



ESTIMACIÓN DEL NIVEL DE PRESIÓN SONORA EMITIDO POR UN VEHÍCULO EN EL ENSAYO *COAST-BY* A PARTIR DEL NIVEL DE POTENCIA SONORA OBTENIDO EN ENSAYOS DE LABORATORIO

E. VELASCO-SÁNCHEZ, D. CLAR-GARCÍA, N. CAMPILLO-DAVÓ, R. PERAL-ORTS, H. CAMPELLO-VICENTE

Universidad Miguel Hernández de Elche
Departamento Ingeniería Mecánica y Energía
Avenida Universidad s/n, 03202 Elche, Alicante, España

(Recibido 30 de marzo de 2018, para publicación 15 de julio de 2018)

Resumen – El ruido de rodadura ocasionado por la interacción entre el neumático y la carretera es la principal fuente sonora causada por el tráfico rodado a velocidades medias y altas. En las últimas décadas, las emisiones sonoras de los neumáticos han sido ampliamente estudiadas por diversos grupos de investigación. Sin embargo, la mayoría de estas investigaciones se han centrado, principalmente, en ensayos en pista. Como resultado de estas investigaciones, se han desarrollado diferentes métodos de ensayo para medir la emisión sonora de los neumáticos. Los métodos más importantes son los denominados *Coast-By*, *Close-Proximity*, *Statistical Pass-By* y *Controlled Pass-By*. Entre todos ellos, el método *Coast-By* se ha establecido en Europa como método estándar relativo a la homologación de neumáticos con respecto a las emisiones sonoras de rodadura según determina el Reglamento 117 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE). Sin embargo, todos los métodos mencionados anteriormente tienen varios inconvenientes tales como la influencia de factores ambientales, los diferentes resultados que se pueden obtener dependiendo de la pista de ensayo o del vehículo con el que se realizan los ensayos, la falta de repetibilidad o el que quizás sea el aspecto más importante, que es la limitación de la magnitud medida, el nivel de presión acústica. Una nueva metodología basada en ensayos de tipo *Drum* y la norma ISO 3744:2010 [4], que fue desarrollada para evitar estas limitaciones, ha probado ser comparable con el método *Coast-By* (CB). Este artículo describe cómo se puede estimar los resultados del ensayo CB a partir de datos obtenidos con el nuevo método de ensayo en laboratorios DRUM. En concreto, esta nueva metodología consiste en la obtención del nivel de potencia sonora del neumático, como fuente individual, y la aplicación de un modelo de propagación que represente el ensayo en pista CB.

Palabras clave – Ruido, neumático, rodadura, Sound Power Level, *Coast-By*.

1. INTRODUCCIÓN

La actual reglamentación en la Unión Europea para la homologación del ruido emitido por un neumático es el Reglamento 117 [2] CEPE en 2007 y los Reglamentos 661 [6] y 1222 [7] en 2009. El primero describe el método para medir la emisión de sonido rodante para neumáticos mientras que las Regulaciones 661 y 1222 establece los límites de ruido de rodadura para los neumáticos que se aplican desde noviembre de 2012 bajo la aprobación de tipo de marcado CE y una clasificación de neumáticos según sus valores de emisión de ruido, respectivamente.

El método descrito en la mencionada reglamentación es el habitualmente conocido como método *Coast-By* (CB). Se trata de un ensayo en pista, definido en el Reglamento 117, que proporciona el nivel de presión sonora de un juego de neumáticos montado en un vehículo rodando sobre una superficie específica. El nivel máximo de presión acústica es registrado por dos micrófonos a una distancia de 7.5 m en ambos lados de la línea de referencia de la vía CC 'y 1.2 m sobre el suelo, cuando el vehículo circula a una velocidad de referencia que para un turismo es de 80 km/h. La Fig. 1 muestra las posiciones del micrófono, la zona de medición, área delimitada por líneas AA' y BB', y un vehículo durante la prueba.

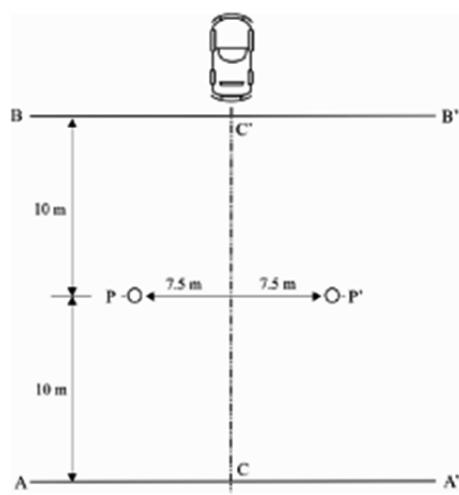


Fig. 1. Esquema configuración ensayo *Coast-By*.

Existen otros ensayos desarrollados en normas o por grupos de investigación que permiten obtener los niveles de ruido emitidos por los neumáticos (ISO 11819-2 *Close-Proximity (CPX)* o -1 *Statistical Pass-By (SPB)* por ejemplo) que no se han considerado en este trabajo.

Sin embargo, todos estos métodos mencionados anteriormente tienen varias desventajas tales como la influencia de factores ambientales, la variabilidad de resultados dependiendo de la pista de prueba o del vehículo utilizado para realizar los ensayos, el alto costo de las pruebas en términos de tiempo y dinero, o el aspecto más importante, que es la limitación de la magnitud medida, el nivel de presión sonora [3]. Estas limitaciones, en conjunto, pueden llegar a suponer una diferencia superior a 4 dB según diversos estudios publicados [9]. Por otro lado, es bien sabido que el nivel de presión acústica depende de varios factores como el entorno en el que viajan las ondas de sonido, atenuación o distancia de la fuente de ruido. Esto no sucede si se utiliza el nivel de potencia acústica, que es una magnitud inherente a la fuente de ruido y no depende de otros factores externos [8].

