

CRIAÇÃO DE UM ESPAÇO ACÚSTICO COM BARREIRAS DUPLAS 3D – FORMULAÇÃO TBEM

Julietta António¹, António Tadeu¹, Igor Castro²

¹ Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra
{julieta, tadeu@dec.uc.pt}

² Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção – ITECons
igorasc@itecons.uc.pt

Resumo

No presente trabalho simula-se o comportamento de barreiras duplas 3D para criar um espaço acústico com alguma privacidade quando inseridas no interior de grandes espaços. As barreiras são modeladas como elementos rígidos finos. A propagação do som gerado por fontes pontuais na vizinhança das barreiras é simulada, no domínio da frequência, utilizando uma formulação de uma equação integral derivada em elementos de fronteira (TBEM). No modelo utilizam-se soluções fundamentais adequadas para simular superfícies reflectoras (pavimento, paredes) na vizinhança das barreiras. São simuladas diferentes geometrias para as barreiras, assim como a sua posição relativa em relação a uma parede lateral. A partir dos resultados obtidos no domínio da frequência calcula-se o campo de pressões no domínio do tempo através da aplicação de uma transformada inversa de Fourier. São também apresentados os valores da atenuação sonora em receptores localizados entre as duas barreiras, no domínio da frequência.

Palavras-chave: Barreiras 3D, espaço acústico interior, elementos de fronteira, atenuação sonora.

Abstract

This work simulates the performance of double 3D barriers, placed so as to create an acoustic space inside large indoor rooms. The barriers are assumed to be very thin rigid elements. The propagation of sound generated by point pressure sources in the vicinity of the barriers is simulated, in the frequency domain, implementing a 3D normal derivative integral equation using boundary element method (TBEM) formulation. Appropriate fundamental solutions are used to take into account reflecting planes (floor, wall) in the vicinity of the barriers. Different barrier shape geometries and their relative position with respect to a lateral wall are simulated. The pressure field in the time domain is obtained by inverse Fourier transforming the frequency domain results. Insertion loss results are calculated, in frequency domain, for receivers placed between the pair of barriers.

Keywords: Double barriers, indoor acoustic space, boundary elements, insertion loss.

PACS no. 43.50.Gf, 43.55.Ka

1 Introdução

Entre as medidas de mitigação do ruído ambiente exterior e interior (em locais de trabalho), encontra-se a aplicação de barreiras acústicas. O estudo destes dispositivos de redução do ruído tem sido tópicos de investigação nas últimas décadas com o objectivo de compreender melhor o seu funcionamento e de definir configurações dos mesmos que conduzam a desempenhos óptimos. A fase de projecto é de extrema importância e por este motivo vários investigadores se têm dedicado ao estudo de novas configurações e à simulação do comportamento das barreiras acústicas. O desenvolvimento de protótipos, com modelos em escala reduzida ou à escala real, para a sua caracterização experimental em laboratório ajuda a validar e a melhorar os modelos [1,2,3]. Para caracterizar o desempenho da barreira depois de instalada no terreno, as medições *in situ* são fundamentais [3].

O método dos elementos de fronteira (BEM) é um dos modelos numéricos mais adequados para a simulação da propagação sonora na vizinhança de barreiras em meios infinitos. São satisfeitas as condições de radiação de campo distante e apenas é necessário proceder à discretização da superfície da barreira. No entanto, a modelação tridimensional (3D) do problema exige a discretização das superfícies bidimensionais da barreira originando matrizes de grande dimensão e um custo computacional elevado. Como na prática as barreiras têm um comprimento grande e uma secção constante, o problema 3D pode ser resolvido como o somatório de problemas bidimensionais para diferentes números de onda. A resposta tridimensional é obtida aplicando, ao somatório, uma transformada de Fourier espacial ao longo da direcção em que a geometria não varia [4, 5]. Costuma designar-se este problema como um problema de 2.5D.

Se a secção da barreira tiver uma espessura muito reduzida, a equação integral de fronteira clássica não permite modelar o problema porque se traduz num sistema de equações que degenera. Uma formulação dual [6], em que se combina a equação integral de fronteira clássica com a equação integral de fronteira hipersingular (derivada), uma em cada face da barreira permite obter um sistema bem condicionado. Se a espessura tender para zero o problema pode ser resolvido utilizando apenas uma equação integral derivada em elementos de fronteira [7,8].

