira que vai ser discretizada por elementos da linha de fronteira. António *et al.*, 2013 utilizaram uma formulação 3D TBEM no domínio da frequência para estudar a propagação do som na vizinhança de barreiras finas. Em Tadeu, 2007, foi usado uma formulação 2.5D TBEM para analisar o campo sonoro gerado por uma fonte sonora na

proximidade de barreiras finas instaladas em fachadas de edifícios, considerando as barreiras como infinitas no seu comprimento e como não absorventes, assim como os edifícios modelados com altura infinita.

O *finite element method*, FEM, é um método numérico 2D que resolve equações diferenciais aplicadas sobre um domínio simples com limites definidos. É útil em espaços acústicos bem definidos, uma vez que a equação que está por detrás deste método, a equação da onda, é relativamente simples. Neste método é criada uma malha, onde o domínio é discretizado num determinado número de elementos, sendo mais ou menos preciso consoante o número de elementos se adequar ou não ao comprimento de onda do som incidente. A precisão diminui quando não existem elementos suficientes por comprimento de onda. E à semelhança do BEM, quanto maior for o domínio em estudo e o comprimento de onda do som, maior será o tempo de computação e memória envolvidos no processo (Daltrop, 2011).

Daltrop, 2011 estudou três modelos numéricos diferentes na análise da previsão do desempenho de barreiras acústicas: o FEM, o *method of images* (MOI) e um método “*ray tracing*”. Concluiu que, apesar do desvio que se verificou entre os dados experimentalmente medidos e os resultados obtidos por este modelo, o FEM era o que melhor traduzia o desempenho da barreira. Pelo facto de o FEM ser um modelo 2D, e portanto não ter em conta o som difratado noutras direções que não a perpendicular à barreira, existe um desvio entre os valores medidos experimentalmente e os resultados obtidos através do modelo.

O BEM apresenta como principal vantagem de utilização sobre o FEM, o facto de não necessitar de discretizar todo o domínio, e fazê-lo somente para a fronteira do mesmo, sem comprometer a precisão dos resultados em qualquer ponto interior do domínio, o que leva a que as formulações BEM sejam mais pequenas que as FEM, e por isso que tenham um tempo de computação e espaços de armazenamento de dados menores. A presença de uma solução fundamental também aumenta a precisão do BEM, especialmente quando os problemas em estudo estão relacionados com domínios semi-infinitos (BEM S&S, 2012). Assim, com tempos de computação menores, o BEM, é capaz de incluir na sua modelação problemas de barreiras com configurações de topo mais complexas. Como desvantagem, estes dois modelos têm o facto de não contemplarem a influência de efeitos meteorológicos na sua formulação, assim como, também, não ser possível, ao analisar tráfego rodoviário, obter uma amostra geral de todo o tráfego, devido às frequências em que os ruídos são emitidos, e por isso, ter de se fazer uma análise faseada a cada tipo de frequência (Pigasse e Kragh, 2011).

O *finite difference method*, FDM, é um dos métodos numéricos mais antigos para resolver equações diferenciais, onde o domínio do objeto é discretizado em pequenos elementos, criando uma malha (Maria, M., 2010 citando Ziviani, 1996) e resolvendo para cada elemento uma equação diferencial baseada na aproximação das derivadas por diferenças finitas. Este

método baseia-se na representação da série de Taylor de uma função, de onde resulta a formulação para a avaliação numérica das derivadas da equação da onda (Liu e Sen, 2009). É utilizado para situações em que os limites são descritos por equações diferenciais parciais (Maria, M., 2010 citando Chandrupatla *et al.*, 1991). A precisão deste método depende do número de termos usados na série de Taylor, enquanto que a precisão do cálculo da derivada depende do espaçamento assumido para a malha. Ou seja, uma malha pequena ajuda a incrementar a precisão (Liu e Sen, 2009), mas daí resulta também, o aumento do esforço computacional do cálculo devido ao aumento do número de elementos usados (Maria, M., 2010 citando Ziviani, 1996).

Os FEMs e os FDMs são as abordagens mais diretas para realizar a modulação da propagação das ondas em meios complexos, fornecendo uma descrição completa dos campos sonoros e das difrações envolvidas. Sendo assim, as principais limitações do FDM são a quantidade de memória necessária e o elevado tempo de computação que pode estar associado à sua resolução computacional (Villarreal e Scales, 1997).

Quitesst, 2012 faz referência a outros métodos como o *finite difference time-domain*, FDTD, que é um método que tem em conta a refração atmosférica e onde podem ser incluídos os efeitos meteorológicos na otimização de barreiras, sendo que este método é um pouco menos flexível que o BEM, em termos de modelação de configurações complexas. O *transfer line matrix*, TLM, que proporciona flexibilidade na descrição da geometria das fronteiras tendo em conta a refração atmosférica. E o *transfer matrix method*, TMM, que é orientado para a transmissão e absorção do som através da barreira. Assim como em Noordhoek e Salomons, 2012, são referidos outros modelos para o estudo da propagação do som, como o *Linearized Eulerian model* (EULER), o *Generalized Terrain Parabolic Equation method* (GTPE), o *Fast Field Program* (FFP), o *Straight-ray model for a non-refracting atmosphere, using a linearized sound-profile* (CRAYL) ou o *Statistical scattering models* (STAT).

3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

3.1. Introdução

Na presente formulação apenas a superfície das barreiras são discretizadas com elementos de fronteira 3D. O pavimento é modelado através do uso apropriado de soluções fundamentais que tem em conta a influência de fenómenos de reflexão através do método usando a técnica das fontes imagem. Por uma questão de simplificação, o modelo numérico é primeiramente descrito para um meio infinito e, posteriormente, descrito o processo de simulação do pavimento. Será feita a modelação de barreiras com diferentes propriedades absorventes através de uma formulação dual.

3.2. Fonte Sonora

Um objeto 3D, limitado por uma superfície, S , encontra-se inserido num meio de massa volúmica ρ , que permite que as ondas de pressão se propaguem a uma velocidade c .

A fonte sonora é colocada em $\mathbf{x}_S = (x_S, y_S, z_S)$, perturbando o sistema (ver equação 14):

$$\hat{f}(\mathbf{x}, t) = \delta(x - x_S)\delta(y - y_S)\delta(z - z_S)e^{i\omega t}, \quad (14)$$

onde $\delta(x - x_S)$, $\delta(y - y_S)$ e $\delta(z - z_S)$ são as funções delta-dirac, e ω a frequência de oscilação da fonte.

3.3. Campo de Pressões Incidentes

A pressão gerada, em qualquer ponto $\mathbf{x} = (x, y, z)$ num meio infinito, por uma fonte pontual colocada em \mathbf{x}_S , devido à incidência de ondas de pressão incidentes, pode ser escrita de acordo com (ver equação 15):

$$p_{inc}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_S, \omega) = \frac{e^{ik_c(ct-r_0)}}{r_0} \quad (15)$$

onde $k_c = \frac{\omega}{c}$, $i = \sqrt{-1}$ e $r_0 = \sqrt{(x - x_S)^2 + (y - y_S)^2 + (z - z_S)^2}$.

3.4. Formulação Integral de Fronteira

Na presente secção será descrito o modo como o BEM e a sua derivação normal (TBEM) são formulados para obter o campo de pressão sonora, ou seja, a pressão gerada no meio recetor por ondas sonoras tridimensionais incidindo no obstáculo (objeto).

3.4.1. Formulação do Método dos Elementos de Fronteira (BEM)

A pressão (p) num ponto qualquer do domínio acústico espacial 3D pode ser calculada resolvendo a equação de Helmholtz (ver equação 16).

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right) \cdot p(\mathbf{x}, \omega) + k_c^2 \cdot p(\mathbf{x}, \omega) = 0. \quad (16)$$

A equação clássica da equação integral de fronteira pode ser derivada a partir da equação de Helmholtz, no domínio da frequência aplicando o teorema da reciprocidade, originando a equação (17).

$$b \cdot p(\mathbf{x}_0, \omega) = \int_S q(\mathbf{x}, \mathbf{n}_{n1}, \omega) \cdot G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_S, \omega) ds - \int_S H(\mathbf{x}, \mathbf{n}_{n1}, \mathbf{x}_0, \omega) \cdot p(\mathbf{x}, \omega) ds + p_{inc}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_S, \omega) \quad (17)$$

onde G e H representam as funções de Green (ou soluções fundamentais) para a pressão (p) e gradiente de pressão (q) em qualquer ponto $\mathbf{x} = (x, y, z)$ na fronteira S , devido a uma fonte de pressão pontual e virtual no ponto de colocação $\mathbf{x}_0 = (x_0, y_0, z_0)$. \mathbf{n}_{n1} representa a normal unitária ao longo da fronteira S , no ponto $\mathbf{x} = (x, y, z)$. O factor b assume o valor 0,5 se $\mathbf{x}_0 = (x_0, y_0, z_0) \in S$ ou o valor 1 se não pertencer.

As funções de Green para a pressão e gradiente de pressão num meio infinito, em coordenadas cartesianas, são expressas pelas equações (18) e (19).

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0, \omega) = \frac{e^{-ik_c r}}{4\pi r}, \quad (18)$$

$$H(\mathbf{x}, \mathbf{n}_{n1}, \mathbf{x}_0, \omega) = \frac{e^{-ik_c r} (-ik_c r - 1)}{4\pi r^2} \frac{\partial r}{\partial \mathbf{n}_{n1}} \quad (19)$$

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

A solução global é obtida pela resolução da equação (17), o que requer a discretização da superfície de fronteira, S , num número, N , de elementos de fronteira planos com um ponto nodal no centro de cada elemento.

As integrações necessárias para a equação (17) conduzem a um integral singular quando o elemento a ser integrado é o elemento carregado. Aplica-se uma integração numérica que usa a quadratura de Gauss quando o elemento a integrar não é o elemento carregado.

3.4.2. Equação Integral Normal Derivativa (TBEM)

A equação integral derivada pode ser obtida aplicando o operador gradiente à equação integral de fronteira clássica (17), o que é equivalente à existência de uma fonte de pressões sonoras dipolar. Quando as fronteiras da barreira são carregadas com cargas dipolares a equação integral é expressa pela equação (20).

$$\begin{aligned} a. p(\mathbf{x}_0, \omega) + b. q(\mathbf{x}_0, \mathbf{n}_{n1}, \omega) = \\ \int_S q(\mathbf{x}, \mathbf{n}_{n1}, \omega). \bar{G}(\mathbf{x}, \mathbf{n}_{n2}, \mathbf{x}_0, \omega) ds - \\ - \int_S \bar{H}(\mathbf{x}, \mathbf{n}_{n1}, \mathbf{n}_{n2}, \mathbf{x}_0, \omega). p(\mathbf{x}, \omega) ds + \bar{p}_{inc}(\mathbf{x}, \mathbf{n}_{n2}, \mathbf{x}_S, \omega) \end{aligned} \quad (20)$$

As funções de Green \bar{G} e \bar{H} são obtidas por manipulação matemática das funções de Green G e H , o que pode ser visto como a aplicação de derivadas a essas funções de Green iniciais, de modo a obter os gradientes de pressão. Na equação (20) o termo \mathbf{n}_{n2} representa a normal unitária no ponto de carga virtual ao longo da fronteira S , no ponto $\mathbf{x}_0 = (x_0, y_0, z_0)$. O factor a é nulo para elementos de fronteira planos.

As funções de Green para um domínio espacial infinito, 3D são definidas pelas equações (21) e (22).

$$\bar{G}(\mathbf{x}, \mathbf{n}_{n2}, \mathbf{x}_0, \omega) = \frac{e^{-ik_c r} (-ik_c r - 1)}{4\pi r^2} \frac{\partial r}{\partial \mathbf{n}_{n2}} \quad (21)$$

$$\bar{H}(\mathbf{x}, \mathbf{n}_{n1}, \mathbf{n}_{n2}, \mathbf{x}_0, \omega) = \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \mathbf{n}_{n2}} + \frac{\partial H}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \mathbf{n}_{n2}} + \frac{\partial H}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \mathbf{n}_{n2}} \quad (22)$$

$$\text{com } \frac{\partial H}{\partial x}(\mathbf{x}, \mathbf{n}_{n1}, \mathbf{n}_{n2}, \mathbf{x}_0, \omega) = \frac{1}{4\pi} \left\{ A \left[\left(\frac{\partial r}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial x}{\partial \mathbf{n}_{n1}} + \frac{\partial r}{\partial x} \frac{\partial r}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \mathbf{n}_{n1}} + \frac{\partial r}{\partial y} \frac{\partial r}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \mathbf{n}_{n1}} \right] + B \left[\frac{\partial x}{\partial \mathbf{n}_{n1}} \right] \right\},$$

$$\frac{\partial H}{\partial y}(\mathbf{x}, \mathbf{n}_{n1}, \mathbf{n}_{n2}, \mathbf{x}_0, \omega) = \frac{1}{4\pi} \left\{ A \left[\frac{\partial r}{\partial x} \frac{\partial r}{\partial y} \frac{\partial x}{\partial \mathbf{n}_{n1}} + \left(\frac{\partial r}{\partial y} \right)^2 \frac{\partial y}{\partial \mathbf{n}_{n1}} + \frac{\partial r}{\partial y} \frac{\partial r}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \mathbf{n}_{n1}} \right] + B \left[\frac{\partial y}{\partial \mathbf{n}_{n1}} \right] \right\},$$

$$\frac{\partial H}{\partial z}(\mathbf{x}, \mathbf{n}_{n1}, \mathbf{n}_{n2}, \mathbf{x}_0, \omega) = \frac{1}{4\pi} \left\{ A \left[\frac{\partial r}{\partial x} \frac{\partial r}{\partial z} \frac{\partial x}{\partial \mathbf{n}_{n1}} + \frac{\partial r}{\partial y} \frac{\partial r}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \mathbf{n}_{n1}} + \left(\frac{\partial r}{\partial z} \right)^2 \frac{\partial z}{\partial \mathbf{n}_{n1}} \right] + B \left[\frac{\partial z}{\partial \mathbf{n}_{n1}} \right] \right\},$$

$$A = -\frac{k_c^2 e^{-ik_c r}}{r} + \frac{3ik_c e^{-ik_c r}}{r^2} + \frac{3e^{-ik_c r}}{r^3} \quad e \quad B = -\frac{ik_c e^{-ik_c r}}{r^2} - \frac{e^{-ik_c r}}{r^3}.$$

Na equação (20) a pressão incidente é obtida com base na equação (23).

$$\bar{p}_{inc}(\mathbf{x}, \mathbf{n}_{n2}, \mathbf{x}_S, \omega) = \frac{e^{-ik_c r}(-ik_c r - 1)}{r_0^2} \left(\frac{\partial r_0}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \mathbf{n}_{n2}} + \frac{\partial r_0}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \mathbf{n}_{n2}} + \frac{\partial r_0}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \mathbf{n}_{n2}} \right) \quad (23)$$

A solução global é obtida através da resolução da equação (20), que requer a discretização da interface S, na fonteira do obstáculo. Neste trabalho a interface é discretizada com um número N de elementos de fronteira planos, com o ponto nodal no centro de cada elemento.

As integrações necessárias nestas equações são avaliadas através da quadratura de Gauss, desde que o elemento carregado e o integrado não sejam o mesmo. Nesses casos, a existência de integrais singulares e hipersingulares das funções de Green são calculados analiticamente, de acordo com a secção 3.4.3.

3.4.3. Formulação Dual BEM e TBEM

A formulação BEM não pode ser usada para calcular o campo de pressões sonoras quando o objeto em estudo é demasiado fino, uma vez que cria um sistema que degenera, i.e. não tem solução, recorrendo-se nestas situações a uma formulação dual BEM e TBEM. As duas formulações são combinadas em pontos opostos das superfícies das fronteiras próximas do objeto em estudo. Parte da superfície de fronteira desse obstáculo fino é carregada com cargas monopulares (formulação BEM, equação (22)), enquanto que a restante superfície é carregada com cargas dipolares (formulação TBEM, equação (24)).

3.5. Simulação da Absorção Sonora

A absorção sonora é simulada assumindo condições de fronteira que relacionam a pressão e a velocidade em cada ponto de colocação. Esta condição pode ser encarada como uma condição de fronteira de Robin (condições fronteira de impedância), ou seja (ver equação 24),

$$q(\mathbf{x}, \mathbf{n}_{n1}, \omega) = -i\omega\rho \frac{1}{z(\omega)} p(\mathbf{x}, \omega). \quad (24)$$

Assim, as equações seguintes (ver equações (25) e (26)) são definidas para cada ponto de colocação na superfície do obstáculo,

$$b. p(\mathbf{x}_0, \omega) = \int_S q(\mathbf{x}, \mathbf{n}_{n1}, \omega) \left[G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0, \omega) + \frac{Z(\omega)}{i\omega\rho} H(\mathbf{x}, \mathbf{n}_{n1}, \mathbf{x}_0, \omega) \right] ds + \quad (25)$$

$$+ p_{inc}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_S, \omega)$$

e

$$a. p(\mathbf{x}_0, \omega) + b. q(\mathbf{x}_0, \mathbf{n}_{n1}, \omega) =$$

$$= \int_S q(\mathbf{x}, \mathbf{n}_{n1}, \omega) \left[\bar{G}(\mathbf{x}, \mathbf{n}_{n2}, \mathbf{x}_0, \omega) + \frac{Z(\omega)}{i\omega\rho} \bar{H}(\mathbf{x}, \mathbf{n}_{n1}, \mathbf{n}_{n2}, \mathbf{x}_0, \omega) \right] ds + \quad (26)$$

$$+ \bar{p}_{inc}(\mathbf{x}, \mathbf{n}_{n2}, \mathbf{x}_S, \omega)$$

quando se usam as formulações Bem e TBEM, respetivamente.

A impedância, $Z(\omega)$, é expressa pela razão da pressão com velocidade e o coeficiente de absorção α , como apresentado na equação (27).

$$Z(\omega) = \frac{p_{inc}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_S, \omega)}{v_{inc}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_S, \mathbf{n}_{n1}, \omega)} \left(\frac{1+\sqrt{1-\alpha}}{1-\sqrt{1-\alpha}} \right), \quad (27)$$

quando $p_{inc}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_S, \omega) = \frac{e^{ik_c r_{00}}}{r_{00}}$ e $v_{inc}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_S, \mathbf{n}_{n1}, \omega) = \frac{e^{-ik_c r_{00}}(-ik_c r_{00}-1)}{r_{00}^2} \frac{\partial r_{00}}{\partial \mathbf{n}_{n1}}$ com $r_{00} = \sqrt{(x_0 - x_S)^2 + (y_0 - y_S)^2 + (z_0 - z_S)^2}$, representam, respetivamente, a pressão incidente e a velocidade.

Assim, a imposição da impedância acústica, na direção normal, como condição de fronteira simula materiais localmente reativos. A inclusão de materiais localmente reativos, nos modelos numéricos são a aproximação mais usual nos cálculos BEM. Estes modelos só falham para materiais absorventes espessos onde as propriedades absorventes do volume que são importantes para a modelação do som absorvido. Esse problema pode ser ultrapassado pela modelação desses materiais como materiais poroelásticos, para os quais a teoria de Biot normalmente oferece boas estimativas.

No presente modelo vai-se considerar que não existe qualquer interação das ondas sonoras com o interior do objeto. O objeto funciona como um corpo rígido que terá apenas a superfície absorvente quando for atribuído um coeficiente de absorção diferente de zero à mesma.

3.6. Sistema de Equações

A solução global é encontrada pela resolução das equações (25) e (26), requerendo a discretização da interface S, da fronteira do objeto. Nesta análise a interface é discretizada

com um número, N , de elementos de fronteira planos, com o ponto nodal no centro de cada elemento.

As integrações requeridas para essas equações são resolvidas através do uso da quadratura de Gauss quando o elemento carregado não é o elemento que está a ser integrado. Para os elementos carregados, existem integrais singulares e hipersingulares das funções de Green que são calculados analiticamente.

3.7. Integração Analítica de Integrais Singulares e Hipersingulares

Quando o elemento integrado nas equações (25) e (26) não é o carregado, os integrais são não-singulares e a integração resolve-se mais facilmente usando a quadratura de Gauss. Para os elementos carregados, os integrais são singulares. Contudo, é possível resolvê-los analiticamente, como apresentado de seguida.

Considere-se um elemento retangular de largura W (na direção x) e comprimento L (na direção z), como exemplificado na Figura 3.1.

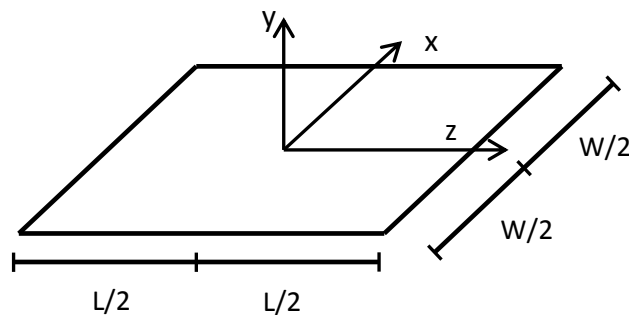


Figura 3.1 – Geometria dos elementos de fronteira.

3.7.1. Integrais Singulares Aplicados à Equação (25)

Desde que r seja perpendicular à normal (i.e. $\mathbf{r}\mathbf{n}_{n1} = 0$), o termo singular $\int_{-L/2}^{L/2} \int_{-W/2}^{W/2} H(\mathbf{x}, \mathbf{n}_{n1}, \mathbf{x}_0, \omega) dx dz$ desaparece e da integração das funções de Green, $\int_{-L/2}^{L/2} \int_{-W/2}^{W/2} G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0, \omega) dx dz$, resulta num termo singular.

Esta integração é realizada considerando $G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0, \omega)$ como a soma de funções de Green 2D para diferentes números de onda espaciais. Obtém-se aplicando uma transformada de Fourier

na direção z às funções de Green 3D $G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0, \omega)$. A aplicação de uma transformada de Fourier espacial à equação (18), na mesma direção, conduz a um campo de pressões linear, em que a amplitude varia sinusoidalmente na terceira dimensão (z). O que pode ser conseguido pelo uso de equações encontradas em Campbell e Foster, 1932 (ver equação 28).

$$\hat{G}(x, y, x_0, y_0, k_z, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-ik_c r}}{4\pi r} e^{ik_z z} dz = \frac{-i}{8\pi} H_0(k\bar{r}_0) \quad (28)$$

em que $H_n(\dots)$ são segundas funções de Hankel de ordem n , $k = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - k_z^2}$, com $Im(k) < 0$, $\bar{r} = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$, onde k_z representa o número de onda na direção z .

Aplicando uma transformada inversa de Fourier na equação (28) ao longo da direção z permite que a solução original 3D seja obtida (ver equação 29). Assim,

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{G}(x, y, x_0, y_0, k_z, \omega) e^{-ik_z z} dk_z, \quad (29)$$

Este integral pode-se tornar discreto se se assumir a presença de um conjunto de fontes espaciais virtuais na direção z . A função de Green inicial da equação (18) pode, então ser reescrita na forma da equação (30).

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{G}(x, y, x_0, y_0, k_z, \omega) e^{ik_z z} \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} e^{ik_z m L_{vs}} dk_z, \quad (30)$$

onde L_{vs} representa o intervalo espacial entre fontes. A equação (30) pode ser discretizada através do uso dos resultados da teoria da distribuição (ver equação 31).

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0, \omega) = \frac{2\pi}{L_{vs}} \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} \hat{G}(x, y, x_0, y_0, k_z, \omega) e^{-ik_{zm} z}, \quad (31)$$

onde $k_{zm} = \frac{2\pi}{L_{vs}} m$ traduz os números de onda discretos.

A equação (31) converge podendo ser aproximada por uma soma finita de termos (M), como exemplifica a equação (32).