El objetivo que nos planteamos es poder estimar el resultado del ensayo CB mediante ensayos de laboratorio de neumáticos sobre rodillo. En el ensayo sobre rodillo (o tambor) obtenemos la potencia acústica del neumático en rodadura en las mismas condiciones de carga y velocidad que en el ensayo en pista *Coast-By* (CB).

La estructura de este artículo es la siguiente en primer lugar se describe el proceso seguido para obtener la potencia acústica del neumático en banco de rodillos y se muestran resultados de un neumático. En segundo lugar se implementa el modelo de propagación que modeliza el ensayo en pista. Finalmente se muestran y comentan los resultados de las pruebas y las conclusiones finales.

2. CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO DE LABORATORIO

Con el fin de resolver las limitaciones de los métodos de ensayo en pista convencionales, se ha desarrollado una nueva metodología basada en pruebas en laboratorio sobre rodillo [3] y la norma internacional ISO 3744 [4]. La norma ISO 3744 permite determinar los niveles de potencia acústica de las fuentes de ruido utilizando la presión del sonido en un campo libre sobre un plano reflector. Este nuevo enfoque combina la experiencia del método ISO con el procedimiento experimental desarrollado en las instalaciones de ensayos de neumáticos del grupo de investigación de Ingeniería Mecánica Aplicada de la Universidad Miguel Hernández de Elche.

Mientras que algunos grupos de investigación internacionales han realizado ensayos de la emisión de ruido de los neumáticos usando tambores [9], ninguno de ellos lo han hecho por medio de un método de

ingeniería específico estandarizado para determinar el sonido nivel de potencia. Por el contrario, todas las pruebas anteriores han considerado la presión sonora.

2.1. Características del entorno acústico de ensayo. Factores de corrección K_1 y K_2

La instalación de ensayo de neumáticos dispone de una máquina con un rodillo Ø1700 mm de acero impulsado por un motor eléctrico de 110 kW. Los neumáticos se montan en llantas comerciales sobre un eje que gira libremente alrededor de su posición. Un cilindro hidráulico empuja el conjunto eje-neumático contra el tambor para comunicar la carga de ensayo. Todo ello se ubica en una celda de ensayos de 3920x9350x4840 mm con el techo y las paredes fabricados con materiales de fono-absorbentes. Los instrumentos de medición como el tacómetro, la célula de carga, micrófonos, calibrador de la presión sonora o el termómetro, son inspeccionados metrológicamente y calibrados regularmente. Además, todas las instalaciones del laboratorio y sus actividades son auditadas todos los años y están acreditados por la norma ISO/IEC 17025 para laboratorios de ensayos desde 2011.

Para caracterizar las condiciones acústicas de la celda de ensayos es preciso determinar los factores de corrección K_1 y K_2 según lo prescrito por ISO 3744. K_1 corresponde a la corrección por ruido de fondo y K_2 a la corrección por el entorno acústico. Los resultados de los ensayos mostraron que $\Delta L > 10 \text{ dB}$ en todas las posiciones de micrófono. Esto significa que ΔL es superior al mínimo exigido para el ruido de fondo que la norma ISO 3745 prescribe para cámaras de ensayo semi-anecoicas de Grado de precisión 1, lo que nos da una idea del entorno de prueba óptimo en el que trabajamos.

Se realizaron varias pruebas de acuerdo con ISO 3744, usando superficies de medición semiesféricas de radio 1 m y 2 m para obtener el factor de corrección del entorno de prueba K_2 . La velocidad del tambor se ajustó a 80 km/h dado que esa es la velocidad de los ensayos en pista de referencia.

Los resultados de ambos factores K_1 y K_2 se muestran en las tablas 1 y 2.

Una vez más, los resultados mostraron que el criterio de idoneidad del entorno de ensayos se ha logrado ampliamente ($K_2 < 2 \text{ dB}$). Además, no sólo cumplió con este requisito, sino que también está muy cerca



Fig. 1. Instalación de ensayos.

Tabla 1. Resultados de factor de corrección por ruido de fondo.

Posiciones de los micrófonos	$L'_p \text{ (dB)}$	$L''_p \text{ (dB)}$	$\Delta L \text{ (dB)}$	$K_1 \text{ (dB)}$
1 m	91.01	77.93	13.08	0.219
2 m	87.38	77.04	10.35	0.4205

Tabla 2. Resultados de factor de corrección por entorno de ensayo.

L'_{p1} (dB)	L'_{p2} (dB)	K_2 (dB)
91.20	86.78	0.699

del criterio del método de precisión ISO 3745 Grado 1 para cámaras semi-anecoicas que establece un valor máximo para K_2 de 0.5 dB.

2.2. Características del entorno acústico de ensayo. Tiempo de reverberación

Además de calcular los factores K_1 y K_2 , se ha obtenido el tiempo de reverberación de la celda de ensayos.

Se utilizaron dos posiciones de fuente, una en el centro de la sala y otra en la esquina noroeste del recinto, así como 4 posiciones de micrófono repartidas de forma que cubriesen todo el lugar homogéneamente. Se realizaron 3 mediciones por cada posición de micrófono, evaluando 3 caídas de 20 dB (T20) por medición.

Los resultados se promediaron por tercios de octava desde los 100 Hz a los 3.150 Hz, obteniendo así el tiempo de reverberación de la sala. Estos resultados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Tiempo de reverberación.

TIEMPO DE REVERBERACIÓN [s]	0,8	0,7	0,7	0,3	1,9	0,2	0,9	0,5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
FRECUENCIA [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150

Se observa un pico especialmente importante a 250 Hz, que consideramos puede deberse a alguna resonancia de la máquina de ensayos. Queda pendiente realizar un análisis modal de la misma que pudiera aportar mayor información al respecto.

Los valores obtenidos a partir de 400/500 Hz se pueden considerar adecuados para poder medir adecuadamente la presión sonora del neumático en rodadura.

2.3. Configuración de los ensayos y valores obtenidos

Dado que el objetivo es obtener resultados comparables a los ensayos *Coast-By*, la configuración de los ensayos se realizó considerando las especificaciones de los ensayos en pista.

