

## **EVALUACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR INSERCIÓN EN BARRERAS ACÚSTICAS RÍGIDAS SEMIINFINITAS MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS DE CONTORNO**

PACS: 43.50.Gf, 43.28.Js, 02.70.Pt

Linares Hurtado, José Ignacio ; Gil Alía, David.  
ETSI (ICAI) – Universidad Pontificia Comillas de Madrid.  
c/ Alberto Aguilera, 23  
28015 Madrid. España  
Tel.: 91 542 28 00  
Fax: 91 559 65 69  
E-mail: [linares@dfc.icaei.upco.es](mailto:linares@dfc.icaei.upco.es)

### **ABSTRACT**

This paper deals with the application of Boundary Element Method (BEM) to determination of insertion loss produced by acoustic screens. The study is limited to rigid semi-infinite screens in 2D configurations, so it's possible to compare numerical results with Kurze models. A traditional convergence criteria is tested (pure tone and 1/3 octave band excitations) showing excellent agreement except for great screens thickness, where it's necessary to use smaller elements due to border effect. Some typical instability problems with BEM are analysed too.

### **RESUMEN**

En esta comunicación se aborda la aplicación del Método de los Elementos de Contorno (MEC) a la determinación de pérdidas por inserción producidas por barreras acústicas. El estudio se limita a barreras rígidas semiinfinitas en configuraciones 2D, de modo que es posible comparar los resultados numéricos con los modelos de Kurze. Se prueba un modelo tradicional de convergencia (con excitación tanto monocromática como en ancho de banda de 1/3 de octava), obteniéndose un excelente acuerdo excepto para barreras de gran espesor, donde es preciso emplear un mallado más fino debido al efecto borde. También se analizan algunos problemas de inestabilidad típicos del MEC.

### **INTRODUCCIÓN**

La determinación de la atenuación producida por la inserción de barreras acústicas (pérdidas de inserción) es un problema de gran interés práctico. Pese a la existencia de gran cantidad de modelos y algoritmos analíticos [8], se requiere el empleo de algún método numérico cuando se pretenden abordar configuraciones complejas. El Método de los Elementos de Contorno (MEC) muestra un gran potencial debido a que se trata de un problema abierto. Si bien existen algunos trabajos sobre la aplicación del MEC a las barreras acústicas [3,7], podría decirse que su uso se encuentra aún en sus comienzos.

En esta comunicación se pretende analizar la aplicabilidad del (MEC) a la determinación del campo acústico producido por la presencia de barreras acústicas rígidas,

prestando especial atención a las pérdidas por inserción (IL). Para validar los resultados obtenidos se ha tomado la formulación de Kurze para barreras semiinfinitas sin espesor, por ser una de las más sencillas de programar y representar una configuración 2D. La barrera simulada numéricamente se ha supuesto de profundidad acotada pero suficientemente grande (la dimensión necesaria será evaluada más adelante), tomándose como excitación una fuente cilíndrica pulsante de forma armónica, tal como se muestra en la figura 1. En la figura 2 se da una representación de los puntos solución evaluados junto con una barrera y la fuente. Como se ve, se ha determinado el campo acústico en una matriz de 23x31 puntos colocados tras la barrera. En la figura se representa en línea azul la línea de iluminación, de modo que en cotas superiores a las dadas por ella no resulta aplicable el modelo de Kurze.

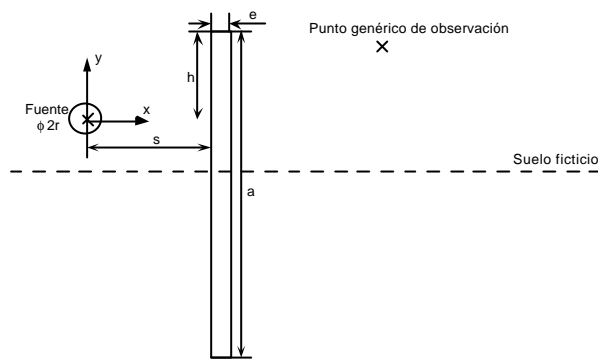


Fig.1.- Geometría considerada. Se representa el suelo como referencia, pero no afecta a los cálculos.