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0, \omega) = \frac{2\pi}{L_{vs}} \sum_{m=-M}^M \hat{G}(x, y, x_0, y_0, k_z, \omega) e^{-ik_{zm} z}. \quad (32)$$

A distância L_{vs} necessita de ser grande o suficiente para impedir uma contaminação espacial (Bouchon e Aki, 1977). O uso de frequências complexas promove ainda mais a redução da influência de fontes fictícias vizinhas, enquanto que o uso de frequências não complexas

requer um elevado número de termos na equação (32). A função de Green 3D pode, então, ser calculada como sendo a pressão irradiada pela soma de cargas harmónicas lineares para as quais a amplitude varia sinusoidalmente na dimensão z .

Este procedimento permite a integração de $\int_{-L/2}^{L/2} \int_{-W/2}^{W/2} G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0, \omega) dx dz$, obtendo-se a equação (33).

$$\int_{-L/2}^{L/2} \int_{-W/2}^{W/2} G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0, \omega) dx dz = \frac{-i}{4Lvs} \int_{-L/2}^{L/2} I_1(k\bar{r}_0) e^{-ik_{zm}z} dz, \quad (33)$$

com

$$\int_{-L/2}^{L/2} I_1(k\bar{r}_0) e^{-ik_{zm}z} dz = I_1(k\bar{r}_0)L \quad \text{se} \quad m = 0$$

$$\int_{-L/2}^{L/2} I_1(k\bar{r}_0) e^{-ik_{zm}z} dz = I_1(k\bar{r}_0) \frac{2\text{sen}(k_{zm}\frac{L}{2})}{k_{zm}} \quad \text{se} \quad m \neq 0$$

onde $I_1(k\bar{r}_0) = \int_{-W/2}^{W/2} H_0(k\bar{r}_0) dx$.

$I_1(k\bar{r}_0)$ é calculado analiticamente, de acordo com a equação (34) apresentada por Tadeu *et al*, 1999.

$$\int_{-W/2}^{W/2} H_0(k\bar{r}_0) dr = \frac{W}{2} H_0\left(k\frac{W}{2}\right) + \pi \frac{L}{4} \left[H_1\left(k\frac{W}{2}\right) \cdot S_0\left(k\frac{W}{2}\right) - H_0\left(k\frac{W}{2}\right) \cdot S_1\left(k\frac{W}{2}\right) \right], \quad (34)$$

onde $S_{ns}(\dots)$ traduzem a função de Sturve em ordem a ns .

3.7.2. Integrais Hipersingulares Aplicados à Equação (26)

Uma vez que r é perpendicular à normal (i.e. $\mathbf{r}\mathbf{n}_{n2} = 0$) o termo singular $\int_{-L/2}^{L/2} \int_{-W/2}^{W/2} \bar{G}(\mathbf{x}, \mathbf{n}_{n2}, \mathbf{x}_0, \omega) dx dz$ desaparece. No entanto, a integração da função de Green $\int_{-L/2}^{L/2} \int_{-W/2}^{W/2} \bar{H}(\mathbf{x}, \mathbf{n}_{n2}, \mathbf{x}_0, \omega) dx dz$ (com $\mathbf{n}_{n2} = \mathbf{n}_{n1}$) conduz a um termo hipersingular.

A solução de $\int_{-L/2}^{L/2} \int_{-W/2}^{W/2} \bar{H}(\mathbf{x}, \mathbf{n}_{n1}, \mathbf{n}_{n2}, \mathbf{x}_0, \omega) dx dz$ é calculada, sobre o mesmo elemento de fronteira plano, definido anteriormente, pelo método proposto por Terai, 1980. A solução de

Terai é numérica, mas pode ser calculada analiticamente para o caso particular de um círculo, como mostra a equação (35).

$$\frac{1}{4\pi} \left[\frac{2\pi e^{-ik_c R}}{R} + i2\pi k_c \right], \quad (35)$$

onde R representa o raio do círculo com a fonte de pressão pontual aplicada no centro do círculo. Para calcular a solução para a toda a superfície do elemento retangular, a integração é resolvida como a combinação de duas partes. O integral sobre o interior da superfície definida pelo círculo (R – metade do comprimento do menor lado do retângulo) é resolvido analiticamente, conforme a equação (35). Contrariamente, no exterior da superfície definida pelo círculo, a integração é resolvida através da integração da quadratura de Gauss. Esta integração numérica é resolvida assumindo o valor de zero nos pontos no interior do círculo.

3.8. Verificação do Modelo

O modelo foi verificado para dois coeficientes de absorção extremos, $\alpha = 0$ e $\alpha = 1$.

3.8.1. Coeficiente de Absorção $\alpha = 0$

Para a verificação do modelo utilizou-se uma inclusão cilíndrica para a qual se conhece uma solução analítica 2.5D. A comparação com o modelo 3D BEM/TBEM é conseguida pela limitação do comprimento da inclusão circular cilíndrica, impondo gradientes de pressões nulos (rígida) em dois planos $z = 0,0$ m e $z = L_t$. Os gradientes de pressão nulos nas secções $z = 0,0$ m e $z = L_t$ são impostos pela adição do campo de pressões gerado pela fonte real com o produzido por fontes virtuais (fontes imagem), localizadas na direção z de maneira a que atuem como se fossem espelhos da fonte real. Considera-se que a inclusão cilíndrica tem o sistema de eixos centrado em $x = 0$ m, $y = 0$ m e $z = 0$ m e raio a (ver Figura 3.2).

A solução analítica 2.5D é escrita como a soma de soluções bidimensionais, cada uma com um número de onda diferente (k_z) na direção z. A solução analítica 2.5D corresponde, assim, a um campo tridimensional 3D obtido pelo somatório de soluções bidimensionais para diferentes números de onda k_z (ver equação 36).

$$p(x, x_s, \omega) = \frac{2\pi}{L_{vs}} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \hat{p}'(x, y, x_s, y_s, k_z, \omega) e^{-ik_z m z} \quad (36)$$

com $k_{zm} = \frac{2\pi}{L_{vs}} m$, ($m = 1, \dots, NS$) e L_{vs} são distâncias entre fontes fictícias usadas para implementar a discretização (transformar um integral em somatório) espacial ao longo de z . $\sum_{m=-\infty}^{\infty} \hat{p}'(x, y, x_s, y_s, k_z, \omega)$ representa o somatório das componentes da fonte real com as das fontes imagem. $\sum_{m=-\infty}^{\infty} \hat{p}'(x, y, x_s, y_s, k_z, \omega)$ é traduzido pela equação (37).

$$\hat{p}'(x, y, x_s, y_s, k_z, \omega) = \hat{p}(x, y, x_s, y_s, k_z, \omega) [e^{-ik_{zm}Z_{m0}} + \sum_{m=1}^{NS_z} \sum_{j=1}^4 e^{-ik_{zm}Z_{mj}}] \quad (37)$$

com $Z_{m0} = Z - Z_s$, $Z_{m1} = Z + Z_0 - 2L_t m$, $Z_{m2} = Z + Z_0 + 2L_t(m - 1)$, $Z_{m3} = Z - Z_0 - 2L_t m$ e $Z_{m4} = Z - Z_0 + 2L_t m$ (as distâncias do recetor às várias fontes). O número de fontes virtuais NS_z , usadas no cálculo, é definido de maneira a que se possa calcular corretamente a propagação das ondas no intervalo de tempo determinado pelo incremento de frequência $1/\Delta f$. $\hat{p}(x, y, x_s, y_s, k_z, \omega)$ representa a solução analítica bidimensional para um determinado número de onda (k_z) (ver equação 38).

$$\hat{p}(x, y, x_s, y_s, k_z, \omega) = H_0(kr) + J_0(kr) \frac{-H_1(ka)}{J_1(ka)} \quad (38)$$

onde $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, $H_n(\dots)$ são funções de Hankel de ordem n e $J_n(\dots)$ são funções de Bessel de ordem n .

Para o modelo numérico, metade da superfície cilíndrica foi discretizada usando a formulação BEM e a outra metade discretizada usando a formulação TBEM. Utilizaram-se as equações 25 e 26, tendo-se calculado a impedância (equação 27) para um valor de α muito próximo de zero. Nesta formulação o efeito da impedância é considerado apenas através do campo direto gerado pelo campo incidente. Para o caso de um α muito próximo de zero, como o valor da impedância é muito elevado, as soluções analíticas e numéricas são semelhantes.

Para a verificação, nestas condições, considerou-se um cilindro com um raio de $a = 3$ m e $L_t = 2.0$ m, com uma fonte a emitir para a frequência de 100 Hz posicionada em $x = 0,0$ m, $y = 0,0$ m, e $z = 1,0$ m.

O cilindro está preenchido por um fluido com as propriedades do ar, $c = 340.0$ m/s (velocidade de propagação do som) e massa volúmica $\rho = 1.22$ kg/m³. A pressão sonora foi calculada ao longo de duas linhas contendo 281 recetores cada. Os recetores da primeira linha situam-se no plano XY ($z=0$), ao longo do eixo x , igualmente espaçados (0.01 m) entre $x = 0,1$ m, e $x = 2,9$ m.

A segunda linha de recetores é paralela ao eixo z com $x = 0,5$ m, e $y = 0,0$ m e os recetores estão igualmente espaçados (0,01 m) entre $z = 2,0$ m, e $z = 4,8$ m.

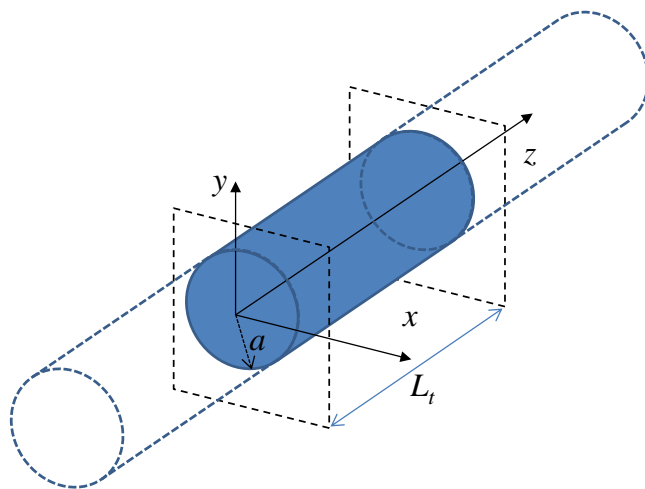
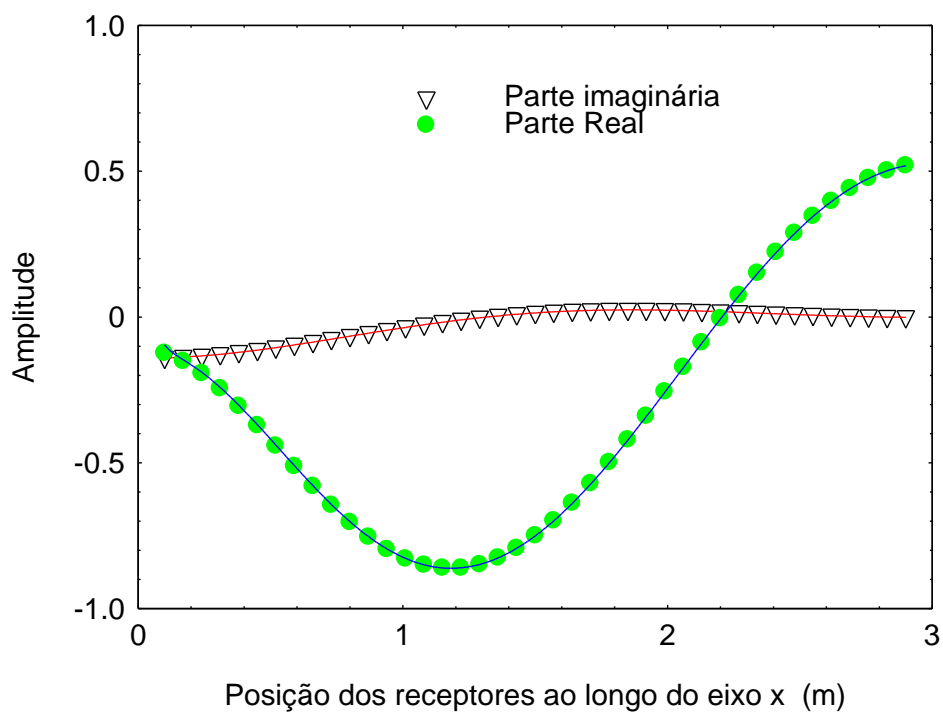
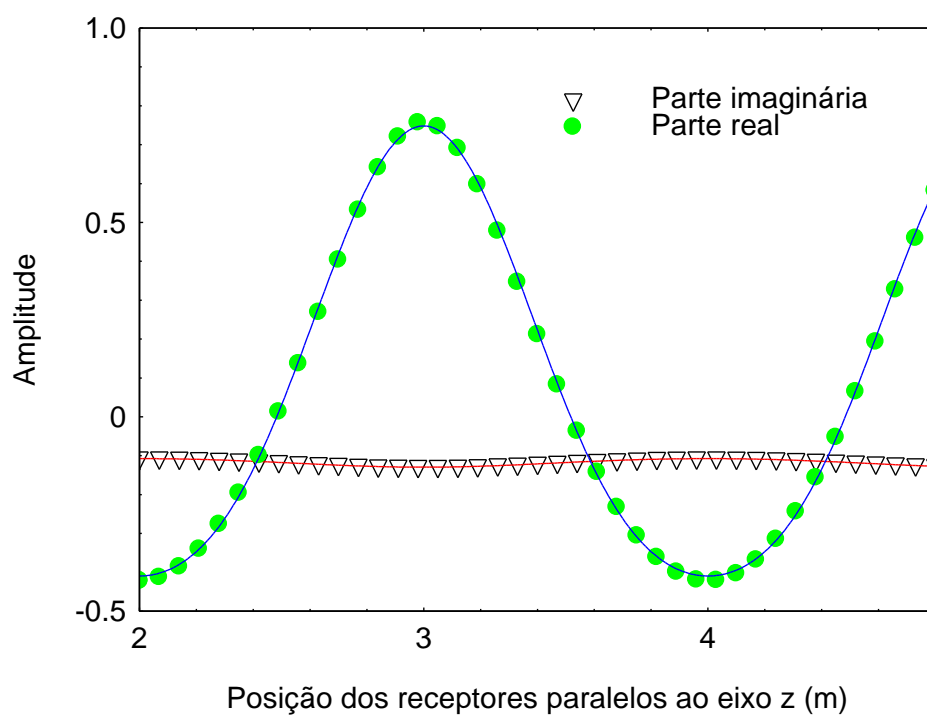


Figura 3.2 – Geometria usada na verificação do modelo ($\alpha = 0$).

Na formulação BEM/TBEM adotou-se a relação $\frac{\lambda}{L} = 10$ entre o comprimento de onda das ondas incidentes e a dimensão do elemento fronteira, o que corresponde a um total de 1482 elementos.

A parte real e imaginária da pressão sonora é apresentada na Figura 3.3 para os recetores posicionados ao longo de x e, na Figura 3.4, para os recetores paralelos ao eixo z .

Figura 3.3 – Pressão sonora nos recetores ao longo do eixo x .Figura 3.4 – Pressão sonora nos recetores paralelos ao eixo z .

Em cada uma das figuras, as linhas sólidas representam a parte real e a imaginária da solução analítica, enquanto as marcas representam a parte real (círculos) e a parte imaginária (triângulos) da pressão calculada pelo modelo numérico. Como se pode observar a formulação analítica e a formulação BEM/ TBEM apresentam uma boa correspondência de resultados.

3.8.2. Coeficiente de Absorção $\alpha = 1$

Para analisar a aptidão da formulação para $\alpha = 1$, recorreu-se a um modelo físico de uma barreira tridimensional, com uma geometria igual a um dos casos de estudo do capítulo 4 (Figura 3.5a), em que à face do lado da fonte foi atribuída uma absorção $\alpha = 1$, pois neste caso verifica-se a inexistência de reflexões. Este modelo foi simulado utilizando a formulação BEM/ TBEM descrita e analisou-se fisicamente a propagação das ondas sonoras no domínio do tempo. (calculada a partir de respostas no domínio da frequência e objeto de análise no próximo capítulo).

Na Figura 3.5b apresenta-se o campo da pressão sonora para o instante $t = 13,0$ ms. Pode-se verificar que, como esperado, a frente de onda, ao embater na barreira, não reflete, ocorrendo apenas difração pelo topo e lados da barreira, concluindo-se que a presente formulação está a modelar os fenómenos físicos associados à propagação das ondas sonoras como o esperado.

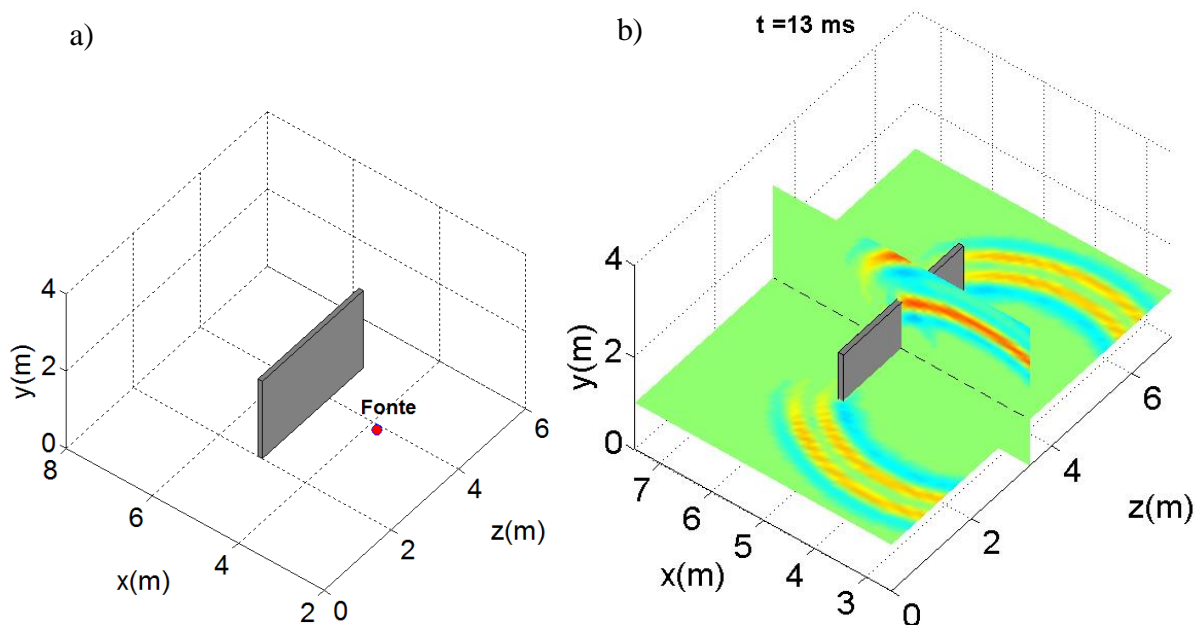


Figura 3.5 – Verificação do modelo para $\alpha = 1$: a) Geometria; b) Campo de pressão sonora no instante $t = 13,0$ ms.

4. APLICAÇÕES

4.1. Introdução

O modelo apresentado anteriormente foi aplicado na simulação do campo sonoro num meio fluido 3D semi-infinito, contendo barreiras tridimensionais (3D). A simulação do pavimento (plano refletor) sobre o qual se posicionam as barreiras 3D, foi efetuada recorrendo à técnica de imagens da fonte real.

De acordo com as dimensões das faces da barreira e a razão $\frac{\lambda}{L} = 8$, estabeleceu-se o número de elementos a serem usados em cada face da barreira. O número máximo de elementos é restringido pelas capacidades computacionais dos computadores. Na presente formulação BEM/TBEM, o número máximo de elementos que se poderia usar era 11000 elementos. Para frequências altas, em que existem comprimentos de onda pequenos, e para geometrias de grandes dimensões, são necessários muitos elementos. Assim, as dimensões das barreiras e a frequência máxima de cálculo foram definidas para não ultrapassar o número máximo de elementos.

Foram considerados 4 casos de estudo. Estudaram-se barreiras sonoras com diferentes dimensões ou propriedades absorventes, considerando uma barreira isolada (Casos 1 e 2), uma barreira paralela a uma fachada – plano refletor (Caso 3), ou duas barreiras paralelas (Caso 4). Os resultados dos cálculos efetuados são apresentados nos domínios do tempo e da frequência

4.2. Geometria dos Casos de Estudo

Em todos os casos de estudo analisados, a barreira é modelada usando cinco planos. Um plano que representa a face voltada para a fonte, outro paralelo voltado para o recetor (afastado da espessura da barreira), uma face no topo e duas faces laterais. Usou-se a formulação BEM para discretizar uma das faces de maior área e a formulação TBEM para a face oposta, a face do topo e as faces laterais da barreira. Em todos os casos, a espessura da barreira é de 10cm. Escolheu-se esta espessura por poder representar uma barreira real. Por outro lado, a modelação de uma barreira mais espessa conduzia a maiores superfícies laterais e de topo o que implica a necessidade de usar um maior número de elementos fronteira. De acordo com

testes preliminares realizados, quando se usa uma espessura muito reduzida, para manter o rigor dos resultados é necessário aumentar bastante o número de elementos fronteira, o que, para estas dimensões de barreiras, tornava o cálculo quase incomportável.

Nos 4 casos de estudo, a fonte sonora manteve-se centrada com as barreiras. No modelo que foi implementado, assume-se que não existem interações entre as faces internas da barreira, pelo que não existem fenómenos de transmissão.

4.2.1. Caso 1

No caso 1 simula-se uma barreira isolada, com dimensões de 3m x 2m e espessura de 10 cm, sobre um pavimento refletor. A face do lado da fonte sonora encontra-se incluída no plano vertical $x = 5$ m, variando segundo o eixo z de 2 m até 5 m e segundo o eixo y de 0 m a 2 m. A face oposta da barreira encontra-se no plano $x = 5,10$ m e varia segundo z e y do mesmo modo que a face paralela. Uma vez que as duas faces estão afastadas 10 cm, é, igualmente, necessário definir os planos que as unem, i.e., o plano $y = 2$ m, $z = 2$ m e $z = 5$ m. A fonte sonora localiza-se em (3,5;0,5;3,5). A geometria do problema está representada na Figura 4.1. A formulação BEM foi aplicada na face contrária à da fonte e a formulação TBEM nas restantes superfícies.

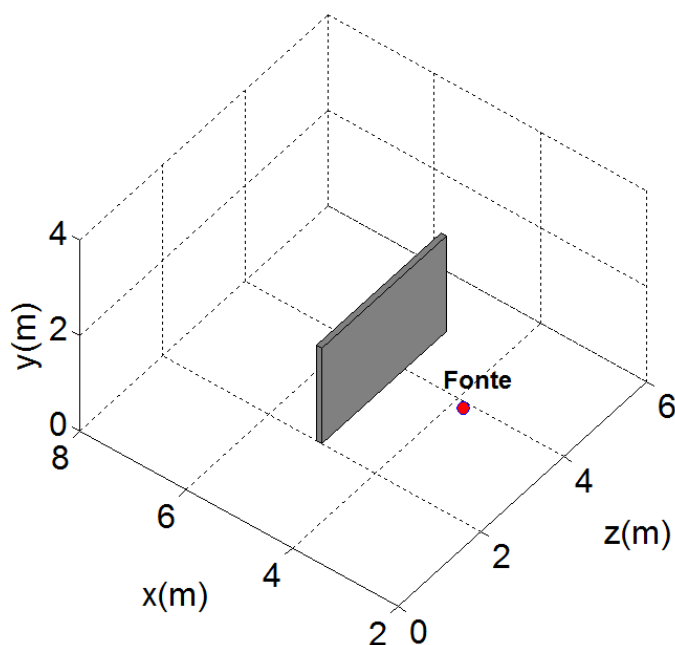


Figura 4.1 – Geometria do Caso 1.

