

TESIS DOCTORAL

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE



“Metodología de ensayo en laboratorio para la medición del ruido de rodadura de neumáticos”

David Clar García

DIRECTORES:

Dr. Ing. Emilio Velasco Sánchez
Dr. Ing. Pedro Ginés Vicente Quiles

Junio - 2017

AUTORIZACIÓN DE LA PRESENTACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL POR LOS DIRECTORES

D. Emilio Velasco Sánchez, Profesor Doctor del Área de Ingeniería Mecánica en el Departamento de Ingeniería Mecánica y Energía de la Universidad Miguel Hernández de Elche y D. Pedro Ginés Vicente Quiles, Profesor Doctor del Área de Máquinas y Motores Térmicos en el Departamento de Ingeniería Mecánica y Energía de la Universidad Miguel Hernández de Elche,

AUTORIZAN

La presentación de la Tesis Doctoral titulada “Metodología de ensayo en laboratorio para la medición del ruido de rodadura de neumáticos”, realizada por D. David Clar García, bajo nuestra dirección y supervisión, en el Departamento de Ingeniería Mecánica y Energía de la Universidad Miguel Hernández de Elche, y que presenta para la obtención del grado de Doctor por la Universidad Miguel Hernández de Elche.

En Elche, a 12 de junio de 2017.

Los Directores de la Tesis



Fdo: Emilio Velasco Sánchez

Fdo: Pedro Ginés Vicente Quiles

D. Óscar Reinoso García, Coordinador del Programa de Doctorado Tecnologías Industriales y de Telecomunicación de la Universidad Miguel Hernández de Elche,

CERTIFICA

Que el trabajo realizado por D. David Clar García, titulado “Metodología de ensayo en laboratorio para la medición del ruido de rodadura de neumáticos”, ha sido dirigido por el Dr. Emilio Velasco Sánchez y el Dr. Pedro Ginés Vicente Quiles, realizado en el Departamento de Ingeniería Mecánica y Energía y se encuentra en condiciones de ser leído y defendido como Tesis Doctoral ante el correspondiente tribunal en la Universidad Miguel Hernández.

Y para que así conste y surta los efectos oportunos, firmo la presente en Elche, a 12 de junio de 2017.

Fdo. D. Óscar Reinoso García
Coordinador del Programa de Doctorado
Tecnologías Industriales y de Telecomunicación



Quiero agradecer a todas las personas que me han ayudado, de alguna manera, a llegar al final de éste camino.

A todos los compañeros del Departamento de Ingeniería Mecánica y Energía que, en mayor o menor medida, habéis contribuido a los resultados de esta tesis y, muy especialmente, a Emilio. Sin tu ayuda, sin tu apoyo, sin tus palabras de ánimo o sin tus consejos, éste documento se hubiera quedado en simple un anhelo.

A Ángel y M^a Cruz. No hay suficientes palabras para expresar mi gratitud por todo lo que habéis hecho por mí. Os esforzasteis incansablemente para darme lo mejor a vuestro alcance. Habéis sido mis mejores maestros, siempre tratando de enseñarme el significado de las palabras esfuerzo y sacrificio. Podéis decir con orgullo que habéis alcanzado esta meta conmigo.

A Ángel. Una parte de ésta tesis es tuya. Siempre me has ayudado a hacer mi trabajo antes que el tuyo. Creo que me habría perdido en Valencia, si no fuera por ti. Fuiste la guía que necesitaba para seguir mi camino. Todavía recuerdo esas palabras por la mañana temprano: ¡Levantaos vagos!

A Ana. La mayor parte de lo que soy, es gracias a ti. Tocaste mi corazón y desde entonces siempre has estado ahí para mí. Siempre me has ayudado a tomar la decisión correcta. Has cambiado mi vida y todas mis metas. Me has dado dos estrellas. No puedo recordar mi vida sin ti a mi lado. No puedo imaginar el resto de mi vida sin ti. Lo mejor está por llegar. Te quiero.

A todos vosotros, desde el fondo de mi corazón, ¡MUCHAS GRACIAS!

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	I
ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE TABLAS	IX
CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2.- ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE	9
2.1.- ANTECEDENTES	11
2.1.1.- Método Coast-By	13
2.1.2.- Close-Proximity	15
2.2.- ESTADO DEL ARTE	19
2.2.1.- Technical University of Gdansk (TUG)	22
2.2.2.- Purdue University, Indiana (USA)	23
2.2.3.- Swedish Road and Transport Research Institute (VTI)	25
2.2.4.- Technical University of Gdansk (TUG) y Proelastic Surface (PERS)	27
2.2.5.- Katholieke Universiteit Leuven, Belgium	30
2.2.6.- Universidad Miguel Hernández de Elche	32
CAPÍTULO 3.- OBJETIVOS Y METODOLOGÍA DE LA TESIS	35

CAPÍTULO 4.- ENSAYOS EN PISTA. MÉTODO <i>COAST-BY</i>	39
4.1.- CONFIGURACIÓN DEL ENSAYO Y NEUMÁTICOS ANALIZADOS	41
4.1.1.- Características de la pista	41
4.1.2.- Especificaciones relativas a los micrófonos	44
4.1.3.- Condiciones ambientales	47
4.1.4.- Otras especificaciones relativas a las mediciones	47
4.1.5.- Características del vehículo empleado	48
4.1.6.- Características de los neumáticos a ensayar	49
4.1.7.- Procedimiento de ensayo	51
4.2.- CONDICIONES DE LOS ENSAYOS REALIZADOS	53
4.3.- RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS	56
4.4.- COMENTARIOS Y CRÍTICAS AL MÉTODO DE ENSAYO <i>COAST-BY</i>	61
CAPÍTULO 5.- DISEÑO DEL MÉTODO DE ENSAYO <i>DRUM</i> EN LABORATORIO	65
5.1.- DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO ACÚSTICO DE ENSAYO	69
5.2.- UBICACIÓN DE LOS MICRÓFONOS SEGÚN LA NORMA ISO 3744	73
5.2.1.- Definición del paralelepípedo de referencia	73
5.2.2.- Determinación de las coordenadas de los micrófonos	75
5.2.3.- Diseño de los soportes para la ubicación de los micrófonos	80
5.3.- CÁLCULO DEL FACTOR DE CORRECCIÓN POR RUIDO DE FONDO K_1	84
5.4.- CÁLCULO DEL FACTOR DE CORRECCIÓN POR ENTORNO ACÚSTICO K_2	85
5.5.- CÁLCULO DEL NIVEL DE POTENCIA SONORA	88

5.6.- CONCLUSIONES	89
CAPÍTULO 6.- ENSAYOS EN LABORATORIO <i>DRUM</i>	91
6.1.- INSTRUMENTACIÓN E INSTALACIONES DE ENSAYO	93
6.2.- CARACTERIZACIÓN DE LAS INSTALACIONES DE ENSAYO DE NEUMÁTICOS	96
6.2.1.- Obtención del factor de corrección por ruido de fondo K_1	96
6.2.2.- Obtención del factor de corrección por entorno acústico de ensayo K_2	97
6.3.- CONFIGURACION DE LOS ENSAYOS Y NEUMÁTICOS ENSAYADOS	99
6.4.- RESULTADOS OBTENIDOS	100
6.5.- CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LABORATORIO	109
CAPÍTULO 7.- VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE ENSAYO	111
7.1.- COMPARATIVA DE RESULTADOS EN PISTA VS. LABORATORIO <i>DRUM</i>	113
7.2.- CÁLCULO DE LA PRESIÓN SONORA A PARTIR DE LA POTENCIA SONORA	115
7.2.1.- Modelo de propagación	115
7.2.1.1.- Atenuación por divergencia geométrica	117
7.2.1.2.- Atenuación por absorción atmosférica	117
7.2.1.3.- Atenuación por efecto suelo	118
7.2.1.4.- Atenuación por barreras	120
7.2.1.5.- Atenuación por otros efectos	120
7.2.1.6.- Atenuación total	121
7.2.2.- Obtención de la presión sonora a partir de la potencia sonora	122

7.3.- RESULTADOS Y VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE ENSAYO EN LABORATORIO	124
7.4.- ESTUDIO DE LA INCERTIDUMBRE DE LAS MEDIDAS	129
7.4.1.- Fuentes de incertidumbre asociadas a los métodos <i>Coast-By</i> y <i>Drum</i>	129
7.4.1.1.- Incertidumbre del método <i>Coast-By</i>	130
7.4.1.2.- Incertidumbre del método <i>Drum</i> con réplicas de asfalto ISO	132
7.4.2.- Incertidumbre de las medidas según ISO 3744	134
7.4.3.- Cálculo de la incertidumbre de medida en los ensayos en laboratorio	136
7.4.3.1.- Introducción	136
7.4.3.2.- Cálculo de $u_c^2(L_{pDrum_{7.5}})$	137
7.4.3.3.- Cálculo de $u_{L_{wDrum}}^2$	138
7.4.3.4.- Cálculo de $u^2(L_{pf})$	139
7.4.3.5.- Cálculo de $u^2(L'_p)$	140
7.4.3.6.- Cálculo de $u^2(K_1)$	142
7.4.3.7.- Cálculo de $u^2(K_2)$	144
7.4.3.8.- Cálculo de la incertidumbre combinada	148
7.5.- CONCLUSIONES SOBRE LA VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE ENSAYO	149
CAPÍTULO 8.- CONCLUSIONES FINALES. TRABAJOS FUTUROS	151
8.1.- CONCLUSIONES FINALES	153
8.2.- LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS	157
8.2.1.- Mejora de las condiciones de ensayo	157
8.2.2.- Medición de la potencia sonora en ensayos CB, CPX, SPB Y CPB	159

8.2.3.- Comparación de resultados entre los métodos CPX y Alternative CPX	159
8.2.4.- Mejora en la aplicación del modelo de propagación sonora	160
8.2.5.- Obtención del umbral de aceptación o rechazo para la homologación	160
BREVE CURRÍCULUM DEL AUTOR. PUBLICACIONES	161
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	165



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Instalaciones de ensayo de neumáticos	7
Figura 2. Disposición de la pista de ensayo y de los micrófonos para un ensayo <i>Coast-By</i>	14
Figura 3. Posiciones de los micrófonos para un ensayo <i>Close-Proximity</i>	16
Figura 4. Diferentes configuraciones tambor-neumático en instalaciones de ensayo <i>Drum</i>	19
Figura 5. <i>Timeline</i> de los diferentes equipos de investigación de ensayo con neumáticos	21
Figura 6. Resultados del nivel sonoro sobre asfalto real suave (izquierda) y en el rodillo sobre la superficie réplica asfáltica (derecha), ambos a 80 km/h	22
Figura 7. Máquina de ensayos <i>Tire-Pavement Test Apparatus</i> de la Universidad de Purdue	23
Figura 8. Presión sonora con diferentes anchos de diente (a) y relación entre el nivel de presión sonora total y el ancho de diente (b)	24
Figura 9. Comparación entre el método CPX y el método <i>Drum</i> en laboratorio	25
Figura 10. Comparación del espectro sonoro de ruido de rodadura de dos superficies de réplica asfáltica colocadas sobre el rodillo con los resultados obtenidos en pista	26
Figura 11. Rodillo cubierto por las diferentes superficies réplicas de asfalto	27
Figura 12. Espectro sonoro obtenido con las diferentes superficies ensayadas	28
Figura 13. Valor global de presión sonora obtenido con las diferentes superficies ensayadas	29
Figura 14. Array de micrófonos para la medida del ruido de rodadura <i>en el laboratorio tipo Drum de la Universidad Católica de Leuven</i>	30
Figura 15. Resultados de ruido de rodadura a 47 km/h con y sin taco colocado sobre el rodillo	31
Figura 16. Disposición de los micrófonos para la realización del ensayo alternativo A-CPX	32
Figura 17. Comparativa de los resultados obtenidos mediante simulación matemática y mediante los ensayos experimentales en pista	33
Figura 18. Vista aérea de la pista de ensayo	42
Figura 19. Vista aérea de la zona de ensayo delimitada por líneas rojas	43
Figura 20. Vista de la zona de ensayo con los vehículos de ensayo realizando una pasada	43
Figura 21. Colocación de los micrófonos en la zona de ensayo	44
Figura 22. Detalle de colocación de los micrófonos y las fotocélulas	46
Figura 23. Vehículos utilizados durante los ensayos en pista y sus dimensiones exteriores	49
Figura 24. Vistas de detalle de uno de los neumáticos ensayados	50
Figura 25. Disposición de la pista de ensayo y de los micrófonos para un ensayo <i>Coast-By</i>	51

Figura 26. Vista general de los neumáticos ensayados en pista según el método <i>Coast-By</i>	54
Figura 27. Gráfica con los espectros de frecuencia de los neumáticos 185/65R15 88H	58
Figura 28. Gráfica comparativa de los niveles de presión sonora equivalente L_{eq} obtenidos	60
Figura 29. Detalle exterior del cerramiento de la cámara de ensayo	70
Figura 30. Detalle interior del cerramiento de la cámara de ensayo	70
Figura 31. Ubicación de la máquina de ensayo dentro de la cámara de ensayo	71
Figura 32. Ventanas para el control visual dispuestas en una de las paredes del cerramiento	71
Figura 33. Disposición del neumático montado en la máquina de ensayos	72
Figura 34. Paralelepípedo hipotético de referencia que contiene la fuente de ruido	74
Figura 35. Dimensión característica de la fuente d_0 en el paralelepípedo de referencia	74
Figura 36. Esquema de distribución de micrófonos sobre la superficie semiesférica	75
Figura 37. Esquema de distribución de los micrófonos tras rotar 90° en sentido antihorario	76
Figura 38. Simulación con la distribución de los micrófonos para la superficie de radio 1 m	78
Figura 39. Simulación con la distribución de los micrófonos para la superficie de radio 2 m	79
Figura 40. Boceto de los soportes para situar espacialmente los micrófonos	80
Figura 41. Detalle del diseño de la base de un soporte para los micrófonos	81
Figura 42. Detalle del diseño del brazo de extensión de un soporte para los micrófonos	81
Figura 43. Detalle de simulación de la ubicación de los soportes alrededor del neumático	82
Figura 44. Soporte CPX situado en su posición y con los micrófonos montados	83
Figura 45. Soportes montados en la sala de ensayo para la superficie de radio 1 m	83
Figura 46. Detalle de simulación de la ubicación de los soportes alrededor del neumático	87
Figura 47. Posicionado de los soportes utilizando un medidor de distancias láser	95
Figura 48. Marcado de la posición de los soportes mediante agujeros y tacos de plástico rojo	95
Figura 49. Comparación de los espectros de ruido de los diferentes micrófonos	101
Figura 50. Espectro registrado para un neumático Michelin Energy 185/65R15-88H a 80 km/h	102
Figura 51. Comparación entre los espectros de diferentes neumáticos de medida 185/65R15 88H y el espectro de ruido de tráfico Europeo Normalizado según la norma EN 1793-3	103
Figura 52. Comparación de los espectros sonoros de un neumático Insa Turbo EcoEvol 205/55R16 91V para un rango de velocidades entre 70 y 120 km/h	104
Figura 53. Medida del ancho del taco para el cálculo de la frecuencia característica de impacto	105

Figura 54. Relación entre nivel de potencia acústica y velocidad de ensayo para diferentes neumáticos tamaño 205/55R16 91V y sus correspondientes regresiones logarítmicas	108
Figura 55. Gráficas del espectro de nivel de potencia sonora obtenido en laboratorio <i>Drum</i> a 80 km/h y de los espectros de nivel de presión sonora en pista entre 75 y 85 km/h	114
Figura 56. Nivel de potencia sonora L_{wDrum} medido en banco de ensayos y nivel de presión sonora L_{pDrum} obtenido a partir de éste mediante el modelo de propagación sonora	123
Figura 57. Comparación entre el nivel de presión sonora L_{pDrum} y los obtenidos según <i>Coast-By</i>	124
Figura 58. Comparación entre el nivel de presión sonora L_{pDrum} obtenido a partir de la potencia sonora en banco utilizando el modelo de propagación y los niveles de presión sonora L_{pTrack} registrados mediante un ensayo en pista <i>Coast-By</i>	126
Figura 59. Comparación entre los niveles de presión sonora L_{pDrum} obtenidos a partir de la potencia sonora registrada en banco de ensayo y los niveles de presión sonora L_{pTrack} registrados mediante un ensayo en pista <i>Coast-By</i>	128
Figura 60. Diseño en dos secciones de una plancha plana vertical para simular la carretera en el punto de contacto entre el neumático y el rodillo	158
Figura 61. Montaje para ensayo según el método <i>Alternative CPX</i> propuesto por Campillo	159
Figura 62. Distancia entre fuentes sonoras y micrófono teniendo en cuenta el ancho de vías	160

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos de presión sonora recogidos en laboratorio para ensayos en tres superficies de réplica asfáltica con distintos neumáticos a 80 km/h	28
Tabla 2. Clasificación de los neumáticos según el Reglamento 117	49
Tabla 3. Neumáticos de medida 185/65R15 ensayados en pista según el método <i>Coast-By</i>	54
Tabla 4. Neumáticos de medida 195/50R15 ensayados en pista según el método <i>Coast-By</i>	55
Tabla 5. Neumáticos de medida 205/55R16 ensayados en pista según el método <i>Coast-By</i>	55
Tabla 6. Valores obtenidos para el espectro de frecuencias de los neumáticos 185/65R15 88H	57
Tabla 7. Velocidades medias de los ensayos para cada uno de los neumáticos. Datos en km/h	59
Tabla 8. Grados de precisión y otros parámetros establecidos en la norma ISO 3744	68
Tabla 9. Coordenadas de los micrófonos en función del radio r de la semiesfera	76
Tabla 10. Coordenadas de las posiciones de los micrófonos para la semiesfera de radio 1 m	77
Tabla 11. Coordenadas de las posiciones de los micrófonos para la semiesfera de radio 2 m	79
Tabla 12. Listado de instrumentación empleada en los ensayos de laboratorio	94
Tabla 13. Resultados para determinar el factor de corrección por ruido de fondo	97
Tabla 14. Listado de neumáticos ensayados, sus dimensiones y carga de ensayo	99
Tabla 15. Listado de neumáticos ensayados y distancia entre tacos de la banda de rodadura	106
Tabla 16. Frecuencias de impacto en función de la velocidad	107
Tabla 17. Coeficiente de atenuación atmosférica α a 25 °C y 60% HR según ISO 9613-1	118
Tabla 18. Factor de atenuación por absorción atmosférica A_{atm} para cada banda	118
Tabla 19. Factor de atenuación por divergencia geométrica A_{div} para cada banda	121
Tabla 20. Factor de atenuación por absorción atmosférica A_{atm} para cada banda	121
Tabla 21. Factor de atenuación por efecto suelo para cada banda de tercio de octava	122
Tabla 22. Factor de atenuación total A_{total} para cada banda de tercio de octava	122
Tabla 23. Curva del modelo de propagación sonora según ISO 9613	123
Tabla 24. Presión sonora L_{pDrum} y su diferencia con el valor medio de la presión sonora L_{p_track}	125
Tabla 25. Incertidumbres asociadas al método de ensayo <i>Coast-By</i>	131
Tabla 26. Incertidumbres asociadas al método de ensayo <i>Drum</i>	134

METODOLOGÍA DE ENSAYO EN LABORATORIO PARA LA MEDICIÓN DEL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS

David Clar García

RESUMEN

La interacción neumático/carretera es la principal fuente de emisión de ruido causado por el tráfico rodado cuando se circula a velocidades de más de 30 km/h y de menos de 120 km/h, a partir de la cual, el ruido aerodinámico empieza a predominar. Varios métodos tales como el *Coast-By*, el *Close-Proximity*, el *Statistical Pass-By* o el *Controlled Pass-By* se han utilizado durante las últimas décadas para medir la emisión de ruido. Sin embargo, desde que se publicó el Reglamento (CE) No 1222/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de noviembre de 2009 sobre el etiquetado de los neumáticos en relación con la eficiencia en términos de consumo de carburante y otros parámetros esenciales, solo el método descrito en el Reglamento 117 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE) *Disposiciones uniformes relativas a la homologación de neumáticos por lo que se refiere a las emisiones de ruido de rodadura, a la adherencia en superficie mojada y/o a la resistencia a la rodadura*, puede ser usado con la finalidad de obtener valores aceptados de emisión sonora para el ruido de rodadura.