Apesar das limitações de cálculo das formulações BEM 3D, quando aplicadas a problemas de grande dimensão, elas são adequadas para a modelação de problemas de menores dimensões e baixas frequências. A modelação de barreiras de extensão limitada, colocadas em grandes espaços fechados para criar áreas de baixo nível de ruído ou assegurar a privacidade da conversação, pode ser adequadamente simulada usando um modelo BEM 3D.

No presente trabalho, utiliza-se um modelo 3D com a equação integral derivada em elementos de fronteira, formulado no domínio da frequência, que simula a propagação de ondas sonoras na presença de barreiras finas 3D. Vai calcular-se a atenuação sonora gerada por duas barreiras finas, colocadas uma em frente à outra na imediação de planos reflectores. Como variáveis do estudo vão considerar-se a geometria das barreiras e a proximidade a um plano reflector vertical. Cada barreira é modelada como uma superfície. Os planos reflectores (paredes e pavimento) não são discretizados com elementos de fronteira. São modelados recorrendo a funções de Green, integradas no modelo, que têm em conta a presença desses planos usando a técnica das fontes imagem.

Nas seguintes secções apresenta-se a formulação do problema e a aplicação do algoritmo para três geometrias das barreiras.

2 Formulação do problema

Considere-se uma barreira rígida 3D num meio infinito com uma espessura a tender para zero. A barreira pode ser modelada apenas por uma superfície e pode-se aplicar a formulação da equação integral derivada em elementos de fronteira, no domínio da frequência (ω)

$$a p(\mathbf{x}_0, \omega) = - \int_S \overline{H}(\mathbf{x}, \mathbf{n}_{n1}, \mathbf{n}_{n2}, \mathbf{x}_0, \omega) p(\mathbf{x}, \omega) ds + \overline{p}_{inc}(\mathbf{x}_0, \mathbf{n}_{n2}, \mathbf{x}_s, \omega). \quad (1)$$

Esta equação pode ser obtida aplicando o operador gradiente à equação integral de fronteira clássica. A normal unitária nos pontos de colocação \mathbf{x}_0 , na fronteira S , é definida pelo vector \mathbf{n}_{n2} e \mathbf{n}_{n1} representa o vector normal unitário nos pontos de observação \mathbf{x} . Na equação (1), o valor de a é nulo para elementos de fronteira rectilíneos [9] e a variável p representa a pressão.

As funções de Green, \overline{H} , necessárias para a equação integral derivada (equação 5) num meio infinito podem ser vistas como as derivadas das funções de Green para gradientes de pressão, H . As funções de Green, \overline{H} , são calculadas no ponto $\mathbf{x} = (x, y, z)$ da fronteira S devido à aplicação de uma carga virtual unitária no ponto de colocação $\mathbf{x}_0 = (x_0, y_0, z_0)$. Podem ser obtidas usando as seguintes expressões:

$$\overline{H}(\mathbf{x}, \mathbf{n}_{n1}, \mathbf{n}_{n2}, \mathbf{x}_0, \omega) = \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \mathbf{n}_{n2}} + \frac{\partial H}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \mathbf{n}_{n2}} + \frac{\partial H}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \mathbf{n}_{n2}}. \quad (2)$$

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

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

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

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

$$\overline{p}_{inc}(\mathbf{x}, \mathbf{n}_{n2}, \mathbf{x}_s, \omega) = \frac{e^{-ik_c r_0} (-ik_c r_0 - 1)}{r_0^2} \left(\frac{\partial r_0}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \mathbf{n}_{n2}} + \frac{\partial r_0}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \mathbf{n}_{n2}} + \frac{\partial r_0}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \mathbf{n}_{n2}} \right).$$

\overline{p}_{inc} é obtido aplicando o operador gradiente à pressão do campo incidente gerada num ponto (x, y, z) do meio infinito por uma fonte pontual em (x_s, y_s, z_s) ,

$$p_{inc}(x, y, z, x_s, y_s, z_s, \omega) = \frac{e^{ik_c(ct-r_0)}}{r_0}, \quad (3)$$

sendo $k_c = \frac{\omega}{c}$, c é a velocidade do som, $i = \sqrt{-1}$ e $r_0 = \sqrt{(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2 + (z-z_s)^2}$.