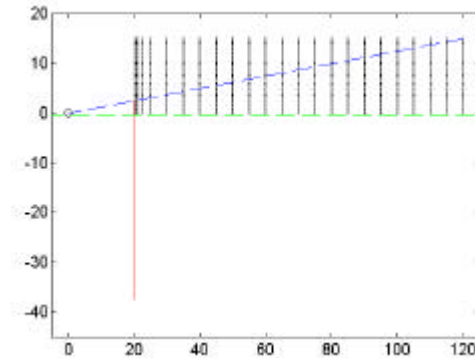


Fig. 2.- Puntos solución del problema. Se representa el suelo ficticio (verde), la barrera (rojo) y la fuente cilíndrica.

Los campos acústicos han sido obtenidos a partir de un código de MEC tomado de [6], el cual ha sido convenientemente adaptado al problema por los autores de esta comunicación. Se han efectuado 10 simulaciones, cuyos parámetros se encuentran recogidos en la tabla 1.

## CONVERGENCIA

El criterio clásico de convergencia del MEC establece que la distancia máxima entre nodos adyacentes ha de ser de  $\lambda/4$ , lo que se traduce en que el tamaño máximo de los elementos cuadráticos es de  $\lambda/2$ . En este trabajo se han empleado elementos cuadráticos con tamaños de elemento ( $\Delta$ ) entre  $\lambda/7$  y  $\lambda/3$ , con lo que dicho criterio ha resultado satisfecho. La necesidad de cerrar el contorno de la barrera obliga a que ésta deba ser de profundidad ( $a$ ) finita. Sin embargo, la formulación de Kurze [8] con la que se obtiene el patrón de referencia supone un valor infinito de este parámetro. Estas consideraciones se analizan en las figuras 3 y 4. En la primera se comparan resultados obtenidos con  $\Delta = \lambda/7$  y  $\Delta = \lambda/3$ , no apreciándose diferencias significativas. Aparece también en la figura el resultado predicho por el modelo de Kurze, encontrándose una buena concordancia entre la solución numérica y éste. En la segunda se comparan resultados obtenidos utilizando diferentes profundidades, encontrándose suficiente considerar  $a = 50\lambda$ .

	Nr	Na	Ne	r [m]	e [m]	h [m]	a [m]	s [m]	f [Hz]
C1	7	400	2	0.025	0.05	2.5	10	20	2000
C2	4	200	1	0.025	0.05	2.5	10	20	2000
C3	4	150	1	0.1	0.1	2.5	15	20	600
C4	4	300	1	0.1	0.1	2.5	30	20	600
C5	4	400	1	0.1	0.1	2.5	40	20	600
C6	4	400	2	0.05	0.1	2.5	20	20	1000
C7	8	200	2	0.1	0.086	2.5	40	20	600
C8	8	200	1	0.1	0.05	2.5	40	20	600
C9	2	250	3	0.02	0.4	2.5	40	20	600
C10	2	500	6	0.02	0.4	2.5	40	20	600

Tabla 1.- Parámetros de las simulaciones efectuadas. Nr representa el número de elementos en la fuente, Na en un lateral de la barrera y Ne en el espesor.

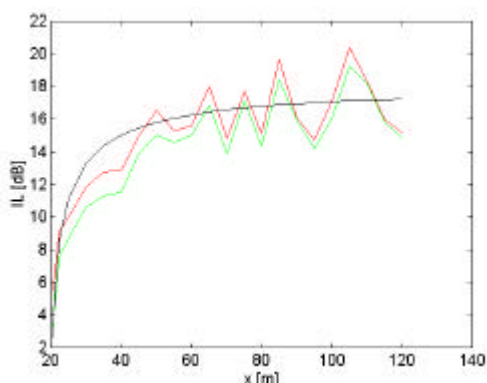


Fig. 3.- Pérdidas por inserción evaluadas a  $y = 2.5$  m. La línea roja se corresponde con C1 ( $\Delta = \lambda/7$ ) y la azul con C2 ( $\Delta = \lambda/3$ ). En negro se representa la solución de Kurze.