Es decir, el objetivo es obtener el nivel de potencia acústica a la velocidad de ensayo objetivo (80 km/h), la carga de ensayo que indica la norma (80% del índice de carga) y la presión de inflado nominal.

La principal ventaja de los ensayos en laboratorio es que los factores ambientales están muy controlados, la temperatura se mantuvo entre 24.2°C y 24.9°C.

En los ensayos en pista es preciso realizar al menos tres ensayos a velocidades ligeramente inferiores a 80 km/h y tres ensayos a velocidades ligeramente superiores a 80 km/h y realizar un análisis de regresión de los resultados para conseguir el valor de presión sonora a 80 km/h. Además, la temperatura ambiental puede ser muy diferente de un día a otro, lo cual aporta también cierta variabilidad.

Para validar la metodología se realizaron además ensayos entre 40 km/h y 120 km/h con intervalos de 10 km/h. El sistema de adquisición, LMS Scadas Mobile, se configuró para registrar las señales de 5 s entre 100 Hz y 10 kHz en un tiempo de integración de 125 ms. Todos estos datos se procesaron en bandas de tercio de octava.

Se dispusieron los micrófonos conforme a la norma ISO 3744 para obtener el nivel de potencia sonora (Lw) como se indica en la Fig. 3.

Como ejemplo de los resultados obtenidos en la Fig. 4 se muestra un espectro del nivel de potencia de sonora ponderado A en bandas de tercio de octava para un neumático Michelin Energy Saver 185/65R15-

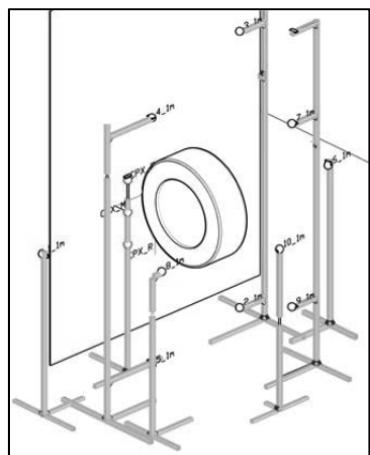


Fig. 3. Esquema configuración de nube de micrófonos en el ensayo.

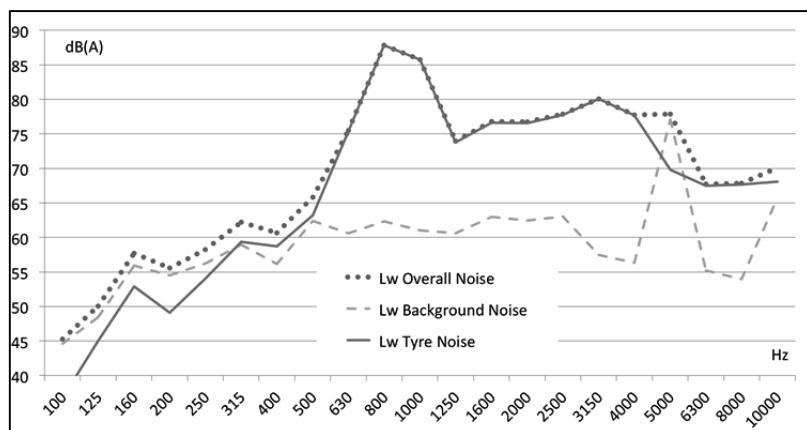


Fig. 4. Espectro de ruido para un neumático Energy Saver Michelin 185/65R15-88H a 80 km/h.

88H a una velocidad de 80 km/h. La línea punteada roja muestra el nivel de potencia de sonido general, que incluye el ruido de los neumáticos y el ruido del tambor al girar a 250 rpm (80 km/h para el neumático). La línea discontinua verde muestra el ruido de fondo, es decir, el ruido emitido por el banco de pruebas cuando el tambor está girando, en este caso sin un neumático y sin carga, a la misma velocidad de 250 rpm. Finalmente, la línea continua azul es el nivel de potencia acústica emitida por el neumático en sí, que se obtiene, en una primera aproximación, por la resta logarítmica del ruido de fondo al nivel de potencia total. Posteriormente se emplea el filtrado de la señal y la atenuación del ruido de fondo para la obtención del espectro del nivel de potencia sonora del neumático que se mostrará más adelante en la Fig. 5.

Estos resultados son similares a los que se muestran en la literatura [1] y en otras investigaciones [9] y [10]. La Fig. 4 muestra un espectro de ruido de típico en el rango de 315 Hz a 4 kHz, donde está contenida la mayoría de la energía del sonido. El pico alrededor de la frecuencia de 1 kHz es característico del ruido emitido por un neumático en rodadura y coincide con los ensayos en pista.

La banda de 5kHz difiere del espectro típico de ruido de neumático/carretera, esto se debe a la influencia de la máquina de ensayos, y más específicamente al motor eléctrico que impulsa el conjunto, como se puede observar en la gráfica del ruido de fondo. Sin embargo, este comportamiento no es un problema porque el método ISO 11819 CPX recomienda estudiar el ruido de los neumáticos en las bandas de tercio de octava ubicadas entre 315 Hz - 4 kHz y la emisión de sonido principal del ruido de los neumáticos se concentra entre 800 y 1600 Hz. La diferencia de niveles de ruido entorno a 1kHz entre el ruido de fondo y el Lw permite determinar que los resultados obtenidos son válidos.

3. MODELO DE PROPAGACIÓN

Gracias al ensayo descrito podemos obtener el nivel de potencia sonora emitido por la fuente de ruido que supone un neumático rodando sobre el tambor en condiciones muy controladas de laboratorio. Si bien para obtener los valores de referencia de presión sonora conforme al Reglamento de Homologación 117 (ensayos CB) es preciso aplicar un modelo de propagación.