O campo de pressões, em qualquer ponto do meio, pode ser obtido aplicando a equação (1) à fronteira, S , da barreira. Para o efeito discretiza-se a fronteira S em N elementos de fronteira planos, com um ponto nodal no meio de cada elemento. As integrações necessárias são efectuadas usando a quadratura de Gauss quando o elemento a integrar não é o elemento carregado e usando cálculo analítico quando o elemento a integrar é hipersingular (elemento carregado) [10].

A consideração de planos reflectores na proximidade da barreira (ex: paredes, pavimento) é tida em conta sem haver necessidade de proceder à sua discretização. Para o efeito, as funções de Green descritas anteriormente e a pressão sonora incidente são combinadas de modo a impor velocidades normais nulas nessas fronteiras (consideradas rígidas).

As funções de Green são definidas tendo em consideração a pressão gerada pela carga real e a pressão gerada por imagens dessa carga colocadas de modo a espelhar a carga real em relação aos planos horizontais ou verticais considerados. Este é um procedimento bem conhecido [11] pelo que não se entra em detalhes adicionais.

3 Aplicação do modelo

O modelo anteriormente apresentado vai ser aplicado para simular o campo sonoro num meio fluido limitado por duas superfícies horizontais rígidas, com uma parede lateral, simulando um espaço interior de grandes dimensões, onde estão localizadas duas barreiras 3D. As barreiras são colocadas uma em frente à outra de modo a criarem um espaço acústico mais privado no interior do espaço de grandes dimensões (ver Figura 1). Consideram-se duas posições distintas para as barreiras: uma próxima da parede lateral, a 0.5 m (caso A) e outra afastada de qualquer outra parede (caso B). Adicionalmente consideram-se três geometrias distintas para as barreiras: barreira com forma de L invertido, barreira com o topo curvo e barreira recta (Figuras 4a), 4b) e 4c) respectivamente). As duas barreiras encontram-se afastadas de 5 m. Cada barreira tem uma altura de 2.5 m. A superfície horizontal da barreira em L tem um comprimento de 1.5 m e a barreira com o topo curvo (quarto de circunferência) tem um raio de 1.5 m.

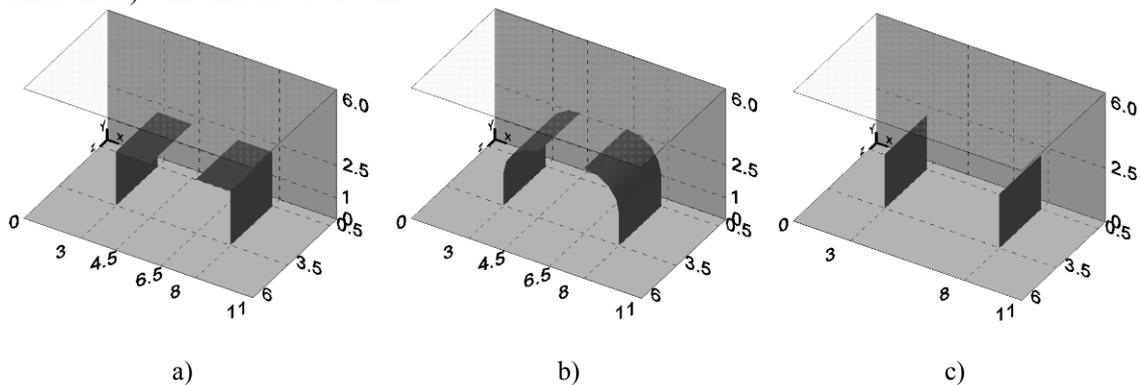


Figura 1 – Geometria dos exemplos: a) barreira em L; b) barreira curva; c) barreira recta.

As simulações foram efectuadas no domínio da frequência, no intervalo [4.25, 1088.0 Hz], com um incremento de 4.25 Hz. Considerou-se 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 $c = 340.0 \text{ m/s}$. Considerou-se a fonte sonora colocada em (11.5 m, 1.5 m, 2.0 m). Obtém-se o campo de pressões no domínio do tempo, com uma duração $T = (1/4.25) = 0.235 \text{ s}$, aplicando uma transformada inversa de Fourier aos resultados em frequência.