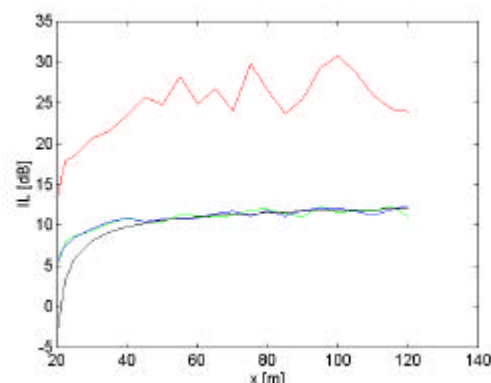


Fig. 4.- Pérdidas por inserción evaluadas a  $y = 2.5$  m. La línea roja se corresponde con C3 ( $\Delta = \lambda/6$ ,  $a = 26\lambda$ ), la verde con C4 ( $\Delta = \lambda/6$ ,  $a = 50\lambda$ ) y la azul con C5 ( $\Delta = \lambda/6$ ,  $a = 70\lambda$ ). En negro se representa la solución de Kurze.

## RESULTADOS GENERALES

El caso C5 corresponde a una configuración habitual en la que la fuente estaría colocada 0.5 m sobre el suelo, a 20 m de la barrera y teniendo ésta 3 m de altura desde el suelo. La frecuencia considerada es de 600 Hz y el espesor de la barrera de 10 cm. En las figuras 5 y 6 se comparan las pérdidas por inserción obtenidas con el MEC con Kurze en dos planos horizontales, uno al borde de la barrera ( $y = 2.5$  m) y otro más alto ( $y = 7.5$  m). En las figuras queda patente la buena concordancia entre ambos modelos. En la figura 6 se pone de manifiesto la limitación del de Kurze para cotas mayores a las dadas por la línea de iluminación, dando ahí resultados no válidos. Sin embargo, la solución hallada por el MEC parece correcta, pues predice ausencia total de pérdidas en cotas muy superiores a la línea de iluminación, creciendo rápidamente a medida que el punto de observación se acerca a la misma.

En las figuras 7 y 8 se evalúan las pérdidas en un plano vertical tras la barrera. De nuevo se observa la tendencia comentada anteriormente, y es que ambos modelos convergen por debajo de la línea de iluminación. Así, en la figura 7 la convergencia se pierde aproximadamente a partir de  $y = 2.5$  m (fin de la barrera), mientras que en la figura 8 a partir de  $y = 10$  m. En este figura se aprecia un rizado en la solución numérica inexistente en la que arroja Kurze. En la sección siguiente se mostrará que ello es debido a que Kurze no supone excitación monocromática, sino en cierta banda de frecuencia. Se mostrará cómo excitando con una banda de 1/3 de octava es suficiente para hacer desaparecer ese rizado.

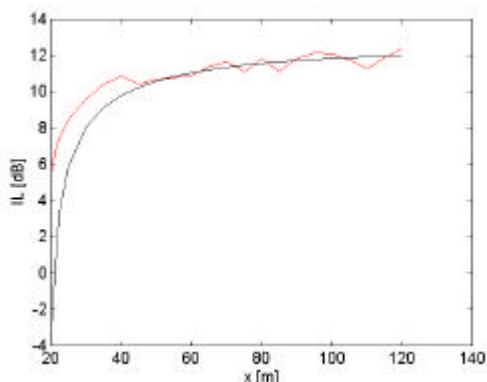


Fig. 5.- Pérdidas por inserción evaluadas en  $y = 2.5$  m. La línea roja se corresponde con C5 y la negra con la solución de Kurze.