Recordando lo que se ha comentado en la introducción de este artículo, en el ensayo CB tenemos cuatro neumáticos montados sobre un vehículo circulando en línea recta a velocidad quasi-constante. En el ensayo se mide el nivel de presión sonora a 7'5 m a ambos lados de la línea central longitudinal del vehículo. En este ensayo se registra el valor de nivel de presión sonora global máximo, que sabemos corresponde a la banda de 1 kHz.

El modelo de propagación debe reproducir el ensayo considerando el vehículo con cuatro fuentes de ruido moviéndose a 80 km/h. Para poder comparar los resultados el modelo de propagación debería poder contemplar las características geométricas del vehículo de ensayo (batalla y anchos de vía), incluyendo las reflexiones y atenuaciones de los pasos de rueda y bajos del vehículo, y las diferencias de ruido emitido debido a la diferente carga de ensayo de cada rueda del vehículo circulando. Estas consideraciones complican de forma importante el modelo de propagación.

Sin embargo, las características o limitaciones que el Reglamento 117 impone al vehículo de ensayo son mínimas. La variabilidad del tipo de vehículo válido es muy elevada y este hecho es una causa de falta de repetibilidad intrínseca al ensayo de homologación en pista.

El modelo de propagación que proponemos es una primera aproximación que nos permite comprobar que es posible caracterizar adecuadamente el ruido emitido por un neumático utilizando exclusivamente los ensayos en tambor, en laboratorio.

Para poder validar el modelo propuesto se han realizado múltiples ensayos en pista con los mismos neumáticos que luego se han utilizado en el ensayo en tambor.

En la Fig. 5 se muestra, con trazo continuo de color anaranjado, se representa el espectro del nivel de potencia sonora L_{W-Drum} de un neumático Insa Turbo Sport 185/65R15 88H obtenido mediante ensayo en laboratorio utilizando el nuevo método Drum a una velocidad de 80 km/h.

Más abajo, mediante una nube de puntos, se representan los espectros de nivel de presión sonora $L_{p-track}$ para el mismo neumático Insa Turbo Sport 185/65R15 88H obtenidos mediante diez ensayos ($L_{pTrack1}$ - $L_{pTrack10}$) en pista según el método *Coast-By* a unas velocidades comprendidas entre los 75 y los 85 km/h.

Nótese que, aunque se han superpuesto las gráficas, el espectro mostrado para el caso de los ensayos en laboratorio corresponde al nivel de potencia sonora en campo cercano mientras que en el caso de los en-

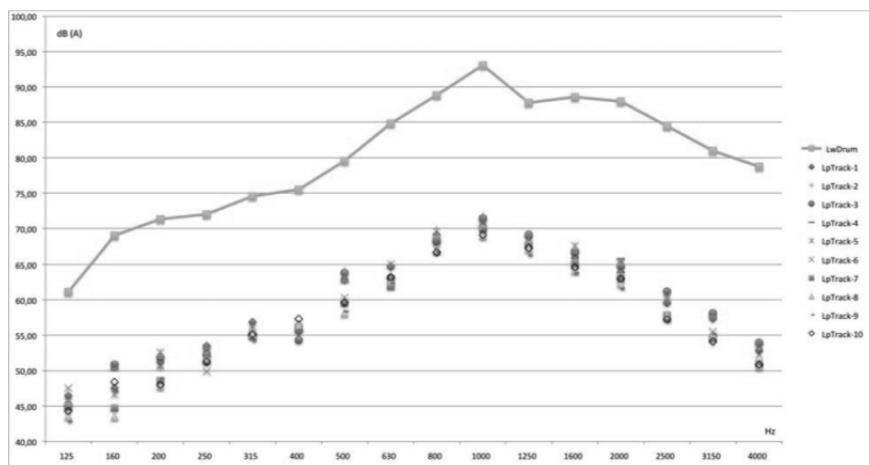


Fig. 5. Espectro de nivel de potencia acústica obtenido en ensayos de laboratorio en tambor a 80 km/h y espectros de nivel de presión sonora obtenido en ensayos en pista 75 y 85 km/h.

sayos en pista corresponde al nivel de presión sonora a 7.5 m de distancia. Por tanto, la diferencia entre los espectros obtenidos en ambos casos es totalmente normal y está justificada. Como puede apreciarse, existe una diferencia aproximada de 20 dB(A) entre el nivel de potencia sonora $L_{W\text{-Drum}}$ registrado en el banco de ensayos y el nivel de presión sonora $L_{p\text{-Track}}$ registrado en pista. Sin embargo, la forma de la curva es bastante similar y se observa el valor máximo en la banda de 1 kHz.

3.1. Obtención del nivel de presión acústica L_p a partir del nivel de potencia acústica L_w

Aunque existen diversos modelos de propagación sonora entre fuente y receptor, el modelo propuesto en la norma ISO 9613-2 *Atenuación del sonido en campo abierto* [5], es ampliamente empleado en diversas aplicaciones de ingeniería acústica. A pesar de que sus resultados pueden ser menos precisos que otros modelos empíricos más avanzados como los de Rasmussen [22] o Rudnik [23], se trata de un modelo muy fiable y sencillo de implementar. El modelo propuesto en la norma ISO 9613-2 consiste en un método de ingeniería para calcular el nivel de presión sonora en un punto procedente de una o más fuentes sonoras, que pueden ser estáticas o móviles, como es el caso de un neumático montado en un banco de ensayos en laboratorio o de un vehículo en marcha.

La ecuación propuesta por la norma ISO 9613-2 calcula el nivel de presión sonora L_p continuo equivalente en bandas de octava a partir del nivel de potencia sonora L_w producido por la fuente sonora puntual, realizando una corrección por directividad D_l , y teniendo en cuenta el factor de atenuación A de la siguiente manera:

$$L_p = L_w + D_l - A \text{ (dB)} \quad (1)$$

El factor de corrección por directividad D_l describe el grado en que el nivel de presión sonora equivalente de una fuente puntual se desvía en una dirección determinada respecto del nivel sonoro de una fuente puntual omnidireccional. Dicho factor se establece en cero a una altura de referencia de la ubicación del micrófono desde el suelo.