Todos estos métodos convencionales tienen varias desventajas y limitaciones tales como la falta de repetibilidad, la influencia de factores ambientales o los diferentes resultados que pueden ser obtenidos dependiendo de la pista de ensayo o del vehículo con el cual se lleven a cabo los ensayos. Hace falta, por tanto, una metodología de ensayo que sea capaz de eliminar o reducir todas las desventajas enumeradas anteriormente y mediante la cual la medida del ruido de rodadura sea más rápida, fiable y económica.

La presente Tesis Doctoral desarrolla un nuevo método de ensayo para la obtención del nivel de potencia sonora que emite un neumático en banco de ensayos tipo *Drum* basándose en la norma internacional ISO 3744. Este nuevo enfoque combina la experiencia del método ISO con el procedimiento experimental desarrollado en las instalaciones de ensayo de neumáticos del Laboratorio de Vehículos de la Universidad Miguel Hernández de Elche.

La novedad radica en que ninguno de los grupos de investigación que ha ensayado el ruido de rodadura de neumáticos usando tambores lo ha hecho por medio de un método de ingeniería específico estandarizado para determinar el nivel de potencia acústica. Por el contrario, todas las pruebas anteriores han considerado únicamente la presión sonora que es una magnitud que depende de factores tales como el medio en el que viajan las ondas sonoras, la atenuación o la distancia de la fuente sonora por lo que mediante la medición de la presión sonora no es posible

cuantificar la potencia del sonido de la fuente a menos que todos y cada uno de los factores anteriormente mencionados estén estrictamente controlados y definidos, hecho que no sucede totalmente en la metodología descrita en el Reglamento 117.

Esta nueva metodología para realizar los ensayos en laboratorio tipo *Drum*, incluye la localización de los micrófonos, la obtención de los factores de corrección por ruido de fondo y por entorno acústico de ensayo y el procedimiento operativo para la medición de la presión sonora y la obtención de la potencia sonora que emite el neumático.

El nuevo método ha sido validado mediante la comparación con los resultados obtenidos en numerosos ensayos en pista realizados siguiendo el método Coast-By descrito en el Reglamento 117 y utilizando el modelo de propagación sonora descrito en la norma ISO 9613, mediante el cual ha sido posible obtener el nivel de presión sonora que se obtendría en el ensayo en pista a partir del nivel de potencia sonora obtenido en el laboratorio de ensayo.

Los resultados obtenidos en la presente Tesis Doctoral permiten concluir que se ha logrado el objetivo principal de la investigación, obteniendo un método de ensayo en laboratorio válido para evaluar el ruido de rodadura en ensayo de homologación de neumáticos.



LABORATORY TEST METHOD FOR MEASURING TYRE ROLLING NOISE

David Clar García

ABSTRACT

Tyre/road interaction is the main source of noise emission caused by road traffic when cruising at speeds over 30 km/h and less than 120 km/h, from which aerodynamic noise begins to predominate. Several methods such as the Coast-By, the Close-Proximity, the Statistical Pass-By or the Controlled Pass-By have been used over recent decades to measure noise emission. However, since Regulation (EC) No 1222/2009 on the labelling of tyres was published, only the method described in UNECE Regulation 117 concerning the approval of tyres with regard to rolling sound emissions, can be used in order to obtain tyre/road noise emission approved values.

All these conventional methods have several disadvantages and limitations such as the lack of repeatability, the influence of environmental factors or 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 a new methodology that eliminates or reduces all the disadvantages listed before and by which tyre/road noise measurement is done on a faster, more reliable and cheaper way, is obvious.

This Doctoral Thesis has developed a new test method for obtaining sound power level emitted by a tyre in a Drum facility based on the international standard ISO 3744. This new approach combines the expertise of the ISO method with the experimental procedure developed in the tyre test facilities of the Vehicle Laboratory at Universidad Miguel Hernández de Elche.

The innovation is that none of the research groups that have tested the tyre rolling noise using drums have done it by a specific engineering standardized method for determining the sound power level. On the contrary, all previous tests have considered only sound pressure, which is a magnitude that depends on factors such as the medium in which sound waves travel, the attenuation or the distance from the sound source so by measuring the sound pressure is not possible to quantify the sound power of the source unless each and every one of the above mentioned factors are strictly controlled and defined, a fact not entirely true on the methodology described in Regulation 117.

This new methodology for tests in Drum facilities includes the location of microphones, obtaining correction factors for both background noise and acoustic environment and the operational method for measuring sound pressure and obtaining the sound power emitted by the tyre.

The new method has been validated by comparison with the results of several track tests carried out according to the Coast-By method described in Regulation 117 and using the sound propagation model described in ISO 9613 standard, which allows to get the sound pressure level to be measured at the test track from the sound power level obtained in drum facilities.

The results obtained in this Doctoral Thesis can conclude that the main goal of the research has been achieved, obtaining a valid test method for measuring tyre-rolling sound emission for approval of tyres.



CAPÍTULO 1



INTRODUCCIÓN

En relación con la generación de ruido de tráfico en carretera, la fuente principal de emisión sonora para un vehículo que viaja a más de 30 km/h es el ruido de rodadura debido a la interacción del neumático con la carretera. Hay otras fuentes de ruido, tales como el ruido aerodinámico debido a la turbulencia del viento, el motor o la transmisión del vehículo que también contribuyen al ruido del tráfico rodado. Sin embargo, estas otras fuentes tienen poco peso en el ruido total del vehículo a velocidades medias y altas.

Hoy en día, el ruido aerodinámico exterior a velocidades inferiores a 120 km/h es bastante bajo [1]. Del mismo modo, las fuentes de ruido de las futuras unidades de potencia (motor y transmisión) se reducirán drásticamente debido a la introducción progresiva de los vehículos eléctricos. En este escenario, la reducción de ruido de neumático/carretera provocará la mayor contribución a la disminución de la emisión de ruido del tráfico rodado.

En la última década, se han publicado varias normativas en la Unión Europea con el fin de reducir el ruido generado por la interacción de la superficie del neumático y la carretera. La primera de ellas, el Reglamento CEPE 117 [2], se publicó en 2007 y describe el método para medir la emisión de ruido de rodadura de los neumáticos. Este método se basa en la norma ISO 13325 [3] *Coast-by methods for measurement of tyre-to-road sound emission* publicada en 2003.

Posteriormente, el Reglamento (CE) 661/2009 [4] establece los límites de ruido de rodadura para los neumáticos vendidos después del 1 de noviembre de 2012 bajo marca de homologación de tipo CE. Por último, el Reglamento (CE) 1222/2009 [5] establece una clasificación de los neumáticos en función de sus valores de emisión de ruido que se pueden obtener mediante el procedimiento descrito anteriormente en el Reglamento CEPE 117. El método *Coast-By* (CB) junto con los métodos *Close-Proximity* (CPX), el *Statistical Pass-By* (SPB) o el *Controlled Pass-By* (CPB) han sido considerados en los trabajos de normalización.

Sin embargo, todos estos métodos convencionales para la clasificación de los neumáticos en relación con la emisión de ruido de rodadura tienen varias desventajas y limitaciones entre las cuales las siguientes son las más importantes:

- **Falta de repetibilidad.** Como parece obvio, es muy difícil conseguir los mismos resultados cuando los ensayos se llevan a cabo por diferentes equipos en diferentes pistas [6] y con diferentes vehículos [7]. Incluso es relativamente difícil conseguir los mismos resultados en los ensayos realizados por el mismo equipo, en la misma pista y con el mismo vehículo, ya que hay otros muchos factores que influyen en los resultados.

A pesar de los factores de corrección para aspectos tales como la temperatura, otras variables tales como la velocidad y dirección del viento, el ruido de fondo o cambios a lo largo del tiempo [8] (por ejemplo, en los neumáticos, en la pista de ensayo o en el propio vehículo debido al uso y desgaste) no pueden ser ponderados con facilidad. Las diferencias en las velocidades de referencia, las categorías de vehículos y los efectos de la edad y la rugosidad de superficie de la pista de ensayo pueden traer discrepancias significativas en los resultados finales [9], [10].

- **Método costoso.** Llevar a cabo una prueba en cualquiera de los métodos convencionales anteriormente mencionados - CB, CPX, SPB o CPB - implica el uso de un vehículo equipado con cuatro neumáticos para realizar el ensayo. El coste de montaje de cuatro neumáticos es cuatro veces mayor que el costo de montaje de un solo neumático. Lo mismo ocurre con el propio coste de los neumáticos. Las llantas del vehículo deberán ser compatibles con los neumáticos; de lo contrario se necesita montar cuatro nuevas llantas en el vehículo. Es importante mencionar que no existe un vehículo que sea compatible con todas las medidas de neumáticos del mercado, por lo que será necesario

disponer de varios vehículos para poder llevar a cabo los ensayos de toda la gama de neumáticos existente.

Además, al menos dos personas deben estar trabajando en la prueba al mismo tiempo y es necesaria una cierta cantidad de combustible que se consume durante los ensayos. Por último, los ensayos en pista necesitan mucho más tiempo para ser llevados a cabo, lo cual los hace más caros. Todos estos factores hacen que los métodos convencionales sean mucho más caros que la nueva metodología propuesta en esta tesis.

Con el fin de obtener una idea aproximada, los presupuestos dados por laboratorios de ensayos de automoción acreditados para ensayos en pista *Coast-By* son entre tres y cuatro veces más caros que para los ensayos de resistencia a la rodadura en laboratorio (equivalente, en términos de costos, al propuesto siguiendo la nueva metodología de esta tesis).

- **Tiempo necesario para el ensayo.** La metodología descrita en el Reglamento CEPE 117 determina que se deben realizar, al menos, cuatro mediciones en cada lado del vehículo de ensayo a una velocidad de ensayo más baja que la velocidad de referencia y al menos otras cuatro mediciones a una velocidad de ensayo más alta que la velocidad de referencia. La velocidad de referencia para un neumático de turismo es de 80 km/h. Esto significa que para ensayar el ruido de rodadura mediante el método convencional se requieren, al menos, 40 minutos. El mismo número de mediciones se puede hacer en 8 minutos si se emplea la nueva metodología propuesta en esta tesis. Además, el montaje de un solo neumático en la máquina de ensayo es cuatro veces más rápido que montar cuatro neumáticos en un vehículo.

- **Magnitud medida.** La magnitud que se mide de acuerdo con los reglamentos mencionados anteriormente es el nivel de presión sonora. Sin embargo, esta magnitud depende de factores tales como el medio en el que viajan las ondas sonoras, la atenuación o la distancia de la fuente sonora. Esto no sucede con el nivel de potencia acústica, que es una magnitud inherente a la fuente sonora y que no depende de otros factores externos [1], [11]. Por lo tanto, mediante la medición de la presión sonora no es posible cuantificar la potencia del sonido de la fuente a menos que todos y cada uno de los factores anteriormente mencionados estén estrictamente controlados y definidos. Esto no sucede en la metodología descrita en el Reglamento 117 o en cualquier otro de los métodos convencionales mencionados anteriormente.

Con el fin de resolver estos problemas, se ha desarrollado una nueva metodología basada en los ensayos de laboratorio tipo *Drum* y la Norma Internacional ISO 3744 Determinación de los niveles de potencia acústica de fuentes de ruido a partir de la presión acústica [12]. La norma ISO 3744 determina los niveles de potencia acústica de fuentes de ruido utilizando presión sonora en un campo libre sobre un plano reflectante.

Este nuevo enfoque combina la experiencia del método ISO con el procedimiento experimental desarrollado por el grupo de investigación de mecánica aplicada en las instalaciones de ensayo de neumáticos del Laboratorio de Vehículos de la Universidad Miguel Hernández de Elche (LVUMH). En la Figura 1 se muestra una parte de las instalaciones mencionadas.

El LVUMH, perteneciente al Departamento de Ingeniería Mecánica y Energía, dispone unas instalaciones que cuentan con una máquina de ensayo de neumáticos tipo *Drum*. Esta máquina permite realizar ensayos de carga/velocidad según los Reglamentos 30 [13], 54 [14], 108 [15] y 109 [16] de la Unión Europea relativos a la homologación de neumáticos así como ensayos de resistencia a la rodadura y de ruido de rodadura de neumáticos de turismo

e industriales. Para ello, dispone de un tambor de acero de 1700 mm de diámetro accionado por un motor eléctrico de 380V - 50Hz - 110 kW. Los neumáticos están montados en llantas comerciales adaptadas para ser montadas en un eje de ensayo que gira libremente. El ensamblaje llanta-neumático-eje es empujado contra el tambor mediante un cilindro hidráulico.



Fig. 1. Instalaciones de ensayo de neumáticos

Por otra parte, el conjunto de las instalaciones del laboratorio, sus procedimientos y sus actividades tanto de inspección como ensayo y su Sistema de Gestión de la Calidad, son auditados cada año desde 2011 y están acreditados por un organismo internacional de acreditación conforme al cumplimiento de la norma ISO / IEC 17025 [17] para laboratorios de ensayo.

Mientras que algunos grupos de investigación han ensayado el ruido de rodadura de neumáticos usando tambores [18], ninguno de ellos lo ha hecho por medio de un método de

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

Esta tesis desarrolla y explica la nueva metodología para realizar los ensayos en laboratorio tipo *Drum*, incluyendo la localización de los micrófonos, la obtención de los factores de corrección por ruido de fondo y por entorno acústico de ensayo y el procedimiento operativo para la medición de la presión sonora y la obtención de la potencia sonora que emite el neumático según la norma ISO 3744. Adicionalmente, se han validado los resultados obtenidos mediante este nuevo método de ensayo en laboratorio. Para ello, se ha realizado un análisis comparativo con los resultados obtenidos en los ensayos realizados en pista con los mismos neumáticos siguiendo el Reglamento CEPE 117, utilizando el modelo de propagación sonora establecido en la norma ISO 9613.



CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE



2.1.- ANTECEDENTES

Según la Organización Mundial de la Salud, el ruido excesivo perjudica gravemente la salud humana e interfiere con las actividades diarias de las personas en la escuela, en el trabajo, en casa y en el tiempo libre [19]. El ruido puede perturbar el sueño, causar efectos cardiovasculares y psicofisiológicos, reducir el rendimiento y provocar respuestas de molestia y cambios en el comportamiento social.

El ruido del tráfico por sí solo es perjudicial para la salud de casi una de cada tres personas en la Unión Europea. Además, uno de cada cinco europeos está regularmente expuesto a niveles de ruido por la noche que podrían perjudicar significativamente su salud.

Actualmente, la OMS utiliza evidencias sobre los efectos en la salud del ruido para identificar las necesidades de los grupos vulnerables y para ofrecer orientación técnica y políticas de protección de la salud.

La problemática del ruido como factor que altera la salud humana es ampliamente conocida y estudiada desde hace décadas. De hecho, las primeras normativas relativas al ruido emitido por los vehículos aparecieron a mediados de los años 30 de manera casi paralela en Reino Unido, Alemania y Polonia [1], [20].

Desde entonces se han realizado multitud de estudios, ensayos e investigaciones sobre el ruido de rodadura. La mayoría de estos análisis se ha llevado a cabo mediante ensayos de vehículos circulando en carretera o en pista. Para que los resultados puedan ser comparables, muchos de los ensayos en pista utilizan como superficie de rodadura una superficie normalizada definida en la norma ISO 10844 [21]. Todos los ensayos comparten esencialmente que se mide el ruido de rodadura (presión sonora) de un vehículo circulando con los neumáticos a ensayar montados. Con dichas pruebas se ha tratado de evaluar la emisión sonora de los neumáticos y/o las características de diferentes tipos de asfalto y pistas de ensayo.

Los principales métodos de ensayo en pista empleados son el *Statistical Pass-By* (SPB), el *Controlled Pass-By* (CPB), el *Coast-By* (CB) y el *Close-Proximity* (CPX). Los dos primeros métodos se emplean para evaluar principalmente el ruido de diferentes superficies de rodadura o pavimentos mediante el uso de neumáticos normalizados conocidos como SRTT Standard Reference Test Tire [22]. Los dos últimos están enfocados a evaluar tanto el ruido producido por los neumáticos como el ruido de diferentes superficies de rodadura o pavimentos.

El método *Statistical Pass-By* proporciona el nivel de presión sonora a 7.5 m de distancia a ambos lados de un flujo de tráfico convencional, cuyos vehículos circulan a velocidad constante con el motor operando en las condiciones habituales para esa velocidad.

El método *Controlled Pass-By* es similar al SPB aunque en éste caso los vehículos son seleccionados previamente. Este método sólo se ha desarrollado en Francia, existiendo una norma a nivel nacional [23].

Existen otros métodos orientados exclusivamente al análisis de neumáticos como el *Trailer Coast-By* (TCB) o los ensayos en laboratorio tipo *Drum* pero el primero es muy complicado y costoso al requerir un vehículo tractor y un remolque en el que instalar el neumático a ensayar y los segundos, a pesar de existir varios grupos de investigación trabajando en ellos, todavía no están normalizados ni desarrollados suficientemente.

Posteriormente se explicarán con mayor detalle los avances y el estado del arte en el campo del análisis del ruido de rodadura en instalaciones tipo *Drum*, pero para comprender mejor estas explicaciones así como las realizadas en el Capítulo 4 Ensayos en Pista y en el Capítulo 7 Comparación de Resultados en Pista vs *Drum*, a continuación se explican con mayor detalle los métodos *Coast-By* y *Close-Proximity* esencialmente importantes para el desarrollo de esta Tesis.

2.1.1.- MÉTODO COAST-BY (CB)

Uno de los métodos más extendidos a nivel internacional es el método *Coast-By* [3], que proporciona el nivel de ruido neumático/carretera mediante el registro del nivel de presión sonora a 7.5 m de distancia a ambos lados del eje longitudinal del vehículo para una velocidad de referencia, que para un vehículo de turismo son 80 km/h. Según establecen los Reglamentos 661/2009 [4] y 1222/2009 [5] el procedimiento descrito en esta norma es el que actualmente se contempla para el ensayo de homologación que todo neumático nuevo debe pasar antes de ser lanzado al mercado bajo el marcado CE.

Se trata de un método en el que el vehículo de ensayo equipado con los neumáticos a ensayar pasa por delante de la localización de los micrófonos con el motor apagado y la transmisión en punto muerto. Es lo que en la terminología anglosajona se denomina *Coast-By* o circular, sin potencia del motor, en punto muerto.

Tal y como puede verse en la figura 2, los micrófonos P-P' se sitúan, a ambos lados, a 7.5 m de distancia de la trayectoria del vehículo C-C', medidos desde el centro de la pista de ensayo por la que el vehículo circula, y a 1.2 m de altura respecto al suelo. Durante el paso del vehículo por la zona de ensayo se registra el nivel de presión sonora en ponderación A, con el sonómetro en respuesta de medición Fast. También es habitual registrar el espectro de frecuencia (generalmente en bandas de tercio de octava) en el momento de máximo pico del nivel de presión sonora. En este ensayo, el análisis de frecuencia en banda estrecha no es adecuado debido al efecto Doppler, a menos que se empleen procedimientos de compensación de este efecto.

El vehículo se desplaza a velocidad constante y justo antes de que el alcance la zona de medición, el motor se para y la transmisión se pone en punto muerto. A lo largo del recorrido de ensayo entre las líneas A-A' y B-B' el vehículo se mueve solamente gracias a las fuerzas de inercia y se asume que en estas condiciones el ruido emitido por el vehículo procede únicamente de la rodadura.