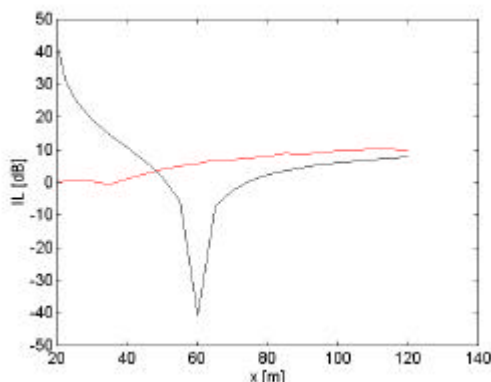


Fig. 6.- Pérdidas por inserción evaluadas a en  $y = 7.5$  m. La línea roja se corresponde con C5 y la negra con la solución de Kurze.

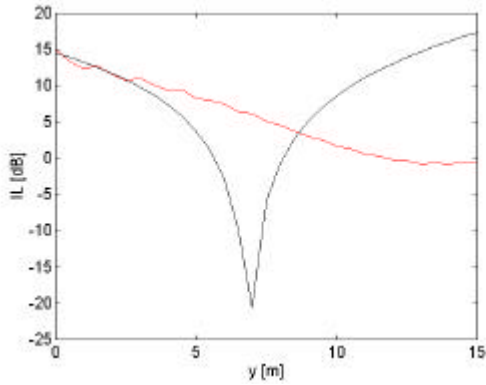


Fig. 7.- Pérdidas por inserción evaluadas 35 m tras la barrera ( $x = 55.1$  m). La línea roja se corresponde con C5 y la negra con la solución de Kurze.

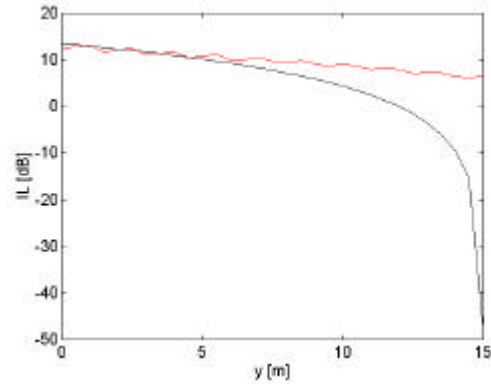


Fig. 8.- Pérdidas por inserción evaluadas 100 m tras la barrera ( $x = 120.1$  m). La línea roja se corresponde con C5 y la negra con la solución de Kurze.

### RESULTADOS CON EXCITACIÓN EN BANDA DE 1/3 DE OCTAVA

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al considerar una excitación de ancho de banda de 1/3 de octava constituida por la frecuencia central de 1 kHz y otras 12 frecuencias separadas entre sí 1/36 de octava. El campo acústico (complejo) obtenido en cada una de las frecuencias anteriores se ha expandido en el tiempo a través de la exponencial que lo define, tomándose posteriormente la parte real. Los vectores temporales así obtenidos se han sumado y se han integrado cuadráticamente (RMS) para obtener el valor eficaz. Tras aplicar este procedimiento tanto al campo libre como al calculado en presencia de barrera se han obtenido las figuras 9 y 10. Los parámetros de la simulación se corresponden al caso C6. En la figura 9 se aprecia que la simulación en banda pasa a ser la envolvente de la monocromática, mientras que en la 10 se ve que la diferencia entre la simulación en banda y Kurze es despreciable en la zona en la que el modelo de Kurze es aplicable.

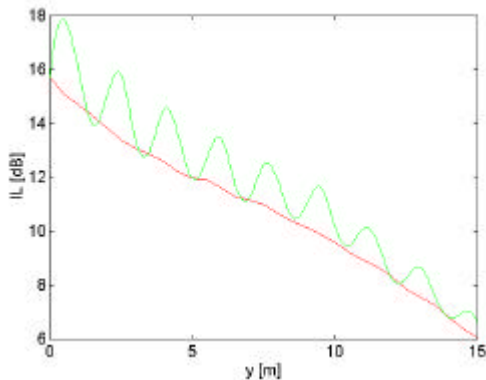


Fig. 9.- Evaluación 100 m tras la barrera ( $x = 120.1$  m). En verde se representa la simulación hecha con MEC para un caso monocromático a 1 kHz (C6), y en rojo para una banda de 1/3 de octava centrada en 1 kHz (parámetros C6, salvo las frecuencias).