4.2.2. Caso 2

No caso 2, a barreira sonora, sobre o pavimento, assume as dimensões de 5 m x 2 m e 10 cm de espessura. Os planos que a definem são $x = 5$ m e $x = 5,1$ m para as faces do lado da fonte e do recetor, respetivamente, e os planos $y = 2$ m para a face do topo da barreira e $z = 1$ m e $z = 6$ m para ambas as faces laterais. À semelhança do caso anterior, a fonte sonora no Caso 2 está posicionada em (3,5;0,5;3,5). A formulação BEM foi aplicada na face contrária à da fonte e a formulação TBEM nas restantes superfícies. A Figura 4.2 exhibe a geometria do Caso 2.

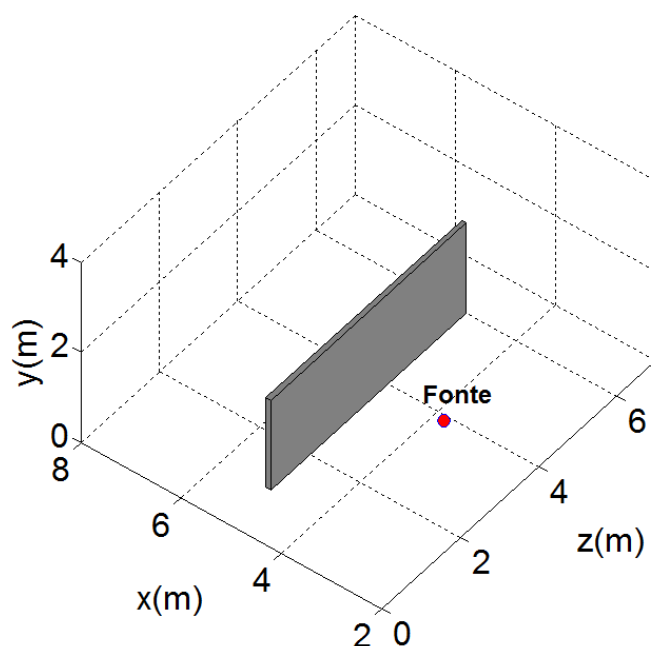


Figura 4.2 – Geometria do Caso 2.

4.2.3. Caso 3

No caso de estudo 3, a barreira, sobre o pavimento refletor tem as dimensões da barreira do Caso 1 e está posicionada nas mesmas coordenadas. No entanto, simula-se também um plano refletor de dimensões infinitas, paralelo à barreira, no plano vertical $x = 0$ m. Esta situação pode reproduzir a existência de uma barreira sonora na proximidade de uma fachada de um prédio. A fonte sonora localiza-se em (6,6;0,5;3,5). A geometria do problema, para este caso, é apresentada na Figura 4.3. A formulação BEM foi aplicada na face do lado da fonte e a formulação TBEM nas restantes superfícies.

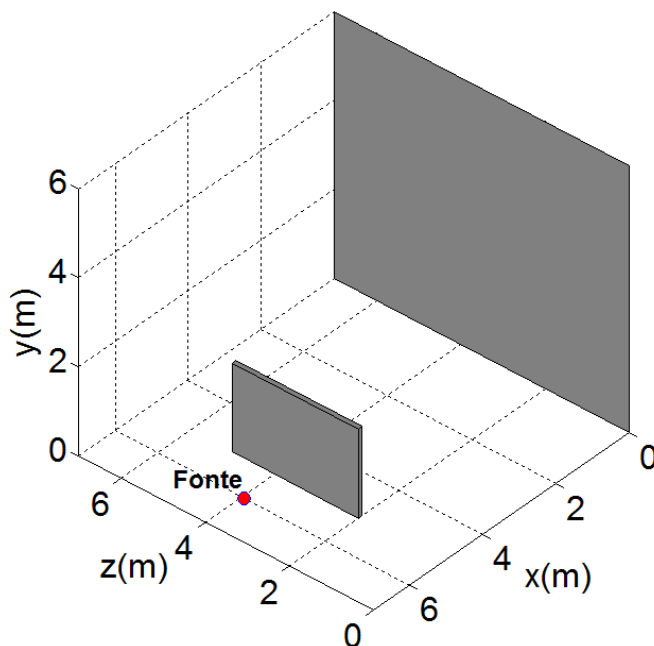


Figura 4.3 – Geometria do Caso 3.

4.2.4. Caso 4

No Caso 4, definiram-se duas barreiras paralelas de iguais dimensões (3m x 2m) com a fonte sonora localizada entre estas, em (2,6;0,5;3,5). Uma delas tem as suas faces nos planos $x = 7,0$ m e $x = 7,1$ m, para as faces do lado da fonte e do lado oposto, respetivamente, e lateral e superiormente é limitada pelos planos $z = 2,0$ m, $z = 5,0$ m e $y = 2,0$ m. A outra barreira apresenta as suas faces do lado da fonte e do lado oposto nos planos $x = 1,1$ m e $x = 1,0$ m, respetivamente, e as faces laterais e superior em $z = 2,0$ m $z = 5,0$ m e $y = 2,0$ m.

Este caso pode simular uma situação em que existem barreiras sonoras de ambos os lados de uma faixa de rodagem e existe a possibilidade da ocorrência de sucessivas reflexões entre ambas as barreiras. Apresenta-se, na Figura 4.4, a posição e geometria das duas barreiras.

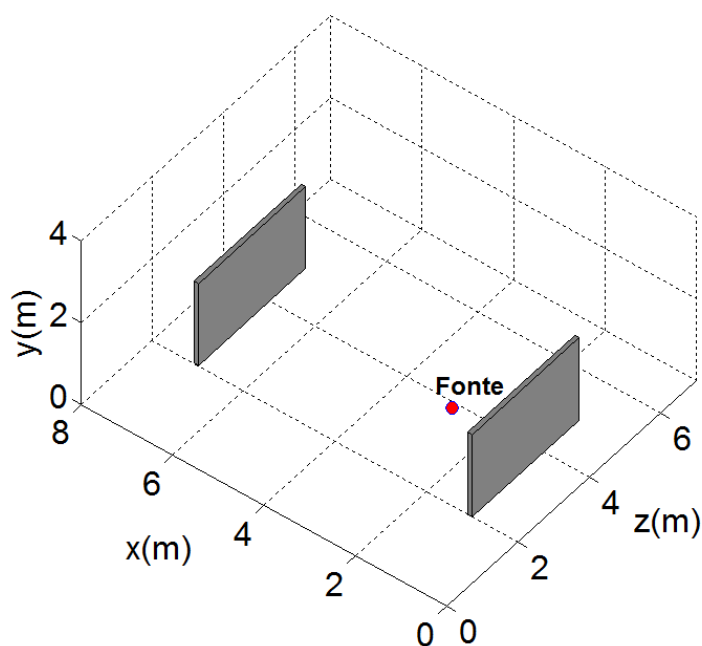


Figura 4.4 – Geometria do Caso 4.

4.3. Resultados no Domínio do Tempo

Os cálculos da pressão sonora, em grelhas de recetores horizontais e verticais dispostas junto às barreiras, foram efetuados, inicialmente, no domínio da frequência, para o intervalo [3 Hz a 768 Hz], com um incremento de frequência de 3Hz. Nas grelhas de recetores, os recetores estão igualmente espaçados em cada direção. No domínio do tempo, o campo de pressões obteve-se para uma frequência característica de 250 Hz aplicando uma transformada inversa de Fourier aos resultados em frequência. O tempo de propagação das ondas que pode ser visualizado tem uma duração de $T = (1/\Delta f) = (1/3) = 0,3333$ s. Apresentam-se resultados, no domínio do tempo, para os casos 1, 3 e 4, que permitem visualizar a evolução da propagação das ondas sonoras para os diferentes casos de estudo.

Apresentam-se, para cada exemplo, as amplitudes da pressão no domínio do tempo, como uma sequência de figuras, para diferentes instantes, registadas nos planos das grelhas de recetores, usando uma escala de cores, que varia do azul ao vermelho, representando a variação da amplitude da pressão de valores negativos para positivos.

Para a geometria do Caso 1, a pressão sonora foi calculada numa grelha horizontal de recetores que intersesta a barreira e numa grelha vertical de recetores perpendicular à barreira que também a intersesta. A grelha horizontal de recetores, situada em $y = 1,0$ m dispõe de 3962 recetores, localizados entre $x = 2,5$ m e $x = 7,5$ m (52 recetores) e entre $z = 0,0$ m e

$z = 7,0$ m (71 recetores). A grelha vertical, localizada em $z = 3,45$ m, contém 1664 recetores localizados desde $x = 2,5$ m e $x = 7,5$ m (52 recetores) e desde $y = 0,0$ m e $y = 3,0$ m (32 recetores).

Os cálculos foram efetuados para duas situações distintas: todas as faces da barreira têm um coeficiente de absorção $\alpha = 0$; a face da barreira do lado da fonte tem um coeficiente de absorção de $\alpha = 0,5$ e as restantes faces da barreira têm um coeficiente de absorção $\alpha = 0$.

Nas Figuras 4.5 a 4.8 apresenta-se a pressão sonora registada nas grelhas de recetores para os instantes $t = 2,1$ ms, $t = 5,0$ ms, $t = 10,1$ ms e $t = 13,0$ ms para os coeficientes de absorção de $\alpha = 0$ e $\alpha = 0,5$.

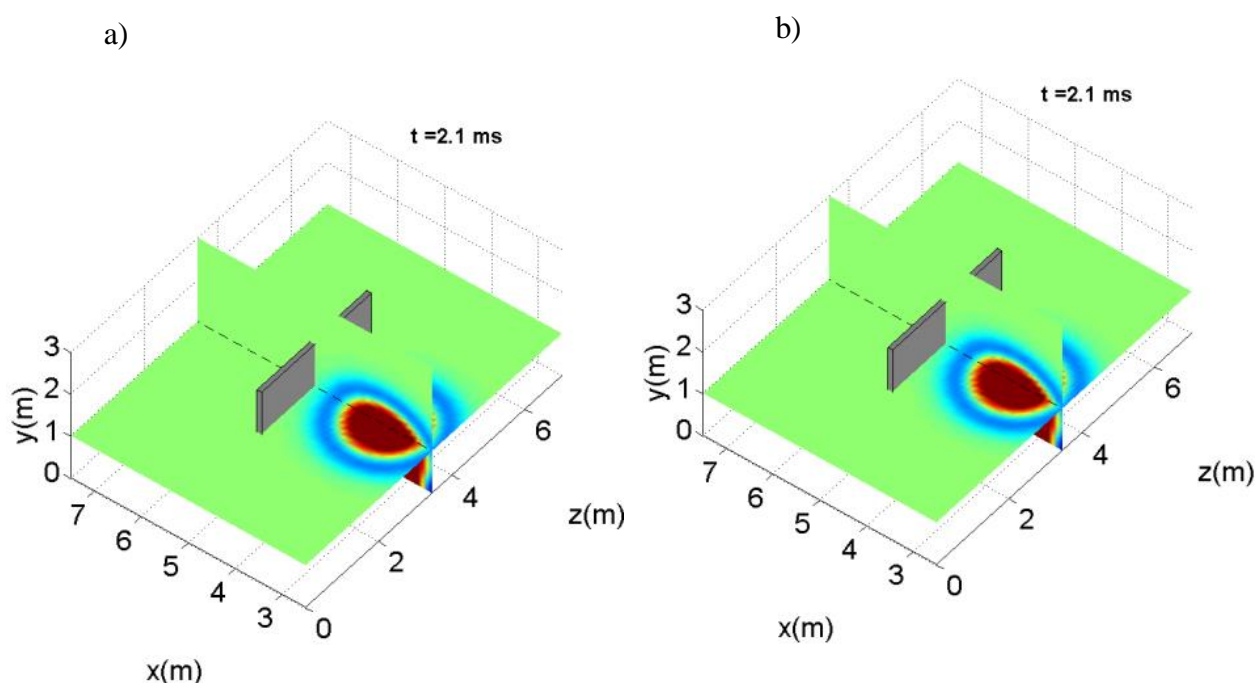


Figura 4.5 – Pressão sonora para uma frequência característica de 250 Hz, registada em duas grelhas de recetores (planos vertical e horizontal), no instante $t = 2,1$ ms para o Caso 1: a) $\alpha = 0$, b) $\alpha = 0,5$ (na face voltada para a fonte).

Na Figura 4.5a e 4.5b está representado um instante próximo do início da propagação do som. As figuras apresentam resultados semelhantes para ambos os coeficientes de absorção sonora porque a onda sonora ainda não embateu na barreira, não se registando diferenças nas tonalidades das cores das figuras. Repara-se, também, que a dispersão das ondas sonoras, como esperado, é feita de uma forma esférica. Neste instante apenas é visível no plano horizontal a frente de onda incidente. No plano vertical, junto ao pavimento já se iniciou a reflexão no mesmo (para $t = 1,47$ ms), mas não é visível nesta perspetiva da figura.

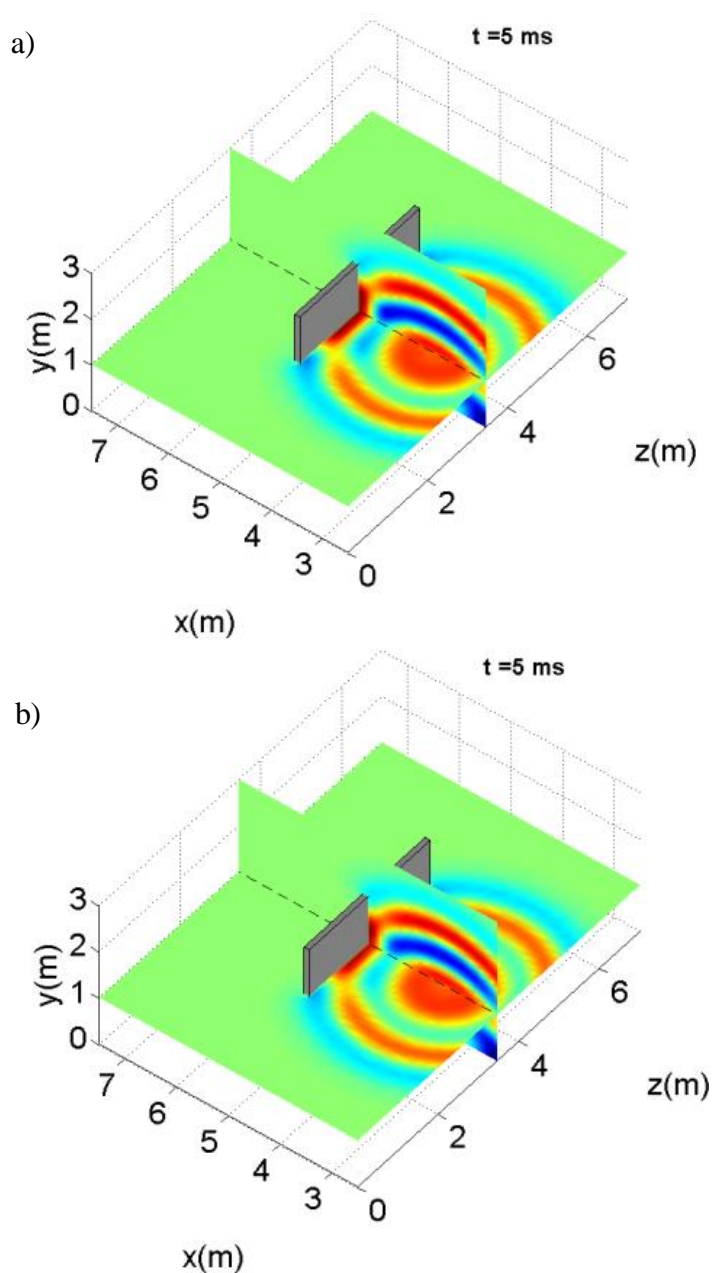


Figura 4.6 – Pressão sonora para uma frequência característica de 250 Hz, registada em duas grelhas de recetores (planos vertical e horizontal), no instante $t = 5,0 \text{ ms}$ para o Caso 1: a) $\alpha = 0$, b) $\alpha = 0,5$ (na face voltada para a fonte).

Nas Figuras 4.6a e 4.6b está representado o instante $t = 5,0 \text{ ms}$ para os casos em que o coeficiente de absorção é 0 e 0,5, respetivamente. A frente de onda já embateu na barreira, mas ainda se observam diferenças pouco perceptíveis nas intensidades da cor de ambas as imagens. Neste instante, já é possível distinguir, com nitidez, a reflexão que vem do pavimento, quer no plano horizontal quer no vertical de recetores.

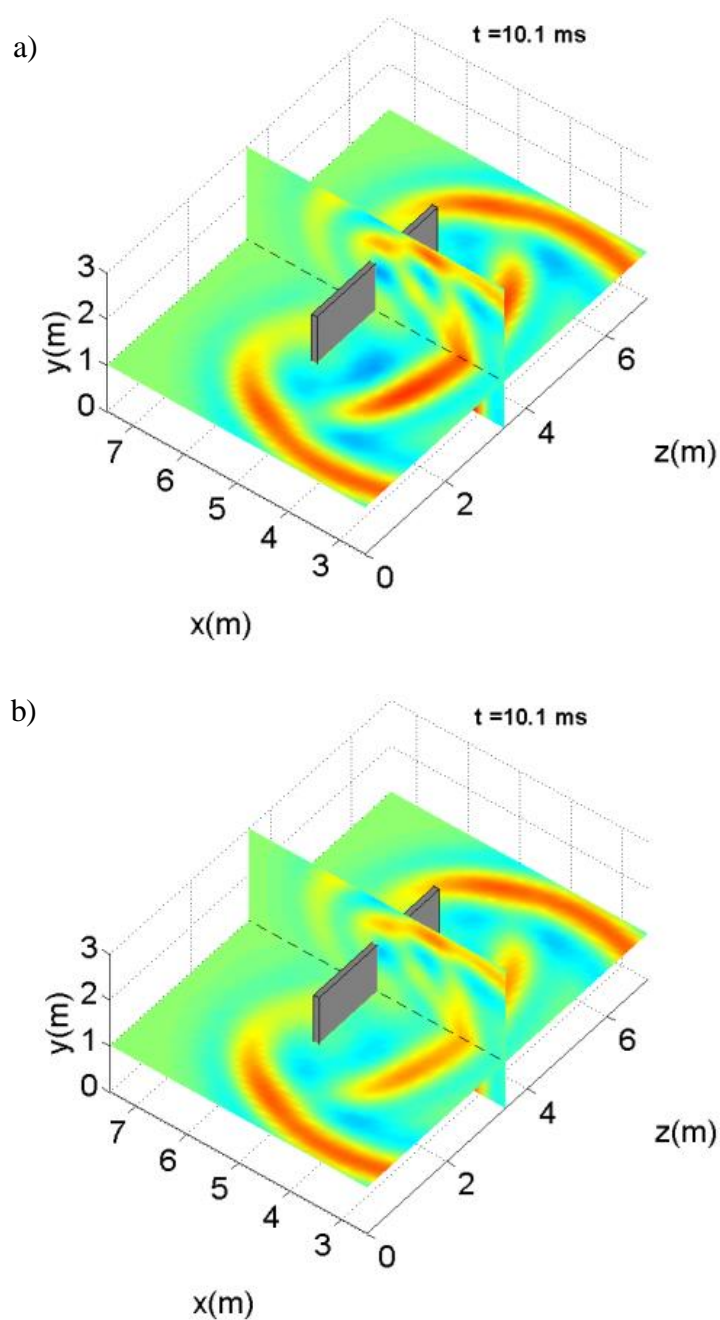


Figura 4.7 – Pressão sonora para uma frequência característica de 250 Hz, registada em duas grelhas de recetores (planos vertical e horizontal), no instante $t = 10,1$ ms para o Caso 1: a) $\alpha = 0$, b) $\alpha = 0,5$ (na face voltada para a fonte).

Nas Figuras 4.7a e 4.7b, correspondentes ao instante $t = 10,1$ ms, são visíveis os fenómenos de reflexão e de difração das ondas que ocorrem na barreira. A diferença de cores é mais acentuada neste caso, uma vez que a Figura 4.7a apresenta tons mais escuros que a Figura 4.7b, resultado da reflexão na barreira ser mais intensa para $\alpha = 0$.

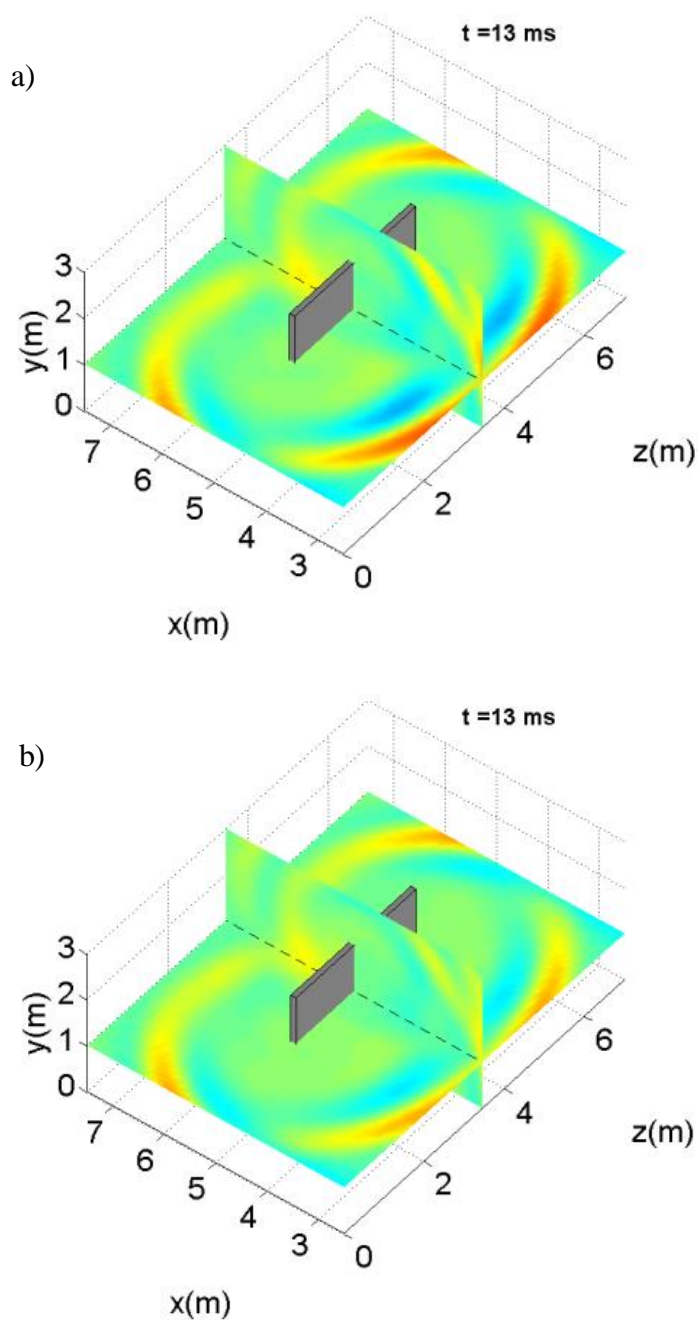


Figura 4.8 – Pressão sonora para uma frequência característica de 250 Hz, registada em duas grelhas de recetores (planos vertical e horizontal), no instante $t = 13,0$ ms para o Caso 1: a) $\alpha = 0$, b) $\alpha = 0,5$ (na face voltada para a fonte).

No instante $t = 13,0$ ms, traduzido pelas Figuras 4.8a e 4.8b, observam-se as ondas sonoras já em dispersão, depois de embaterem na barreira e a ultrapassarem. A onda refletida para trás continua a afastar-se da barreira, continuando a apresentar menor amplitude quando $\alpha = 0,5$.