Por otro lado, el factor de atenuación A , depende de los siguientes factores:

$$A_{\text{total}} = A_{\text{div}} + A_{\text{atm}} + A_{\text{gr}} + A_{\text{bar}} + A_{\text{misc}} \text{ (dB)} \quad (2)$$

donde

A_{div} es el factor de atenuación por divergencia geométrica;

A_{atm} es el factor de atenuación por absorción atmosférica;

A_{gr} es el factor de atenuación por efecto del suelo;

A_{bar} es el factor de atenuación por barreras y

A_{misc} es el factor de atenuación por otros efectos no contemplados en los efectos anteriores

El modelo que se propone considera que las cuatro fuentes, una por cada neumático, son iguales y se mueven a 80 km/h sobre la línea longitudinal de referencia del ensayo en pista, a 7,5 m de distancia del observador. No se contempla la distancia asociada a batalla y vías de los vehículos. Y tampoco como afecta la carrocería y la diferencia de peso en cada rueda. Es por tanto un modelo sencillo, pero que nos va a proporcionar resultados satisfactorios.

El factor de atenuación por divergencia geométrica A_{div} depende de la distancia entre fuente y receptor y viene dada por la siguiente expresión:

$$A_{\text{div}} = 20 \cdot \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + 8 \text{ (dB)} \quad (3)$$

Donde la constante relaciona el nivel de potencia sonora con la presión sonora a la distancia de referencia d_0 , la cual es 1 m, para una fuente sonora omnidireccional sobre un plano reflectante.

El valor de la divergencia geométrica es independiente de la frecuencia por lo que teniendo en cuenta que la fuente sonora se haya ubicada a 7.5 m de distancia del receptor y sustituyendo dicho valor en la ecuación (3) tenemos $A_{\text{div}} = 25.5$ dB para todas las frecuencias de banda de tercio de octava.

El factor de atenuación por absorción atmosférica A_{atm} puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$A_{atm} = \frac{\alpha \cdot d}{1000} \quad (\text{dB}) \quad (4)$$

El factor de atenuación por absorción atmosférica depende de la distancia d y del coeficiente de atenuación atmosférica α en decibelios por kilómetro, para cada banda de octava. Dicho coeficiente está recogido en la tabla 1 de la norma ISO 9613-1. Para una temperatura del aire de 25°C y una humedad relativa del 60%, condiciones ambientales a las cuales se llevó a cabo el ensayo.

Teniendo en cuenta la ecuación (4), que la distancia entre la fuente y el receptor es de 7.5 m y el coeficiente de atenuación atmosférica que establece la norma, el valor del factor de atenuación por absorción atmosférica A_{atm} para cada banda de tercio de octava se obtiene (tabla 4).

El factor de atenuación por efecto suelo A_{gr} es el resultado del sonido reflejado por la superficie del suelo. Depende de la atenuación en la región de la fuente A_s caracterizada por el factor de suelo de esta región G_s y de la atenuación para la región del receptor A_r caracterizada por su factor de suelo G_r y se da por la siguiente ecuación:

$$A_{gr} = 1.5 \cdot (3.5 \cdot G_s + 2.5 \cdot G_r) \quad (\text{dB}) \quad (5)$$

En nuestro caso, N. Campillo [20] en su Tesis Doctoral caracterizó experimentalmente la superficie asfáltica del suelo de la pista de ensayo tanto de la región de la fuente como de la región del receptor, siendo el factor de suelo G en ambas de 0,1. Por tanto, la atenuación por efecto suelo, independiente de las frecuencias para distancias inferiores a 10 m, será:

$$A_{gr} = 1.5 \cdot (3.5 \cdot 0.1 + 2.5 \cdot 0.1) = 0.9 \text{ dB} \quad (6)$$

Para considerar atenuación por barreras A_{bar} debe haber un objeto situado entre fuente y receptor. En nuestro caso no existe ninguna barrera entre la fuente y el receptor por lo que $A_{bar} = 0$.

Para finalizar, la atenuación por otros efectos A_{misc} , corresponde a la atenuación de otros efectos no incluidos en los cuatro factores anteriores, como puede ser la atenuación durante la propagación a través de bosques o de instalaciones industriales o zonas urbanizadas. Los ensayos de rodadura de neumáticos se realizan en zonas despejadas no habiendo ninguno de esos elementos, por lo que $A_{misc} = 0$.

Por tanto, el factor de atenuación A_{total} dadas las características de nuestro ensayo vendrá dado por la siguiente expresión:

Tabla 4. Factor de atenuación por absorción atmosférica A_{atm} para cada banda de tercio de octava.

f(Hz)	125	160	200	250	315	400	500	630
A_{atm} (dB)	0.0002	0.0003	0.0005	0.0080	0.0118	0.0168	0.0231	0.0304
f(Hz)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
A_{atm} (dB)	0.0382	0.0464	0.0551	0.0651	0.0780	0.0960	0.1223	0.1583

Tabla 5. Factor de atenuación total A_{total} para cada banda de tercio de octava.

f(Hz)	125	160	200	250	315	400	500	630
A_{atm} (dB)	26.38	26.38	26.38	26.39	26.39	26.40	26.41	26.41
f(Hz)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
A_{atm} (dB)	26.42	26.43	26.44	26.45	26.46	26.48	26.51	26.54

$$A_{\text{total}} = A_{\text{div}} + A_{\text{atm}} + A_{\text{gr}} \text{ (dB)} \quad (7)$$

Puesto que tal y como se ha explicado anteriormente, el factor de atenuación por absorción atmosférica es distinto para cada banda de octava tendremos que el valor total de la atenuación también será distinto para cada frecuencia.