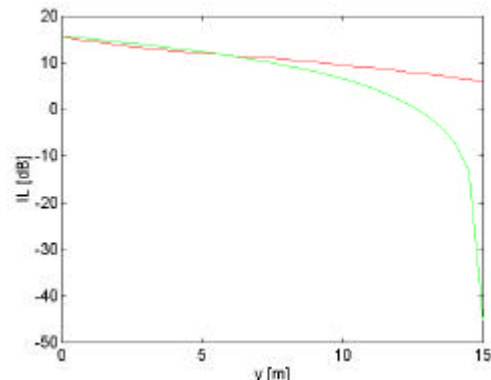


Fig. 10.- Evaluación 100 m tras la barrera ( $x = 120.1$  m). En verde se representa la solución de Kurze para 1 kHz y en rojo la simulación efectuada por MEC para una banda de 1/3 de octava centrada en 1 kHz (como en la figura 9).

### ESPEORES IRREGULARES

En la literatura referente al MEC en procesos dinámicos externos aparece ampliamente documentado el problema de las frecuencias irregulares [1,2,4]. Básicamente consiste en que al resolver un problema exterior tipo Neuman aparecen como “autovalores” del mismo (físicamente inexistentes al tratarse de un problema exterior) los del problema interior con condiciones tipo Dirichlet. En los casos discutidos en esta comunicación eso se traduce en que dicho fenómeno se localiza en los espesores de barrera múltiplos de la semilongitud de onda considerada.

En la figura 11 se muestra un ejemplo de este fenómeno. Para una frecuencia de 2 kHz la semilongitud de onda resulta 86 mm, mostrándose las pérdidas por inserción en la cota correspondiente al borde de la barrera en color rojo. Como se ve, el resultado es totalmente atípico, debido al problema numérico del MEC. Sin embargo, para un espesor inferior a este crítico, por ejemplo 50 mm (curva verde) el resultado se corresponde con el esperado, mostrándose un excelente acuerdo con Kurze. Sin embargo, en las figuras 12 y 13, obtenidas a una cierta distancia del borde de la barrera no se nota una diferencia significativa entre las pérdidas obtenidas en el espesor irregular y el convencional, al menos a grandes distancias de la barrera. Finalmente, la figura 14 muestra el valor del primer espesor irregular para cada frecuencia. De ella se deduce que este fenómeno no es importante en los espesores manejados habitualmente, por ser éstos inferiores al primer irregular. No obstante, existen formulaciones específicas del MEC para resolver los casos irregulares [1,2].

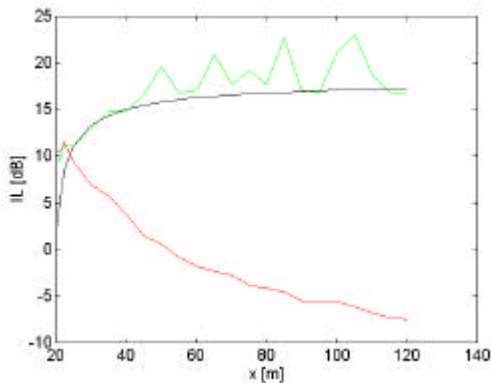


Fig. 11.- Pérdidas por inserción obtenidas a  $y = 2.5$  m y 2 kHz con diferentes espesores. La línea roja se corresponde con C7 ( $e = 0.086$  m), un caso irregular, y la verde con C8 ( $e = 0.05$  m). En negro se representa la solución de Kurze.