Para a geometria do Caso 3, a pressão sonora foi calculada em três grelhas de recetores, duas verticais, uma paralela à barreira e à superfície rígida, outra perpendicular à barreira, e uma horizontal que intersesta a barreira. A grelha de recetores horizontal contém 5822 recetores disposta sobre o plano $y = 1$ m, com a posição dos recetores a variar de $x = 0,5$ m a $x = 8,5$ m (82 recetores) e de $z = 0,0$ m a $z = 7,0$ m (71 recetores). A grelha vertical perpendicular à barreira encontra-se sobre o plano $z = 3,45$ m, contém 2624 recetores dispostos em x de 0,5 m a 8,5 m (82 recetores) e em y de 0,0 m a 3,0 m (32 recetores). A grelha de recetores, paralela à superfície rígida, contém 2201 recetores e posiciona-se sobre o plano $x = 0,5$ m, com a posição dos recetores a variar de $y = 0,0$ m até $y = 3,0$ e de $z = 0,0$ m até $z = 7,0$ m, com 31 por 71 recetores.

Os cálculos foram efetuados para o caso em que todas as faces da barreira têm um coeficiente de absorção sonora de $\alpha = 0$ e para uma barreira com um coeficiente de absorção $\alpha = 0,5$ na face da barreira do lado da fonte (apresentando as outras faces $\alpha = 0$). Como já foi referido, anteriormente, a barreira situa-se paralelamente a uma superfície rígida infinita (correspondente a $\alpha = 0$). Nas Figuras 4.9 a 4.12 apresenta-se o campo de pressões para os instantes $t = 2,1$ ms, $t = 5,0$ ms, $t = 13,0$ ms e $t = 28,0$ ms.

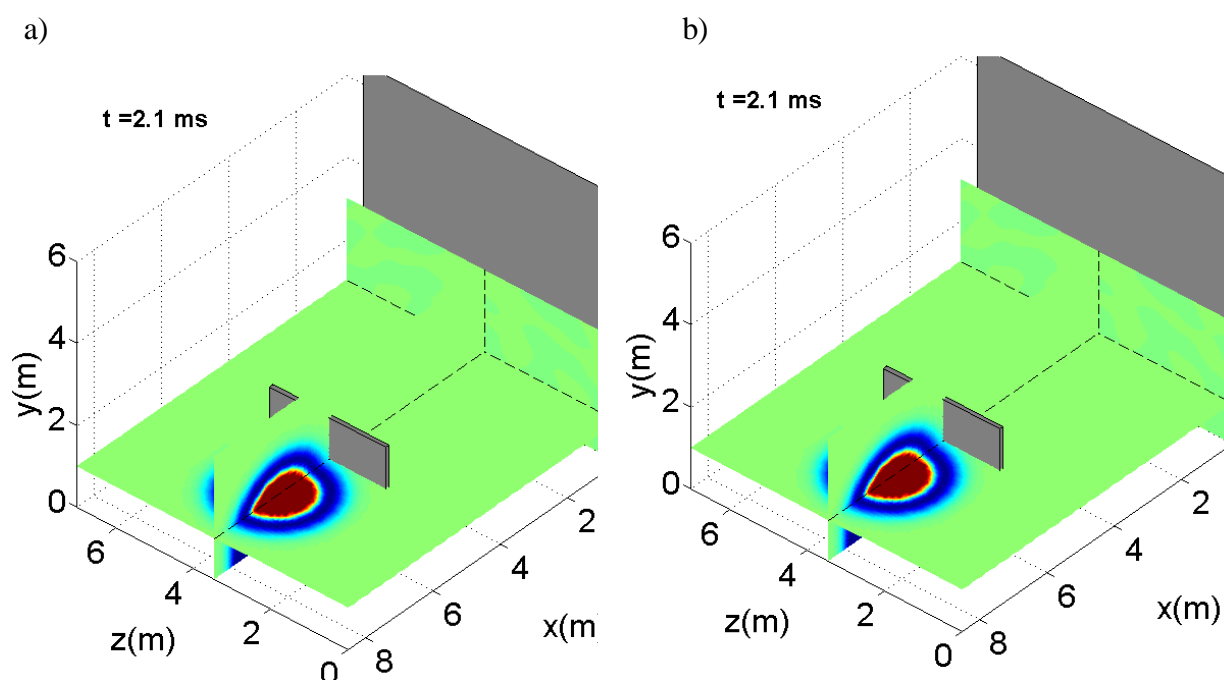


Figura 4.9 – Pressão sonora para uma frequência característica de 250 Hz, registada em três grelhas de recetores (dois planos verticais e um plano horizontal), no instante $t = 2,1$ ms para o Caso 3: a) $\alpha = 0$, b) $\alpha = 0,5$ (na face voltada para a fonte).

Nas Figuras 4.9a e 4.9b é apresentada a pressão sonora no instante $t = 2,1$ ms, para os coeficientes de absorção 0 e 0,5. Nos planos horizontal e vertical de recetores vê-se a frente de onda incidente. O início da reflexão da onda, que embate no pavimento, ainda não é visível nesta perspetiva da figura.

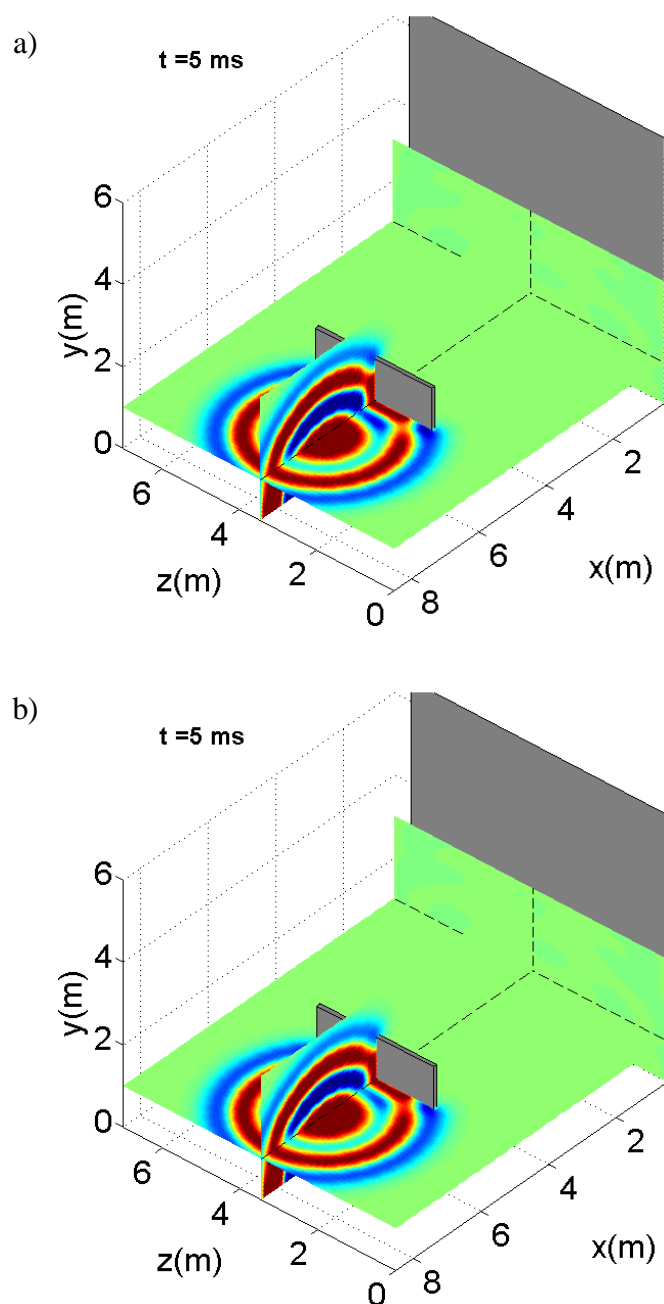


Figura 4.10 – Pressão sonora para uma frequência característica de 250 Hz, registada em três grelhas de recetores (dois planos verticais e um plano horizontal), no instante $t = 5,0$ ms para o Caso 3: a) $\alpha = 0$, b) $\alpha = 0,5$ (na face voltada para a fonte).

Nas Figuras 4.10a e 4.10b podem-se observar os resultados para o instante $t = 5,0$ ms. A onda sonora incidente já atingiu a barreira e começou a refletir. É já bastante visível, quer no plano horizontal, quer no vertical, a onda que se segue à incidente e que é resultado da sua reflexão no pavimento. Nota-se também o início da difração das ondas pela barreira. Observa-se que para $\alpha = 0$ existem cores vermelhas e azuis com tonalidades mais intensas do que no caso em que $\alpha = 0,5$, fruto de, no primeiro caso, a barreira ser rígida e portanto existirem reflexões com amplitude superior.

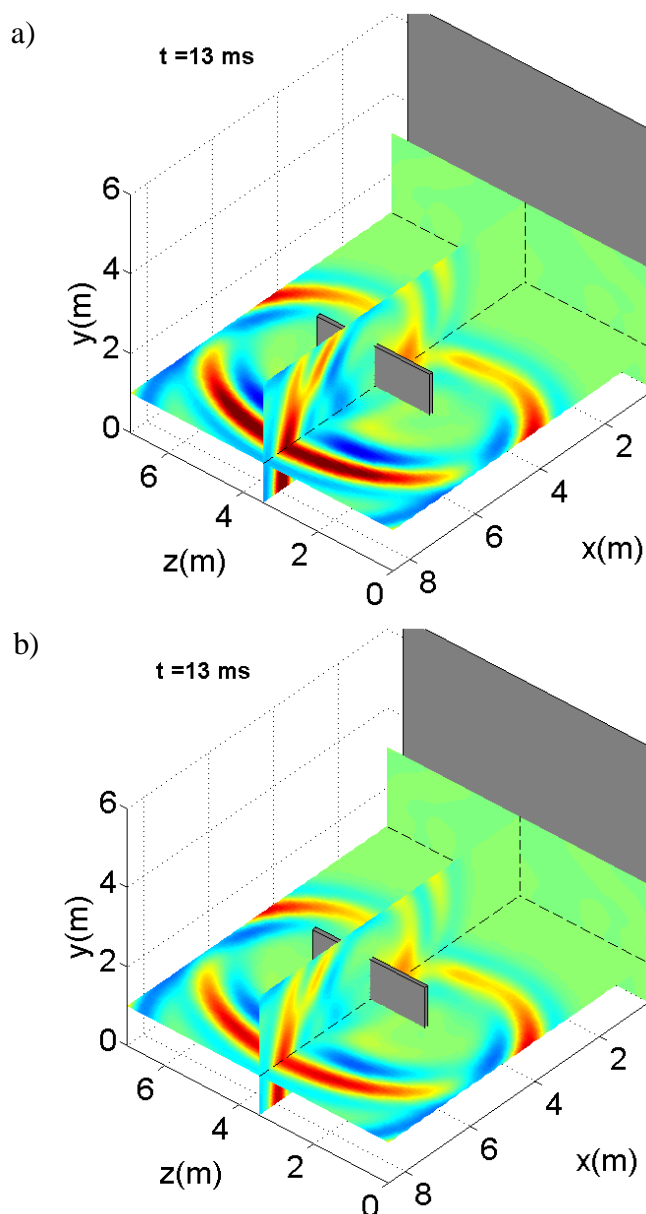


Figura 4.11 – Pressão sonora para uma frequência característica de 250 Hz, registada em três grelhas de recetores (dois planos verticais e um plano horizontal), no instante $t = 13,0$ ms para o Caso 3: a) $\alpha = 0$, b) $\alpha = 0,5$ (na face voltada para a fonte).

As Figuras 4.11a e 4.11b apresentam a amplitude da pressão sonora para o instante $t = 13,0$ ms. Pode-se observar, nestas figuras, a parte da onda sonora que foi refletida e a parte que foi difratada. O efeito da existência de absorção sonora é bastante visível na Figura 4.11b que apresenta, como esperado, tonalidades mais claras na onda refletida, e ligeiramente mais claras nas ondas difratadas.

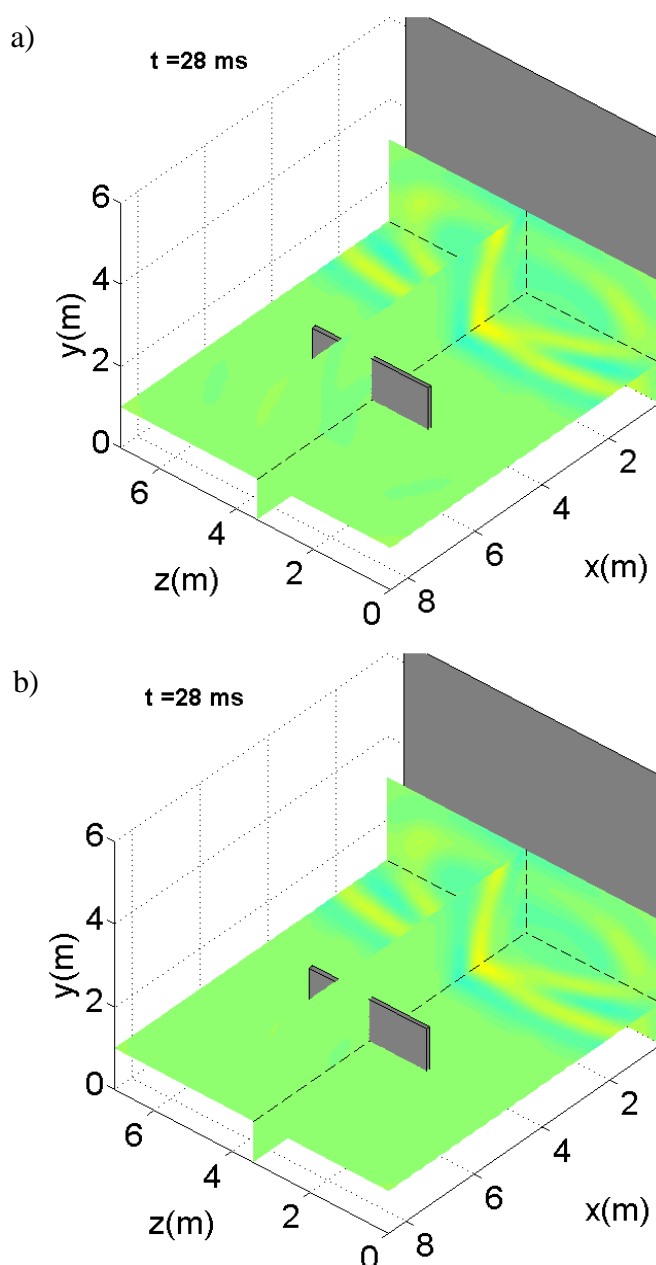


Figura 4.12 – Pressão sonora para uma frequência característica de 250 Hz, registada em três grelhas de recetores (dois planos verticais e um plano horizontal), no instante $t = 28,0$ ms para o Caso 3: a) $\alpha = 0$, b) $\alpha = 0,5$ (na face voltada para a fonte).

Nas Figuras 4.12a e 4.12b observam-se os resultados obtidos para o instante $t = 28,0$ ms, para a barreira com um coeficiente de absorção sonora $\alpha = 0$ e $\alpha = 0,5$ (na face voltada para a fonte), respetivamente. Neste instante, as ondas difratadas já atingiram a fachada rígida, e foram refletidas por esta, regressando em direção à barreira. As tonalidades das cores nas Figuras 4.12a e 4.12b não são muito diferentes. Uma vez que o plano rígido se encontra a alguma distância da fonte, quando as ondas sonoras o atingem, a energia sonora está distribuída por uma superfície maior do que quando a frente de onda está próxima da fonte o que resulta em menores amplitudes do som. Por esse motivo, não é tão visível a diferença de amplitude para $\alpha = 0$ e $\alpha = 0,5$, embora se possa observar uma ligeira diferença. Com o decorrer do tempo, a energia que está a ser refletida sofrerá reflexões sucessivas entre a superfície rígida e a barreira. Quando a onda refletida atinge a barreira, parte da sua energia será difratada por esta e outra parte será refletida novamente em direção à superfície rígida.

No Caso 4 dispuseram-se duas barreiras paralelas com a fonte emissora posicionada entre ambas, de modo a avaliar o comportamento das ondas sonoras ao longo do tempo e recriando um possível cenário real em que existe uma estrada com barreiras acústicas em ambos os lados da faixa de rodagem. Estudou-se a propagação das ondas sonoras, para a situação em que as duas barreiras não têm propriedades absorventes ($\alpha = 0$), e para a situação em que as duas barreiras têm um coeficiente de absorção sonora $\alpha = 0,5$ na face voltada para a fonte sonora, e um coeficiente de absorção igual a $\alpha = 0$ nas restantes faces.

A pressão sonora foi registada em duas grelhas de recetores, uma horizontal que intersesta as barreiras e uma outra vertical perpendicular às barreiras e que também as intersesta. A grelha horizontal contém 5822 recetores sobre o plano $y = 1,0$ m dispostos de $x = 0,5$ m a $x = 8,5$ m (82 recetores) e de $z = 0,0$ m a $z = 7,0$ m (71 recetores). A grelha vertical de recetores situa-se sobre o plano $z = 3,45$ m e contém 2624 recetores dispostos segundo de $x = 0,5$ m a $x = 8,5$ m (82 recetores) e segundo $y = 0,0$ m até $y = 3,0$ m (32 recetores).

Nas Figuras 4.13 a 4.17 apresentam-se os valores da pressão sonora nos instantes $t = 2,1$ ms, $t = 5,0$ ms, $t = 10,1$ ms, $t = 16,0$ ms e $t = 27,0$ ms, para o Caso 4.

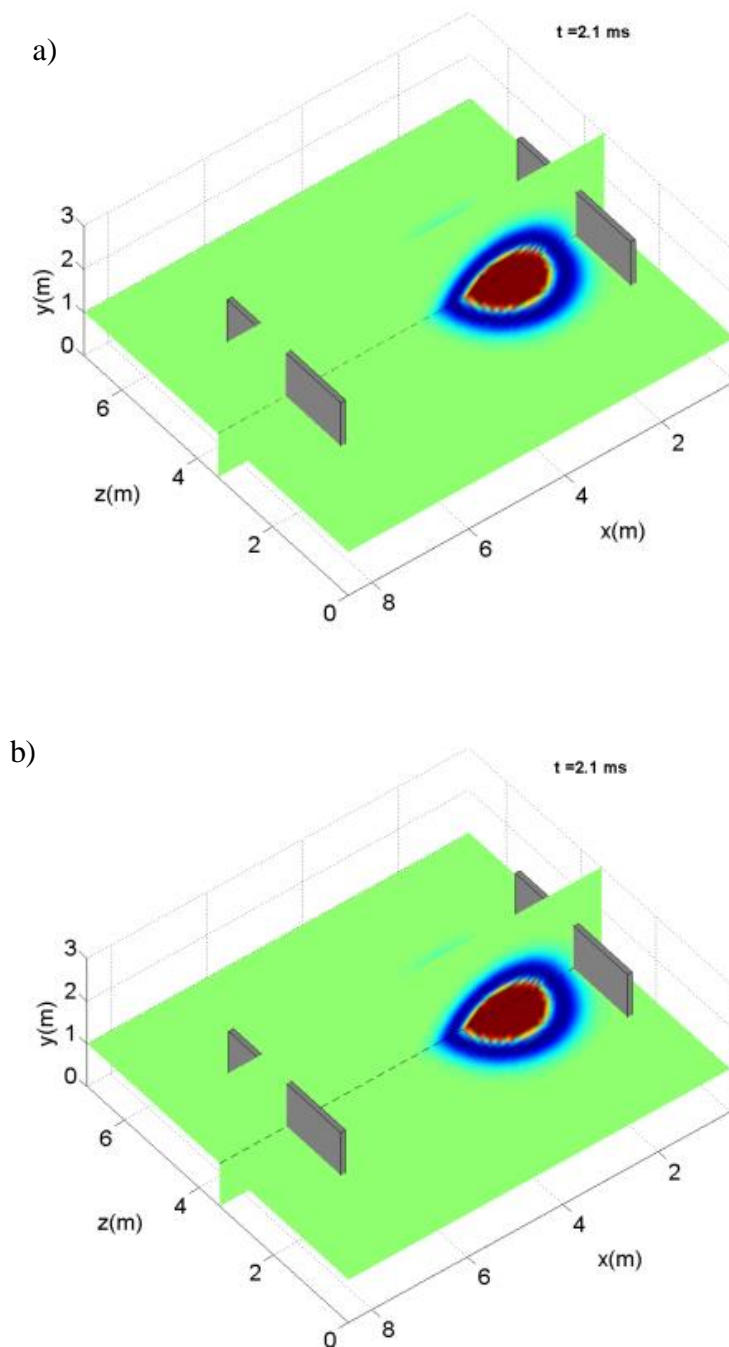


Figura 4.13 – Pressão sonora para uma frequência característica de 250 Hz, registada em duas grelhas de recetores (planos vertical e horizontal), no instante $t = 2,1 \text{ ms}$ para o Caso 4: a) $\alpha = 0$, b) $\alpha = 0,5$ (na face voltada para a fonte).

As Figuras 4.13a e 4.13b traduzem o instante $t = 2,1 \text{ ms}$, em que as ondas sonoras se afastam do ponto da emissão da fonte sonora. Ainda não ocorreu qualquer reflexão nas barreiras e apenas é visível a frente de onda incidente. A reflexão no pavimento já teve início, mas ainda não é visível nas figuras.

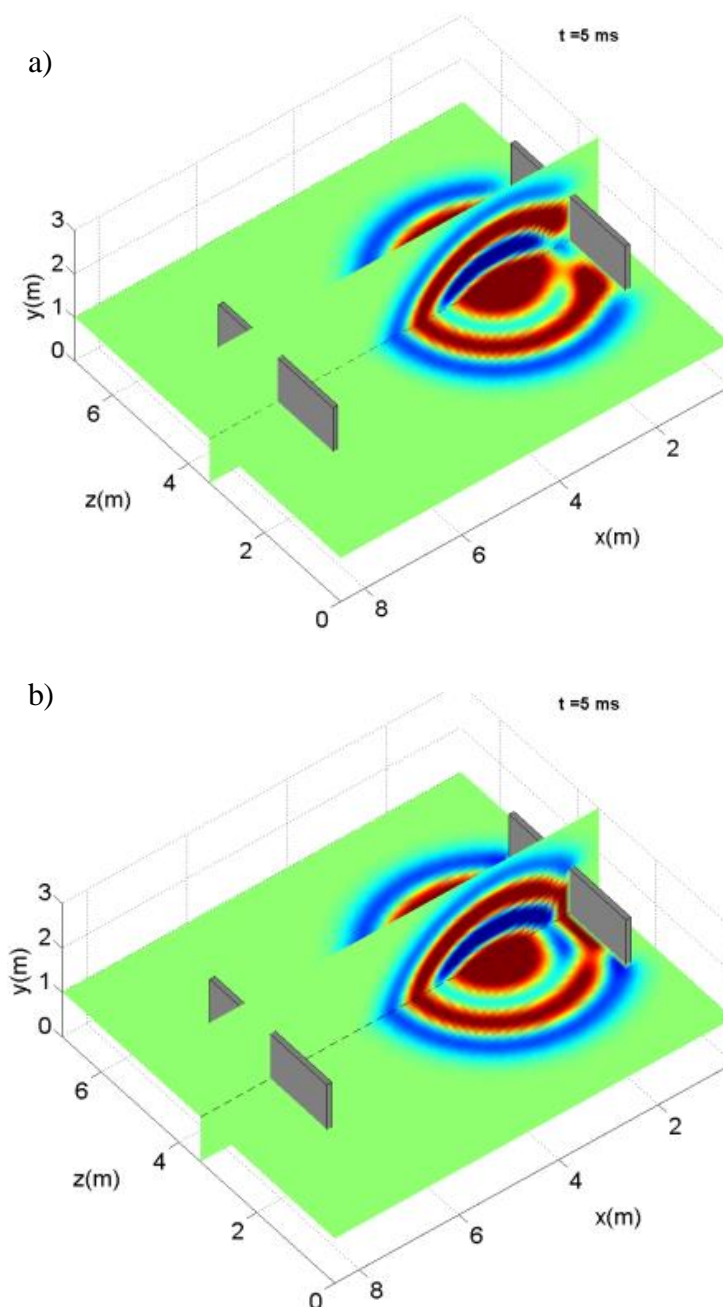


Figura 4.14 – Pressão sonora para uma frequência característica de 250 Hz, registada em duas grelhas de recetores (planos vertical e horizontal), no instante $t = 5,0 \text{ ms}$ para o Caso 4: a) $\alpha = 0$, b) $\alpha = 0,5$ (na face voltada para a fonte).