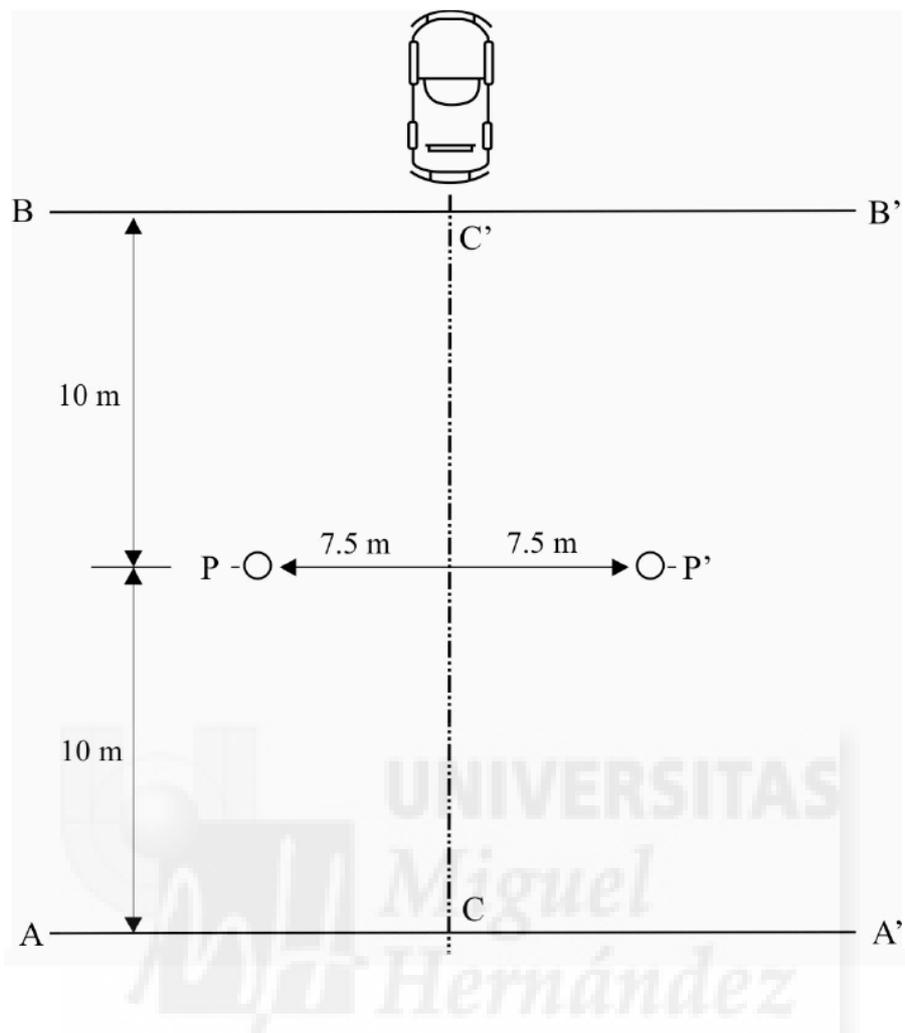


Fig. 2. Disposición de la pista de ensayo y de los micrófonos para un ensayo *Coast-By*

Durante los 20 m que recorre el vehículo en el ensayo, sobre una superficie totalmente horizontal, el vehículo suele disminuir su velocidad en aproximadamente 1 km/h. Esta reducción de velocidad se desprecia al utilizarse la velocidad media registrada para la obtención del nivel de presión sonora.

La velocidad de referencia indicada en la normativa es de 80 km/h para vehículos ligeros y 70 km/h para vehículos pesados. El valor final sonoro que se obtiene en la prueba se basa en calcular el nivel sonoro a la velocidad de referencia, mediante un análisis de regresión lineal de la velocidad y el ruido medido.

Puesto que la finalidad de este método es ensayar neumáticos y no vehículos, se asume que no habrá diferencia en el nivel de presión sonora registrado cuando el juego de neumáticos ensayado se evalúe en cualquier otro vehículo, lo cual no es totalmente cierto.

Algunos aspectos más específicos de este método se detallarán en el capítulo 4, donde se explica minuciosamente cómo se llevaron a cabo los ensayos en pista para la validación de esta Tesis siguiendo el método Coast-By.

2.1.2.- CLOSE-PROXIMITY (CPX)

Un procedimiento de medida también muy extendido, aunque más empleado en el campo de la investigación de pavimentos, es el método *Close-Proximity* o método del tráiler [24]. Según esta metodología se registra el nivel de presión sonora en el entorno cercano del neumático bajo estudio obteniendo finalmente el *Close-Proximity Sound Index* (CPXI).

En el método CPX se miden los niveles de presión sonora con ponderación A emitidos por la rodadura de un neumático en marcha, junto con la velocidad del vehículo de ensayo. Para registrar estos datos, se emplean al menos dos -aunque pueden ser tres- micrófonos situados cerca de los neumáticos, ver Figura 3. El vehículo de ensayo puede ser autopropulsado o remolcado por otro vehículo.

Se trata de un método en el cual el neumático de ensayo está rodando sobre una carretera o pista de ensayo con los micrófonos de medida situados próximos a la interfaz neumático-pavimento. El neumático puede ser uno de los cuatro neumáticos normales de un vehículo, un neumático extra instalado sobre el vehículo o bien un neumático instalado sobre un remolque especialmente diseñado para el ensayo, siendo esta última opción la más empleada habitualmente.

La mayoría de los remolques empleados disponen de un recinto alrededor del micrófono y del neumático, de modo que producen un encapsulamiento para el viento y el ruido exterior.

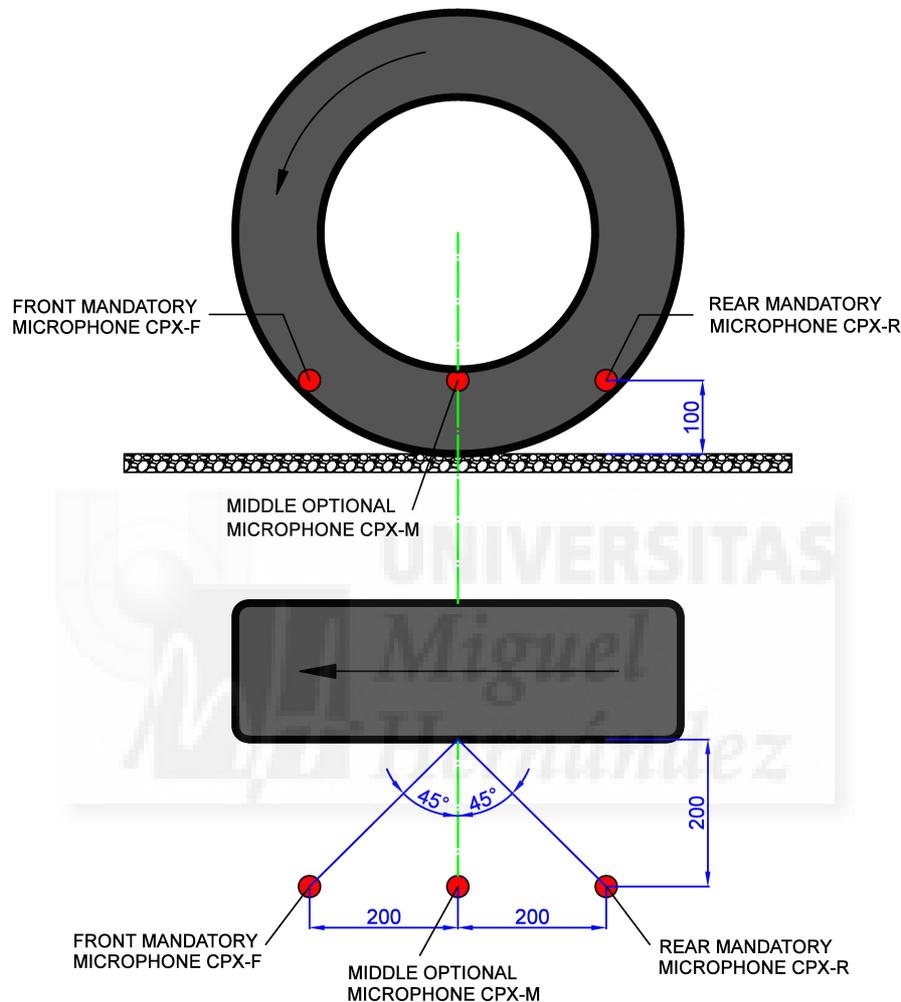
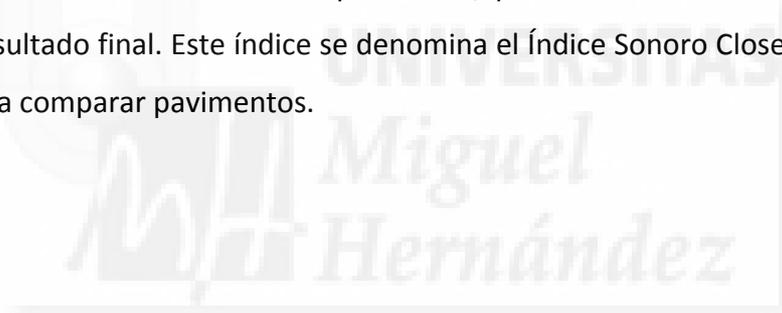


Fig. 3. Posiciones de los micrófonos para un ensayo *Close-Proximity*

Cuando se emplea este método para caracterizar superficies asfálticas, se suelen emplear unos neumáticos estandarizados SRTT indicados anteriormente. Son neumáticos diferentes entre ellos, con el fin de representar las características del neumático-pavimento que van a ser estudiadas. Estos neumáticos de referencia se instalan en el vehículo de ensayo, bien uno por uno, o unos pocos al mismo tiempo.

El resultado del ensayo es el valor del nivel sonoro del neumático-pavimento, L_{tr} , a una o más de las denominadas velocidades de referencia (50, 80 y 110 km/h). Se miden los niveles sonoros promedio en pequeñas distancias de medida (segmentos de 20 m cada uno) para cada neumático de referencia y para cada ensayo individual con ese neumático, junto con la velocidad de ensayo. Seguidamente, el nivel sonoro en cada segmento se corrige para la velocidad de referencia. Y a continuación, se realiza un promedio de acuerdo con el propósito de la medida (midiendo un segmento concreto o un número consecutivo de segmentos). El nivel sonoro promedio resultante para los dos micrófonos principales a esa velocidad de referencia se denomina nivel sonoro del neumático-pavimento, L_{tr} . De este modo, se obtiene un L_{tr} para cada neumático de referencia y cada velocidad de referencia.

Si lo que se desea obtener son las características sonoras de la superficie, los L_{tr} de los neumáticos de referencia se deben promediar, para así obtener un único índice que constituya el resultado final. Este índice se denomina el Índice Sonoro Close-Proximity (CPXI) y se emplea para comparar pavimentos.



2.2.- ESTADO DEL ARTE

Hasta ahora, se han explicado los distintos métodos utilizados para la obtención del ruido de rodadura de un neumático cuando circula por una pista de ensayo. Sin embargo y aunque la pista de ensayo esté normalizada, los cambios que se producen a lo largo del tiempo en el vehículo debido al uso y desgaste [7] y en la propia pista de ensayo [8], hacen que comparar distintos neumáticos a lo largo del tiempo sea difícil. Para ello, los métodos de ensayo en laboratorio son, con total seguridad, más adecuados [1].

Estos métodos requieren de una instalación tipo *Drum* donde el neumático gira contra un tambor o rodillo de acero que suele medir entre 1500 y 2500 mm de diámetro. El neumático de ensayo está montado de tal manera que rueda contra la parte interior o exterior de un tambor, siendo esta última la configuración más utilizada por los grupos de investigación de ruido de rodadura.

A continuación puede verse una instalación tipo *Drum* donde el neumático rueda contra el interior del tambor (Figura 4 izquierda) y la instalación de ensayo de neumáticos del Laboratorio de Vehículos de la Universidad Miguel Hernández de Elche (LVUMH) donde el neumático rueda contra el exterior (Figura 4 derecha).

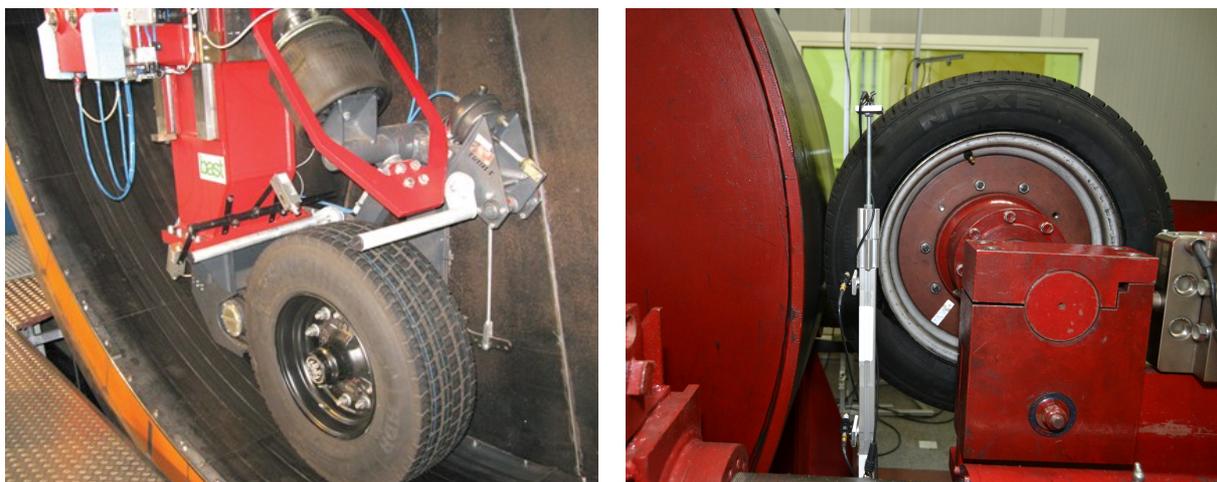


Fig. 4. Diferentes configuraciones tambor-neumático en instalaciones de ensayo tipo *Drum*.

Tal y como se ha comentado anteriormente, existen varios grupos de investigación trabajando con instalaciones tipo *Drum*. Sin embargo, cada grupo trabaja con máquinas de ensayo diferentes. Del mismo modo, las líneas de investigación también son muy dispares. Unos grupos estudian la resistencia a la rodadura de los neumáticos, otros hacen ensayos de carga-velocidad según los Reglamentos 30 [13], 54 [14], 64 [25], 108 [15] y 109 [16], otros investigan sobre cómo afectan diversos factores al ruido de rodadura, etc. Dentro de estos últimos hay varios grupos europeos y un grupo estadounidense.

A mediados de 2015 se creó un Comité ISO para desarrollar un método de ensayo estandarizado en laboratorio para la medida de ruido de rodadura que se denominó *Tyre noise test – Methods of Drum* [26] y del cual forma parte, dentro de un grupo de trabajo, el Grupo de Investigación de Mecánica Aplicada de la UMH. El plazo propuesto para el desarrollo del método es de 24 meses, con la posibilidad de una prórroga de 9 meses más. Por tanto, la presentación del borrador para su evaluación será, casi con toda probabilidad, en 2018.

Dicho método es actualmente un borrador muy poco detallado en el cual hay numerosos factores aún por determinar y otras deficiencias entre las que cabe destacar la magnitud que se propuso registrar inicialmente, que es el nivel de presión sonora. Como se verá a lo largo de esta Tesis, dicha magnitud depende de factores externos tales como el medio en el cual viajan las ondas sonoras, la atenuación o la distancia entre la fuente y el receptor. A diferencia de ésta, la potencia sonora es una magnitud inherente a la fuente sonora y no depende de los factores mencionados anteriormente.

En definitiva, como se ha visto hasta ahora y como se explica más adelante, el ensayo de ruido de rodadura en neumáticos en instalaciones tipo *Drum* es un campo en el que todavía queda mucho por avanzar.

A continuación se describe brevemente el estado del arte relacionado con los diferentes estudios realizados sobre la medición del ruido de rodadura de neumáticos en laboratorio en las últimas dos décadas. Para ello se muestran cronológicamente las distintas investigaciones sobre el tema llevadas a cabo por varios grupos y universidades a lo largo del tiempo. En la siguiente imagen (Figura 5), podemos observar una línea del tiempo donde se muestra con claridad dicho orden cronológico.



Fig. 5. Timeline de los diferentes equipos de investigación de ensayo con neumáticos en laboratorio

2.2.1.- TECHNICAL UNIVERSITY OF GDANSK (TUG)

THE SWEDISH ROAD AND TRANSPORT RESEARCH INSTITUTE (VTI)

1999

Ambas entidades en colaboración participaron en este estudio en el que se midieron hasta 100 neumáticos distintos para observar las relaciones entre el ruido, la fricción y la resistencia a la rodadura de los neumáticos. Las mediciones se realizaron a 80 km/h con el método CPX5. En este estudio la toma de medidas se practicó sobre una réplica de superficie asfáltica ISO 10844 que cubre uno de los tambores de la máquina de TUG. Para la medida del ruido de rodadura se hizo una comparativa entre los valores de presión sonora SPL de las mediciones obtenidas en un ensayo en carretera real y otro realizado en el rodillo del laboratorio. Estos fueron los resultados más destacables.

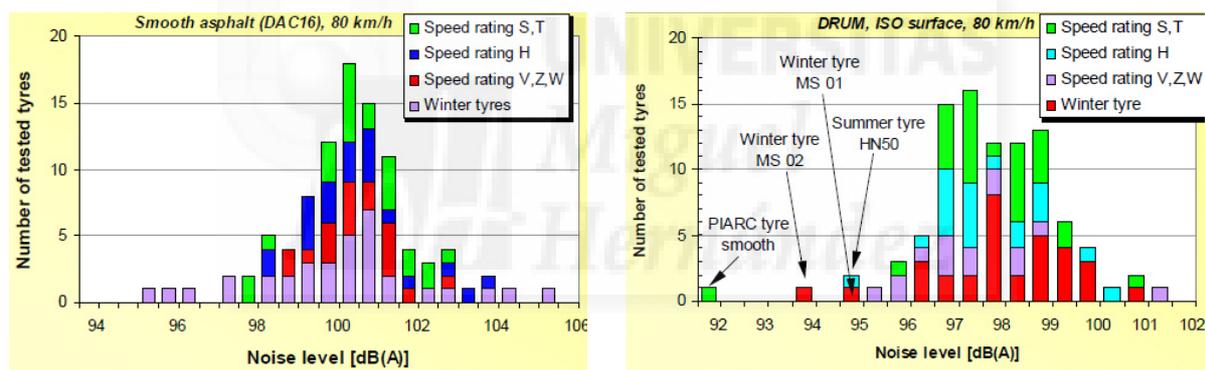


Fig. 6. Resultados del nivel sonoro sobre asfalto real suave (izquierda) y en el rodillo sobre la superficie réplica asfáltica (derecha), ambos a 80 km/h.

Estos resultados arrojaron varias conclusiones a tener en cuenta. En primer lugar se observó que en muchos casos los neumáticos más silenciosos eran los de invierno. También se apreció con claridad que los neumáticos con códigos de velocidad S y T son los más ruidosos. La mayor diferencia de ambos estudios estuvo en que sobre el asfalto real el nivel sonoro era mayor que sobre la réplica asfáltica de laboratorio.

2.2.2.- PURDUE UNIVERSITY, INDIANA (USA)**2003**

El grupo de investigación de la Universidad de Purdue (USA) cuenta con una máquina de ensayo de neumáticos llamada TPTA (*Tire-Pavement Test Apparatus*). Este banco de ensayo consta de un tambor de 3.7 m de diámetro donde las secciones de pavimento se colocan alrededor de él. El neumático puede alcanzar hasta 50 km/h.



Fig. 7. Máquina de ensayos *Tire-Pavement Test Apparatus* de la Universidad de Purdue.

En este estudio se mide la influencia de la granulometría del pavimento sobre los neumáticos, entre otros parámetros el ruido de rodadura. Se colocaron un total de cinco micrófonos sobre el TPTA para realizar las mediciones, tres para cumplir con el método de proximidad CPX que establece la norma y otros dos a 5 cm por encima de la superficie del pavimento.

Los resultados obtenidos mostraron que la influencia de la forma de los tacos (borde redondeado) no es un factor significativo en el ruido de rodadura provocado por los neumáticos mientras que el tamaño de los tacos si que influye directamente en los valores de presión sonora registrados. En la siguiente gráfica (Fig. 8) se puede observar el valor de presión sonora SPL en función de la frecuencia para diferentes anchos de taco así como para un neumático sin tacos tipo slick.