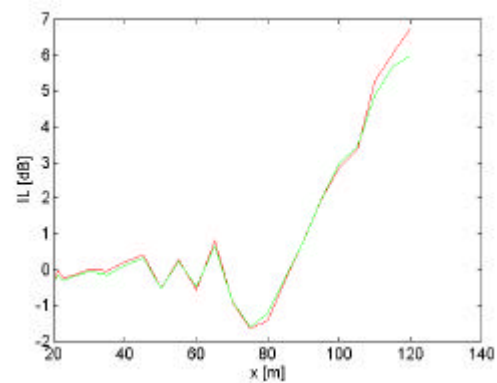


Fig. 12.- Pérdidas por inserción obtenidas a  $y = 15$  m en los mismos casos que en la figura 11. Apenas se aprecia diferencia entre el caso regular (verde) y el irregular (rojo).

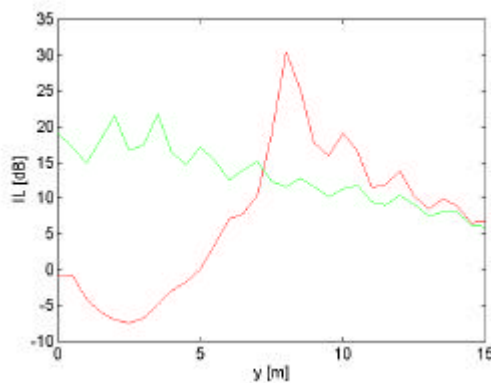


Fig. 13.- Pérdidas por inserción obtenidas 100 m tras la barrera en los mismos casos que en las figuras 11 y 12. Se aprecia cómo a grandes distancias de la barrera no hay diferencia entre el caso regular y el irregular.

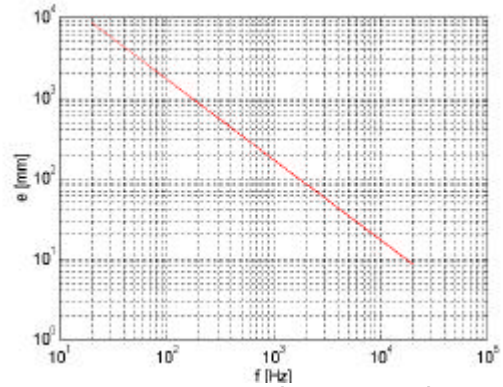


Fig. 14.- Espesor irregular mínimo en función de la frecuencia. Se aprecia que para 600 Hz resulta de 300 mm y para 2 kHz de 86 mm.

## GRANDES ESPESORES

Por lo que respecta al tamaño apropiado del mallado cuando se trata de obtener una adecuada convergencia, se comentó previamente que era suficiente con  $\Delta = \lambda/2$ , presentándose aquí simulaciones efectuadas a  $\lambda/3$ . Sin embargo, si bien esta cota sirve como criterio general, no es válida cuando el espesor de la barrera es elevado, tal como se muestra en las figuras 15 y 16, donde se dan los resultados correspondientes a barreras de 400 mm a 600 Hz, apareciendo en color rojo los resultados obtenidos con  $\lambda/3$  y en verde los de  $\lambda/7$ .

Cuando el espesor es muy grande, el efecto de difracción en los bordes de la barrera es muy acusado, por lo que es preciso afinar mucho el mallado para lograr unos buenos resultados

en las proximidades de dicho borde (figura 15). Sin embargo, lejos del citado borde el resultado no es tan sensible al mallado (figura 15 para  $x > 70$  m y 16 para  $y > 7$  m). De hecho, existen formulaciones especiales del MEC en las proximidades de una arista viva, que son una alternativa al refinamiento del mallado, consistentes en la consideración de núcleos especiales que reproduzcan de modo conveniente la el campo difractado [5].