Os cálculos são efectuados em receptores distribuídos em duas grelhas, uma segundo um plano horizontal ($y=0.075 \text{ m}$) e outra segundo um plano vertical ($x=0.075 \text{ m}$). Os receptores estão espaçados de 0.1 m na direcção x e 0.075 m nas direcções y e z . Para que as grelhas de receptores mantivessem as mesmas coordenadas em ambos os casos estudados, considerou-se que quando a barreira está localizada próxima da parede esta se localiza em $z=0 \text{ m}$, e quando a barreira está afastada da parede a parede se localiza numa coordenada z negativa e enorme e não influencia os resultados.

Os cálculos no domínio do tempo foram efectuados para uma frequência característica de 400 Hz.

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

Nas Figuras 2 e 3 apresenta-se uma sequência de gráficos, no tempo, para os casos A e B respectivamente.

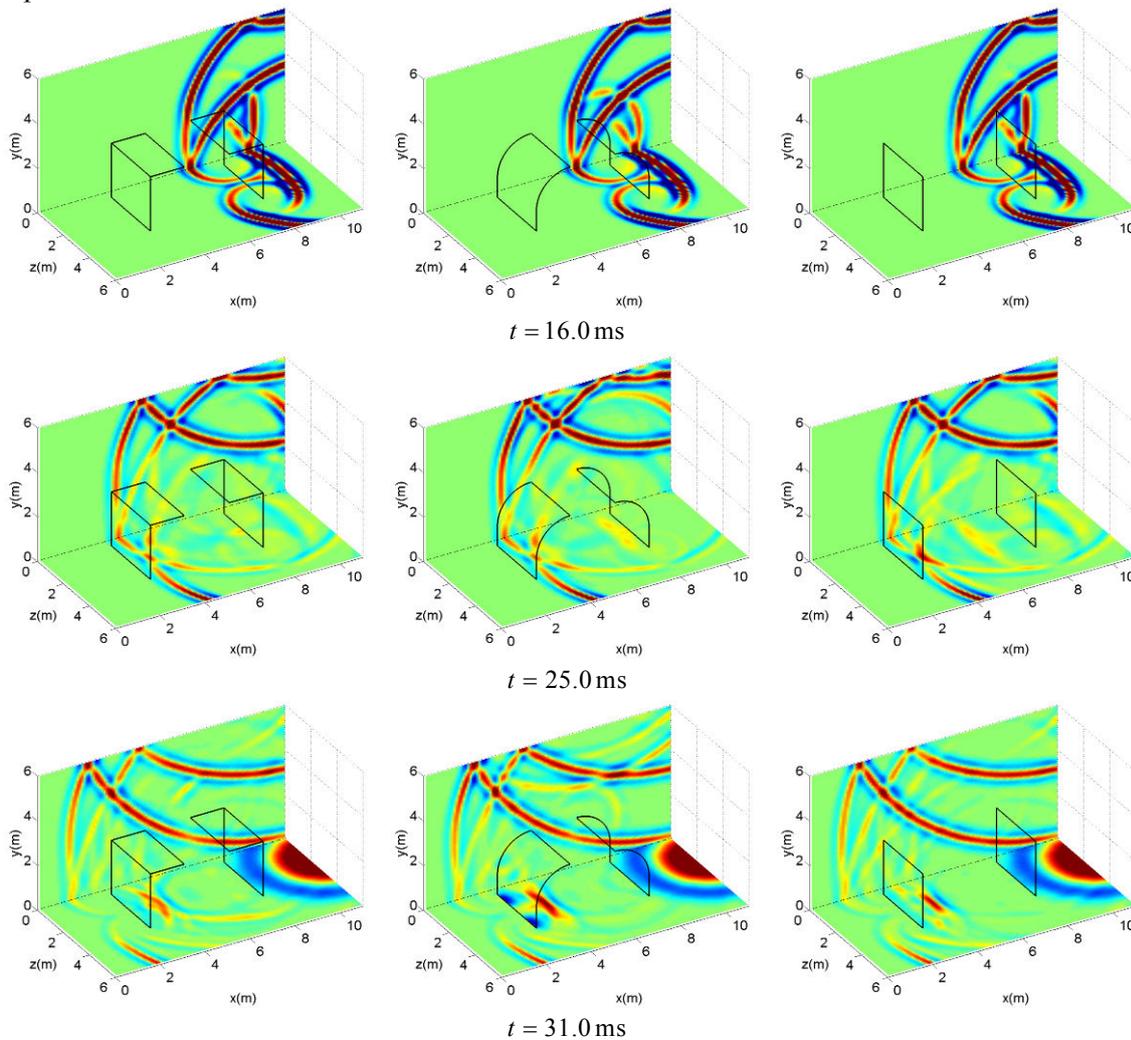


Figura 2 – Variação da pressão ao longo do tempo, para uma frequência característica de 400 Hz, registada em duas grelhas de receptores (planos vertical e horizontal), quando as barreiras estão afastadas da parede lateral: barreiras em L (coluna da esquerda), barreiras curvas (coluna central) e barreiras rectas (coluna da direita).

Na Figura 2, para $t = 16.0 \text{ ms}$, o pulso incidente já foi reflectido pelo pavimento e pelo tecto. Já atingiu também a barreira da direita onde foi reflectido e difractado. A onda reflectida na barreira move-se para a direita (em direcção à fonte), enquanto que as difracções