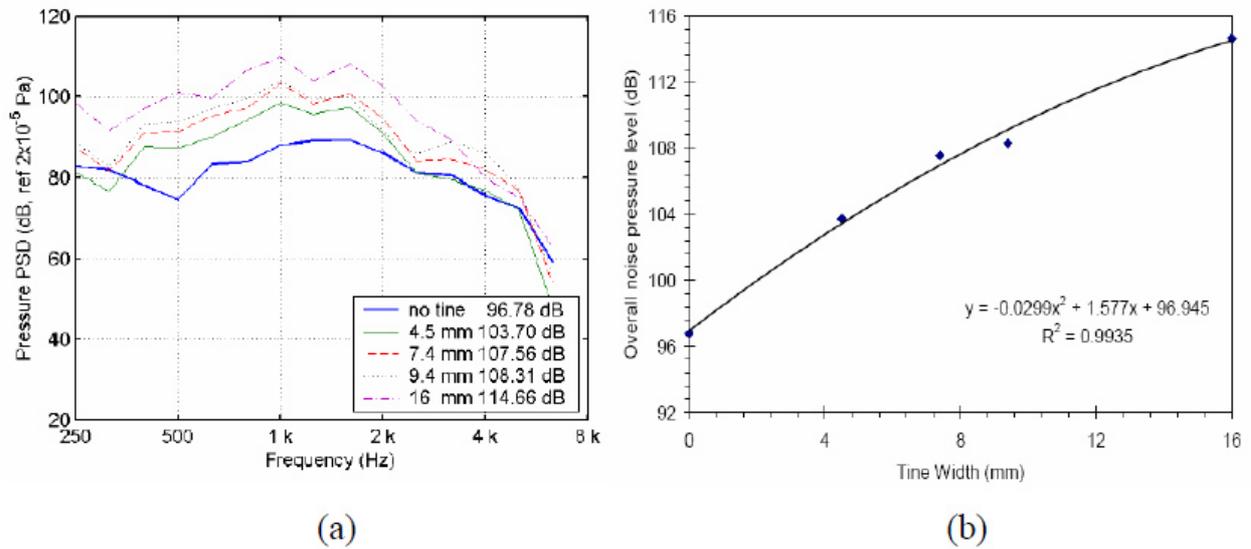


Fig. 8. Presión sonora con diferentes anchos de diente (a) y relación entre el nivel de presión sonora total y el ancho de diente (b).

Como podemos apreciar el nivel de presión sonora SPL emitido por el neumático es tanto mayor cuanto más ancho es el diente, correspondiendo el menor nivel de todos a los neumáticos lisos tipo slick. El modelo obtenido a partir de los ensayos, no predice ningún cambio en los niveles de tensión pico cuando se produce una modificación del borde redondeado.

2.2.3.- SWEDISH ROAD AND TRANSPORT RESEARCH INSTITUTE (VTI)

2005

En este caso el equipo de investigación de VTI realiza un estudio específico para comparar las mediciones en carretera con el método CPX (*Close Proximity*) frente a las mediciones realizadas en laboratorio (DR), examinando así el comportamiento en ambos casos, y viendo si el error cometido es elevado o si realmente es aproximada la simulación en laboratorio.

A continuación (Figura 9) podemos observar los resultados obtenidos y ver así la diferencia entre ambos métodos.

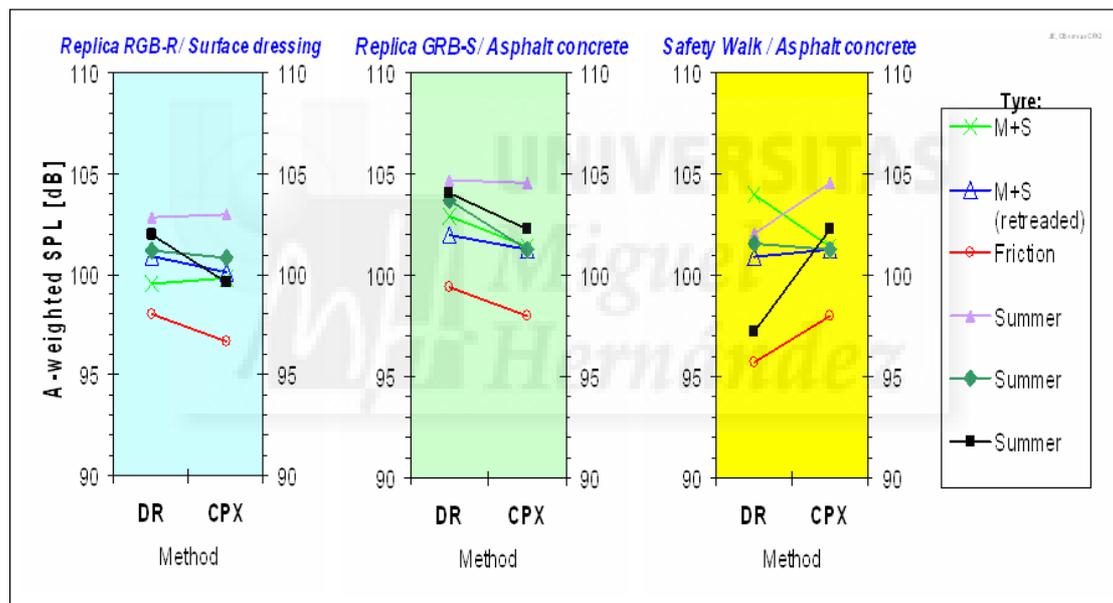


Fig. 9. Comparación entre el método CPX y el método *Drum* en laboratorio

Como vemos las diferencias en la mayoría de las ocasiones no son muy significativas, salvo en algún tipo de neumático específico. En la gráfica de la derecha (en amarillo) sí que existen mayores diferencias, puesto que la superficie colocada en el rodillo en este caso es la denominada *Safety Walk*, una cinta adhesiva antideslizante para suelos o escaleras, similar al papel de lija, cuya textura difiere bastante del asfalto real.

En la siguiente gráfica (Figura 10) se muestra la comparación del espectro de ruido de rodadura para dos tipos de réplica de asfalto (ISO y DAC 16) colocados sobre el rodillo.

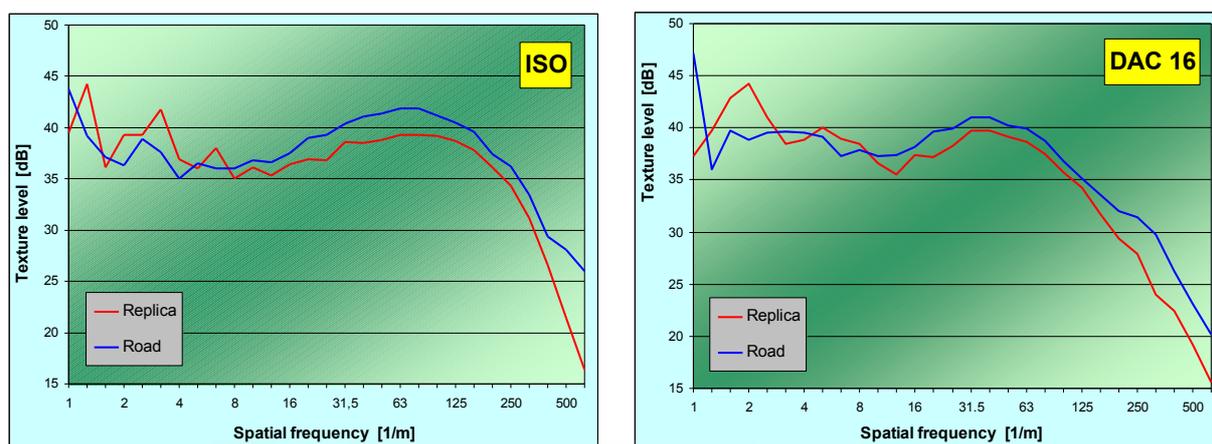


Fig. 10. Comparación del espectro sonoro de ruido de rodadura de dos superficies de réplica asfáltica colocadas sobre el rodillo con los resultados obtenidos en pista.

2.2.4.- TECHNICAL UNIVERSITY OF GDANSK (TUG) Y PROELASTIC SURFACE (PERS) 2009

La Universidad de Gdansk realizó otro estudio, esta vez para probar la eficacia de una superficie de asfalto nueva llamada *Proelastic Surface*, un nuevo material producido por la empresa Rosehill. Estos ensayos también se realizaron a 80 km/h sobre un rodillo cubierto por una capa de este material y de otras superficies de asfalto normalizado.



Fig. 11. Rodillo cubierto por las diferentes superficies réplicas de asfalto

En la imagen anterior (Figura 11) se muestra en la parte izquierda de la superficie externa del rodillo una réplica de una superficie asfáltica llamada APS-4 mientras que en la derecha se encuentra la superficie PERS.

En la Tabla 1 aparecen los resultados numéricos del nivel de presión sonora SPL emitido por el neumático para los tres tipos distintos de asfalto (ISO, APS-4 y PERS).

TYRE SYMBOL	MANUFACTURER	SIZE	TREAD	A-weighted SPL [dB] on surface:		
				ISO	APS-4	PERS
AN-1	AVON	185/65R15 88H	ZV1	97.4	100.4	89.3
BN-1	AVON	185/65R15 88T	ENVIRO CR322	98.3	98.6	91.4
C-TUG	AVON	185/65R15 88T	CR 65 TURBOGRIP	97.7	100.4	93.3
D-TUG	DUNLOP	185R14 90Q M+S	SP ARCTIC	100.4	97.8	96.4
KH-14	NOKIAN	225/45R17 94V	NRV1	92.9	97.5	90.7
SE-03	FIGHTER	195/60R15 86H	M+S 33		98.8	94.9
SE-07	FIGHTER	195/65R15 91T	M+S 310		100.1	93.3
YOK	YOKOHAMA	205/50ZR16 87W	AUS SPORT	96.0	99.5	87.8

Tabla 1. Datos de presión sonora recogidos en laboratorio para ensayos en tres superficies de réplica asfáltica con distintos neumáticos a 80 km/h.

Los resultados indican que para todos los neumáticos el ruido generado en la superficie asfáltica *Proelastic Surface* es considerablemente más bajo que en otras superficies como la suave ISO y por supuesto con otras más agresivas como la APS-4.

A continuación podemos ver dos gráficas donde se muestra el espectro sonoro obtenido a 80 km/h (Figura 12) así como el valor global de presión sonora (Figura 13) de diferentes neumáticos ensayados en las distintas superficies utilizadas.

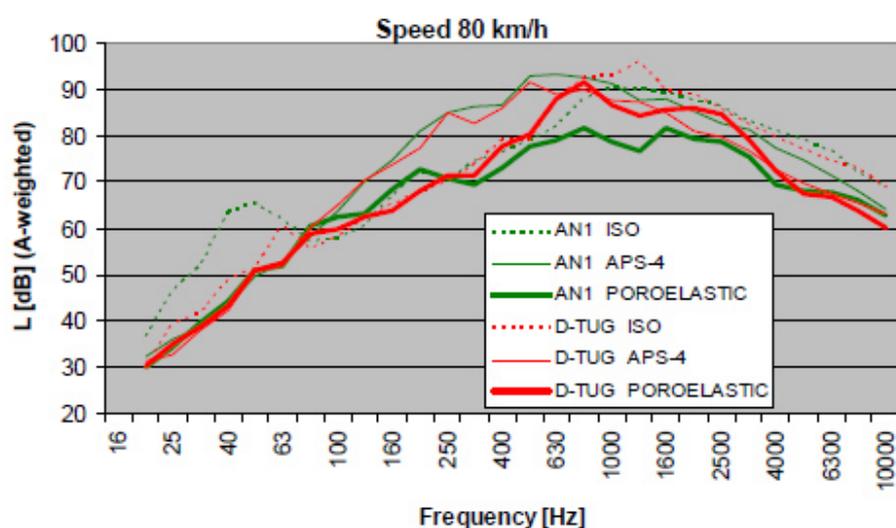


Fig. 12. Espectro sonoro obtenido con las diferentes superficies ensayadas.

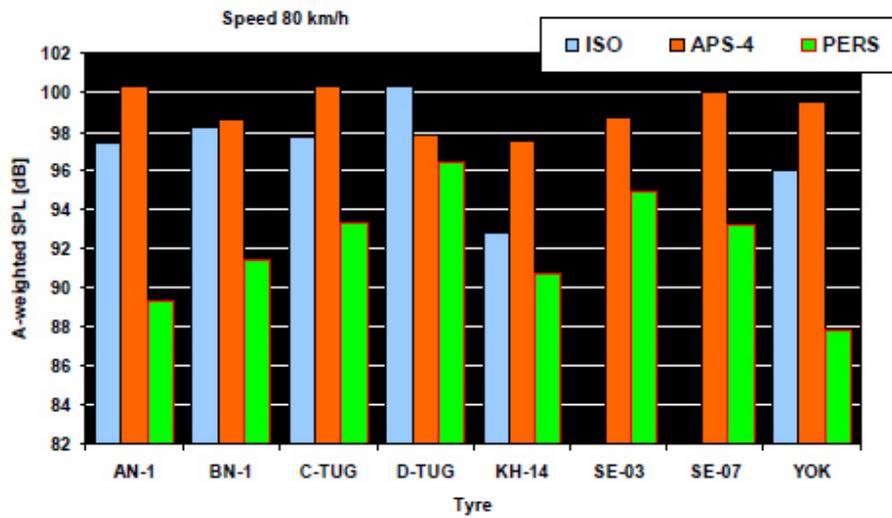


Fig. 13. Valor global de presión sonora obtenido con las diferentes superficies ensayadas.

Como se puede apreciar en ambas gráficas, el resultado en todos los casos es que la superficie asfáltica *Proelastic Surface* PERS es la que menor emisión sonora provoca, independientemente del neumático ensayado.

2.2.5.- KATHOLIEKE UNIVERSITEIT LEUVEN, BELGIUM**2011**

El Departamento de Ingeniería Mecánica de esta Universidad cuenta con un grupo de investigación dedicado también a realizar ensayos de neumáticos en laboratorio. Cuenta con maquinaria específica para ello, entre otras, una máquina de rodillo. En 2011 se llevó a cabo un intenso estudio, junto con el fabricante americano de neumáticos Goodyear, de los diferentes parámetros que afectan al ruido emitido por un neumáticos durante la rodadura. En la siguiente imagen (Figura 14) se muestra la preparación del ensayo mediante la colocación de los micrófonos.

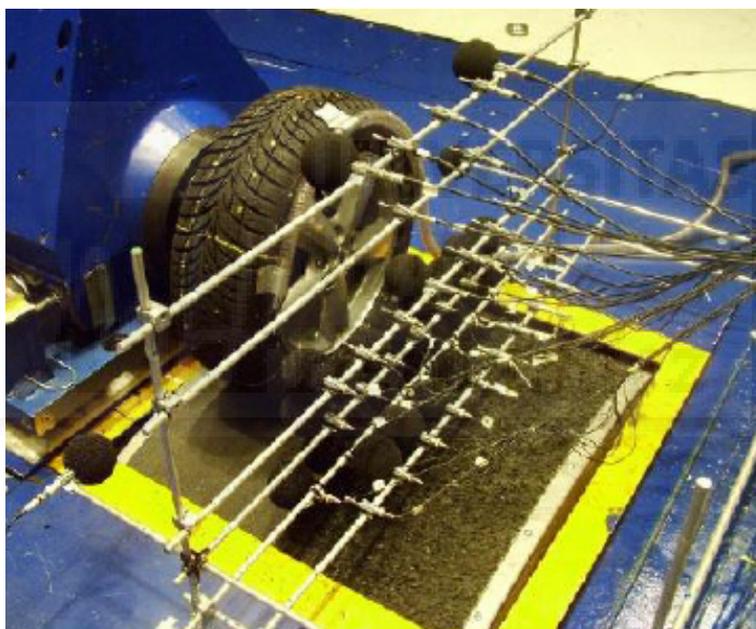


Fig. 14. Array de micrófonos para la medida del ruido de rodadura *en el laboratorio tipo Drum de la Universidad Católica de Leuven*

Se obtuvo gran cantidad de resultados interesantes, entre los que cabe destacar la diferencia en el espectro de emisión sonora entre los neumáticos con dibujo y los neumáticos lisos tipo slick, carentes de tacos.

En la siguiente imagen (Figura 15) se observa el espectro de ruido de rodadura de dos neumáticos. En el se puede apreciar como los neumáticos con dibujo (en rojo) son mucho más ruidosos en todo el espectro sonoro relevante que los neumáticos lisos tipo slick (en negro). Este efecto es mucho más acusado en bajas frecuencias (hasta 800 Hz) que en altas frecuencias.

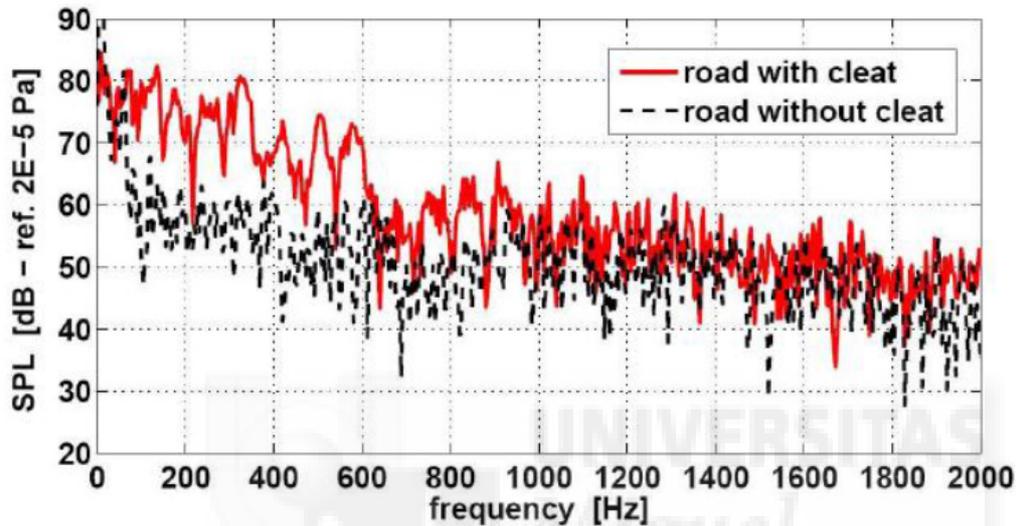


Fig. 15. Resultados del ruido de rodadura a 47 km/h con y sin taco colocado sobre el rodillo

2.2.6.- UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE**2013**

El Grupo de Investigación de Mecánica Aplicada, perteneciente al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Miguel Hernández de Elche desarrolló, en 2013, un modelo con base experimental para la evaluación del ruido de rodadura de neumáticos durante su ensayo de homologación según el Reglamento 117 [2]. La principal novedad de este método radica en obtener el nivel de potencia sonora de la fuente, considerada ésta como un sistema en el que neumático y pavimento intervienen simultáneamente.

A partir del resultado experimental de potencia sonora obtenido con el método alternativo, denominado A-CPX, se desarrolló un modelo de comportamiento sonoro en el que se consideró el efecto de la propagación sonora entre fuente y receptor. Con este modelo se obtiene el nivel de presión sonora que se registrará a 7.5 m de distancia del vehículo, considerando que en este punto se recibirá el sonido emitido por los cuatro neumáticos. En la siguiente imagen (Fig. 16) puede verse la disposición de los micrófonos para la obtención de la potencia sonora mediante el ensayo alternativo A-CPX.

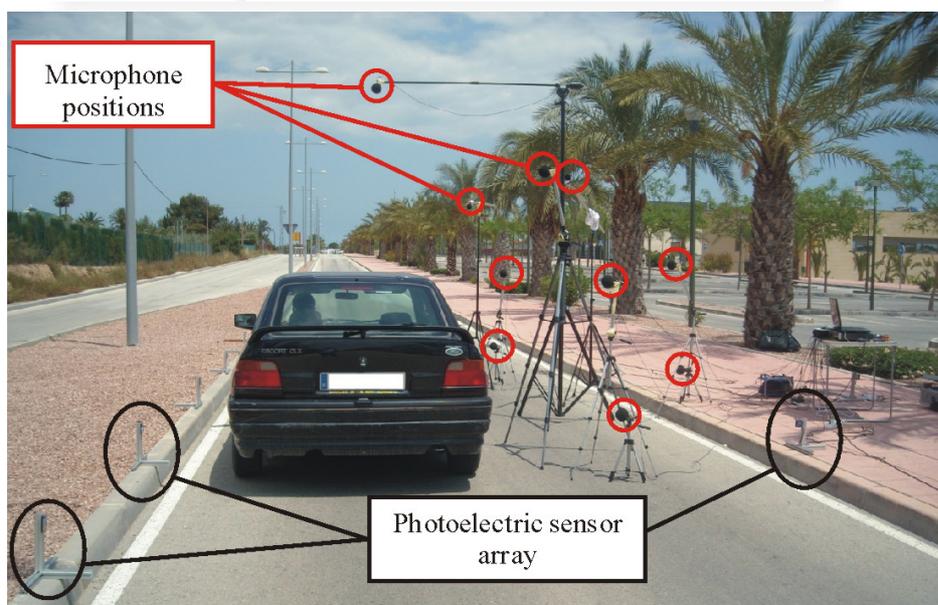


Fig. 16. Disposición de los micrófonos para la realización del ensayo alternativo A-CPX

Para establecer la relación entre la potencia sonora que emite un neumático en rodadura y la que emite el conjunto de los cuatro neumáticos de un vehículo se diseñó una segunda metodología, denominada A-CB, planteada para evaluar la potencia sonora de la rodadura de cuatro neumáticos instalados en un vehículo. Esta segunda metodología se empleó como punto intermedio en el análisis de la propagación sonora para la validación del modelo con base experimental.