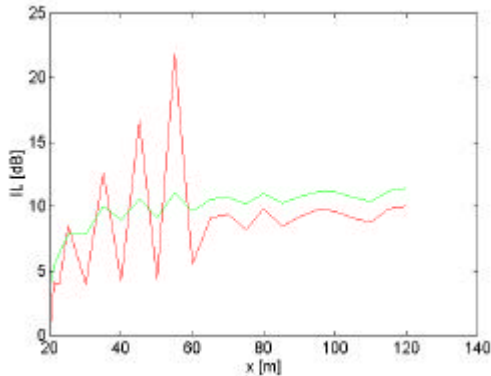


Fig. 15.- Pérdidas por inserción en  $y = 2.5$  m. La línea roja se corresponde con C9 ( $\Delta = \lambda/3$ ) y la verde con C10 ( $\Delta = \lambda/7$ ).

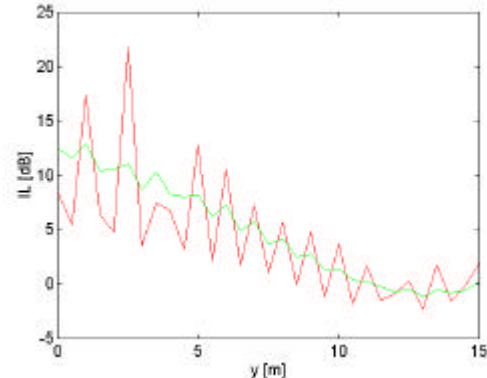


Fig. 16.- Pérdidas por inserción 35 m tras la barrera. Los casos representados son los mismos que en la figura 15.

## CONCLUSIONES

El objetivo de esta comunicación era establecer las limitaciones del MEC en el estudio de barreras acústicas. Para ello se ha construido un modelo 2D simulándose con él barreras de diferentes espesores y a distintas frecuencias (casos monocromáticos y en banda de 1/3 de octava), comparándose sus resultados con la formulación de Kurze. Por lo que respecta a la convergencia se ha encontrado que el criterio clásico de distancia internodal inferior a  $\lambda/4$  es válido para barreras de pequeño espesor. Cuando el espesor de la barrera es grande es preciso afinar mucho el mallado (distancia internodal del orden de  $\lambda/14$ ) debido a la fuerte influencia de los bordes de la barrera en la difracción. No obstante, los resultados obtenidos con el mallado tradicional son satisfactorios a partir de  $90\lambda$  de la barrera.

Por último, se ha comprobado que el fenómeno de frecuencias irregulares característico del MEC en dominios abiertos se manifiesta aquí en forma de espesores irregulares. No se considera preciso recurrir a las formulaciones especiales del MEC (CHIEF o GHIE) debido a que los espesores típicos de las barreras son inferiores a los primeros espesores irregulares a cada frecuencia.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Copley, L. G. (1968). "Fundamental results concerning integral representations in acoustic radiation". J. Acoust. Soc. Am., Vol. 44, pp 28-32.
- [2] Schenck, H. A. (1968). "Improved integral formulation for acoustic radiation problems". J. Acoust. Soc. Am., Vol. 44, pp.41-58.
- [3] Sez nec, R. (1980). "Diffraction of sound around barriers: Use of the boundary elements technique". Journal of Sound and Vibration, Vol. 73 (2), pp. 195-209.
- [4] Brod, K. (1984). "On the uniqueness of solution for all wavenumbers in acoustic radiation". J. Acoust. Soc. Am., Vol. 76, pp. 1238-1243.
- [5] Mateo, J. (1993). "Tratamiento de una singularidad en un problema de potenciales resuelto por el Método de los Elementos de Contorno". I Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica.
- [6] Domínguez, J. (1993). "Boundary elements in dynamics". CMP, Southampton.
- [7] Antes, H.. (1991) "Applications in Environmental Noise" in Boundary Element Methods in Acoustic, edited by Ciskowski, R. D. and Brebbia, C. A., CMP, Southampton.
- [8] Muradali, A., Fyfe, K. R.. (1998) "A Study of 2D and 3D Barrier Insertion Loss using Improved Diffraction-based Methods". Applied Acoustics, Vol. 53 (1-3), pp. 49-75.