laterais movem-se para a esquerda convergindo entre as duas barreiras. Em $t = 25.0 \text{ ms}$ observa-se que o pulso inicialmente reflectido pelo pavimento já atingiu o tecto onde foi reflectido. Os pulsos inicialmente difractados pela primeira barreira estão agora próximos da segunda barreira. Quando estes pulsos atingem a barreira da esquerda, parte da energia vai ser reflectida para trás, enquanto outra parte vai ser difractada nos lados

da barreira como se observa em $t = 31.0 \text{ ms}$. Nesse gráfico ainda se verifica que o pulso incidente que tinha inicialmente atingido o tecto foi reflectido para baixo e atingiu o pavimento onde foi novamente reflectido.

Com o decorrer do tempo o campo de pressões torna-se mais complexo devido às reflexões e difracções sucessivas. De um modo geral o desempenho acústico das barreiras diminui segundo a seguinte ordem: barreira em L invertido, barreira curva, barreira recta. No entanto, este comportamento não é sempre evidente em todos os instantes.

Na situação em que as barreiras estão muito próximas da parede lateral, o campo de pressões torna-se mais complexo e exibe amplitudes mais elevadas devido à reflexão das ondas que atingem a parede lateral, como se pode observar na Figura 3. Neste caso a amplitude do campo sonoro entre o par de barreiras apresenta também amplitudes mais elevadas do que no caso A. Se compararmos o desempenho acústico das barreiras em função da geometria verifica-se um comportamento semelhante ao observado para o caso A.