La viabilidad de ambas metodologías fue previamente estudiada mediante simulaciones matemáticas, obteniendo resultados satisfactorios que condujeron a analizar su viabilidad técnica mediante ensayos experimentales. Como puede verse en la siguiente imagen (Fig. 17), los ensayos experimentales finales proporcionaron resultados excelentes que demostraron que ambas metodologías son aptas para cumplir su propósito.

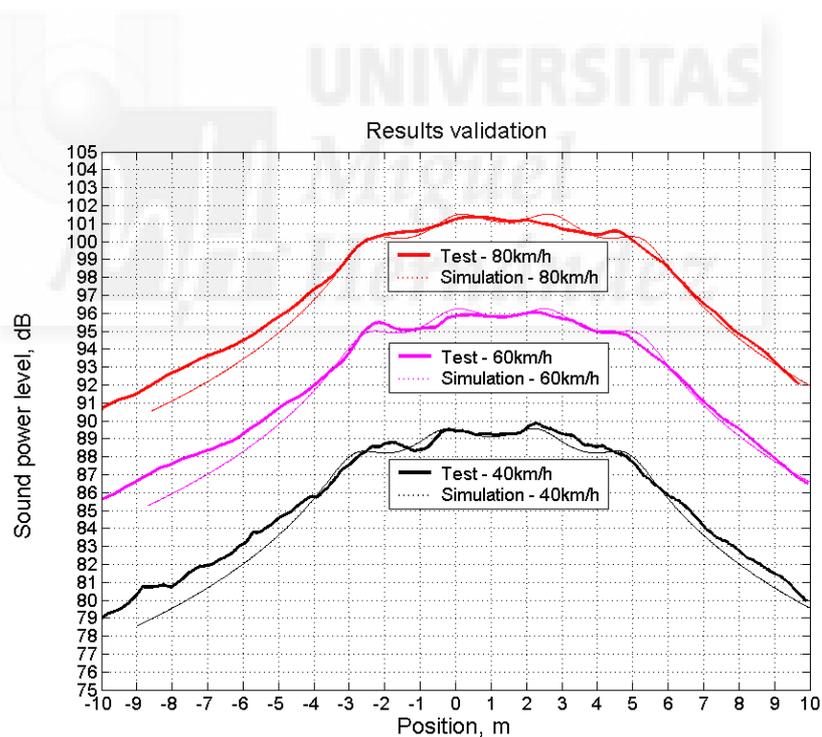


Fig. 17. Comparativa de los resultados obtenidos mediante simulación matemática y mediante los ensayos experimentales en pista.

Como se ha podido comprobar a lo largo del presente capítulo, no se ha encontrado ningún grupo de investigación que haya ensayado el ruido de rodadura de neumáticos usando tambores por medio de un método de ingeniería específico estandarizado para determinar el nivel de potencia acústica [18].

Por el contrario, todas las pruebas anteriores han considerado únicamente la presión sonora que, como se ha explicado anteriormente, es una magnitud que depende de factores tales como el medio en el que viajan las ondas sonoras, la atenuación o la distancia de la fuente sonora, por lo que mediante la medición de la presión sonora no es posible cuantificar la potencia del sonido de la fuente a menos que todos y cada uno de los factores anteriormente mencionados estén estrictamente controlados y definidos, hecho que no sucede en la metodología descrita en el Reglamento 117.



CAPÍTULO 3

OBJETIVOS Y METODOLOGÍA DE LA TESIS



Hasta ahora se han revisado tanto los antecedentes como el estado del arte y los avances en la investigación dentro del campo del ruido de rodadura realizados en los últimos años. Asimismo, se ha introducido la problemática y las limitaciones implícitas al hecho de realizar la medida del ruido de rodadura en pista o en laboratorios de ensayo tipo *Drum* mediante el registro de la presión sonora, las cuales se detallarán y justificarán más adelante en los siguientes capítulos.

Llegados a este punto, analizando detenidamente la problemática existente así como la necesidad de establecer un método normalizado de ingeniería para medir el ruido de rodadura en condiciones controladas de laboratorio, se establece un objetivo principal así como diversos objetivos parciales o secundarios para esta Tesis.

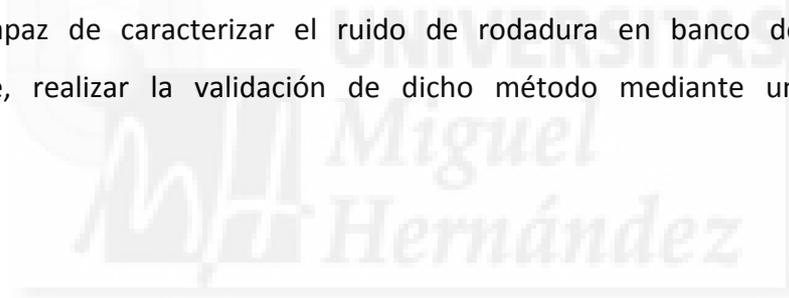
En primer lugar y como objetivo principal de esta Tesis, se pretende diseñar y validar un nuevo método de ensayo para evaluar el nivel de potencia sonora emitido por un neumático durante su rodadura bajo condiciones controladas de laboratorio en una instalación tipo *Drum*.

Para lograr este objetivo, se ha propuesto alcanzar los siguientes objetivos parciales o secundarios:

- Realizar ensayos de ruido de rodadura en pista según establece el Reglamento nº117 CEPE (método *Coast-By*) para obtener el valor de ruido de rodadura –nivel de presión sonora- de numerosas muestras de neumáticos de diferentes marcas, modelos y medidas.
- Diseñar un método de ensayo para la medida del ruido de rodadura de neumáticos en banco de ensayo en instalaciones tipo *Drum*, identificando el ruido propio de la máquina y el ruido generado por el neumático, con la finalidad de obtener, de manera aislada, el nivel de potencia sonora generado por el neumático.

- Ensayar en el banco de ensayos tipo *Drum* mediante el procedimiento descrito en el objetivo anterior, los mismos neumáticos ensayados en pista según el Reglamento 117 CEPE (método *Coast-By*).
- Comparar los resultados obtenidos en los ensayos en pista con los obtenidos en los ensayos en laboratorio mediante la nueva metodología, utilizando los modelos de propagación de ruido, con la finalidad de validar el método de ensayo diseñado.

Para alcanzar los objetivos propuestos, la metodología que se va a utilizar combina el desarrollo teórico con la práctica experimental. Se propone desarrollar un modelo matemático capaz de caracterizar el ruido de rodadura en banco de ensayos para, posteriormente, realizar la validación de dicho método mediante un procedimiento empírico.



CAPÍTULO 4

ENSAYOS EN PISTA. MÉTODO *COAST-BY*



Tal y como se ha explicado en el capítulo 2, el método Coast-By es probablemente, el ensayo más extendido a nivel internacional para la medida del nivel de presión sonora del ruido de rodadura emitido por los neumáticos. En el presente capítulo se explica, con mayor detalle, el método Coast-By así como la configuración de los ensayos llevados a cabo para la medida del ruido de rodadura en pista de los distintos neumáticos. Dichos resultados servirán para validar posteriormente el método de ensayo en laboratorio diseñado en esta Tesis para evaluar el nivel de potencia sonora emitido por un neumático durante su rodadura bajo condiciones controladas de laboratorio en una instalación tipo *Drum*.

4.1.- CONFIGURACIÓN DEL ENSAYO Y NEUMÁTICOS ANALIZADOS

El método *Coast-By*, definido en el Reglamento 117 [2], proporciona el nivel de ruido neumático/carretera mediante el registro del nivel de presión sonora a 7.5 m de distancia a ambos lados del eje longitudinal del vehículo a una velocidad de referencia que, para un vehículo de turismo, son 80 km/h.

A lo largo del presente apartado, se van a definir y detallar todos los parámetros relativos a la propia configuración del ensayo, incluyendo las características de la pista, las especificaciones y la ubicación de los micrófonos, las condiciones ambientales y tanto el vehículo de ensayo como los neumáticos considerados.

4.1.1.- CARACTERÍSTICAS DE LA PISTA

La pista de ensayo debe estar dispuesta de manera que haya un campo libre de sonidos entre la fuente de ruido y el micrófono con una precisión de 1 dB(A). Se considera que se reúnen las condiciones si no hay grandes objetos que reflejen el sonido, como vallas, rocas, puentes o edificios en un radio de 50 m alrededor del punto de medición. La

superficie de la pista de ensayo y las dimensiones del lugar del mismo se deben ajustar a lo dispuesto en el Reglamento 117.

Una parte central, con un radio mínimo de 10 m, debe estar libre de nieve en polvo, hierba alta, tierra suelta, cenizas o elementos semejantes. No debe haber obstáculo alguno que pueda afectar al campo de sonido en las cercanías del micrófono y nadie se debe colocar entre este y la fuente de ruido. El operario que realice las mediciones y todo observador presente durante estas, se debe situar de manera que no afecten a las mediciones de los instrumentos.

La pista de ensayo empleada en esta tesis, está situada en el vial norte de la Universidad Miguel Hernández de Elche y cuenta con una longitud total de 700 metros (véase la figura 18).



Fig. 18. Vista aérea de la pista de ensayo

La zona de ensayo o zona de medición es un tramo de pista de 50 m de longitud que cumple con los requisitos establecidos en el Reglamento 117 en cuanto a características del pavimento y a las especificaciones relativas a las características físicas y de construcción de la pista de ensayo y alrededor de la cual no existen elementos que puedan generar reflexión de las ondas sonoras. En la figura 19 puede verse la zona de medición delimitada por unas líneas rojas y en la figura 20 con uno de los vehículos pasando durante los ensayos.



Fig. 19. Vista aérea de la zona de ensayo delimitada por líneas rojas



Fig. 20. Vista de la zona de ensayo con los vehículos de ensayo realizando una pasada.

Tal y como se demostró en la tesis doctoral de Campillo [27], el posible efecto de atenuación por apantallamiento producido por el bordillo de la mediana es despreciable para el rango de frecuencias estudiadas, así como el efecto de otros tipos de atenuaciones.

4.1.2.- ESPECIFICACIONES RELATIVAS A LOS MICRÓFONOS

El nivel máximo de presión sonora se registra, mediante los micrófonos P-P' situados a ambos lados, a 7.5 ± 0.05 m de distancia de la trayectoria del vehículo C-C', medidos desde el centro de la pista de ensayo por la que el vehículo circula, y a 1.2 ± 0.02 m de altura respecto al suelo (véase Figura 2). La medición se realiza cuando el vehículo transita en punto muerto. En las Figuras 21 y 22 pueden verse los micrófonos colocados en la pista de ensayo.



Fig. 21. Colocación de los micrófonos en la zona de ensayo.

El resultado final se obtiene mediante un análisis de regresión lineal para una velocidad de referencia que, como se ha dicho anteriormente, para los neumáticos de

turismo es de 80 km/h Según establece el Reglamento 117 [2] el nivel del ruido de rodadura L_R en dB(A) se determinará mediante el análisis de regresión aplicando la siguiente fórmula:

$$L_R = \bar{L} - a \cdot \bar{v} \quad (4.1)$$

donde \bar{L} es el valor medio de los niveles de ruido de rodadura L_i medidos en dB(A):

$$\bar{L} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i \quad (4.2)$$

n es el número de mediciones ($n \geq 16$),

\bar{v} es el valor medio de las velocidades logarítmicas v_i :

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad v_i = \log \frac{V_i}{V_{ref}} \quad (4.3)$$

a es la pendiente de la línea de regresión en dB(A):

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v}) \cdot (L_i - \bar{L})}{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2} \quad (4.4)$$

Durante el paso del vehículo por la zona de ensayo se registra el nivel de presión sonora en ponderación A, con el sonómetro en respuesta de medición *Fast* (125 ms).

También es habitual registrar el espectro de frecuencia (generalmente en bandas de tercio de octava) en el momento de máximo pico del nivel de presión sonora. En este ensayo, el análisis de frecuencia en banda estrecha no es adecuado debido al efecto Doppler, a menos que se empleen procedimientos de compensación de este efecto.

Dado que la fuente sonora se encuentra en movimiento, se producirá un desplazamiento de las frecuencias registradas por los micrófonos respecto de la señal original emitida por la fuente, que dependerá de la velocidad de ésta, es decir, el efecto

Doppler. Para evitar que este desplazamiento de la señal afecte a los cálculos finales, los datos registrados se analizarán en bandas de tercio de octava. Realizando el procesado en tercios de octavas, de acuerdo con [28] el error que se comete es despreciable: para una fuente sonora circulando a 100 km/h este error es de 0.015 dB, y para velocidades más bajas el error es aún menor.



Fig. 22. Detalle de colocación de los micrófonos y las fotocélulas para la medición de la velocidad.

Al comienzo y al final de cada sesión de mediciones debe comprobarse todo el sistema de medición mediante un calibrador de sonido. Sin ningún otro ajuste, la diferencia entre las mediciones de dos controles consecutivos debe ser inferior o igual a 0.5 dB. Si se supera este valor, los resultados de las mediciones obtenidas después del anterior control satisfactorio deben desecharse.

4.1.3.- CONDICIONES AMBIENTALES

Se debe tomar la temperatura del aire y del pavimento de ensayo. Los dispositivos de medición de la temperatura deben tener una incertidumbre de ± 1 °C.

El viento debe medirse a la altura del micrófono. El dispositivo debe ser capaz de medir la velocidad del viento con una tolerancia de ± 1 m/s. Se anota la dirección del viento con respecto a la dirección de desplazamiento.

Las mediciones no se deben realizar en condiciones meteorológicas adversas. Se debe garantizar que los resultados no estén influidos por ráfagas de viento. No se efectuará el ensayo si la velocidad del viento a la altura del micrófono es superior a 5 m/s. No se realizarán las mediciones si la temperatura ambiente es inferior a 5 °C o superior a 40 °C, o la del pavimento de ensayo es inferior a 5 °C o superior a 50 °C.

El nivel de ruido de fondo (incluido el ruido del viento) será, por lo menos, 10 dB(A) inferior a la emisión de ruido de rodadura medida. Se podrá colocar una pantalla contra el viento en el micrófono siempre que se tengan en cuenta sus repercusiones en la sensibilidad y las características direccionales del micrófono.

4.1.4.- OTRAS ESPECIFICACIONES RELATIVAS A LAS MEDICIONES

La velocidad del vehículo se mide con instrumentos con una incertidumbre máxima de ± 1 km/h cuando la parte delantera del vehículo haya alcanzado la línea P-P'. A tal efecto, se dispone de unas fotocélulas capaces de medir la velocidad del vehículo cumpliendo dicho requerimiento.

4.1.5.- CARACTERÍSTICAS DEL VEHÍCULO EMPLEADO

Según el Reglamento 117, el vehículo de ensayo debe estar equipado con cuatro neumáticos repartidos en dos ejes. La distancia entre los dos ejes en los que se hayan colocado los neumáticos de ensayo será inferior a 3500 mm para los neumáticos de la clase C1 y a 5000 mm para los neumáticos de las clases C2 y C3 según se especifica en la tabla 2.

Durante el ensayo, debe cumplirse que la carga de ensayo Q_t para cada neumático sea del 50 al 90% de la carga de referencia Q_r . Además, debe cumplirse que la carga media de prueba $Q_{t,avr}$ de todos los neumáticos sea el $75 \pm 5 \%$ de la carga de referencia Q_r . La carga de referencia Q_r corresponderá a la masa máxima asociada con el índice de capacidad de carga del neumático.

Tras evaluar la carga de los neumáticos teniendo en cuenta la tara del vehículo así como la carga que transportaba el mismo junto con el peso del conductor y del depósito de combustible y haciendo el reparto de masas entre los dos ejes del vehículo, se comprobó que la condición descrita en el apartado anterior se cumplía en todos los casos.

Para los ensayos se emplearon 2 vehículos idénticos marca Peugeot modelo 207 (véase Figura 23), de colores gris y azul oscuro, cuya batalla es de 2540 mm. Tal y como establece el Reglamento, los dos vehículos cumplían las siguientes características:

- La distancia entre los dos ejes o batalla es inferior a 3500 mm (neumáticos clase C1).
- Carecían de aletas antiproyección ni ningún otro dispositivo adicional antiproyección.
- No disponían de elementos en la proximidad inmediata de las llantas ni de los neumáticos que puedan amortiguar el ruido emitido.
- La alineación de los neumáticos (convergencia, salida, avance) estaba ajustada totalmente a las recomendaciones del fabricante del vehículo.
- No estaba montado ningún material adicional absorbente del ruido en el alojamiento de la rueda ni en la parte inferior de la carrocería.

- La suspensión estaba en buenas condiciones, de manera que no producía una disminución anormal de la distancia al suelo cuando el vehículo estaba cargado de conformidad con el requisito de ensayo.
- Se comprobó que los ventiladores eléctricos de refrigeración no estaban funcionando.
- Las ventanas del vehículo estaban cerradas durante el ensayo.



Fig. 23. Vehículos utilizados durante los ensayos en pista y sus dimensiones exteriores

4.1.6.- CARACTERÍSTICAS DE LOS NEUMÁTICOS A ENSAYAR

El Reglamento 117 establece las disposiciones relativas a la homologación de neumáticos por lo que se refiere a las emisiones de ruido de rodadura, a la adherencia en superficie mojada y/o a la resistencia a la rodadura. Realiza una clasificación inicial de los neumáticos en las clases C1, C2 y C3, correspondiendo cada uno de ellos a un uso destinado según la siguiente tabla:

CLASE	USO DESTINADO
C1	Neumáticos para vehículos de las categorías M1, O1 y O2 (Vehículos destinados al transporte de personas < 9 plazas y sus remolques cuya masa máxima no sea superior a 3500 kg)
C2	Neumáticos con Índice de Carga < 121 (1450 kg) y Código de Velocidad > N (140 km/h) destinados a vehículos de las categorías M2, M3, N, O3 y O4 (Vehículos destinados al transporte de personas > 9 plazas, vehículos destinados al transporte de mercancías y remolques > 3500 kg)
C3	Neumáticos con Índice de Carga > 121 (1450 kg) y Código de Velocidad < N (140 km/h) destinados a vehículos de las categorías M2, M3, N, O3 y O4 (Vehículos destinados al transporte de personas > 9 plazas, vehículos destinados al transporte de mercancías y remolques > 3500 kg)

Tabla 2. Clasificación de los neumáticos según el Reglamento 117.

Los neumáticos instalados en el vehículo de ensayo tendrán una presión P_t , no superior a la presión de referencia P_r , que estará situada dentro del intervalo:

$$P_r \cdot \left(\frac{Q_t}{Q_r}\right)^{1.25} \leq P_t \leq 1.1 \cdot P_r \cdot \left(\frac{Q_t}{Q_r}\right)^{1.25} \quad (4.5)$$

En el caso de la clase C1, la presión de referencia será $P_r = 250$ kPa para los neumáticos «normales» y de 290 kPa para los neumáticos «reforzados» o «de carga extra»; la presión mínima de ensayo deberá ser $P_t = 150$ kPa.

En nuestro caso, la presión de ensayo de todos los neumáticos fue de 2 bar ya que dicha presión además de cumplir con la especificación anterior, era la presión preconizada por el fabricante del vehículo para dichas medidas de neumático. En la siguiente Figura 24 puede verse una vista de detalle de uno de los neumáticos ensayados.