Una vez desarrollada la ecuación (1) a lo largo del apartado 3.1, el modelo de propagación propuesto por la norma ISO 9613-2 que obtiene el nivel de presión sonora L_p continuo equivalente en bandas de octava a partir del nivel de potencia sonora L_w producido por la fuente sonora puntual queda de la siguiente manera:

$$L_p = L_w + 10 \cdot \log 4 - A_{\text{total}} \text{ (dB)} \quad (8)$$

Donde el factor $10 \cdot \log 4$ es el resultante de considerar cuatro neumáticos para poder comparar el ensayo realizado en el laboratorio con el ensayo realizado en pista según el Reglamento 117. Sustituyendo los valores obtenidos anteriormente en la ecuación (8) obtendremos la curva resultado del modelo de propagación sonora que permite predecir el nivel de presión sonora L_p continuo equivalente, en bandas de tercio de octava, a partir del nivel de potencia sonora L_w medido en el laboratorio.

En la Fig. 6 están representados los niveles de potencia sonora L_w obtenidos en el banco de ensayo para un neumático Insa Turbo Sport 185/65R15 88H a una velocidad de 80 km/h y los niveles de presión sonora L_p calculados considerando el incremento por tratarse de cuatro neumáticos y la atenuación que se produce en el ensayo en pista obtenida mediante el modelo de propagación sonora descrito anteriormente.



Fig. 6. Nivel de potencia sonora L_w medido en banco de ensayos y nivel de presión sonora L_p obtenido a partir de éste mediante el modelo de propagación sonora.

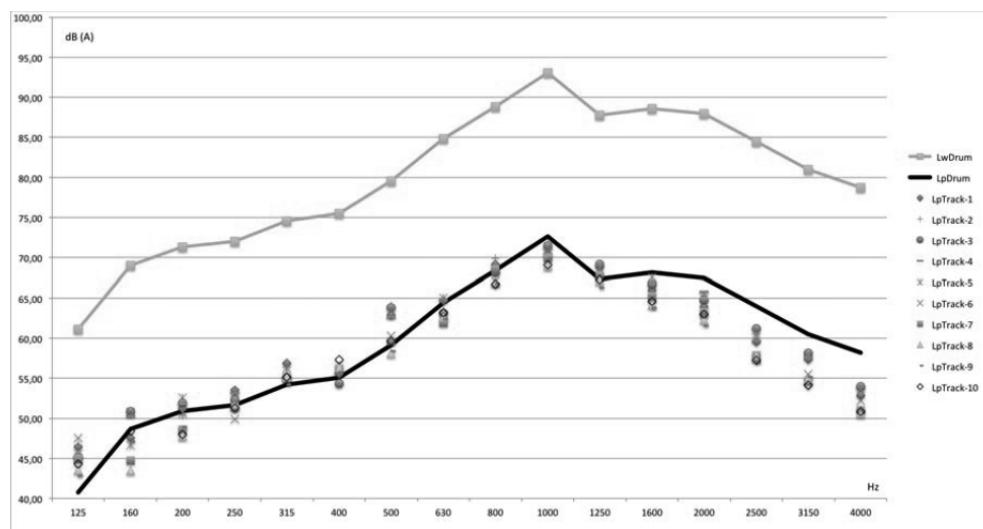
4. RESULTADOS Y VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE ENSAYO EN LABORATORIO

Utilizando un modelo de propagación de sonido desarrollado entre la fuente y el receptor, es posible obtener el nivel de presión sonora equivalente L_p a partir del nivel de potencia acústica L_w medido en un Tambor.

Aplicando el modelo, podemos ver en la Fig. 7 el resultado del modelo y los datos experimentales obtenidos conforme al ensayo *Coast-By*, descrito en el Reglamento 117.

Tabla 6. Factor de atenuación total A_{total} para cada banda de tercio de octava.

f(Hz)	125	160	200	250	315	400	500	630
$L_{p\text{Drum}}$ (dB)	40.76	48.67	50.94	51.65	54.19	55.10	59.16	64.45
$L_{p\text{Drum}} - L_{p\text{track}}$ (dB)	-4.10	0.61	1.21	-0.05	-0.71	-0.38	-1.58	1.63
f(Hz)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
$L_{p\text{Drum}}$ (dB)	68.43	72.67	67.34	68.18	67.50	64.00	60.52	58.20
$L_{p\text{Drum}} - L_{p\text{track}}$ (dB)	0.93	2.73	-0.17	3.04	4.21	5.65	4.76	6.32

Fig. 7. Comparación entre los niveles de potencia sonora $L_{w\text{Drum}}$ y presión sonora $L_{p\text{Drum}}$ obtenidos en banco de ensayo y los niveles de presión sonora $L_{p\text{Track}}$ obtenidos según el método *Coast-By*.

La tabla 6 muestra, para un neumático Insa Turbo Sport 185/65R15 88H, en bandas de tercio de octava los valores de presión sonora $L_{p\text{Drum}}$ obtenidos a partir de los niveles de potencia acústica $L_{w\text{Drum}}$, así como la diferencia entre estos valores y el valor medio de la presión del sonido, calculado de acuerdo al método *Coast-By*.

En el rango de frecuencias comprendido entre 2 kHz y 4 kHz se puede apreciar una diferencia de entre 4 y 6 dB en función de la banda de tercio de octava de que se trate. Sin embargo, esa diferencia no es muy significativa si evaluamos los valores globales de presión sonora equivalentes $L_{p\text{-eq}}$, debido al peso de dichas bandas de frecuencias en el valor global $L_{p\text{-eq}}$ ya que la concentración de la mayor cantidad de energía sonora se da en torno a 1 kHz.

Por otro lado, en la Fig. 8 se puede ver, para un neumático Insa Turbo Sport 185/65R15 88H a una velocidad de 80 km/h, una comparación entre los valores medios de presión sonora obtenidos mediante el ensayo *Coast-By* y los obtenidos mediante la potencia sonora en el banco de ensayo aplicando el modelo de propagación sonora establecido en la norma ISO 9613.