Nas Figuras 4.14a e 4.14b podem-se observar as ondas sonoras no instante $t = 5,0 \text{ ms}$ a incidir na barreira mais próxima (da direita) e a serem refletidas por ela. Neste instante, a reflexão da frente de onda incidente no pavimento já é bastante visível, tanto no plano horizontal como no plano vertical de recetores. Quando a face das barreiras voltada para a

fonte tem absorção sonora, a reflexão é menos intensa conduzindo a amplitudes de pressão mais baixas, representadas pela tonalidade mais clara das ondas.

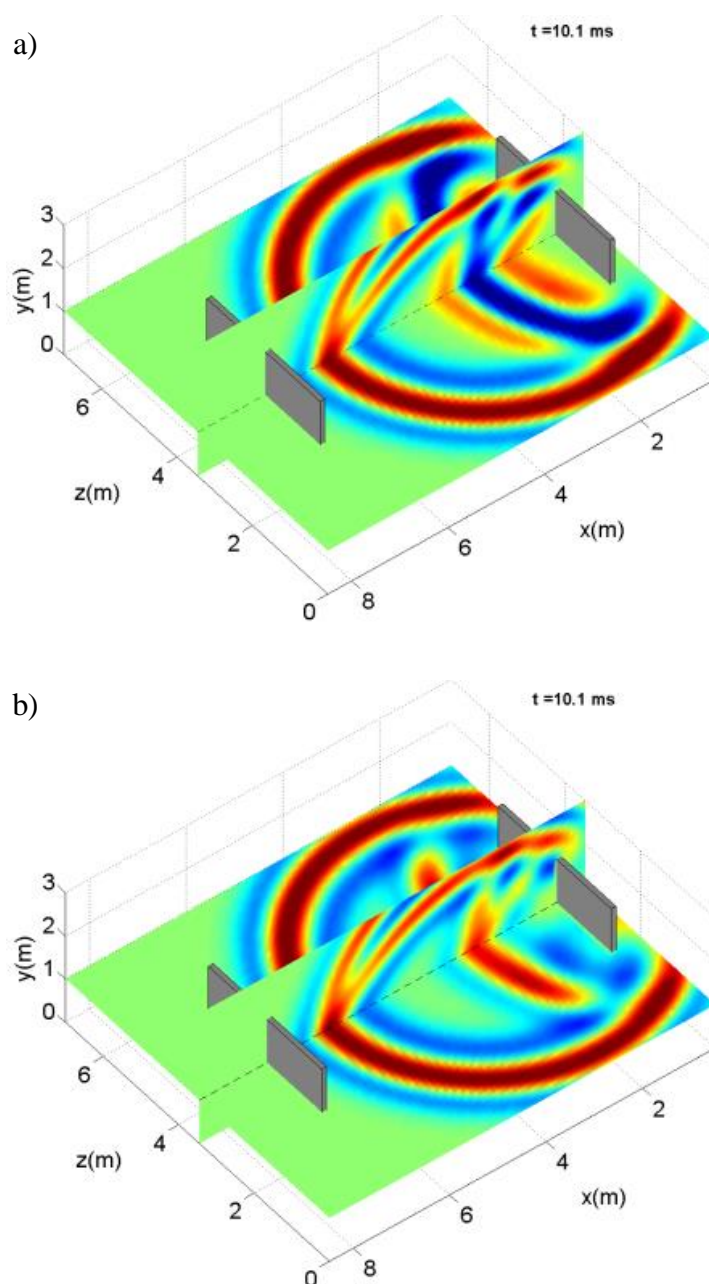


Figura 4.15 – Pressão sonora para uma frequência característica de 250 Hz, registada em duas grelhas de recetores (planos vertical e horizontal), no instante $t = 10,1$ ms para o Caso 4: a) $\alpha = 0$, b) $\alpha = 0,5$ (na face voltada para a fonte).

Nas Figuras 4.15a e 4.15b observa-se o campo de pressões no instante $t = 10,1$ ms. Nesse instante, as ondas refletidas na primeira barreira e pavimento estão a progredir em direção à barreira da esquerda, assim como as ondas que foram emitidas diretamente pela fonte e que se

aproximam da segunda barreira (esquerda), mas ainda não embateram nela. É também visível a difração de uma parte das ondas sonoras na barreira da direita. O efeito da absorção sonora é bastante perceptível na menor amplitude das ondas (cores menos intensas) da Figura 4.15b.

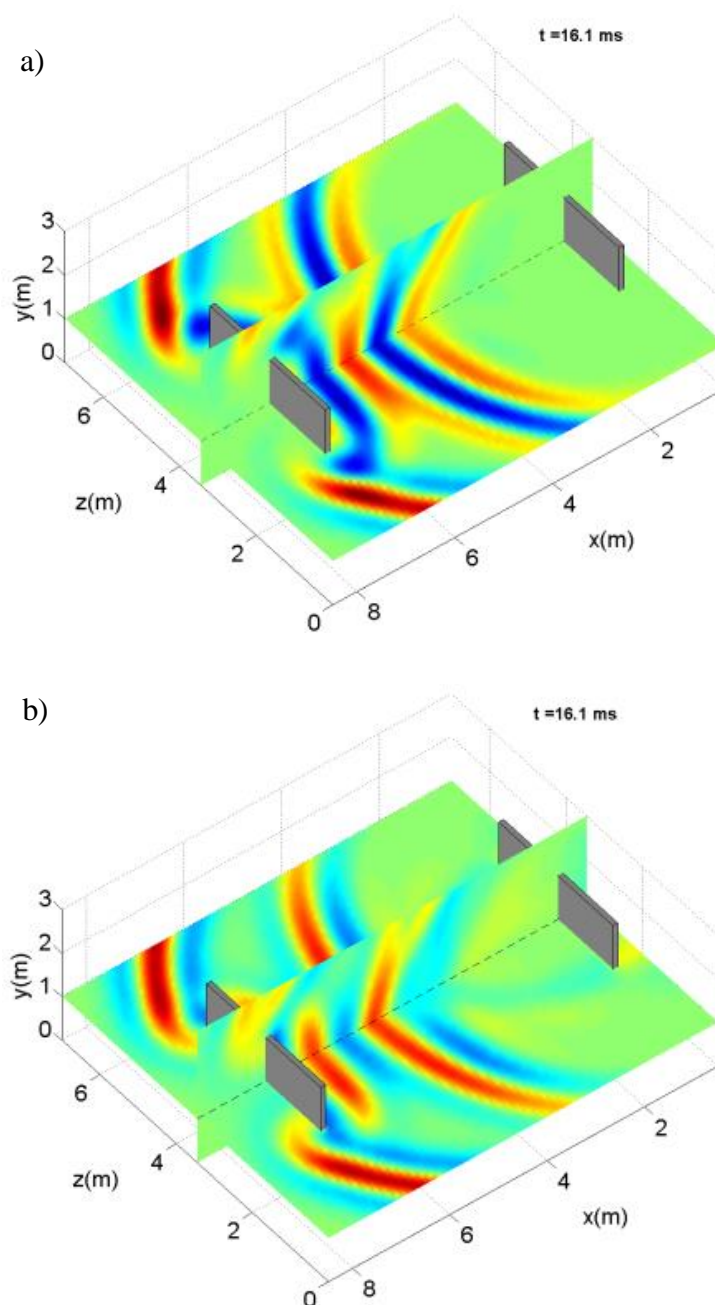


Figura 4.16 – Pressão sonora para uma frequência característica de 250 Hz, registada em duas grelhas de recetores (planos vertical e horizontal), no instante $t = 16,1$ ms para o Caso 4: a) $\alpha = 0$, b) $\alpha = 0,5$ (na face voltada para a fonte).

Pela observação das Figuras 4.16a e 4.16b, no instante $t = 16,1$ ms, a frente de onda incidente já está a ser refletida pela barreira da esquerda, a qual foi atingida por ela em $t = 12,9$ ms. Percebe-se, também, a ocorrência de difração das ondas sonoras na barreira da esquerda.

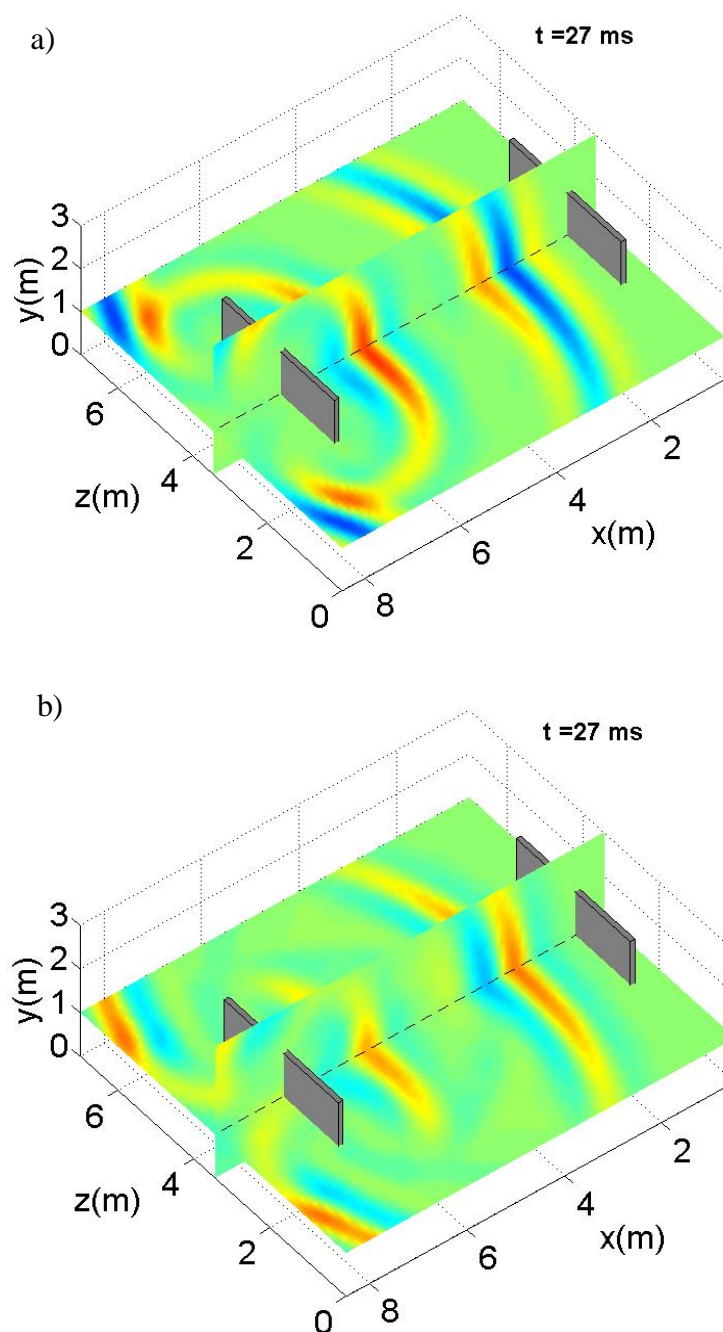


Figura 4.17 – Pressão sonora para uma frequência característica de 250 Hz, registada em duas grelhas de recetores (planos vertical e horizontal), no instante $t = 27,0$ ms para o Caso 4:
a) $\alpha = 0$, b) $\alpha = 0,5$ (na face voltada para a fonte).

Nas Figuras 4.17a e 4.17b observa-se o instante $t = 27,0$ ms onde as duas ondas sonoras refletidas na barreira esquerda evoluem no mesmo sentido. Entre as figuras é perceptível que a Figura 4.17a tem cores mais carregadas e a Figura 4.17b cores mais atenuadas, fruto das diferentes amplitudes das ondas refletidas nas barreiras com diferentes coeficientes de absorção. Os processos descritos, de sucessivas reflexões repetir-se-ão até que a onda sonora perca toda a energia. No caso em que $\alpha = 0$ (Figura 4.17a) demorará mais tempo até que deixem de ocorrer reflexões uma vez que a perda de energia da onda sonora não está dependente da absorção da barreira como no caso em que $\alpha = 0,5$ (Figura 4.17b).

Por vezes, quando existem barreiras paralelas com materiais sem tratamento para atenuar o som incidente, há a possibilidade de ocorrer um aumento do nível de pressão sonora entre estas.

4.4. Resultados no Domínio da Frequência

Apresentam-se resultados, no domínio da frequência, para os Casos 1 e 2, para três frequências específicas, 125, 250 e 500 Hz. Para os dois casos de estudo, à face da barreira voltada para a fonte foram atribuídos os coeficientes de absorção sonora $\alpha = 0$, $\alpha = 0,2$, $\alpha = 0,5$ e $\alpha = 0,8$, enquanto às outras faces atribuiu-se $\alpha = 0$. Em ambos os casos, os cálculos permitiram determinar a perda por inserção (insertion loss – IL) e ainda a diferença de nível sonoro (ΔL) obtida do lado da fonte pelo facto de se introduzir absorção na face da barreira sonora.

A IL traduz a diferença dos níveis de pressão sonora nas situações em que existe e não existe barreira, ou seja, calcula a atenuação conferida por esta. Registam-se os valores de pressão sonora numa mesma grelha de recetores, disposta paralelamente à barreira, do lado oposto ao da fonte, na ausência (p_0) e na presença da barreira (p_b). A perda por inserção (IL), pode ser expressa por (ver equação 39):

$$IL = 20 \log_{10} \left| \frac{p_0}{p_b} \right| \quad (39)$$

onde p_0 é a pressão no recetor na ausência da barreira e p_b é a pressão sonora no recetor quando a barreira está na sua posição.

No cálculo da IL a grelha de recetores vertical paralela à barreira, tem 2201 recetores, inserida no plano $x = 5,5$ m, com os recetores a variarem segundo $y = 0,0$ m a $y = 3,0$ m (31 recetores) e segundo $z = 0,0$ m a $z = 7,0$ m (71 recetores).

Quando se usa uma barreira sem absorção, a tendência é, do lado da fonte sonora, o nível sonoro aumentar (em relação à situação em que não existe barreira) devido às reflexões das ondas sonoras na barreira. Para perceber o ganho que se vai obter pelo facto de se usar uma barreira com absorção, vai calcular-se a diferença de nível sonoro (ΔL), do lado da fonte, entre a situação em que existe uma barreira rígida e uma barreira com absorção (ver equação 40).

$$\Delta L = L_1 - L_2 \quad (40)$$

sendo L_1 o nível de pressão sonora, do lado da fonte, quando a barreira é rígida ($\alpha = 0$) e L_2 o nível de pressão sonora quando $\alpha \neq 0$. Ou seja, é calculada a diferença entre os níveis de pressão sonora, registados numa grelha de recetores, considerando a barreira sem absorção ($\alpha = 0$) e com as absorções $\alpha = 0,2$, $\alpha = 0,5$ e $\alpha = 0,8$. Considerou-se, para os cálculos, que o ar tem uma massa volúmica $\rho = 1,22 \text{ kg/m}^3$ e que a velocidade de propagação do som no ar é $c = 340 \text{ m/s}$.

No Caso 1 e no Caso 2, apesar de as barreiras terem dimensões diferentes, as grelhas de recetores são iguais, uma vez que tanto num caso como no outro, estas abarcam plenamente as dimensões das barreiras. Para o cálculo da IL, a grelha de recetores está posicionada em $x = 45 \text{ m}$ e é constituída por 2201 recetores colocados entre $y = 0,0 \text{ m}$ e $y = 3,0 \text{ m}$ e entre $z = 0,0 \text{ m}$ e $z = 7,0 \text{ m}$.

No cálculo da IL utilizou-se uma escala de cores para facilitar a leitura e interpretação das imagens apresentadas. A escala de cores varia do azul ao vermelho, representando o azul a base da escala, correspondente a valores de diferença de nível sonoro negativos e o vermelho a valores de diferença de nível sonoro positivos. Nas Figuras 4.18 a 4.20 são apresentados os resultados da IL para o Caso 1, em função da frequência do som incidente e do coeficiente de absorção da barreira.

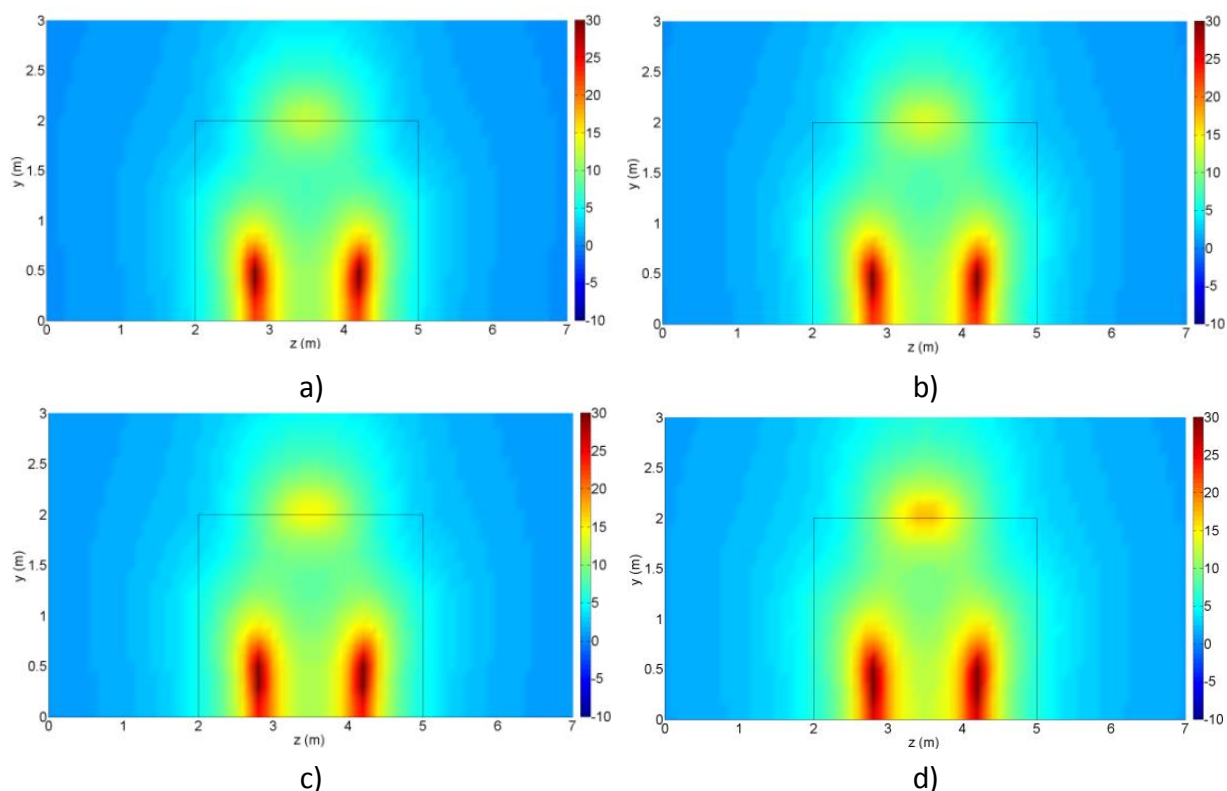


Figura 4.18 – Atenuação sonora, IL, (dB) calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, para a frequência de 125 Hz, para o Caso 1: a) $\alpha = 0$; b) $\alpha = 0,2$; c) $\alpha = 0,5$; d) $\alpha = 0,8$.

Pela observação das Figuras 4.18a a 4.18d constata-se que, para uma frequência de 125 Hz a barreira confere uma maior atenuação localizada, principalmente em três zonas da barreira. É expectável que a introdução de absorção sonora na face da barreira, do lado da fonte, tenha uma maior influência na diminuição do nível sonoro do lado da fonte do que do lado contrário (onde é calculada a IL). No entanto, se observarmos a Figura 4.18d a tonalidade das cores vermelhas e amarelas é mais intensa quando comparada com as cores da Figura 4.18a. Estas diferenças, devem-se ao facto de as ondas difratadas serem ligeiramente atenuadas devido à absorção da barreira e atingirem o lado oposto com menor amplitude do que quando a barreira não tem absorção.

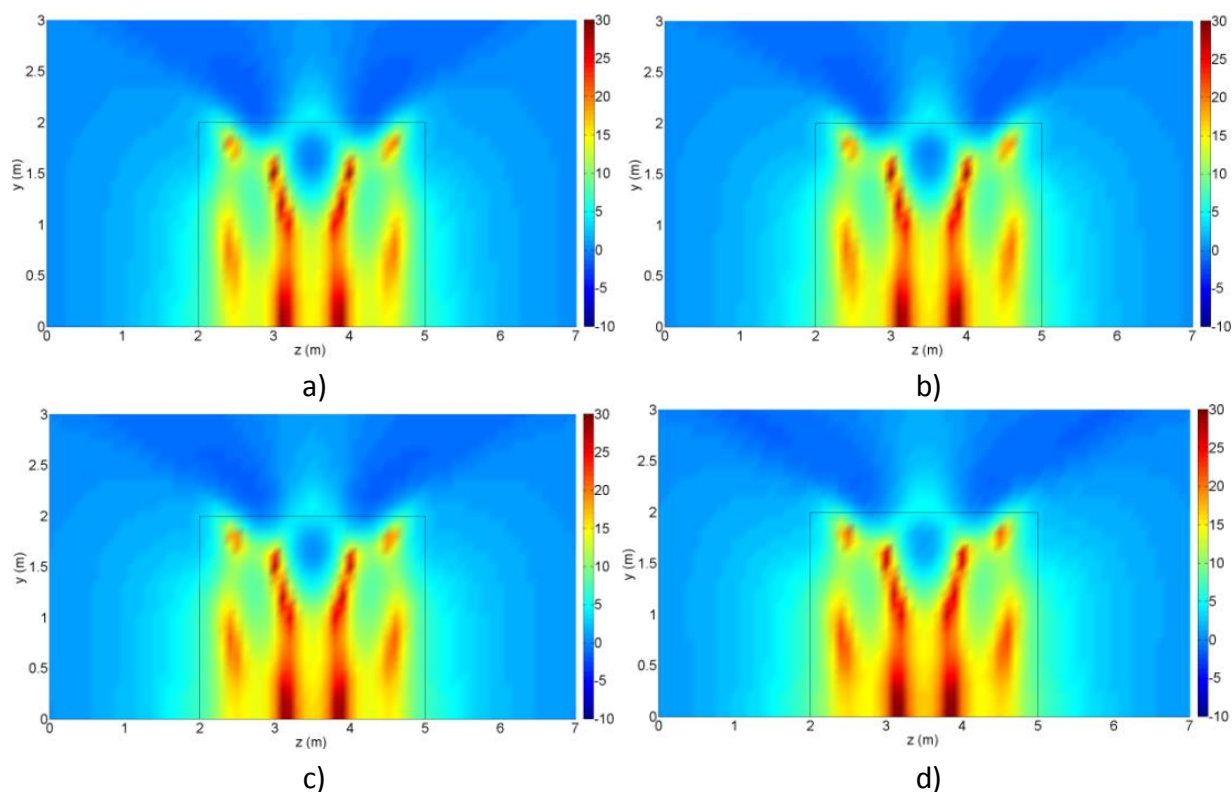


Figura 4.19 – Atenuação sonora, IL, (dB) calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, para a frequência de 250 Hz, para o Caso 1: a) $\alpha = 0$; b) $\alpha = 0,2$; c) $\alpha = 0,5$; d) $\alpha = 0,8$.