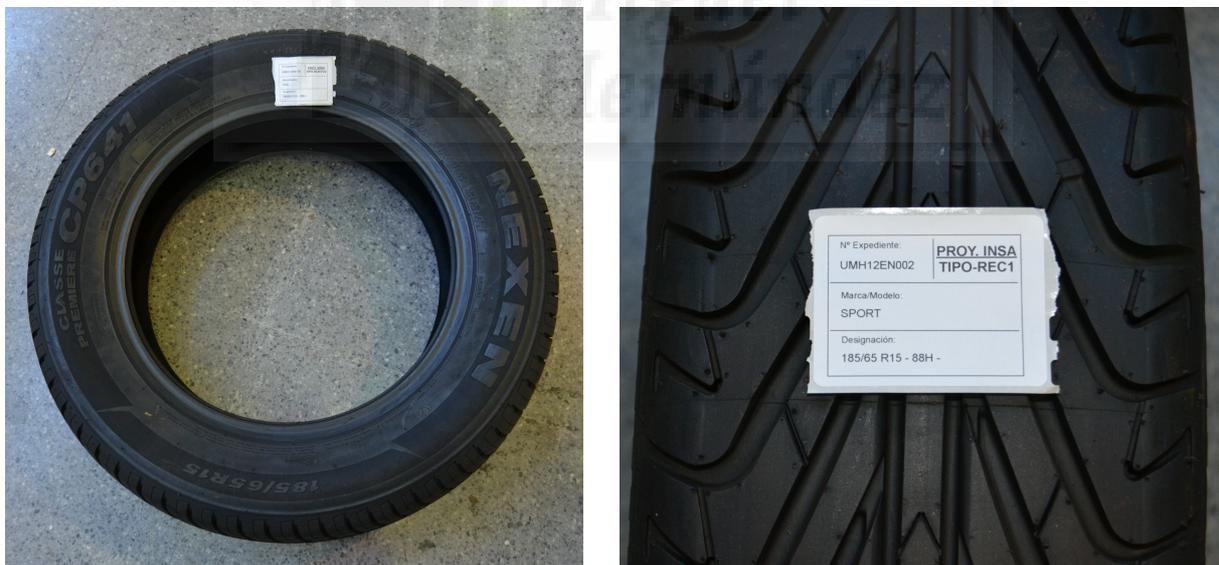


Fig. 24. Vistas de detalle de uno de los neumáticos ensayados.

4.1.7.- PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

En todas las mediciones el vehículo es conducido en línea recta en la zona de medición (A-A' a B-B') de manera que el plano longitudinal medio del vehículo esté lo más cercano posible a la línea C-C' (véase la Figura 25).

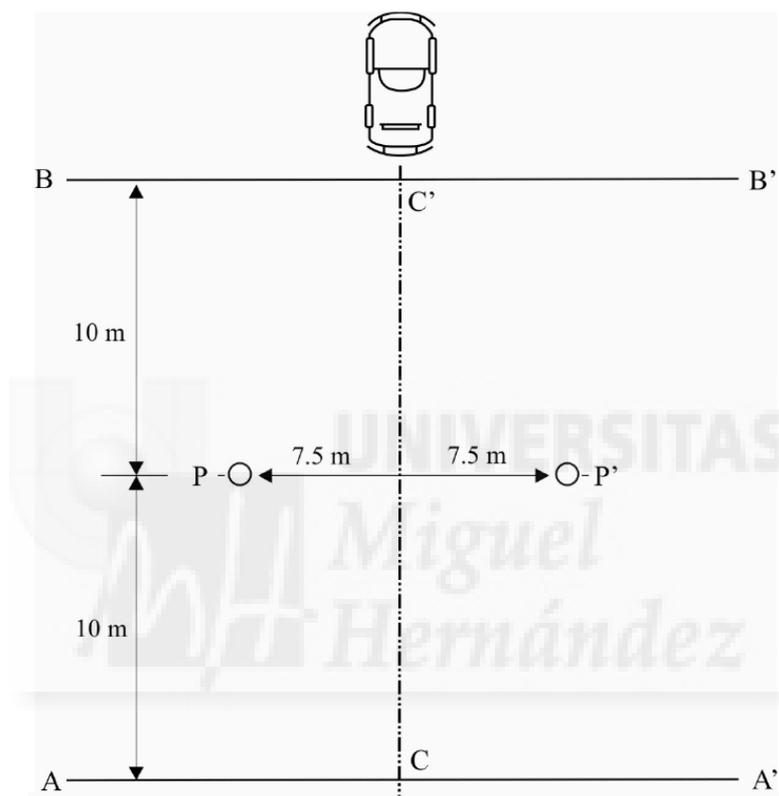


Fig. 25. Disposición de la pista de ensayo y de los micrófonos para un ensayo *Coast-By*

El vehículo se desplaza a velocidad constante y justo antes de que alcance la zona de medición, el motor se para y la transmisión se pone en punto muerto. A lo largo del recorrido de ensayo entre las líneas A-A' y B-B' el vehículo se mueve solamente gracias a las fuerzas de inercia y se asume que en estas condiciones el ruido emitido por el vehículo procede únicamente de la rodadura. Si se produce algún ruido anormal emitido por el vehículo de ensayo durante la medición (por ejemplo, el ventilador, autoencendido), el ensayo no se tomará en consideración.

Durante los 20 m. que recorre el vehículo en el ensayo, sobre una superficie totalmente horizontal, el vehículo suele disminuir su velocidad en aproximadamente 1 km/h. Esta reducción de velocidad se desprecia al utilizarse la velocidad media registrada para la obtención del nivel de presión sonora.

El máximo nivel de ruido expresado en decibelios ponderados A se medirá hasta el primer decimal cuando el vehículo transite en punto muerto entre las líneas A-A' y B-B' (parte delantera del vehículo en la línea A-A' y trasera del vehículo en la línea B-B'). Ese valor será el resultado de la medición.

Se efectuarán al menos cuatro mediciones en cada lado del vehículo de ensayo a una velocidad de ensayo más baja que la velocidad de referencia y al menos cuatro mediciones a una velocidad de ensayo más alta que la velocidad de referencia. Las velocidades estarán regularmente espaciadas dentro de la siguiente gama de velocidades:

- a) de 70 a 90 km/h en el caso de los neumáticos de las clases C1 y C2;
- b) de 60 a 80 km/h en el caso de los neumáticos de la clase C3.

La velocidad de referencia indicada en la normativa es de 80 km/h para vehículos ligeros y 70 km/h para vehículos pesados. El valor final sonoro que se obtiene en la prueba se basa en calcular el nivel sonoro a la velocidad de referencia, mediante un análisis de regresión lineal de la velocidad y el ruido medido.

4.2.- CONDICIONES DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

Previamente a la realización de los ensayos, se comprobó que las condiciones ambientales cumplieran con las establecidas en el Reglamento 117. Durante los ensayos se midió en dos ocasiones y al finalizar los mismos se volvió a medir, comprobando que en todo momento se cumplieran las condiciones ambientales.

Se midió la velocidad del viento a la altura del micrófono dando como resultado una velocidad prácticamente nula (0 – 1.2 m/s). También se registró la temperatura del aire a la altura del micrófono siendo ésta entre 27.2 °C al inicio y 24.8 °C al final. En cuanto a la temperatura superficial de ensayo, se tomaron varias muestras representativas de la pista de ensayo, dando como resultado una temperatura media entre 33.8 °C al inicio y 31.3 °C al final. Por último, se midió el ruido ambiente siendo el resultado de la medición que el nivel de ruido de fondo no superaba, en ningún momento, los 60 dB(A). Teniendo en cuenta los valores de registrados durante los ensayos, en todos los casos se cumplía que la diferencia superaba los 10 dB(A), que es el margen mínimo que establece el Reglamento.

Por último, para posicionar los micrófonos, se utilizó un medidor de distancias láser Bosch GLM80 calibrado cuya incertidumbre de medida es de 0.003 m para el rango de medidas en el que fue utilizado.

Se hicieron cinco mediciones en cada lado del vehículo de ensayo a una velocidad de ensayo más baja que la velocidad de referencia ($70 < v < 80$ km/h) y otras cinco mediciones a una velocidad de ensayo más alta que la velocidad de referencia ($80 < v < 90$ km/h). En total, se realizaron 20 mediciones para cada neumático diferente lo que hizo un total de 300 mediciones.

Se registró tanto la velocidad del vehículo como el espectro sonoro en bandas de tercio de octava mediante un sistema de adquisición de datos LMS Scadas International de 16 canales.

En el caso de los ensayos realizados en el marco de esta Tesis, todos los neumáticos ensayados corresponden a la clase C1. A continuación se detallan en las Tablas 3, 4 y 5, clasificados por sus dimensiones en tres grupos, todos los neumáticos ensayados. Además, puede verse una vista general de los mismos en la Figura 26.

MARCA / MODELO DIMENSIONES	CARACTERÍSTICAS	POSICIÓN DE MONTAJE	REFERENCIA DE LA MUESTRA
Michelin Energy Saver 185/65R15 88H	Neumático nuevo tipo 1 Índice de Carga 88 (560 kg) Código Velocidad H (210 km/h)	TD	UMH12EN086
		TI	UMH12EN087
		DD	UMH12EN169
		DI	UMH12EN170
Nexxen Classe CP641 185/65R15 88H	Neumático nuevo tipo 2 Índice de Carga 88 (560 kg) Código Velocidad H (210 km/h)	TD	UMH12EN092
		TI	UMH12EN093
		DD	UMH12EN175
		DI	UMH12EN176
Insa Turbo Sport 185/65R15 88H	Recauchutado tipo 1 Índice de Carga 88 (560 kg) Código Velocidad H (210 km/h)	TD	UMH12EN003
		TI	UMH12EN004
		DD	UMH12EN005
		DI	UMH12EN006
Insa Turbo Ecosaver 185/65R15 88H	Recauchutado tipo 2 Índice de Carga 88 (560 kg) Código Velocidad H (210 km/h)	TD	UMH12EN021
		TI	UMH12EN022
		DD	UMH12EN023
		DI	UMH12EN024
Insa Turbo Ecosaver 185/65R15 88H	Recauchutado tipo 3 Índice de Carga 88 (560 kg) Código Velocidad H (210 km/h)	TD	UMH12EN039
		TI	UMH12EN040
		DD	UMH12EN041
		DI	UMH12EN042

Tabla 3. Neumáticos medida 185/65R15 ensayados en pista según el método *Coast-By*



Fig. 26. Vista general de los neumáticos ensayados en pista según el método *Coast-By*

MARCA / MODELO DIMENSIONES	CARACTERÍSTICAS	POSICIÓN DE MONTAJE	REFERENCIA DE LA MUESTRA
Michelin Pilot Exalto 195/50R15 82V	Neumático nuevo tipo 1 Índice de Carga 82 (475 kg) Código Velocidad V (240 km/h)	TD	UMH12EN090
		TI	UMH12EN091
		DD	UMH12EN173
		DI	UMH12EN174
Nexxen Classe CP641 195/50R15 82V	Neumático nuevo tipo 2 Índice de Carga 82 (475 kg) Código Velocidad V (240 km/h)	TD	UMH12EN096
		TI	UMH12EN097
		DD	UMH12EN179
		DI	UMH12EN180
Insa Turbo TVS 195/50R15 82V	Recauchutado tipo 1 Índice de Carga 82 (475 kg) Código Velocidad V (240 km/h)	TD	UMH12EN015
		TI	UMH12EN016
		DD	UMH12EN017
		DI	UMH12EN018
Insa Turbo Ecosaver 195/50R15 82V	Recauchutado tipo 2 Índice de Carga 82 (475 kg) Código Velocidad V (240 km/h)	TD	UMH12EN033
		TI	UMH12EN034
		DD	UMH12EN035
		DI	UMH12EN036
Insa Turbo Ecosaver 195/50R15 82V	Recauchutado tipo 3 Índice de Carga 82 (475 kg) Código Velocidad V (240 km/h)	TD	UMH12EN051
		TI	UMH12EN052
		DD	UMH12EN053
		DI	UMH12EN054

Tabla 4. Neumáticos medida 195/50R15 ensayados en pista según el método *Coast-By*

MARCA / MODELO DIMENSIONES	CARACTERÍSTICAS	POSICIÓN DE MONTAJE	REFERENCIA DE LA MUESTRA
Michelin Energy Saver 205/55R16 91V	Neumático nuevo tipo 1 Índice de Carga 91 (615 kg) Código Velocidad V (240 km/h)	TD	UMH12EN088
		TI	UMH12EN089
		DD	UMH12EN171
		DI	UMH12EN172
Nexxen Classe CP641 205/55R16 91V	Neumático nuevo tipo 2 Índice de Carga 91 (615 kg) Código Velocidad V (240 km/h)	TD	UMH12EN094
		TI	UMH12EN095
		DD	UMH12EN177
		DI	UMH12EN178
Insa Turbo TVS 205/55R16 91V	Recauchutado tipo 1 Índice de Carga 91 (615 kg) Código Velocidad V (240 km/h)	TD	UMH12EN009
		TI	UMH12EN010
		DD	UMH12EN011
		DI	UMH12EN012
Insa Turbo EcoEvolution 205/55R16 91V	Recauchutado tipo 2 Índice de Carga 91 (615 kg) Código Velocidad V (240 km/h)	TD	UMH12EN027
		TI	UMH12EN028
		DD	UMH12EN029
		DI	UMH12EN030
Insa Turbo EcoEvolution 205/55R16 91V	Recauchutado tipo 3 Índice de Carga 91 (615 kg) Código Velocidad V (240 km/h)	TD	UMH12EN045
		TI	UMH12EN047
		DD	UMH12EN046
		DI	UMH12EN048

Tabla 5. Neumáticos medida 205/55R16 ensayados en pista según el método *Coast-By*

4.3.- RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS

Tal y como se ha explicado en el apartado anterior, se registró la velocidad del vehículo y el espectro sonoro en bandas de tercio de octava.

Posteriormente, se realizó un análisis de regresión de las mediciones de ruido de rodadura según establece el apartado 4.2 del Reglamento 117. Para ello, el nivel de ruido de rodadura L_R en dB(A) se determinó aplicando las ecuaciones (4.1), (4.2), (4.3) y (4.4) presentadas en la sección 4.1.2.

Del mismo modo y según establece el apartado 4.3 del Reglamento 117, se realizó la correspondiente corrección de la temperatura mediante la ecuación

$$L_R(\vartheta_{ref}) = L_R(\vartheta) + K(\vartheta_{ref} - \vartheta)$$

Siendo ϑ la temperatura de la superficie, $\vartheta_{ref} = 20$ °C y $K = -0.03$ dB(A)/°C

Como se ha explicado en el apartado anterior, para cada neumático se han realizado veinte mediciones, diez a una velocidad de ensayo más baja que la velocidad de referencia y otras diez a una velocidad más alta, registrando en el sistema de adquisición de datos LMS Scadas International los niveles de ruido de rodadura mediante los micrófonos y las velocidades mediante las fotocélulas.

A partir de dichos registros y mediante el análisis de regresión descrito en el Reglamento 117 se han calculado los valores de nivel de ruido de rodadura L_R .

También se ha obtenido el espectro de frecuencias en bandas de tercio de octava entre 100 y 4000 Hz para la totalidad de las 300 mediciones realizadas en pista según el método *Coast-By*.

A modo de ejemplo, a continuación se muestra la Tabla 6 con los valores de presión sonora en dB(A) registrados a velocidades altas para el espectro de frecuencias en bandas de tercio de octava entre 100 y 4000 Hz para los neumáticos de medida 185/65R15 88H:

	FRECUENCIA (Hz)																
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
Insa Turbo Eco.	45.5	47.7	48.9	52.0	54.2	55.0	56.2	60.1	62.9	72.6	73.5	69.5	67.5	64.4	60.0	58.7	55.1
Insa Turbo Sport	43.6	45.3	49.0	51.1	52.6	55.5	55.2	62.8	63.7	68.3	70.6	68.2	66.2	64.5	59.8	57.2	53.2
Nexxen CP461	42.2	43.8	46.2	48.4	49.8	51.3	53.6	56.3	59.4	66.6	70.0	70.0	69.2	63.9	58.1	55.9	53.3
Michelin	44.1	44.1	47.6	50.7	52.4	54.1	56.8	60.0	64.7	69.9	72.6	69.5	68.9	65.1	59.3	57.2	53.3

Tabla 6. Valores de presión sonora obtenidos para los neumáticos de medida 185/65R15 88H.

Con esos valores, se muestra a continuación la Figura 27 con el espectro de frecuencia de los diferentes neumáticos de medida 185/65R15 88H ensayados:

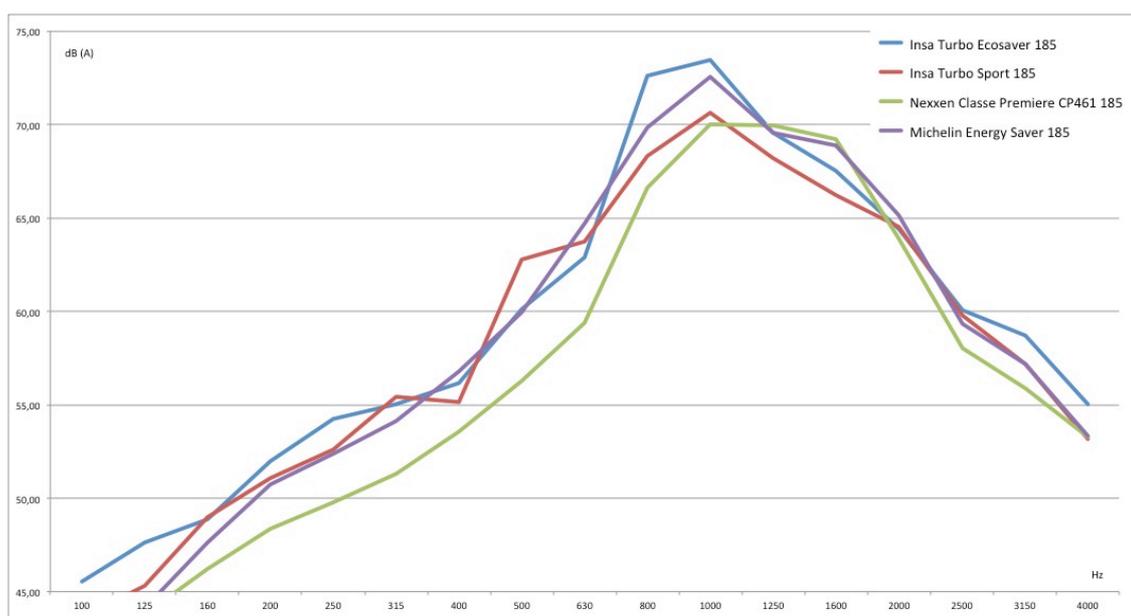


Fig. 27. Gráfica con los espectros de frecuencia de los neumáticos 185/65R15 88H.

Como puede observarse las gráficas obtenidas muestran, en todos los casos, el espectro típico de ruido de rodadura descrito en la literatura [1], [29], incrementándose los valores de nivel de ruido de rodadura conforme aumenta la frecuencia hasta un pico en torno a la banda de 1000 Hz para luego ir disminuyendo otra vez.

Por otro lado, se puede apreciar como los dos neumáticos de tipo “ecológico” –Insa Turbo Ecosaver y Michelin Energy Saver– son los más ruidosos mientras que los neumáticos convencionales –Insa Turbo Sport y Nexxen Classe Premiere– proporcionan niveles de ruido de rodadura más contenidos.