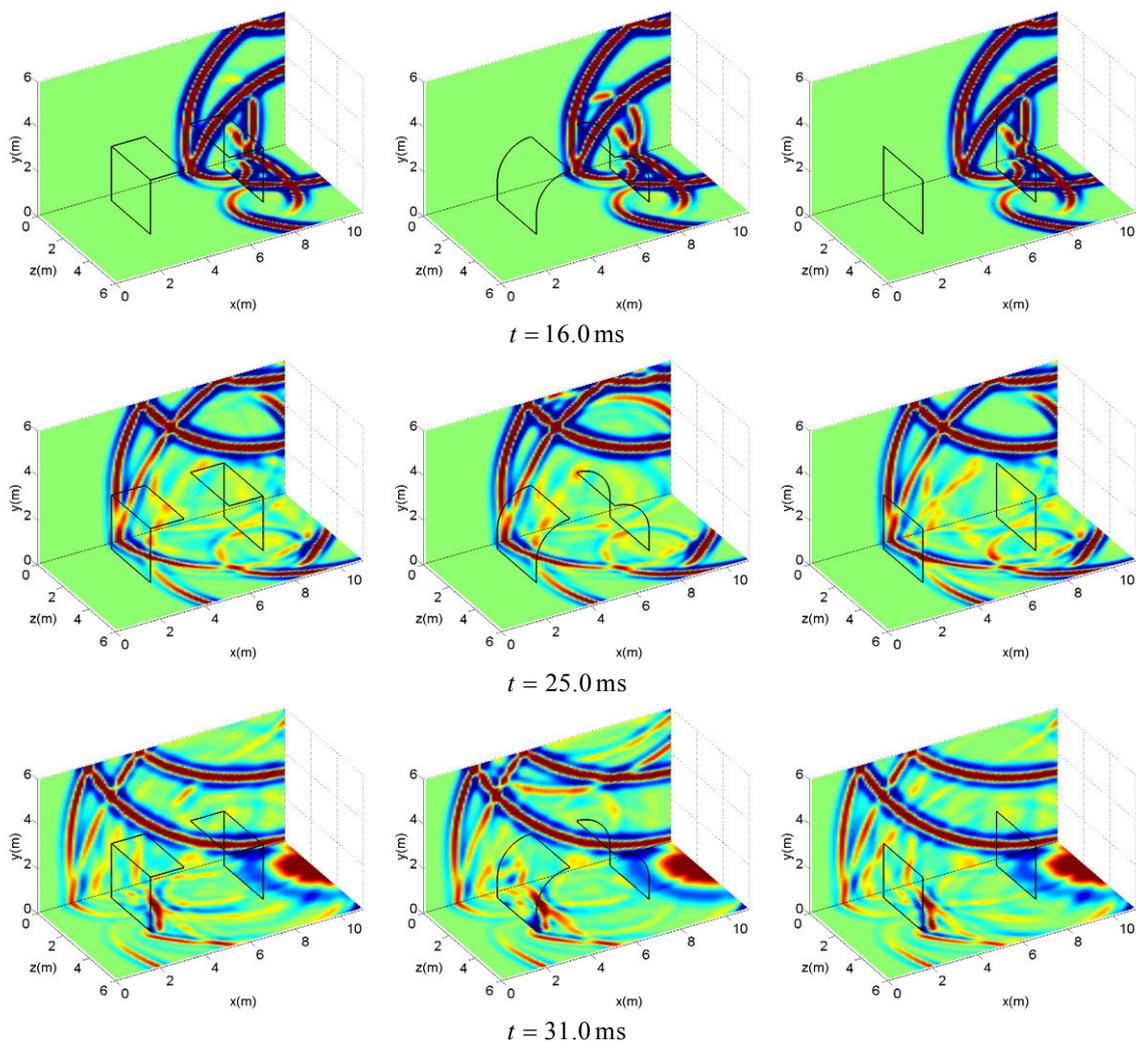


Figura 3 – Variação da pressão ao longo do tempo, para uma frequência característica de 400 Hz, registada em duas grelhas de receptores (planos vertical e horizontal), quando as barreiras estão próximas da parede lateral: barreiras em L (coluna da esquerda), barreiras curvas (coluna central) e barreiras rectas (coluna da direita).

Calculou-se também a atenuação para cada frequência da seguinte forma

$$IL = 20 \log \frac{p_0}{p_b} \text{ (dB)} \quad (4)$$

sendo p_0 a pressão no receptor na ausência de barreiras, isto é com a situação de referência, apenas com as fronteiras rígidas horizontais e a fronteira rígida vertical, enquanto p_b é a pressão sonora quando as barreiras estão posicionadas na geometria de referência.

Para ilustrar os resultados, a atenuação foi calculada, para frequências específicas, numa grelha de receptores localizada entre o par de barreiras, para as três geometrias em estudo, quando as barreiras estão afastadas da parede lateral. A grelha está colocada em $y = 0.075 \text{ m}$ e os receptores estão espaçados de 0.1 m desde $x = 3.05 \text{ m}$ até $x = 7.95 \text{ m}$ e de 0.075 m desde $z = 0.6 \text{ m}$ até $z = 3.45 \text{ m}$.

Na Figura 4 apresentam-se os resultados obtidos para as frequências de 50 Hz (coluna da esquerda) e 119 Hz (coluna da direita).