Nas Figuras 4.19a a 4.19d, apresentam-se os resultados do cálculo da IL correspondentes à frequência de 250 Hz para os vários coeficientes de absorção em estudo. Observa-se que existe um padrão da localização das zonas de maior atenuação que se mantém para todos os coeficientes de absorção. Para esta frequência a variação de tonalidades de cores, entre figuras, é quase impercetível. Repare-se que, para a frequência de 250 Hz, a atenuação conferida pela barreira é superior à atenuação para a frequência de 125 Hz devido à maior dificuldade da onda de 250 Hz contornar a barreira devido ao seu menor comprimento de onda.

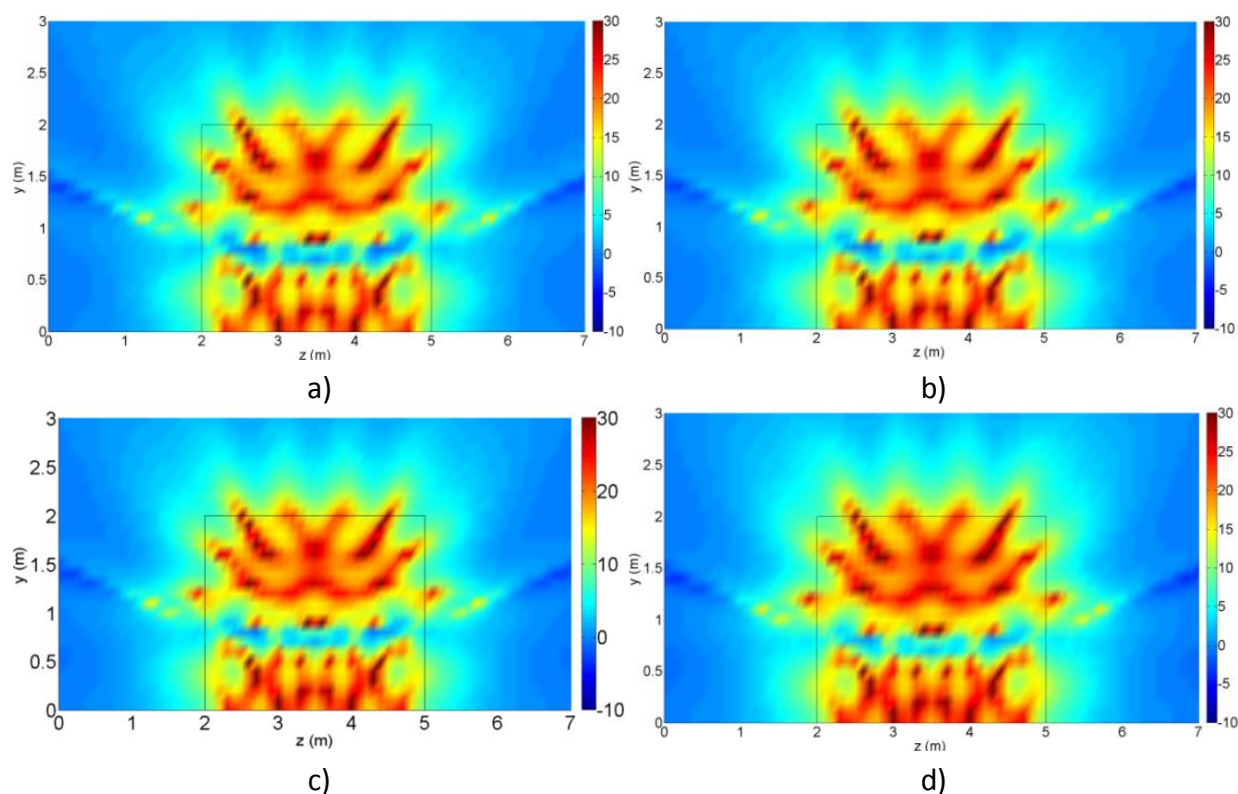


Figura 4.20 – Atenuação sonora, IL, (dB) calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, para a frequência de 500 Hz, para o Caso 1: a) $\alpha = 0$; b) $\alpha = 0,2$; c) $\alpha = 0,5$; d) $\alpha = 0,8$.

Nas Figuras 4.20a a 4.20d são apresentados os cálculos da IL para uma frequência de 500 Hz. Observa-se que o padrão de zonas de atenuação conferida pela barreira se mantém, independentemente do coeficiente de absorção. No entanto, existe uma intensificação das cores vermelhas e amarelas quando $\alpha = 0,8$, o que traduz uma maior atenuação conferida para este coeficiente de absorção. Verifica-se que existe uma zona de menor atenuação sonora, a uma determinada altura da grelha. Este facto deve-se, provavelmente, à interferência com as ondas que são refletidas no pavimento.

Através das Figuras 4.18 a 4.20 é possível comprovar a dependência da IL, da frequência e do coeficiente de absorção do material de que é constituída a barreira e verificar que, de uma forma geral, quanto maior o coeficiente de absorção e a frequência do som incidente, maior a IL.

Nas Figuras 4.21 a 4.23 são apresentados os resultados do cálculo da IL, para o Caso 2, em função da frequência e do coeficiente de absorção da barreira.

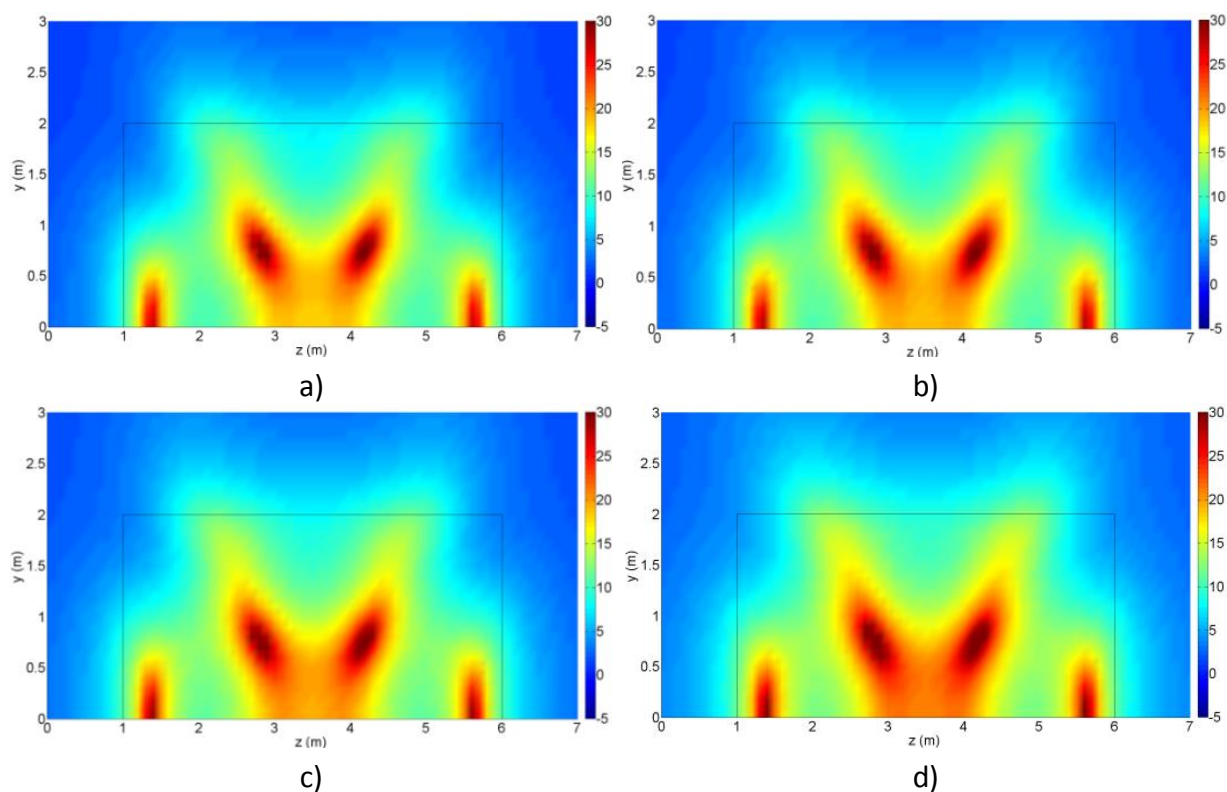


Figura 4.21 – Atenuação sonora, IL, (dB) calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, para a frequência de 125 Hz, para o Caso 2: a) $\alpha = 0$; b) $\alpha = 0,2$; c) $\alpha = 0,5$; d) $\alpha = 0,8$.

Nas Figuras 4.21a a 4.21d podem-se observar os resultados do cálculo da IL quando a frequência em estudo é de 125 Hz. Verifica-se que o padrão de zonas de maior atenuação se mantém, independentemente do coeficiente de absorção sonora que a barreira possui. Existe, no entanto, uma intensificação da tonalidade das cores vermelhas e amarelas crescente do menor coeficiente de absorção para o maior, o que corresponde a um aumento da atenuação (IL).

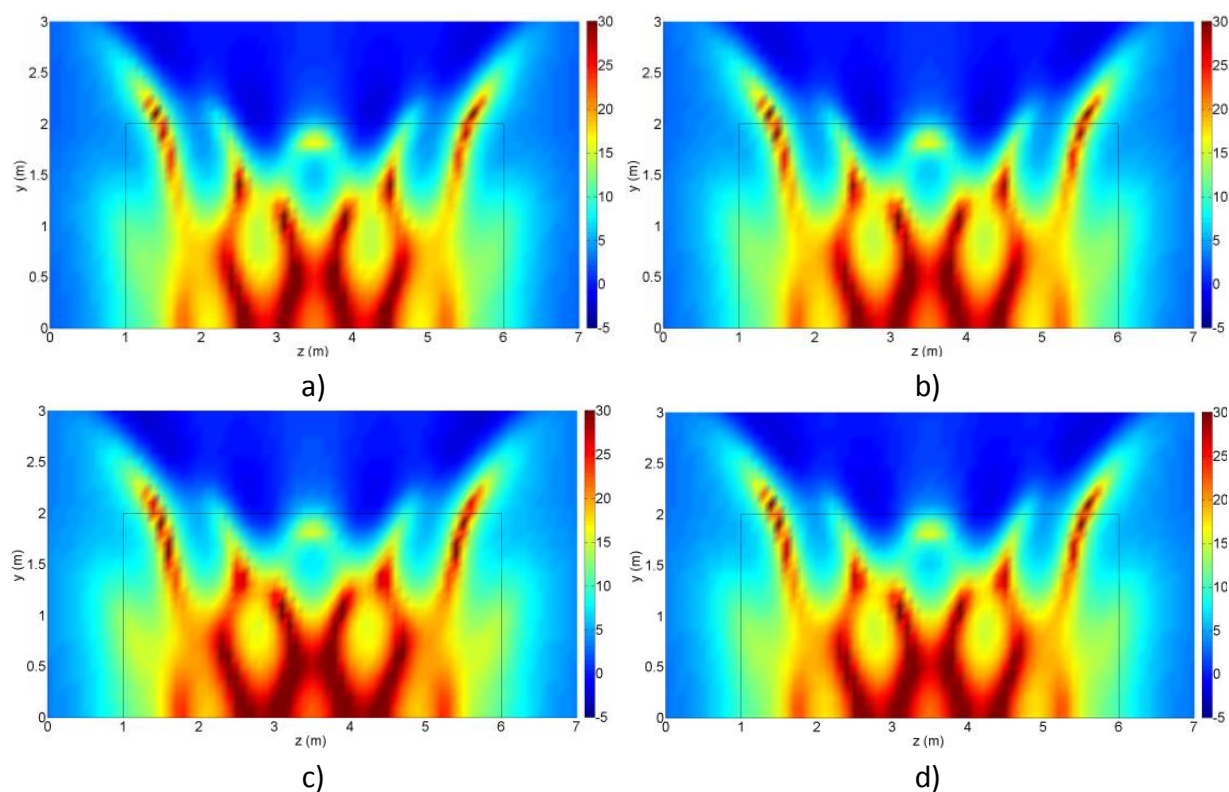


Figura 4.22 – Atenuação sonora, IL, (dB) calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, para a frequência de 250 Hz, para o Caso 2: a) $\alpha = 0$; b) $\alpha = 0,2$; c) $\alpha = 0,5$; d) $\alpha = 0,8$.

Nas Figuras 4.22a a 4.22d são apresentados os resultados da IL para a frequência de 250 Hz. Verifica-se que a zona central da grelha de recetores é a que apresenta maior atenuação, correspondendo a uma maior proteção conferida pela parte central da barreira. À semelhança dos resultados anteriores, existe um padrão de zonas de maior atenuação, traduzidas pelas cores amarelas e vermelhas que se mantém para os vários coeficientes de absorção. Neste caso quase não se percebem variações na intensidade de cores à medida que os coeficientes de absorção são mais altos.

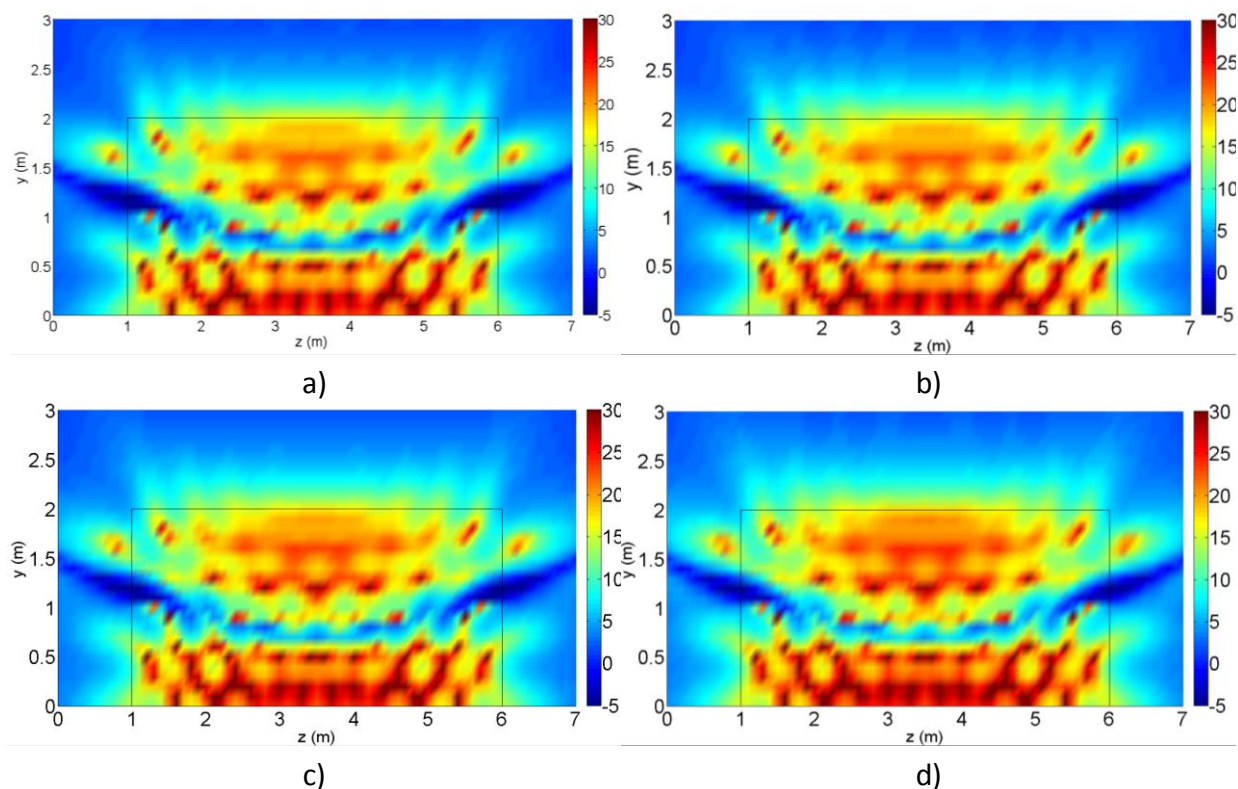


Figura 4.23 – Atenuação sonora, IL, (dB) calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, para a frequência de 500 Hz, para o Caso 2: a) $\alpha = 0$; b) $\alpha = 0,2$; c) $\alpha = 0,5$; d) $\alpha = 0,8$.

Nas Figuras 4.23a a 4.23d são apresentados os resultados do cálculo da IL na frequência de 500 Hz para os diferentes coeficientes de absorção em estudo. Existe uma maior atenuação dos sons, na frequência de 500 Hz, na parte inferior e superior da barreira independentemente do coeficiente de absorção em causa, mantendo-se o padrão de atenuação à medida que o α cresce.

Pela observação das Figuras 4.18 a 4.23 constata-se que quanto maior a frequência, maior a IL da barreira. Para uma mesma frequência, com o aumento do coeficiente de absorção sonora aumenta a atenuação sonora. No entanto, esse aumento é mais visível para as frequências mais baixas.

No cálculo da diferença de nível sonoro (ΔL), do lado da fonte, quando se compara uma barreira rígida com uma barreira com absorção, foi utilizada uma escala comum a todos os exemplos em que as cores variam entre o azul e o vermelho, correspondendo a cor azul a valores de diferença de nível sonoro negativos e o vermelho a valores de diferenças de nível positivos. Nas Figuras 4.24 a 4.32 são apresentados os cálculos de ΔL , no Caso 1, para as frequências de 125, 250 e 500 Hz e para os coeficientes de absorção sonora de 0,2, 0,5 e 0,8.

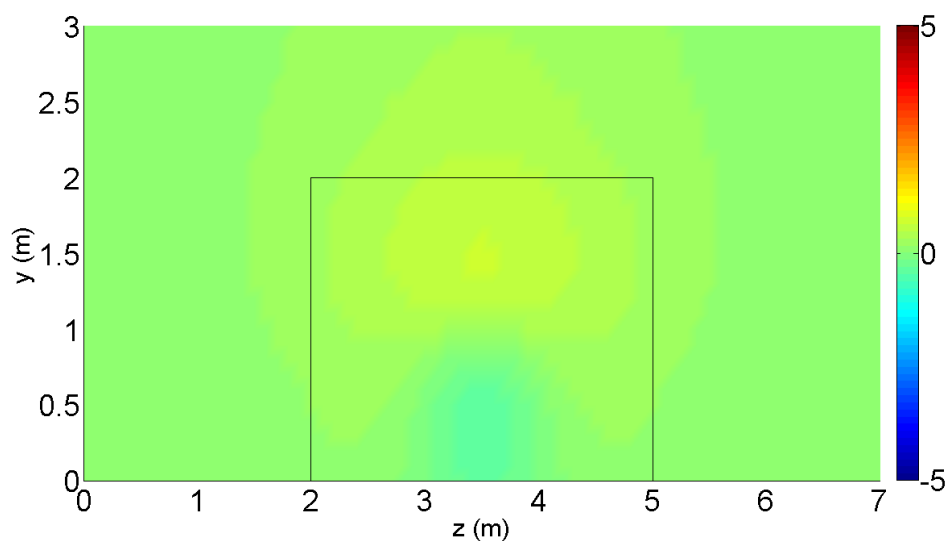


Figura 4.24 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 125 Hz, quando $\alpha = 0,2$, Caso 1.

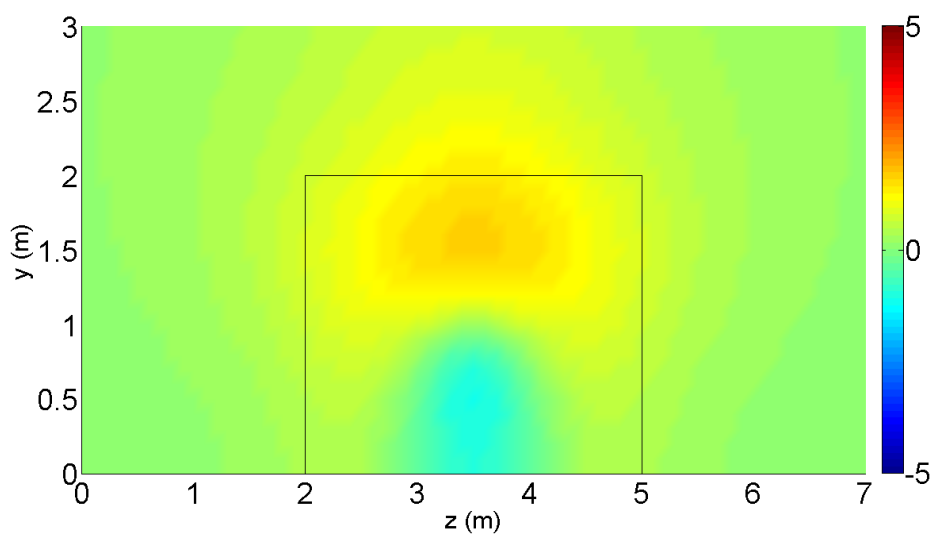


Figura 4.25 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 125 Hz, quando $\alpha = 0,5$, Caso 1.

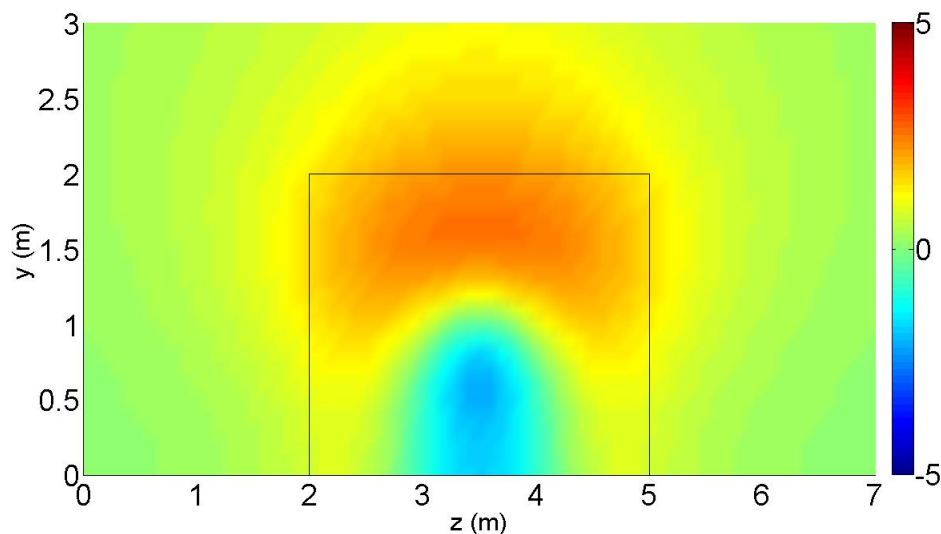


Figura 4.26 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 125 Hz, quando $\alpha = 0,8$
Caso 1.

Nas Figuras 4.24 a 4.26 são apresentados os resultados de ΔL , para a frequência de 125 Hz em função do coeficiente de absorção. Na Figura 4.24 as diferenças de nível sonoro praticamente não existem, a figura tem uma cor verde, relativamente homogénea. Significa que existe pouca diferença entre ter uma barreira rígida, ou com um coeficiente de absorção sonora tão baixo. Na Figura 4.25 para o coeficiente de absorção $\alpha = 0,5$, existem variações de cor pouco significativas, tendo uma zona amarela com diferenças positivas e outra azul claro, correspondendo a diferenças de nível negativas. Na Figura 4.26 as variações já são mais significativas tendo, na zona superior da barreira, diferenças positivas na ordem dos 2,5 dB. A zona a azul, na base da barreira, deve-se à interferência com as ondas refletidas pelo pavimento. Refira-se que, esta é uma frequência baixa, com um comprimento de onda de 2,72 m, muito próximo das dimensões da barreira, e por esse motivo as ondas serão mais dificilmente refletidas pela barreira do que para uma frequência mais alta. Estas condições fazem com que a diferença entre ter uma face rígida ou com absorção sonora não seja demasiado evidente.