En la Tabla 7, se muestran los resultados obtenidos de nivel de presión sonora equivalente (L_{eq}) así como las velocidades medias de los ensayos para cada uno de los neumáticos ensayados:

	70 < v < 80 km/h (Bajas)		80 < v < 90 km/h (Altas)	
	\bar{v} (km/h)	L_{eq} dB(A)	\bar{v} (km/h)	L_{eq} dB(A)
Michelin Energy Saver 185/65R15 88H	74.3	75.20	83.7	77.36
Nexxen Classe CP641 185/65R15 88H	74.6	74.18	83.5	75.91
Insa Turbo Sport 185/65R15 88H	75.4	73.44	85.7	75.85
Insa Turbo Ecosaver 185/65R15 88H REC2	73.4	74.31	87.2	78.08
Insa Turbo Ecosaver 185/65R15 88H REC3	72.3	74.78	82.8	78.91
Michelin Pilot Exalto 195/50R15 82V	69.0	74.74	76.2	76.39
Nexxen Classe CP641 195/50R15 82V	68.3	72.94	78.6	75.57
Insa Turbo TVS 195/50R15 82V	69.3	72.18	77.2	73.83
Insa Turbo Ecosaver 195/50R15 82V REC2	72.4	72.76	83.5	74.59
Insa Turbo Ecosaver 195/50R15 82V REC3	68.2	72.61	77.1	74.81

Michelin Energy Saver 205/55R16 91V	74.3	74.11	85.3	77.26
Nexxen Classe CP641 205/55R16 91V	74.4	74.36	84.4	76.37
Insa Turbo TVS 205/55R16 91V	75.8	73.99	85.3	75.87
Insa Turbo EcoEvol. 205/55R16 91V REC2	75.3	72.87	84.2	74.80
Insa Turbo EcoEvol. 205/55R16 91V REC3	73.8	73.41	85.1	76.08

Tabla 7. Velocidades medias de los ensayos y sus correspondientes niveles de presión sonora equivalente (L_{eq}) para cada uno de los neumáticos. Datos en dB(A) y en km/h

Por otro lado, a continuación se muestra en la Figura 28 una comparación entre el nivel de presión sonora equivalente (L_{eq}) en dB(A) obtenido a velocidades altas para los diferentes neumáticos ensayados:

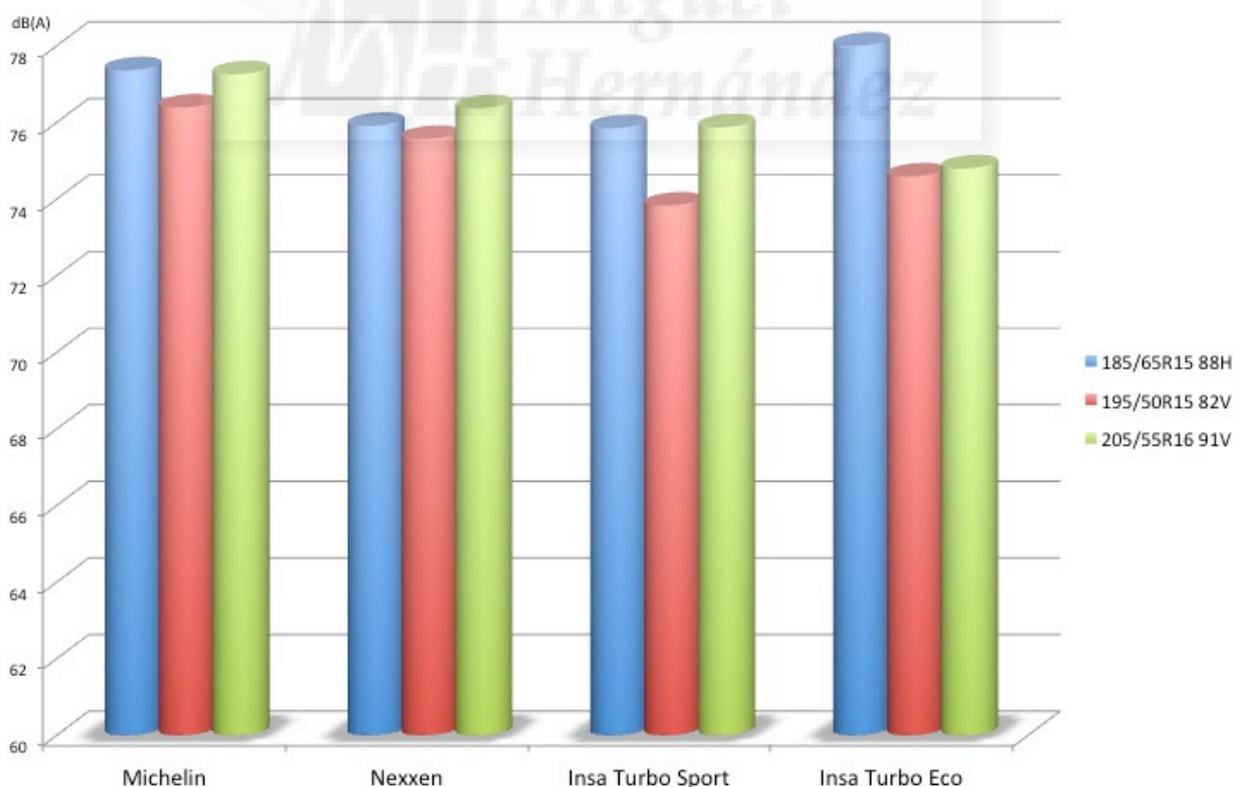


Fig. 28. Gráfica comparativa de los niveles de presión sonora equivalente L_{eq} obtenidos

Como puede observarse en la Figura 8, la medida 195/50R15 es la menos ruidosa de todas mientras que los valores de las otras dos medidas son similares en todos los casos salvo el modelo Insa Turbo Eco, cuya medida más pequeña es la más ruidosa. Es importante mencionar que las especificaciones, los dibujos de las bandas de rodaduras y los compuestos de goma no son iguales en ninguna de las medidas aun siendo las mismas marcas de neumáticos.

En la gráfica también se aprecia que el neumático Michelin es, generalmente y para todas las medidas, el más ruidoso de los cuatro modelos de neumáticos ensayados.



4.4.- COMENTARIOS Y CRÍTICAS AL MÉTODO DE ENSAYO *COAST-BY*

Como ya se adelantó en la introducción, el método descrito en el Reglamento 117 es el único procedimiento de ensayo válido para la homologación que cualquier neumático nuevo antes de comercializarse bajo el marcado CE.

Sin embargo, el método de ensayo de ruido de rodadura en punto muerto descrito en la normativa presenta múltiples desventajas y limitaciones.

En primer lugar y puesto que la finalidad de este método es ensayar neumáticos y no vehículos, se asume que no habrá diferencia en el nivel de presión sonora registrado cuando el juego de neumáticos ensayado se evalúe en cualquier otro vehículo, lo cual no es totalmente cierto. Se ha demostrado ampliamente que no es posible reproducir fácilmente los resultados cuando los ensayos se llevan a cabo por diferentes equipos de ensayo en diferentes pistas de ensayo [6] y con diferentes vehículos [7]. Incluso es complicado conseguir los mismos resultados en los ensayos realizados por el mismo equipo en la misma pista de ensayo y el mismo vehículo, ya que hay otros muchos factores que influyen en los resultados.

A pesar de la utilización de factores de corrección para la temperatura tal y como se ha descrito en el apartado 4.3 hay otras variables como la velocidad y la dirección del viento, el ruido de fondo o cambios a lo largo del tiempo [8] (por ejemplo, en los neumáticos, en la pista de ensayo o en el propio vehículo debido al uso y desgaste) que no son fácilmente ponderables. Adicionalmente, las diferencias en las velocidades de referencia, las categorías de vehículos y los efectos de la edad y la rugosidad de superficie de la pista de ensayo también pueden traer discrepancias significativas en los resultados finales [9], [10].

Algunos de los estudios referenciados indican que la variación de alguno de estos factores puede llegar a implicar una diferencia en los valores registrados de hasta 2 dB. Si a ello le sumamos la posibilidad de que varíe más de un parámetro de manera simultánea, se

puede afirmar que el método actual tiene ciertas limitaciones para conseguir una repetibilidad y reproducibilidad propias de un método científico cuya finalidad es aceptar o rechazar muestras de neumáticos teniendo como criterio de aceptación o rechazo un valor que podría variar sensiblemente en función de dónde o cuándo se realice el ensayo. Parece lógico pensar que un neumático rechazado por un laboratorio debido a un exceso de 1 o 2 dB, pudiera obtener el certificado de homologación cuando se ensaya en otro laboratorio debido a las carencias del método de ensayo. Esta limitación podría acotarse, pero no eliminarse, realizando un programa de intercomparaciones entre laboratorios lo cual encarecería notablemente el coste final de los ensayos.

Por otro lado y si hablamos de precio, el método Coast-By no es precisamente un procedimiento económico. Un ensayo según el Reglamento 117 requiere un vehículo equipado con cuatro neumáticos. El coste de montar de cuatro neumáticos es cuatro veces mayor que el coste de montaje de un solo neumático. Lo mismo ocurre con el propio coste de los neumáticos. Las llantas del vehículo deben ser compatibles con los neumáticos; de lo contrario es necesario montar cuatro llantas nuevas en el vehículo. Cabe destacar que no existe un vehículo que sea compatible con todas las medidas de neumáticos disponibles en el mercado, por lo que será necesario disponer de varios vehículos para poder llevar a cabo los ensayos de toda la gama de neumáticos existente.

Además, al menos dos personas deben estar trabajando al mismo tiempo para llevar a cabo los ensayos y una cierta cantidad de combustible se consume durante los mismos. Por último, los ensayos en pista necesitan mucho más tiempo para ser llevados a cabo, lo cual los hace más caros. Todos estos factores hacen que los métodos convencionales sean más caros que la nueva metodología propuesta en esta tesis.

Con el fin de obtener una idea aproximada, los presupuestos dados por laboratorios de ensayos de automoción acreditados para ensayos en pista *Coast-by* son entre tres y cuatro veces más caros que para los ensayos de resistencia a la rodadura en laboratorio (equivalente, en términos de costos, al propuesto siguiendo la nueva metodología de esta

tesis). Un ensayo Coast-By para un juego de cuatro neumáticos cuesta 2240€, a lo que hay que añadir el propio coste de los cuatro neumáticos y su montaje. Para un tamaño medio de un neumático, por ejemplo 205/55R16 91V esto es 360€, lo que hace un total de 2600€. En el caso de un ensayo de resistencia a la rodadura, el precio es de 700€ y si incluimos el neumático, 790€.

El ensayo en pista no es exactamente un ensayo rápido y ese hecho también lo hace costoso. La metodología descrita en el Reglamento CEPE 117 determina que se deben realizar, al menos, cuatro mediciones en cada lado del vehículo a una velocidad de ensayo más baja que la velocidad de referencia y al menos otras cuatro mediciones a una velocidad de ensayo más alta que la velocidad de referencia. Estamos hablando de realizar, al menos, 16 pasadas a una pista cuya longitud mínima debe ser de 600 m para que el ensayo pueda realizarse garantizando un mínimo de seguridad. Teniendo en cuenta el recorrido de vuelta de cada pasada, significa recorrer aproximadamente 20 km.

La velocidad de referencia para un neumático de turismo es de 80 km/h. No obstante, si se tiene en cuenta que el ensayo tiene diversas fases como la de aceleración, frenada y recorrido de vuelta, esto significa que para ensayar el ruido de rodadura en un solo juego de neumáticos mediante el método convencional se requiere, al menos, 40 minutos. Como se demostrará más adelante, el mismo número de mediciones se puede hacer en 8 minutos si se emplea la nueva metodología propuesta en esta tesis.

Además, el montaje de un sólo neumático en la máquina de ensayo es cuatro veces más rápido que montar cuatro neumáticos en un vehículo. Un operario experimentado puede montar un juego de neumáticos en las llantas de ensayo, equilibrarlas y montarlas en el vehículo de ensayo en aproximadamente 1 hora. El mismo montaje de un solo neumático en la máquina de ensayo no requiere más de 15 minutos.

Por último está la que, quizás es, la limitación más importante del método convencional: la magnitud medida. La magnitud que se mide de acuerdo con los

Reglamentos mencionados anteriormente es el nivel de presión sonora. Sin embargo, esta magnitud depende de factores tales como el medio en el que viajan las ondas sonoras, la atenuación o la distancia de la fuente sonora. Esto no sucede con el nivel de potencia acústica, que es una magnitud inherente a la fuente sonora y que no depende de otros factores externos [1], [11]. Por lo tanto, mediante la medición de la presión sonora no es posible cuantificar la potencia sonora de la fuente a menos que todos y cada uno de los factores anteriormente mencionados estén estrictamente controlados y definidos. Esto no sucede en la metodología descrita en el Reglamento 117 o en cualquier otro de los métodos convencionales mencionados anteriormente.



CAPÍTULO 5

DISEÑO DEL MÉTODO DE ENSAYO
***DRUM* EN LABORATORIO**

Con la finalidad de obtener, de manera aislada, el nivel de potencia sonora L_w generada por un neumático durante su rodadura, se pretende diseñar un método de ensayo para la medida del ruido de rodadura de neumáticos en banco de ensayo en instalaciones tipo *Drum*, identificando el propio ruido producido por la máquina durante su funcionamiento y el ruido generado por el neumático.

El propósito es eliminar o reducir notablemente los inconvenientes y las limitaciones del ensayo *Coast-By* y obtener los valores de nivel de ruido. Para ello, se ha desarrollado una nueva metodología basada en los ensayos de laboratorio tipo *Drum* y la Norma Internacional ISO 3744 *Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure* [12].

La norma ISO 3744 determina los niveles de potencia acústica de fuentes de ruido utilizando presión sonora en un campo libre sobre uno o más planos reflectantes. Es un método de ingeniería para la medida con grado de precisión 2, designado como grado de peritaje, en el cual se tiene en cuenta que la fuente sonora está situada sobre un plano reflectante tal y como ocurre con un neumático cuando rueda por el asfalto en condiciones normales de uso. En la tabla 8 se muestran los diferentes grados que existen y sus características, que se explicarán a lo largo del presente capítulo.

El nuevo enfoque propuesto en esta tesis combina la experiencia de un método normalizado según los estándares ISO con el procedimiento experimental desarrollado por el grupo de investigación de mecánica aplicada en las instalaciones de ensayo de neumáticos del Laboratorio de Vehículos de la Universidad Miguel Hernández de Elche (LVUMH) situadas en el edificio Torreblanca.

Como ya se ha introducido en el capítulo 2, la novedad de la presente tesis doctoral radica en que los grupos de investigación que han ensayado el ruido de rodadura de neumáticos usando tambores [18] lo han hecho midiendo la presión sonora y en ningún caso utilizando un método de ingeniería específico estandarizado para determinar el nivel de potencia acústica.

Parámetro	ISO 3745 Precisión Grado 1	ISO 3744 Peritaje Grado 2	ISO 3746 Control Grado 3
Entorno de ensayo	Cámara semianecoica	Aire libre o interiores	Aire libre o interiores
Criterio de adecuación del entorno de ensayo ¹⁾	$K_2 \leq 0,5$ dB	$K_2 \leq 2$ dB	$K_2 \leq 7$ dB
Volumen de la fuente de ruido	Preferiblemente inferior a 0,5% de la cámara de ensayo	Sin restricciones; limitado sólo por el entorno disponible	Sin restricciones; limitado sólo por el del entorno disponible
Carácter del ruido	Cualquier (banda ancha, impulsivo)	banda estrecha, frecuencias discretas, estable, no estable,	
Limitación por ruido de fondo ¹⁾	$\Delta L \geq 10$ dB (si es posible, mayor de 15 dB) $K_1 \leq 0,4$ dB	$\Delta L \geq 6$ dB (si es posible, mayor de 15 dB) $K_1 \leq 1,3$ dB	$\Delta L \geq 3$ dB $K_1 \leq 3$ dB
Número de puntos de medición	≥ 10	$\geq 9^{2)}$	$\geq 4^{2)}$
Instrumentación:			
– sonómetro (requisitos mínimos)	a) tipo 1, especificado en la Norma IEC 60651	a) tipo 1, especificado en la Norma IEC 60651	a) tipo 2, especificado en la Norma IEC 60651
– sonómetro integrador (requisitos mínimos)	b) tipo 1, especificado en la Norma IEC 60804	b) tipo 1, especificado en la Norma IEC 60804	b) tipo 2, especificado en la Norma IEC 60804
– juego de filtros pasabanda (requisitos mínimos)	c) clase 1, especificado en la Norma IEC 60225	c) clase 1, especificado en la Norma IEC 60225	–
Precisión del método para determinar L_{WA} , expresado como desviación típica de la reproducibilidad	$\sigma_R \leq 1$ dB	$\sigma_R \leq 1,5$ dB	$\sigma_R \leq 3$ dB (si $K_2 < 5$ dB) $\sigma_R \leq 4$ dB (si $5 \text{ dB} \leq K_2 \leq 7$ dB) Si predominan frecuencias discretas, el valor de σ_R es 1 dB mayor

Tabla 8. Grados de precisión y otros parámetros fundamentales establecidos en la norma ISO 3744

Por el contrario, todas las pruebas anteriores han considerado únicamente la presión sonora que, como se ha explicado en el capítulo 1, es una magnitud que depende de factores tales como el medio en el que viajan las ondas sonoras, la atenuación o la distancia de la fuente sonora por lo que mediante la medición de la presión sonora no es posible cuantificar la potencia del sonido de la fuente a menos que todos y cada uno de los factores anteriormente mencionados estén estrictamente controlados y definidos, hecho que no sucede en la metodología descrita en el Reglamento 117 y que se ha detallado en el capítulo anterior.

Este capítulo desarrolla y explica la nueva metodología para realizar los ensayos en laboratorio tipo *Drum*, incluyendo la localización de los micrófonos, la obtención de los factores de corrección por ruido de fondo y por entorno acústico de ensayo y el procedimiento operativo para la medición de la presión sonora y la obtención de la potencia sonora que emite el neumático según la norma ISO 3744.

5.1.- DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO ACÚSTICO DE ENSAYO

Las instalaciones donde se encuentra el banco de ensayos de neumáticos del Laboratorio de Vehículos están situadas en el laboratorio de la planta baja del edificio Torreblanca de la Universidad Miguel Hernández de Elche.

Con la finalidad de realizar un acondicionamiento acústico del banco de ensayo de neumáticos, se construyó un cerramiento con materiales acústicamente absorbentes en el interior del laboratorio. Este recinto tiene una superficie de 4.84 x 9.35 m y una altura de 3.92 m.

En las Figuras 29, 30 y 31, pueden apreciarse tanto el exterior como el interior de la cámara de ensayo así como la ubicación de la máquina de ensayos dentro del cerramiento.

El cerramiento cuenta con dos ventanas para el control visual del estado de los ensayos, además de una puerta de acceso (ver Figura 32). Las paredes y el techo están fabricadas mediante estructura metálica con un relleno acústicamente absorbente.



Fig. 29. Detalle exterior del cerramiento de la cámara de ensayo



Fig. 30. Detalle interior del cerramiento de la cámara de ensayo

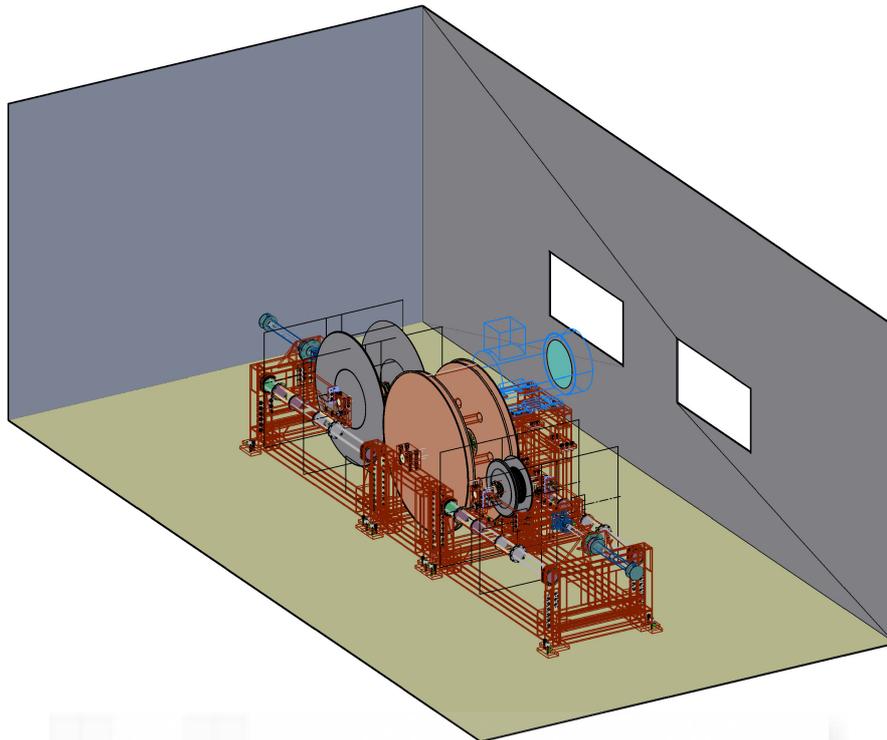


Fig. 31. Ubicación de la máquina de ensayo dentro de la cámara de ensayo



Fig. 32. Ventanas para el control visual dispuestas en una de las paredes del cerramiento

Para el diseño del presente método de ensayo, dado el entorno acústicamente absorbente que existe en el laboratorio, se consiga un sólo plano reflectante. Este plano reflectante será el mismo rodillo de la máquina de ensayos que simulará la pista de ensayo. En la siguiente Figura 33 puede apreciarse la disposición de un neumático de turismo respecto al rodillo una vez montado en la máquina.