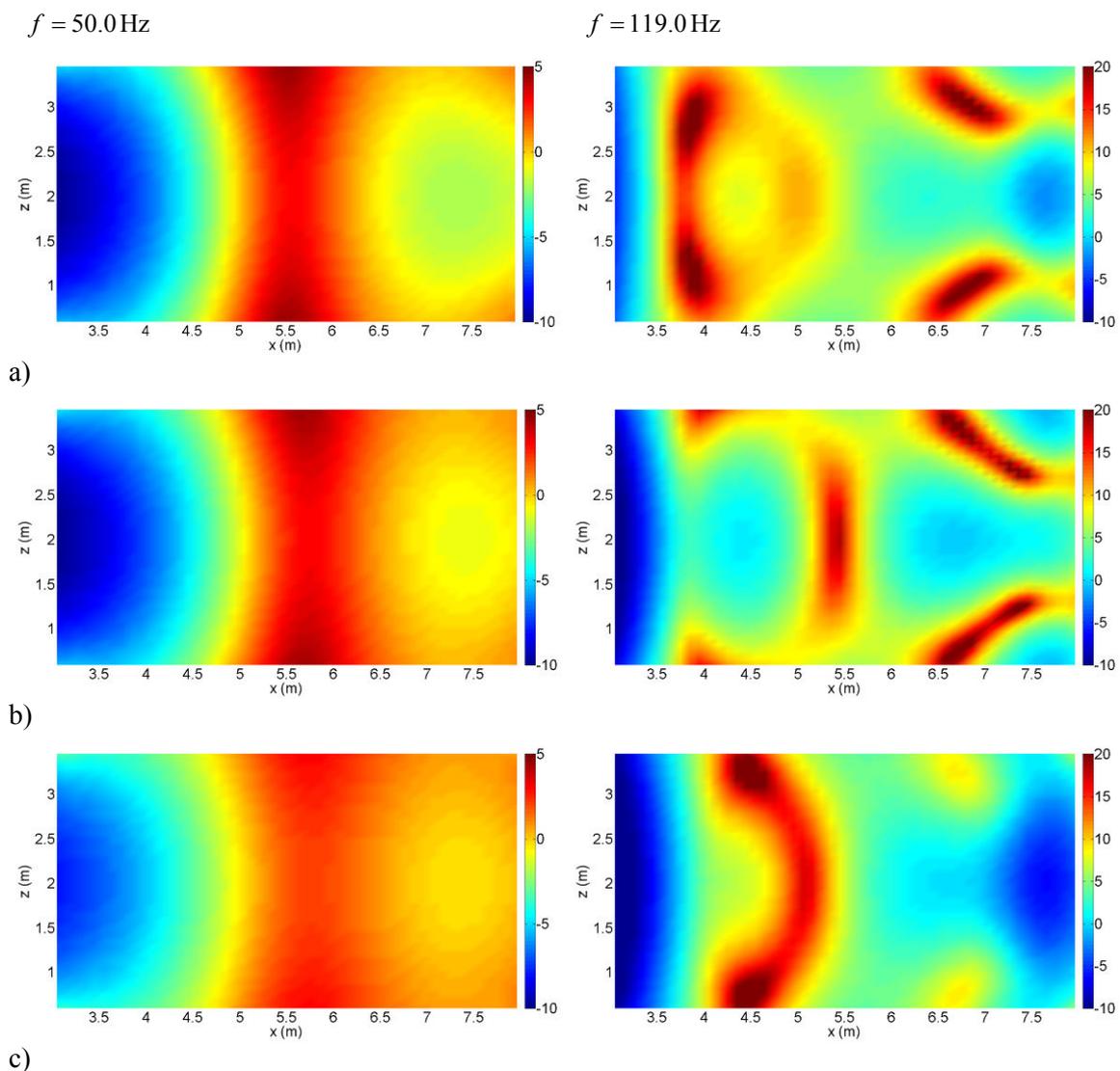


Figura 4 – Atenuação sonora (dB) calculada numa grelha de receptores num plano horizontal entre as duas barreiras para as frequências $f = 50.0 \text{ Hz}$ (coluna esquerda) e $f = 119.0 \text{ Hz}$ (coluna direita)

quando as barreiras estão afastadas da parede lateral: a) barreiras em L; b) barreiras curvas; c) barreiras rectas.

Na frequência de 50 Hz, quando os receptores estão próximos da barreira as barreiras rectas apresentam maior atenuação sonora. No entanto, para receptores na região média entre as duas barreiras, as barreiras em L conferem maior atenuação sonora.