Además, es posible obtener los niveles de presión sonora equivalente $L_{p\text{-eq}}$ mediante la siguiente ecuación:

$$L_{p\text{-eq}} = 10 \cdot \log \left[\sum_{i=1}^N 10^{0.1L'_{pi}} \right] \quad (\text{dB}) \quad (8)$$

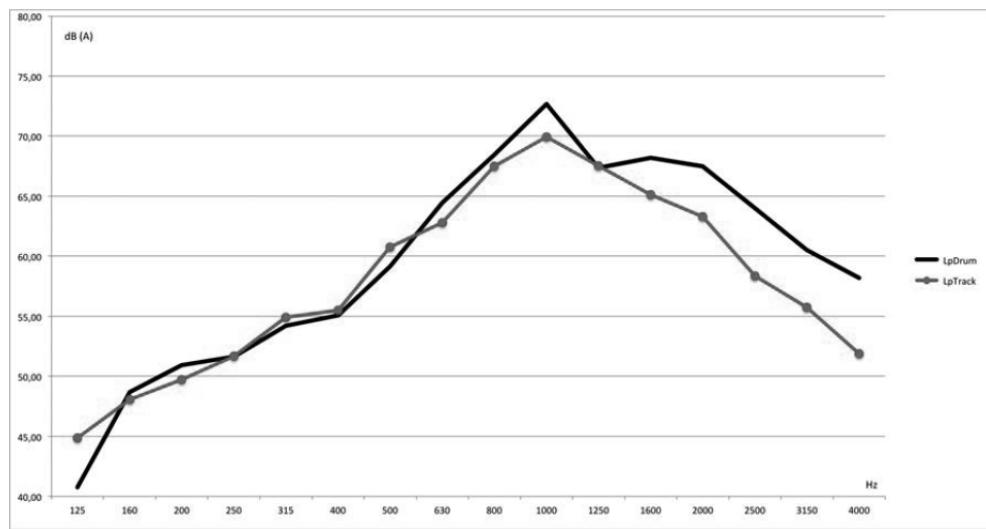


Fig. 8. Comparación entre el nivel de presión sonora $L_{p\text{Drum}}$ obtenido a partir de la potencia sonora en banco de ensayo utilizando el modelo de propagación establecido en la ISO 9613, y los niveles de presión sonora $L_{p\text{Track}}$ registrados mediante un ensayo en pista *Coast-By*.

Sustituyendo los valores de la tabla 5 para cada frecuencia de banda de tercio de octava en la ecuación (8) tenemos que el valor de presión sonora equivalente $L_{p\text{eqDrum}}$ obtenido a partir de los ensayos en laboratorio para el neumático Insa Turbo Sport 185/65R15 88H es $L_{p\text{eqDrum}} = 77.2$ dB. Mientras que el valor de presión sonora equivalente $L_{p\text{eqTrack}}$ obtenido a partir del valor medio de la presión sonora de los ensayos en pista para ese mismo neumático según el método *Coast-By* es $L_{p\text{eqTrack}} = 75.1$ dB.

Comparando las diferencias entre los valores de presión sonora equivalente obtenido mediante ambos métodos para todas las muestras de neumáticos ensayadas, tenemos que el valor medio de dichas diferencias es $\Delta L_{p\text{eq}} = 1.98$ dB. Esta diferencia puede ser debida a factores como la diferencia entre rodar en asfalto y rodar sobre un tambor y sobre todo el modelo de propagación utilizado que representa de forma muy simplificada el vehículo. Sin duda, es necesario mejorar el diseño del modelo para que reproduzca mejor el ensayo en pista, si bien consideramos que se podría utilizar directamente el valor L_w para caracterizar el ruido emitido por el neumático en rodadura y definir el ensayo de homologación y el umbral de aceptación/rechazo en base al ensayo en banco de rodillo. Además, hay que indicar que las diferencias que se han producido entre los ensayos en pista realizados de acuerdo con el Reglamento 117 y cuyas estimaciones han sido publicadas por otros autores en [9] son del mismo orden de las diferencias entre el $L_{p\text{eqTrack}}$ y el $L_{p\text{eqDrum}}$.

5. CONCLUSIONES

Resulta más relevante medir el nivel de potencia sonora L_w en lugar del nivel de presión sonora L_p . La magnitud medida de acuerdo con la Regulación 117 es el nivel de presión sonora. Sin embargo, esta magnitud depende de factores tales como el medio de propagación, la atenuación o la distancia de la fuente de sonido. Esto no sucede al L_w , que es inherente a la fuente y no depende de otros factores externos. Por lo tanto, midiendo L_p es más complicado evaluar el sonido emitido por una fuente a menos que el ambiente esté estrictamente controlado y definido. En este trabajo se evalúa el L_w emitido por un neumático en rodadura utilizando una nueva metodología que combina norma internacional ISO 3744 y ensayos en laboratorio de rodadura sobre tambor.

Para comparar los resultados obtenidos con el método descrito en el Reglamento 117 (*Coast-By*), se han realizado un número considerable de ensayos en pista y los ensayos en laboratorio de los mismos neumáticos. Se ha aplicado un sencillo modelo de propagación, utilizando el modelo de propagación de sonido

establecido en la norma Internacional ISO 9613, para simular el ensayo en pista, considerando los neumáticos como fuente puntual. Y los resultados han sido muy satisfactorios.

La nueva metodología de prueba Drum ha demostrado ser válida, repetible y precisa, con menores valores de incertidumbre que la prueba de homologación actual. Además, los parámetros esenciales del ensayo se pueden controlar mejor que en los ensayos *Coast-By*, por lo que el nuevo método consigue menos variabilidad y, por lo tanto, mayor repetibilidad.

El modelo de propagación ha demostrado que ambos métodos son comparables, tienen espectros de sonido notablemente similares. Las diferencias en cuanto a los valores obtenidos son del orden de las diferencias obtenidas en los ensayos en pista. Si bien, con un modelo de propagación más complejo que tenga en cuenta las características del vehículo de ensayo, esperamos obtener resultados más próximos a los experimentales. Además, mejorando el acondicionamiento acústico de la celda de ensayos de laboratorio obtendríamos también mejores resultados de Lw, sobre todo en frecuencias altas.