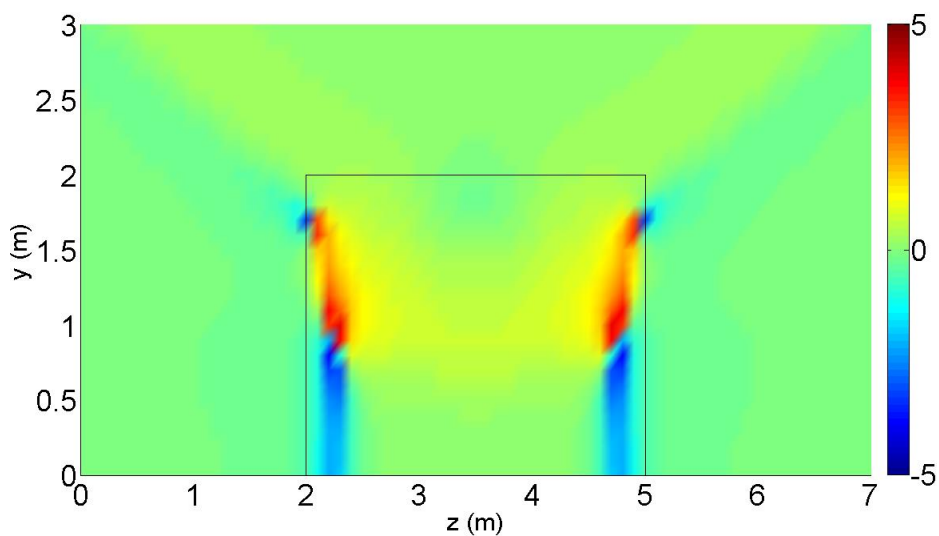


Figura 4.27 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 250 Hz, quando $\alpha = 0,2$
Caso 1.

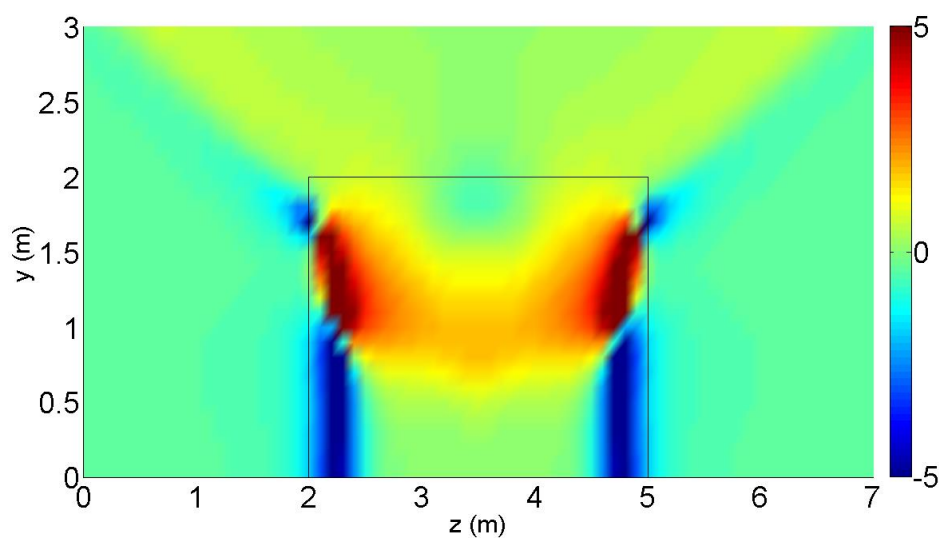


Figura 4.28 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 250 Hz, quando $\alpha = 0,5$
Caso 1.

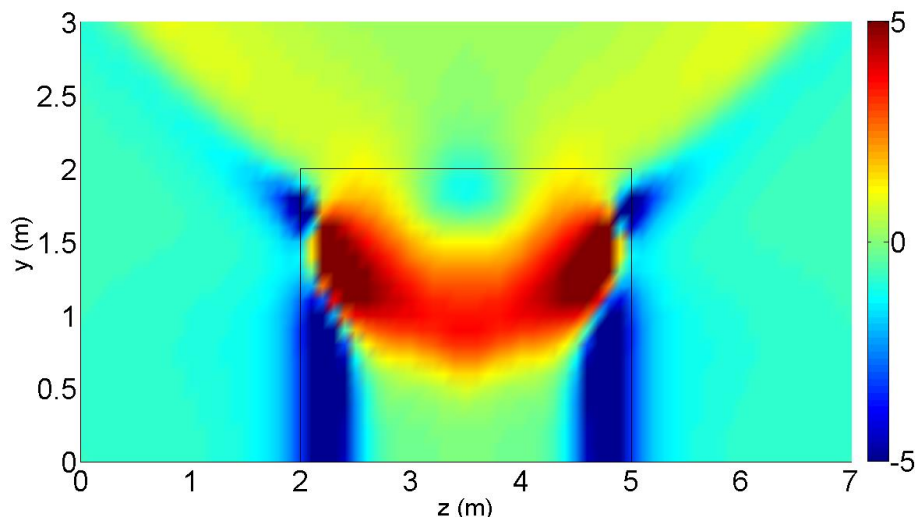


Figura 4.29 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 250 Hz, quando $\alpha = 0,8$
Caso 1.

Nas Figuras 4.27 a 4.29 podem-se verificar os resultados de ΔL para a frequência de 250 Hz, para cada coeficiente de absorção em estudo. As diferenças de níveis de pressão, positivas e negativas, localizam-se principalmente nas de recetores alinhados com as zonas laterais da barreira, existindo uma intensificação dessas duas zonas com o crescimento do coeficiente de absorção. Pode também observar-se que para o coeficiente de absorção maior é evidente o benefício da absorção, mesmo em pontos que ficam em alinhamentos acima da altura da barreira. Neste caso, com o aumento da frequência (em relação ao Caso 1) verifica-se que as diferenças de nível sonoro positivas (onde existem) são superiores.

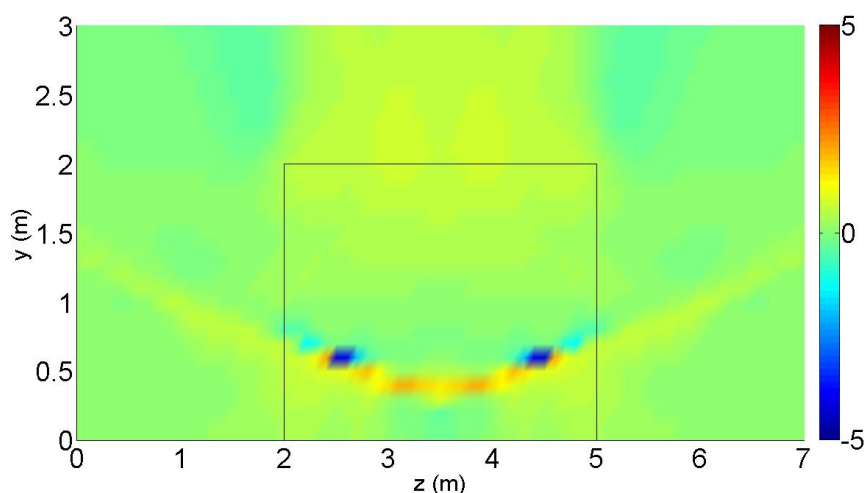


Figura 4.30 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 500 Hz, quando $\alpha = 0,2$
Caso 1.

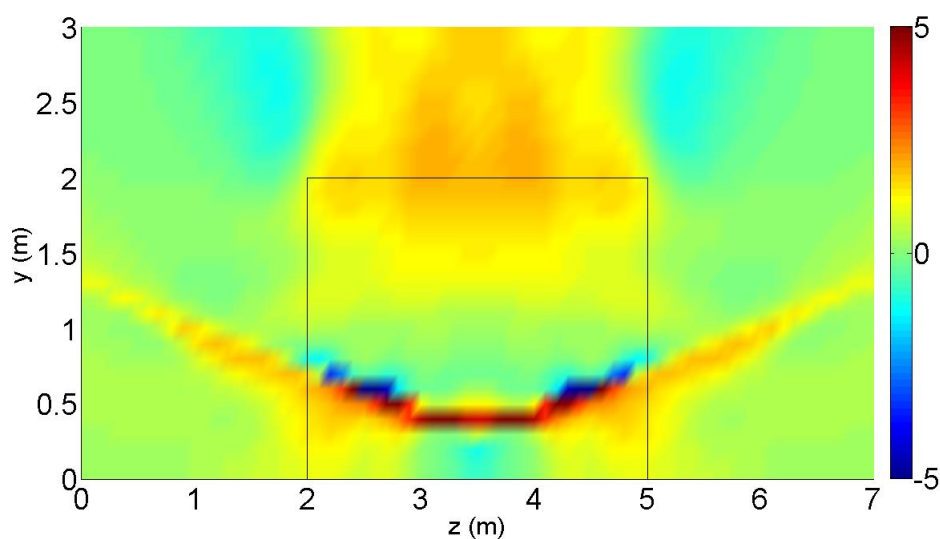


Figura 4.31 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 500 Hz, quando $\alpha = 0,5$
Caso 1.

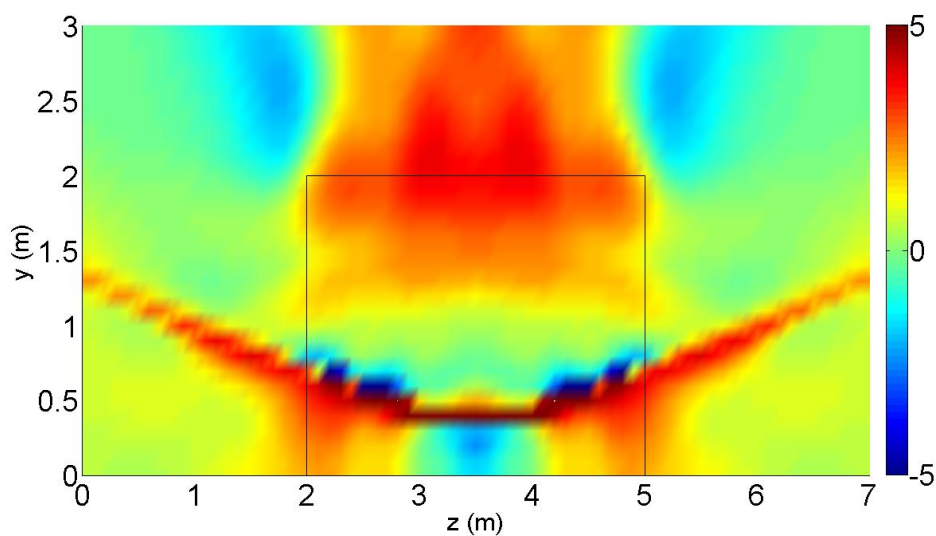


Figura 4.32 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 500 Hz, quando $\alpha = 0,8$
Caso 1.

Nas Figuras 4.30 a 4.32 apresentam-se os resultados dos cálculos de ΔL para a frequência de 500 Hz em função do coeficiente de absorção sonora da barreira. Verifica-se, pela observação destas figuras, que existe um padrão comum para os três coeficientes de absorção sonora. Na Figura 4.30 as principais diferenças de nível sonoro são focalizadas somente na área central da barreira, enquanto na Figura 4.32 essas diferenças são intensificadas, para a mesma área.

Além disso, surgem outras zonas, onde existe uma diferença de níveis sonoros maior, na ordem dos 3 dB, como por exemplo zonas que ficam em alturas correspondentes à parte superior da barreira e alturas superiores, e zonas laterais exteriores ao alinhamento da barreira.

Verifica-se que à medida que aumenta, simultaneamente, a frequência do som e o coeficiente de absorção sonora da barreira, o efeito da absorção é vantajoso numa superfície que transcende mesmo as dimensões da barreira. Refira-se que, se o plano de recetores, em estudo, fosse mais próximo ou mais afastado da barreira, as diferenças de níveis sonoros obtidas poderiam ser distintas devido à interferência das diversas ondas sonoras.

São apresentados os cálculos relativos ao Caso 2, nas Figuras 4.33 a 4.41, para as várias frequências e coeficientes de absorção.

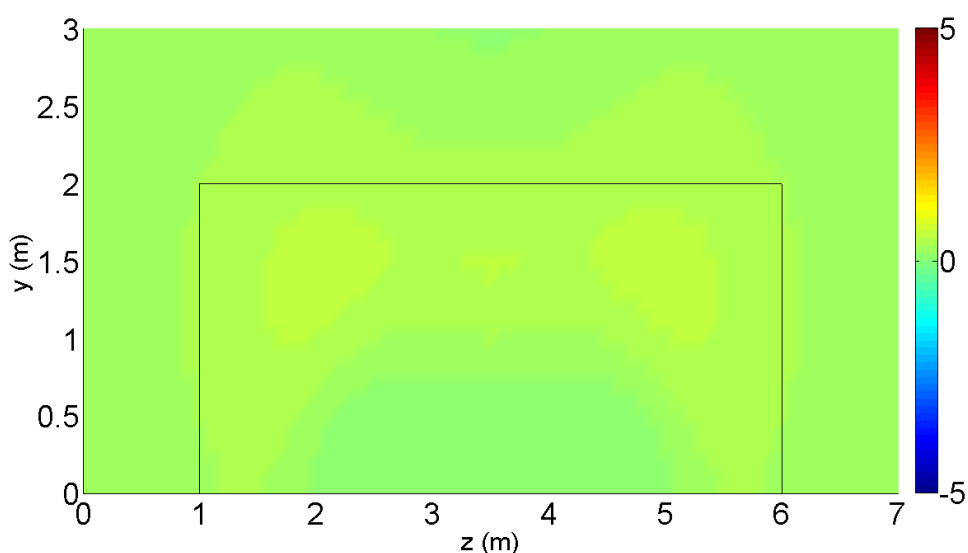


Figura 4.33 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 125 Hz, quando $\alpha = 0,2$
Caso 2.

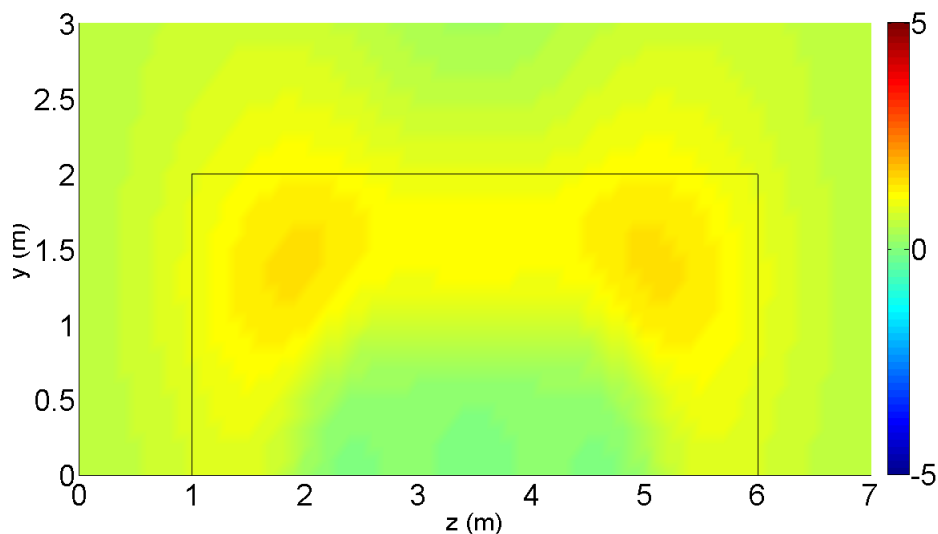


Figura 4.34 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 125 Hz, quando $\alpha = 0,5$
Caso 2.

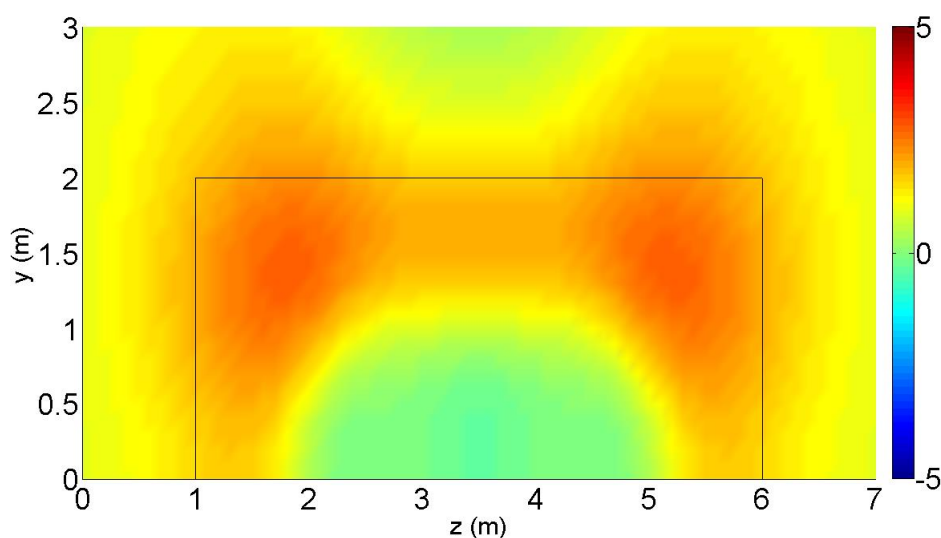


Figura 4.35 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 125 Hz, quando $\alpha = 0,8$
Caso 2.

Nas Figuras 4.33 a 4.35 estão representados os resultados dos cálculos de ΔL para a frequência de 125 Hz. Verifica-se que, na Figura 4.33, as diferenças de níveis sonoros são praticamente nulas, sendo a cor verde a que predomina em toda a grelha de recetores. Não significa, necessariamente, que as diferenças de nível sonoro são iguais a zero, mas que, com

a escala adotada, não são perceptíveis grandes diferenças. Na Figura 4.35 existem, principalmente, duas zonas de diferenças positivas na ordem dos 2 dB.

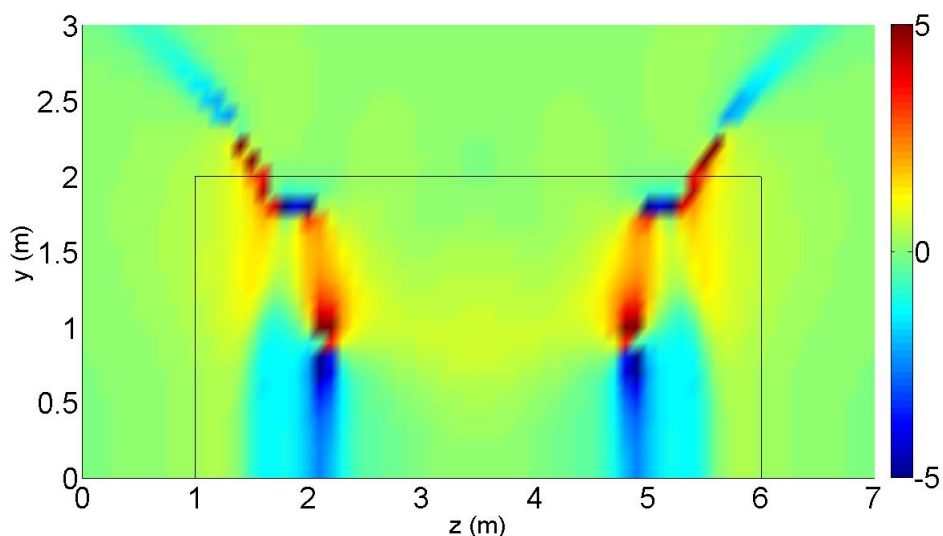


Figura 4.36 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 250 Hz, quando $\alpha = 0,2$
Caso 2.

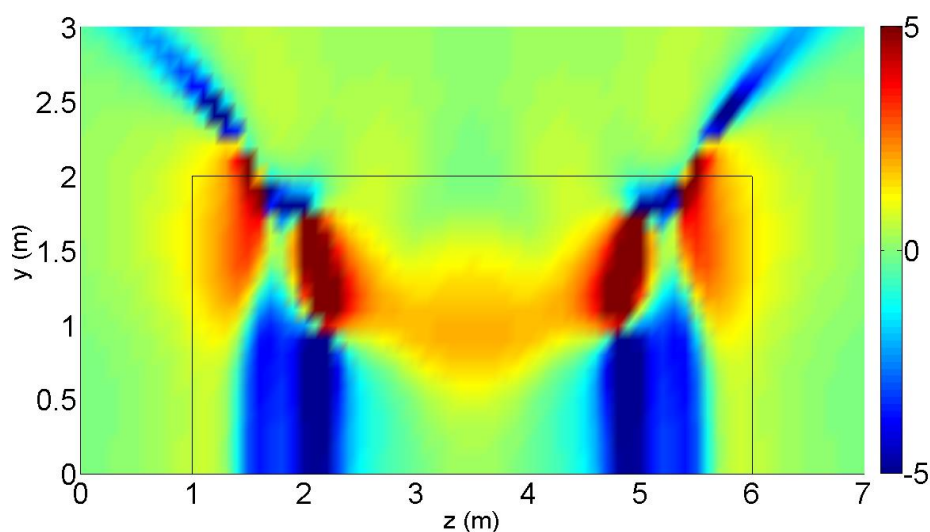


Figura 4.37 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 250 Hz, quando $\alpha = 0,5$
Caso 2.

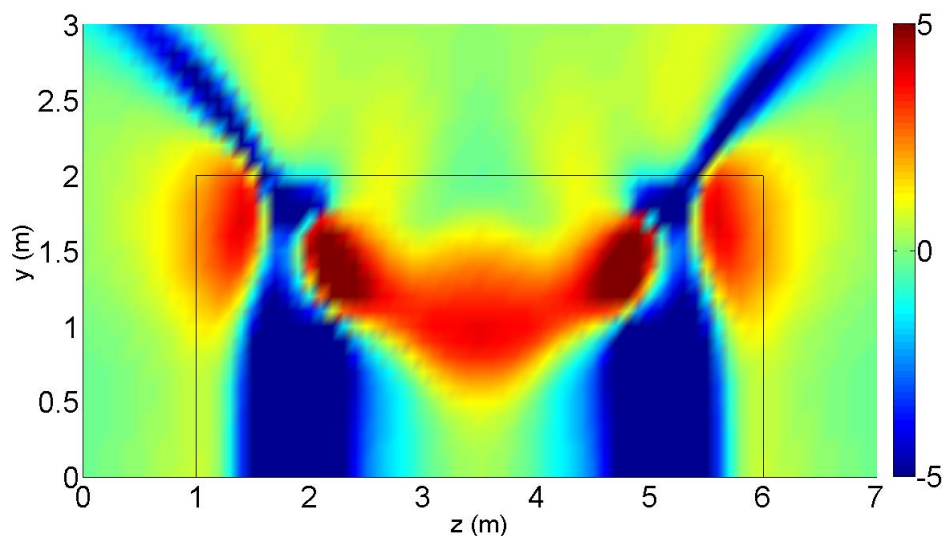


Figura 4.38 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 250 Hz, quando $\alpha = 0,8$
Caso 2.

Os resultados de ΔL , para a frequência dos 250 Hz, são apresentados nas Figuras 4.36 a 4.38. Para esta frequência, as principais diferenças de nível sonoro verificam-se em zonas alinhadas com as extremidades da barreira, onde, para $\alpha = 0,8$, por exemplo, se verificam tanto diferenças positivas significativas na ordem dos 5 dB ou mais, como diferenças negativas significativas na ordem dos menos 5 dB ou mais.