Na frequência de 119 Hz, na região próxima da barreira da direita, a barreira recta apresenta maior atenuação, enquanto na proximidade da barreira da esquerda é a barreira em L que se comporta melhor. Na região intermédia entre as duas barreiras não há, contudo, um comportamento uniforme para cada uma das geometrias das barreiras em estudo. Mas, para ambas as frequências, a análise dos gráficos revela que, globalmente, os maiores valores de atenuação são conferidos pelas barreiras em L.

4 Conclusões

Utilizou-se um modelo tridimensional de elementos de fronteira com a equação integral derivada, no domínio da frequência, para calcular o campo de pressões na presença de barreiras rígidas finas colocadas num espaço fechado de grandes dimensões. A superfície das barreiras foi discretizada com elementos de fronteira planos. A influência dos planos reflectores do espaço (tecto, pavimento e parede) é tida em conta na escrita das funções de Green utilizando a técnica das fontes imagem.

Para ilustrar a aplicação do modelo simularam-se pares de barreiras com geometrias distintas: barreiras em L, barreiras curvas e barreiras rectas. Os cálculos foram efectuados no domínio da frequência tendo permitido calcular o campo de pressão sonora no domínio do tempo e ainda a atenuação sonora em frequências específicas.

Os resultados no domínio do tempo mostram que a amplitude da pressão na região entre as duas barreiras é muito influenciada pelas reflexões múltiplas entre elas e pela presença da parede lateral.

A atenuação sonora entre as duas barreiras depende bastante da localização dos receptores e da geometria das barreiras. Os valores mais baixos de atenuação surgem para receptores próximos da barreira que está mais distante da posição da fonte. Globalmente, as barreiras que apresentam melhor desempenho são as que têm geometria em L, enquanto que as que se comportam pior são as barreiras rectas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção – ITeCons pelo apoio fornecido durante o desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- [1] Jin, B.J.; Kim, H.S.; Kang, H.J.; Kim, J.S. Sound diffraction by a partially inclined barrier. *Applied Acoustics*, Vol. 62, 2001, pp. 1107-1121.
- [2] Watts, G.R.; Hothersall, D.C.; Horoshenkov, K.V. Measured and predicted acoustic performance of vertically louvred noise barriers. *Applied Acoustics*, Vol. 62, 2001, pp. 1287-1311.
- [3] Watts, G.R. Acoustic Performance of a multiple edge noise barrier profile at motorway sites. *Applied Acoustics*, Vol. 47, 1996, pp. 47-66.
- [4] Duhamel, D. Efficient calculation of the three-dimensional sound pressure field around a noise barrier. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 197, 1996, pp. 547-571.

- [5] Godinho, L.; António, J.; Tadeu, A. 3D sound scattering by rigid barriers in the vicinity of tall buildings. *Applied Acoustics*, Vol. 62, 2001, pp. 1229-1248.
- [6] De Lacerda, L.A.; Wrobel, L.C.; Mansur, W.J. A dual boundary element formulation for sound propagation around barriers over an impedance plane. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 202, 1997, pp. 235-247.
- [7] Prosper, D.; Kausel, E. Wave scattering by cracks in laminated media, in: S.N. Atluri, T. Nishioka, M. Kikuchi (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Computational Engineering and Science ICES'01*, Puerto Vallarta, 19-25/08/2001, Tech Science Press.
- [8] Tadeu, A.; Amado Mendes, P.; António, J. The simulation of 3D elastic scattering produced by thin rigid inclusions using the traction boundary element method. *Computers and Structures*, Vol. 84, 2006, pp. 2244-2253.
- [9] Guiggiani, M. Formulation and numerical treatment of boundary integral equations with hypersingular kernels. In: Sládek, V.; Sládek, J. (eds.): *Singular integrals in boundary element methods*. Computational Mechanics Publications. Southampton 1998. Chapter 3, 85-124.
- [10] Tadeu, A.; António, J. 3D Acoustic wave simulation using BEM formulations: closed form integration of singular and hypersingular integrals. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 36(9), 2012, pp. 1389-1396.
- [11] Antonio, J.; Tadeu, A.; Amado Mendes, P. A 2.5D traction boundary element method formulation applied to the study of wave propagation in a fluid layer hosting a thin rigid body. *Journal of Computational Acoustics*, Vol. 16, 2008, pp. 177-198.