Sin embargo, también se podría plantear establecer un ensayo de homologación de ruido de rodadura directamente con el valor de Lw obtenido en el banco de ensayos. Esta futura línea de trabajo permitiría independizar el resultado del vehículo utilizado en el ensayo y aumentaría considerablemente de repetibilidad de los resultados. Por esa razón, una nueva metodología basada en pruebas de tambor (ensayo Drum) se puede implementar para obtener los valores de emisión de ruido de un neumático rodando por una carretera.

REFERENCIAS

- [1] Sandberg, U., Ejsmont, J.A., *Tyre/road noise reference book*, Informex, Kisa, Sweden (2002)
- [2] UNECE Regulation 117. Uniform provisions concerning the approval of tyres with regard to rolling sound emissions and to adhesion on wet surfaces. (2007)
- [3] Clar-Garcia, D. et al., "A new methodology to assess sound power level of tyrreroad noise under laboratory controlled conditions in drum test facilities", *Applied Acoustics*, 110, 23-32 (2016)
- [4] International Organization for Standardization ISO 3744, Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure – Engineering method in an essentially free field over a reflecting plane, (1994)
- [5] International Organisation for Standardization ISO 9613-2, Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 2: General method of calculation, Geneva, Switzerland, (1996)
- [6] Regulation (EC) nº 661/2009 of the European Parliament and of the Council of 13 July 2009 concerning type-approval requirements for the general safety of motor vehicles, their trailers and systems, components and separate technical units intended therefore
- [7] Regulation (EC) nº 1222/2009 of the European Parliament and of the Council of 25 November 2009 on the labelling of tyres with respect to fuel efficiency and other essential parameters
- [8] Campillo Davo, N., Peral Orts, R., Velasco Sanchez, E., "An experimental procedure to obtain sound power level of tyre/road noise under Coast-By conditions", *Applied Acoustics*, 74, 718-727 (2013)
- [9] Sandberg, U., "Possibilities to Replace Outdoor Coast-by Tyre/Road Noise Measurements with Laboratory Drum Measurements", Swedish Road and Transport Research Institute (VTI), *Silence Consortium* (2005)
- [10] Sandberg, U., "The multi-coincidence peak around 1000Hz in tyre/road noise spectra", *Proceedings of Euro-Noise 2003*, Naples, Italy, paper ID 498 (2003)
- [11] van Blokland, G., Kragh, J., "30 Different tyres on 4 surface types – How do truck tyre noise levels relate to the test surface", *Euro-Noise 2015*, Maastrich, 2147-2152 (2015)
- [12] FEHRL Report. "Estimating the influence of vehicle body design on the test result – A theoretical approach", *Final Report SI2.408210 Tyre/Road noise - Volume 2. FEHRL*, 129-132 (2006)
- [13] Ho, K.-Y. et al., "The effects of road surface and tyre deterioration on tyre/road noise emission", *Applied Acoustics*, 74 , 921-925 (2013)
- [14] Peeters, B., van Blokland, G., "The noise emission model for European road traffic". *Deliverable 11 of the IMAGINE project, IMA55TR-060821-MP10*. (January 11th. 2007)

- [15] Hamet, J.-F., "Measurement of Power and Directivity of Tyre/Road Surface Noise", *Proceedings of Inter-Noise 88*, Avignon, France
- [16] International Organization for Standardization ISO/IEC 17020, Conformity assessment. Requirements for the operation of various types of bodies performing inspection, (2012).
- [17] International Organization for Standardization ISO/IEC 17025, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, (2005).
- [18] International Organization for Standardization ISO 3745, Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure – Precision methods for anechoic and hemi-anechoic rooms, (2003).
- [19] Donavan, P., "Use of the ASTM Standard Reference Test Tire as a Benchmark for On-Board Tire/Pavement Noise Measurement", SAE Technical Paper 2009-01-2108 (2009)
- [20] Campillo, N., "Experimental modelization of tyre/road noise in type approval test", Doctoral thesis. Miguel Hernandez University of Elche (March 2013)
- [21] Clar-Garcia, D., "Metodología de ensayo en laboratorio para la medición del ruido de rodadura de neumáticos", Doctoral Thesis, Miguel Hernandez University of Elche (Enero 2018)
- [22] Rasmussen, K.B., "A note on the calculation of sound propagation over impedance jumps and screens", *Journal of Sound and Vibration*, 84(4), 598-602 (1982)
- [23] Rudnick, I., "The propagation of an acoustic wave along a boundary", *Journal of the Acoustical Society of America*, 19, 348-357 (1947)

ESTIMATION OF SOUND PRESSURE LEVEL EMITTED BY A VEHICLE IN THE COAST-BY TEST FROM THE SOUND POWER LEVEL OBTAINED IN LABORATORY TESTS

Abstract – Body of the abstract Tyre/road sound emissions have been proved to be the main source of noise caused by road traffic when driving at medium and high speeds. Tyre/road noise has been widely studied among the last decades. However, an important part of this research has been focused, mainly, on track tests. Different track or road methods have been developed for measurement of tyre/road sound emissions. The most important ones are the Coast-By, the Close-Proximity, the Statistical Pass-By or the Controlled Pass-By methods. Among all of them, the Coast-By method has been raised in Europe as standard method concerning the approval of tyres with regard to tyre/road sound emissions as preconized in UNECE Regulation 117. However, all the above mentioned methods have several disadvantages such as the influence of environmental factors, the different results that can be obtained depending on the test track or the vehicle upon which the tests are carried out, the lack of repeatability or, the most important aspect, which is the limitation of the measured magnitude, the sound pressure level. A new methodology based on drum tests and the ISO 3744, which was developed in order to avoid these limitations, has been proved to be comparable to the Coast-By (CB) method. This paper describes how to estimate the results of the CB test using the new Drum test method. This new methodology obtains the sound power level of a tyre in Drum test conditions, as an individual source, and uses a standardized sound-propagation method to estimate the sound pressure level under CB track test conditions.

Keywords – Noise, Tyre, Road, Sound Power Level, Coast-By.