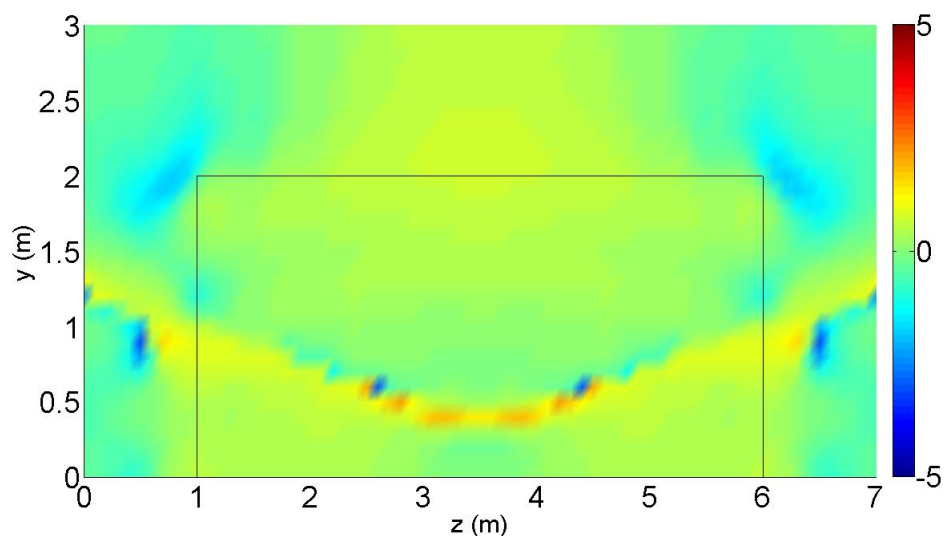


Figura 4.39 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 500 Hz, quando $\alpha = 0,2$
Caso 2.

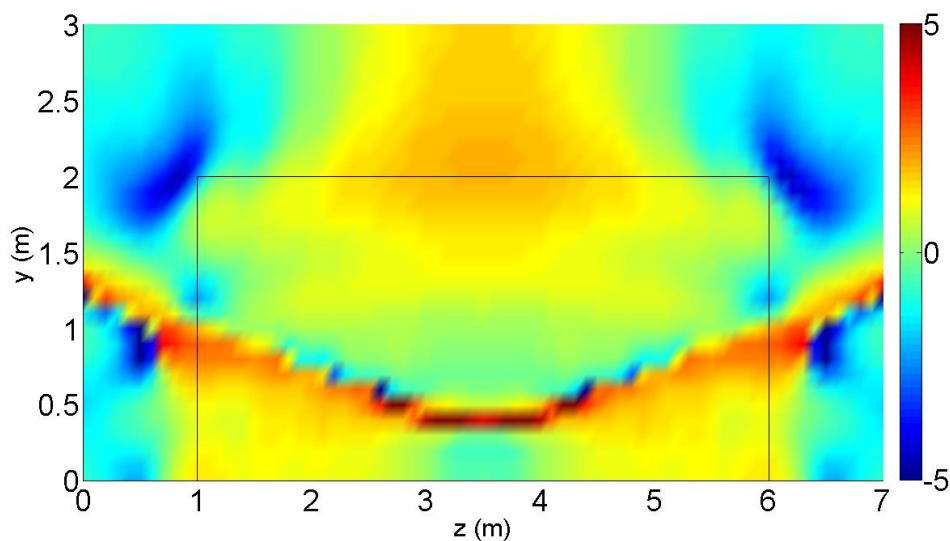


Figura 4.40 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 500 Hz, quando $\alpha = 0,5$
Caso 2.

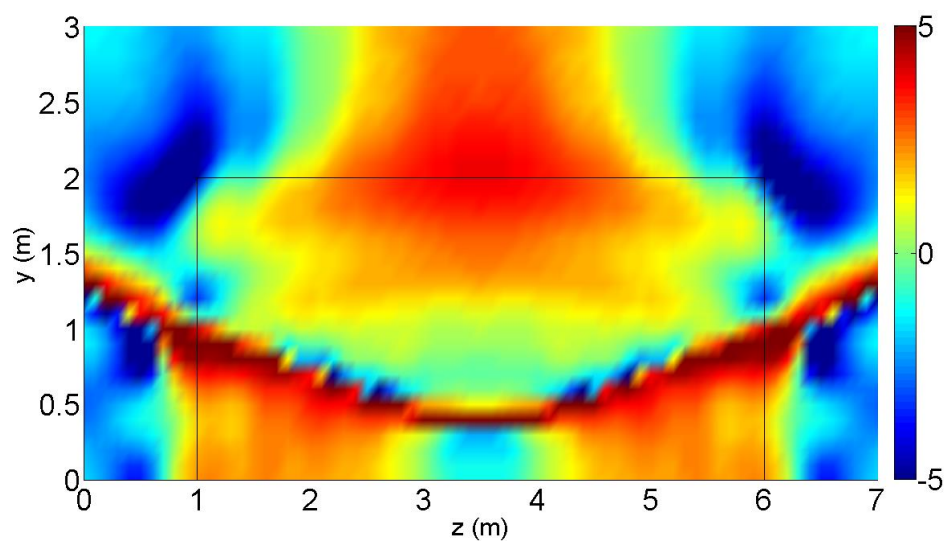


Figura 4.41 – Diferença de nível sonoro, ΔL , calculada numa grelha de recetores num plano vertical paralelo à barreira, (do lado da fonte), para a frequência de 500 Hz, quando $\alpha = 0,8$
Caso 2.

Nas Figuras 4.39 a 4.41 apresentam-se os resultados dos cálculos de ΔL , relativos à frequência de 500 Hz. Na Figura 4.39 as diferenças de nível sonoro positivas observam-se, essencialmente, numa zona da grelha, de recetores, alinhada com a parte central da barreira, sob a forma de arco. Nas Figuras 4.40 e 4.41, a diferença de nível sonoro, na grelha de

recetores, apresentam o mesmo padrão, mas, agora, com uma maior variação na tonalidade das cores, existindo, para o caso em que $\alpha = 0,8$, diferenças de nível sonoro na ordem dos 5 dB ou mais. Na Figura 4.41 verifica-se, também, que na zona da grelha alinhada com o exterior da barreira (cantos superiores da grelha) existem zonas com diferenças de níveis sonoros negativas, na ordem dos menos 5 dB ou mais.

Verifica-se que o padrão de diferença de nível sonoro, ao longo da grelha de recetores, é semelhante entre o Caso 1 e o Caso 2, para uma mesma frequência e coeficiente de absorção, à exceção de que no Caso 2 a área ocupada pelo padrão é maior devido a uma maior área da face exposta da barreira. Também se constata que, devido à interferência das ondas sonoras, quando a barreira apresenta maiores dimensões surgem zonas onde as diferenças de nível negativas são mais intensas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho, aplicou-se uma formulação dual do Método dos Elementos Fronteira em três dimensões para simular a propagação de ondas sonoras na presença de barreiras acústicas. A formulação aplica a equação integral clássica do Método dos Elementos de Fronteira numa parte da barreira e a derivada da equação integral noutra parte da barreira. Nesta formulação, que considera a barreira como um corpo rígido, foi atribuída absorção sonora à superfície da barreira através da imposição de condições fronteira de impedância. Inicialmente, fez-se a verificação do modelo recorrendo a uma solução analítica (para $\alpha = 0,0$) e à observação dos resultados do modelo para ($\alpha = 1,0$), o que permitiu aferir a adequação do modelo à simulação dos fenómenos físicos em causa.

O modelo foi aplicado a vários casos de estudo. Em todos os casos de estudo as barreiras estão colocadas sobre um pavimento refletor. Apenas as barreiras são discretizadas por elementos fronteira. A existência do pavimento é simulada através da utilização de soluções fundamentais, que são integradas no modelo, usando a técnica das fontes imagem. Nos Casos 1 e 2 simulou-se uma barreira isolada com dimensões de 3m x 2m e de 5m x 2m, respetivamente, e com 10 cm de espessura. No caso 3 simulou-se a barreira do Caso 1 na proximidade de um plano refletor vertical (ex.: fachada). Neste caso o plano vertical também foi introduzido no modelo usando a técnica das fontes imagem. No caso 4 simularam-se duas barreiras paralelas com as dimensões da barreira do Caso 1 afastadas de 5,9 m. Nas simulações dos casos descritos fez-se variar o coeficiente de absorção sonora atribuído à face da barreira voltada para a fonte sonora.

Os cálculos foram efetuados no domínio da frequência e, pela aplicação de uma transformada inversa de Fourier, foram transformados para o domínio do tempo. Calcularam-se resultados no domínio do tempo para os Casos 1, 3 e 4, que permitiram, através de animações, acompanhar a propagação das ondas sonoras na presença dos vários obstáculos ao longo do tempo e apreciar a influência da absorção sonora, existente na barreira, na amplitude do campo de pressões.

Para os Casos 1 e 2, nas frequências de 125, 250 e 500 Hz, estudou-se a perda por inserção (IL) conferida pela barreira e a diferença de níveis de pressão sonora (ΔL), do lado da fonte, para as situações em que a face da barreira não é absorvente ($\alpha = 0$) e em que a face da barreira possui absorção ($\alpha \neq 0$).

Pela análise dos resultados, em função do tempo, pode-se constatar que quanto maior o coeficiente de absorção da barreira, menores são as reflexões.

Ao disporem-se duas barreiras paralelas rígidas ($\alpha = 0$), verifica-se que o som sofre sucessivas reflexões entre estas. Consequentemente, demora mais tempo a ser dissipado, do que numa situação em que $\alpha \neq 0$, porque a amplitude das reflexões (na barreira) é cada vez menor devido à existência de absorção. A existência de duas barreiras sem absorção amplifica o nível sonoro nas proximidades da fonte, quando comparado com a situação em que não existem barreiras. Assim, a colocação de absorção sonora, na face da barreira do lado da fonte é importante, nesta situação, para atenuar esse fenómeno. Quando existe um plano vertical refletor, próximo da barreira, existem também reflexões sucessivas entre os dois planos. Nesta situação teria sido vantajoso colocar também absorção do lado contrário da fonte, uma vez que só se colocou do lado da fonte.

Pela análise dos resultados em função da frequência é possível verificar, para frequências e coeficientes de absorção mais elevados, que as barreiras estudadas têm uma IL mais elevada, sobretudo na zona central das mesmas. Para a mesma frequência, existe um padrão de zonas de maior IL, independentemente do coeficiente de absorção em estudo. A atenuação é muito mais influenciada pelas dimensões da barreira e pela frequência do som do que pela absorção sonora. Relativamente à diferença de níveis sonoros (ΔL), do lado da fonte, pelo facto de se usar absorção, verificou-se que quanto maior o coeficiente de absorção maior o valor de (ΔL). Para coeficientes de absorção muito baixos (ex.: $\alpha = 0,2$) a diferença de nível sonoro é muito baixa, o que indica que não será aconselhável usar coeficientes de absorção sonora tão baixos.

Observou-se também, nalgumas zonas dos planos de recetores em estudo, a existência de IL ou diferenças de nível sonoro com valores negativos. Esta situação deve-se à interação das várias ondas difratadas/ refletidas na barreira com ondas refletidas no pavimento.

Este estudo não ficou completo com os exemplos apresentados. Considera-se que poderá haver um desenvolvimento do mesmo através da modelação de algumas situações que não foram consideradas e também desenvolvendo o modelo numérico, tornando-o mais complexo e possibilitando a simulação de situações para o qual não está adaptado. Consideram-se, a seguir, algumas hipóteses de trabalhos futuros.

- Poder-se-ia atribuir propriedades absorventes à barreira, do lado contrário à fonte, e ao plano vertical refletor (fachada) ou ao pavimento.
- A simulação de dois planos verticais refletores (fachadas), um de cada lado, para um conjunto de duas barreiras paralelas, poderia simular situações que existem na realidade.

- Também se poderia fazer uma análise da influência da variação da espessura da barreira na amplitude da propagação das ondas sonoras.
- A atenuação sonora (IL) e a diferença de nível sonoro (ΔL) poderiam ser calculadas em planos mais próximos ou mais afastados das barreiras.
- A variação do coeficiente de absorção em função da frequência, para os cálculos no domínio do tempo será outra hipótese, pois, nos exemplos que se apresentaram considerou-se um coeficiente de absorção constante ao longo da frequência.
- A modelação de blocos tridimensionais poderia simular a presença de edifícios.
- O modelo numérico poderia ser alterado de forma a modelar o corpo da barreira como um objeto elástico, através do qual houvesse transmissão de ondas sonoras.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- António, J. (2012). “Acústica Ambiental”, apontamentos teóricos da disciplina de Acústica Ambiental do Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, Departamento de engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- António, J., Tadeu, A., Castro, I. (2013), “Performance of double 3D rigid barriers used to create an acoustic space – A normal derivative integral equation approach”. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 332, issue 13, pages 3258-3269.
- Arbetarskyddsfonden, 1986, “Noise control”, Ncerum Offset.
- Associação Portuguesa do Ambiente (APA), (2004), “Ruído e a cidade”, Instituto do Ambiente.
- Attenborough, K. (2002) “Sound Propagations close to the ground”, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol.34, pages 51-82.
- BEM S&S (2012), “IsoBEM Theory Manual”, version 1.0, BEM S&S.
- Bies, D. A., Hansen, C. H. (2003), “Engineering Noise Control: Theory and Practice”, 3ª Edição, Spon Press.
- Bouchon M. e Aki K. (1977), “Discrete wave-number representation of seismic source wave field”. *Bull Seism Soc Am*, 67:259–77.
- Bragança, L., Freitas, E., Pinheiro, D. (2006), “Eficácia de Barreiras Acústicas”. Departamento de Engenharia Civil da universidade do Minho, Guimarães.
- Brooks, L., Morgans, R. (2005), “Learning Acoustics and the Boundary Element Method, Using Helm3D and GiD”, Tutorial material, School of Engineering, University of Adelaide, Australia.
- Brown, E., Hall, F. (1978), “Advances in Atmospheric acoustics”, NOAA/ERL Wave Propagation Laboratory, Vol 16, No 1.
- Bruel e Kjøer, e Vibration Measurement A/S, (2001), “Ruído Ambiental”.
- Campbell G. e Foster R. (1932), “Fourier integrals for practical applications”. *Syst Tech Publ, Math Phys, Monogr B-584*.
- Chen, Z., Maher, R. (2004), “Atmospheric sound propagation considerations for the Birdstrike Project”. Universidade do Estado de Montana, USA.
- Clum, C. (1997), “Highway traffic noise barrier overlap gap model”. Dissertação apresentada para obtenção do grau de mestre em ciência, Universidade de Ohio.
- Crocker, M. (2007), “Handbook of Noise and Vibration Control”. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Crombie, D., Hothersall, D., Chandler-Wilde, S. (1995) “Multiple-edge noise barriers”. *Applied Acoustics*. Vol. 44, No 4, pages 353-367.

- Daigle, G. (1999) “Technical assessment of the effectiveness of noise walls – Final Report”. *Noise/News International*, I-INCE Publication 99-1, pages 137- 161.
- Daigle, G. (2010), “Effectiveness of noise barriers”. *Internoise 2010, noise and sustainability*, 13 – 16 June, Lisbon.
- Daltrop, S. (2011), “Investigation of Factors Affecting the Performance of Roadside Noise Barriers”. Master degree’s thesis, University of British Columbia, Vancouver.
- Decreto-Lei n.º 146/2006, *Diário da República*, I Série. 146 (06-07-31) 5433-5441.
- Decreto-Lei n.º 9/2007, *Diário da República*, I Série. 12 (07-01-17) 389-398.
- Department of the army and the air force (1995), “Noise and Vibration control”. Technical Manual.
- Diretiva 2002/49/CE do Parlamento Europeu e do conselho de 25 de Junho de 2002, relativa à avaliação e gestão do ruído ambiente, *Jornal Oficial das Comunidades Europeias*, 2002.
- Egan, C., Chilekwa, V., Oldham, D. (2006), “An investigation of the use of top edge treatments to enhance the performance of a noise barrier using the boundary element method”. *Thirteenth International Congress in Sound and Vibration*, Vienna, Austria.
- Environmental Protection Department, Highway Department, Government of Hong Kong (2003), “Guidelines design of noise barriers”.
- Fard, S., Kessissoglou, N., Samuels, S., Burgess, M. (2013), “Numerical study of noise barrier designs”, *Acoustics 2013: Science Technology and Amenity*, 17-20 November, Victor Harbor, South Australia.
- FHWA@ (2014): <https://www.fhwa.dot.gov/environment/noise/> U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration (página internet oficial), Washington, DC.
- Foss, R. (1975) "Noise Barrier Screen measurements, Single Barriers." Estudo desenvolvido em parceria com FHWA.
- Freitas, E., Trábulo, L. (2007) “Desempenho de Barreiras Acústicas – dois métodos de avaliação”. *Revista Engenharia Civil*. No 29, pages 15-26. Parceria Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho e AENOR, autoestradas do Norte, S.A..
- Fujiwara K., Hothersall D., Kim C. (1998), “Noise Barriers with Reactive Surfaces”. *Applied Acoustics*, Vol. 53, No 4, pages 255-272.
- Gauvreau, B., Bénerngier, M., Blanc-Benon, P., Depollier, C. (2002). “Traffic noise prediction with the parabolic equation method: Validation of a split-step Padé approach in complex environments”. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 112, Issue 6.
- Gilbert, K., White, M. (1988) “Application of the parabolic equation to sound propagations in a refracting atmosphere”. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 85, Issue 2
- Granadeiro, C. (2008), “Ruído Fatal”, *Revista Segurança*.
- Hendriks R., Rymer B., Buehler D., Andrews J. (2013), “Technical Noise Supplement to the Caltrans Traffic Noise Analysis Protocol-A Guide for the Measuring, Modeling, and Abating Highway Operation and Construction Noise Impacts “. Departamento de transportes de California.

- Ishizuka T., Fujiwara K. (2004), "Performance of noise barriers with various edge shapes and acoustical conditions". *Applied Acoustics*, No 65, pages 125-141.
- ISO 9613-2, "Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 2: General method of calculation". Reference number ISO 9613-2:1996 (E).
- Kaiser, F. (2011), "The Boundary Element Method in Acoustic – An internship report", Universidad Technical de Berlin.
- Keller, J. (1962), "Geometrical theory of diffraction", *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 52, Issue 2, pages 116-130.
- Knauer, H., Pedersen, S., Lee, C., Fleming, G. (2000), "FHWA highway noise barrier, design handbook". Relatório final.
- Koussa, F., Defrance, J., Jean, P., Blanc-Benon, P. (2012), "Transport noise reduction by low height sonic crystal noise barriers", *Proceedings of the Acoustics 2012*, 23-27 April, Nantes Conference, France.
- Kwok-Leung (2008), "Evaluating effects of vegetation". Dissertação para obtenção do grau de mestre em Filosofia. Universidade Politécnica de Hong Kong.
- Larsson, C. (1997), "Atmospheric absorption conditions for horizontal sound propagation", *Applied Acoustics*, Vol. 50, No 3, pages 231-245.
- Leissing, T. (2007). "Nonlinear outdoor sound propagation". Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiente da Universidade tecnológica de Chalmers, Goteborg, Suécia.
- Lihoreau, B., Gauvreau, B., Bénerngier, M., Blanc-Benon, P., Calmet, I. (2006), "Outdoor sound propagation modeling in realistic environment: Application of coupled parabolic and atmospheric models". *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 120, Issue 1.
- Liu, Y. e Sen, M. (2009), "Advance finite-difference methods for seismic modeling", *GEOHORIZONS*, Dezembro 2009/5.
- Majjala, P. (2011), "Noise propagation in the atmosphere from wind power plants", *Research Report VTT-R-00030-11*.
- Maria, M. (2010), "Estudo analítico e numérico do espalhamento acústico", Programa de Pós-Graduação em modelagem matemática e Computacional, Belo Horizonte, Brasil.
- Menge, C., Rossano, C., Anderson, G., Bajdek, C. (1998), "FHWA Traffic noise model", *Technical manual, Final Report*.
- Menounou P. (2001), "A correction to Maekawa's curve for the insertion loss behind barriers". *Acoustic society of America* 110, 1828.
- Morgan, P., Hothersall, D., Chandler-Wilde, S., (1998), "Influence of shape and absorbing surface - a numerical study of railway noise barriers". *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 217, issue 3, pages 405-417.
- Noordhoek, I., Salomons, E. (2002), "Choice of basic sound propagation models". *Technical report, Harmonoise. Doc. Identity HAR24-TR021018-TNO10.doc*.
- Pigasse, G., Kragh, J. (2011), "Optimized Noise Barriers, a state-of-art report". Danish Road Institute, published by Vejdirektoratet.

- Quitesst (2012), “Guidebook to noise reducing devices optimization”. Seventh Framework Programme, theme 7: Transport. Doc number FP7-SST-2008-RDT-1.
- Renterghem, T., Salomons, E., Botteldooren, D. (2005). “Efficient FDTD-PE Model for Sound Propagations In Situations with Complex Obstacles and Wind Profiles”. *Acta Acustica united with acustica*, vol 91, pages 671-679.
- Simpson, M. (1976), “Noise Barrier Design Handbook”. Report No. FHWA-RD-76-58. Bolt Beranek e Newman, Inc., Arlington, Virginia.
- Suh, S., Mongeau, L., Bolton, J. (2001), “Study of the Performance of Acoustic Barriers for Indiana Toll Roads”, Relatório final nº FHWA/IN/JTRP-2001/20.
- Tadeu A., António, J., Castro, I. (2012) “Sound pressure attenuation provided by a 3D rigid acoustic barrier on a building façade: the influence of its longitudinal shape”. *Boundary Elements and Other Mesh Reduction Methods XXXIV*, 25-27, Split, Croatia.
- Tadeu, A., António, J., Mendes, P., Godinho, L. (2007), “Sound pressure level attenuation provided by thin rigid screens coupled to tall buildings”, *Journal of Sound and Vibration*, 304, pages 479-496.
- Tadeu, A., Santos, P. e Kausel, E. (1999), “Closed-form integration of singular terms for constant, linear and quadratic boundary elements”. Part I. SH wave propagation. *Engineering Analysis with Boundary Elements* 23 671-681.
- Terai, T. (1980), “On calculation of sound fields around three dimensional objects by integral equation methods”. *Journal of Sound and Vibration* 69 71-100.
- Villarreal, A. e Scales, J. (1997), “Distributed three-dimensional finite-difference modeling of wave propagation in acoustic media”, *Computer in Physics*, Vol. 11, issue 4, AIP Publishing.
- Wakefield Acoustics Ltd., (2012), “City of Vancouver Noise Control Manual”
- Watson, D. (2006), “Evaluation of Benefits and opportunities for innovative noise barrier designs”, Relatório Final 572, Cooperação entre o Departamento de Transportes de Arizona e o FHWA, Arizona.
- Watts, G. (1996a), “Acoustic Performance of Parallel traffic noise barriers”, *Applied Acoustics*, Vol. 47, No 2, pages 95-119.
- Watts, G. (1996b), “Acoustic Performance of a Multiple Edge Noise Barrier Profile at Motorway Sites”. *Applied Acoustics*, Vol.47, pages 47-66.
- Watts, G. (2002), “Barriers designed to reduce road traffic noise”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Transport* 153, Paper 12680, Issue 2, pages 79-86
- Watts, G., Morgan, P., Surgand M. (2003), “Assessment of the diffraction efficiency of novel barrier profiles using an MLS- based approach”. *Journal of Sound and Vibration* 274, pages 669-683.
- Xavier, S. (2009), “Comportamento de barreiras acústicas em Portugal”. Apresentação de dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro, Aveiro.