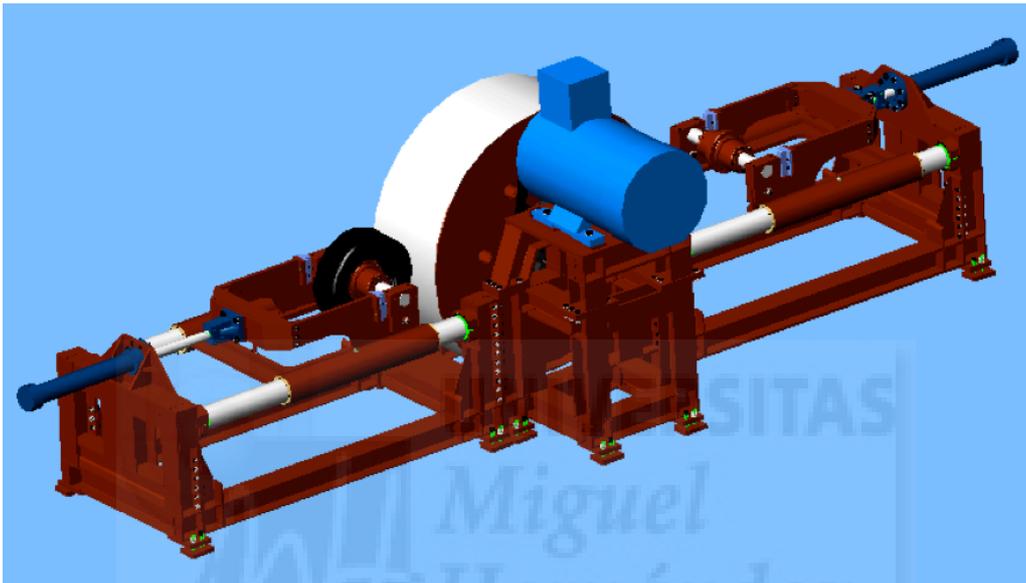


Fig. 33. Disposición del neumático montado en la máquina de ensayos.

En este entorno acústico particular, además del rodillo de la máquina de ensayos, que es el plano reflectante principal al ser el más próximo a la fuente sonora, existen otros planos reflectantes. En primer lugar, por ser más próximo a la fuente sonora, está el suelo de la sala de ensayos. Además están las paredes y el techo, más alejados de la fuente sonora y rellenos de material acústicamente absorbente, por lo que su influencia en las mediciones es mucho menor. Por tanto y como es obvio, la sala de ensayos dista de ser una cámara anecoica.

No obstante, en el Anexo A de la norma, se describen los procedimientos para determinar la magnitud de la corrección por entorno acústico de ensayo K_2 , con objeto de

considerar las desviaciones del entorno frente al caso ideal. Para esta norma internacional, la corrección por entorno acústico de ensayo K_2 debe ser menor o igual a 2 dB.

Se debe tener en cuenta para los cálculos que se realicen, que el nivel de ruido de fondo medio para las distintas posiciones de los micrófonos debe estar al menos a 6 dB y, preferiblemente, más de 15 dB por debajo de la presión acústica a medir.

Como se ha comentado, el plano reflectante es el rodillo de la máquina de ensayos, cuya superficie está situada en la posición donde estaría la carretera respecto a un neumático. De esta forma, la fuente sonora se coloca respecto a su plano reflectante, como está en su posición habitual, tal y como indica la norma.

5.2.- UBICACIÓN DE LOS MICRÓFONOS SEGÚN LA NORMA ISO 3744

La norma ISO 3744 define la posición de los micrófonos mediante una superficie semiesférica S que envuelve a la fuente sonora a partir de un paralelepípedo hipotético de referencia. A continuación se muestran con detalle los pasos a seguir para definir la posición de los micrófonos y ubicarlos alrededor de la fuente sonora.

5.2.1.- DEFINICIÓN DEL PARELEPÍPEDO DE REFERENCIA

El primer paso para localizar las posiciones de los micrófonos es definir un paralelepípedo hipotético de referencia que contenga a la fuente de ruido (ver Fig. 30). La dimensión característica de la fuente d_0 se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$d_0 = \sqrt{\left(\frac{L_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{L_2}{2}\right)^2 + L_3^2} \quad (5.1)$$

La posición de la fuente sonora, así como la superficie de medición y las posiciones de los micrófonos se definen en un sistema de coordenadas con los ejes horizontales X e Y contenidos en un plano definido por la base del paralelepípedo de referencia, y que son, respectivamente, paralelos a su largo y ancho.

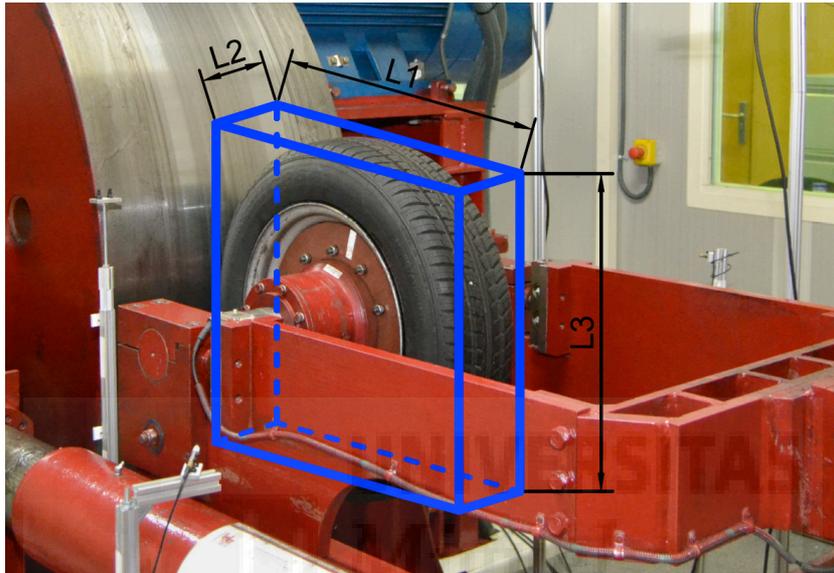


Fig. 34. Paralelepípedo hipotético de referencia que contiene la fuente de ruido.

La dimensión característica de la fuente d_0 , se muestra en la figura 31

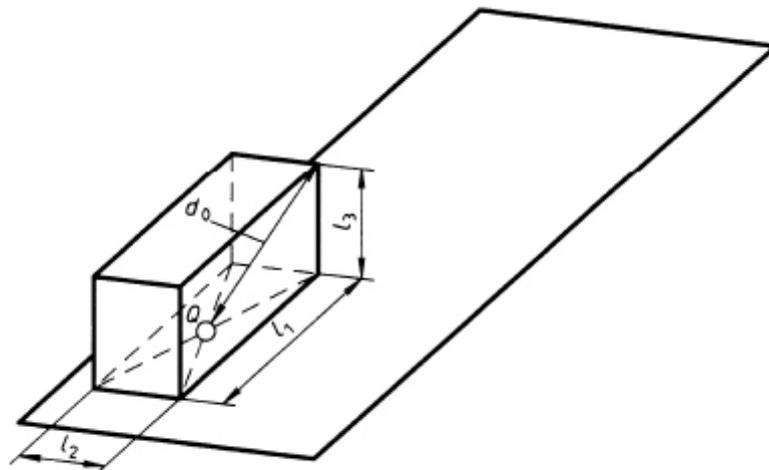


Fig. 35. Dimensión característica de la fuente d_0 representada en el paralelepípedo de referencia

Los micrófonos se colocan en una superficie semiesférica de medición que tiene que estar centrada en el medio del paralelepípedo hipotético de referencia. El radio r de la semiesfera debe cumplir la siguiente condición:

$$r > 2 \cdot d_0 \quad (5.2)$$

5.2.2.- DETERMINACIÓN DE LAS COORDENADAS DE LOS MICRÓFONOS

Tal como prescribe la norma, los micrófonos se colocan de acuerdo con el esquema de distribución sobre la superficie semiesférica de medición de radio r que se muestra en la Fig. 36 y las coordenadas que se muestran en la Tabla 9.

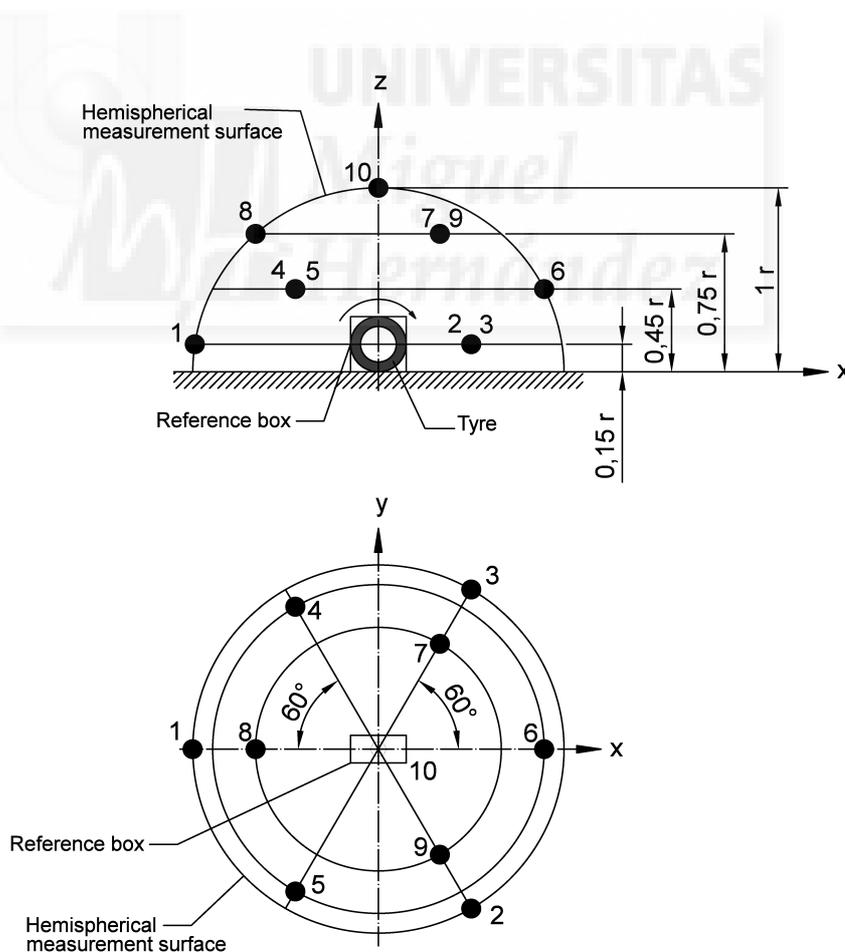


Fig. 36. Esquema de distribución de micrófonos sobre la superficie semiesférica de medición.

POSICIÓN	x/r	y/r	z/r
1	-0.99	0	0.15
2	0.50	-0.86	0.15
3	0.50	0.86	0.15
4	-0.45	0.77	0.45
5	-0.45	-0.77	0.45
6	0.89	0	0.45
7	0.33	0.57	0.75
8	-0.66	0	0.75
9	0.33	-0.57	0.75
10	0	0	1.0

Tabla. 9. Coordenadas de las posiciones de los micrófonos en función del radio r de la semiesfera.

Sin embargo, los micrófonos 1 y 6 tienen una mayor contribución al nivel de sonido medio debido a la directividad de la emisión sonora de ruido del neumático según se ha demostrado anteriormente [30]. Por esta razón y con el fin de que sea posible llevar a cabo futuras comparaciones con los resultados obtenidos mediante el procedimiento experimental para obtener el nivel de potencia acústica del ruido de neumático/carretera bajo condiciones *Coast-By* [11], la distribución de micrófonos de la Figura 36, se giró 90° en sentido anti horario respecto al plano XY, resultando una distribución como se muestra en la Figura 37.

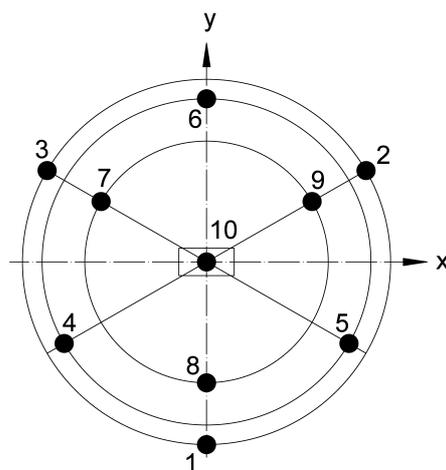


Fig. 37. Nuevo esquema de distribución de los micrófonos tras rotar 90° en sentido anti horario.

Una vez seleccionada la superficie de medición semiesférica, la norma establece que la semiesfera debe estar centrada en el centro del paralelepípedo formado por el paralelepípedo de referencia y sus imágenes en los planos reflectantes adyacentes. El radio, r , de la superficie semiesférica de medición debe ser mayor o igual al doble de la dimensión característica de la fuente, d_0 , y no menor de 1 m. El radio de la semiesfera debe tener uno de los siguientes valores (en metros): 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 14 ó 16.

Como se explica detalladamente más adelante, para el cálculo del factor de corrección por entorno acústico de ensayo K_2 , es necesario seleccionar dos superficies que rodeen la fuente de ruido. La primera debe ser la superficie semiesférica de medición, de área S y la segunda superficie, con área S_2 , debe ser geoméricamente similar a la primera, pero situada a más distancia de ésta, de manera que se cumpla que el cociente S_2/S no debe ser menor de 2 y preferentemente debería ser mayor de 4

Dadas las dimensiones de la celda de ensayos, se eligieron los valores de 1 y 2 m para los radios de las semiesferas S y S_2 respectivamente.

A continuación se muestra una tabla con las coordenadas de los micrófonos para la semiesfera de radio 1 m teniendo en cuenta las coordenadas que establece la norma y que se han explicado anteriormente:

POSICIÓN DE MICRÓFONO	X	Y	h_{micro}	Z
1.1m	-0.99	0	1.01	0.15
2.1m	0.5	-0.86	0.15	0.15
3.1m	0.5	0.86	1.87	0.15
4.1m	-0.45	0.77	1.78	0.45
5.1m	-0.45	-0.77	0.24	0.45
6.1m	0.89	0	1.01	0.45
7.1m	0.33	0.57	1.58	0.75
8.1m	-0.66	0	1.01	0.75
9.1m	0.33	-0.57	0.44	0.75
10.1m	0	0	1.01	1

Tabla. 10. Coordenadas (en m) de las posiciones de los micrófonos para la semiesfera de radio 1 m

Nótese que h_{micro} hace referencia a la altura de cada micrófono respecto al suelo de la celda de ensayos. Este valor será necesario posteriormente para fabricar los soportes de los micrófonos.

En la siguiente imagen se puede observar una simulación de la distribución espacial de los micrófonos para la superficie de medición semiesférica de radio 1 m según las coordenadas anteriores.

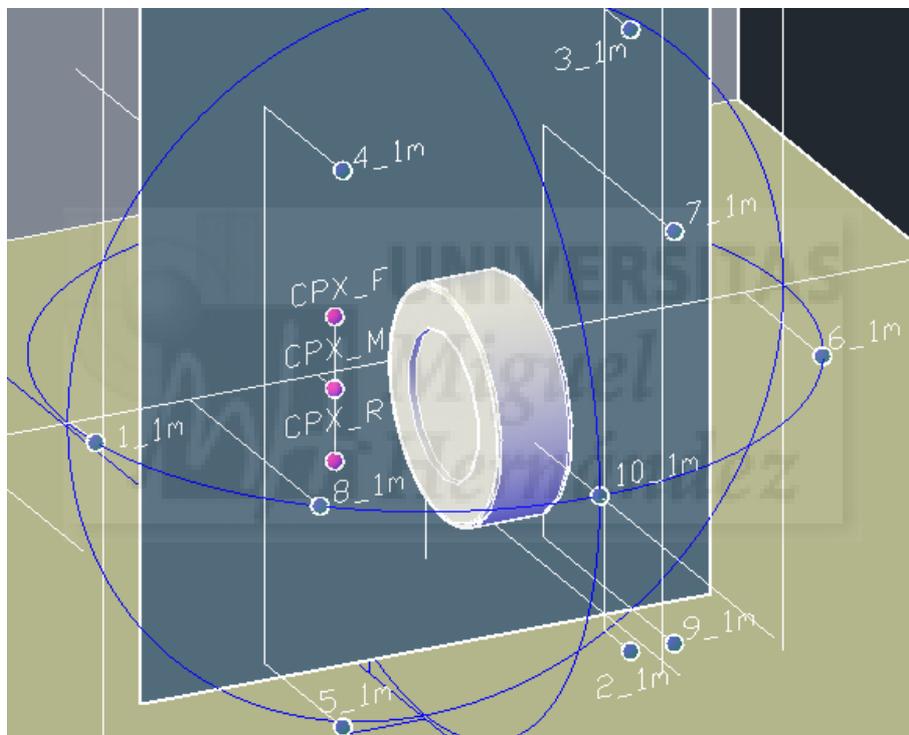


Fig. 38. Simulación con la distribución espacial de los micrófonos para la superficie de radio 1 m.

De manera análoga se calcularon las coordenadas de los micrófonos para la semiesfera de radio 2 m teniendo en cuenta las consideraciones que establece la norma. Sin embargo, en este caso, algunas de las posiciones tienen una altura negativa y por consiguiente, quedarían por debajo del suelo de la sala de ensayos. Por este motivo se tuvieron que descartar las posiciones de micrófono 2, 5 y 9 para la semiesfera de radio 2 m.

A continuación puede verse la Tabla 11 con las coordenadas de los micrófonos para la semiesfera de radio 2 m con las alturas que quedarían por debajo del suelo de la sala de ensayos marcadas en rojo.

POSICIÓN DE MICRÓFONO	X	Y	h_{micro}	Z
1.2m	-1.98	0	1.01	0.3
2.2m	1	-1.72	-0.71	0.3
3.2m	1	1.72	2.73	0.3
4.2m	-0.9	1.54	2.55	0.9
5.2m	-0.9	-1.54	-0.53	0.9
6.2m	1.78	0	1.01	0.9
7.2m	0.66	1.14	2.15	1.5
8.2m	-1.32	0	1.01	1.5
9.2m	0.66	-1.14	-0.13	1.5
10.2m	0	0	1.01	2

Tabla. 11. Coordenadas de las posiciones de los micrófonos para la semiesfera de radio 2 m

En la siguiente imagen se puede observar una simulación de la distribución espacial de los micrófonos para la superficie de medición semiesférica de radio 2 m según las coordenadas anteriores.

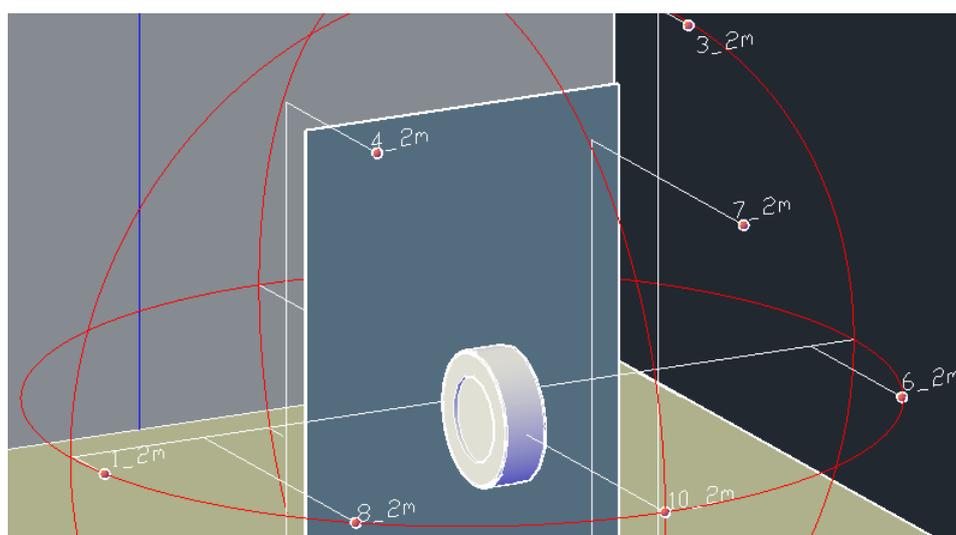


Fig. 39. Simulación con la distribución espacial de los micrófonos para la superficie de radio 2 m.

5.2.3.- DISEÑO DE LOS SOPORTES PARA LA UBICACIÓN DE LOS MICRÓFONOS

Una vez obtenidas las coordenadas de los micrófonos y situados todos los puntos sobre el suelo, se comenzó el diseño de los soportes de los micrófonos. En una serie de bocetos a mano alzada se ilustraron las diferentes opciones para cada tipo de soporte. Tras diferentes consideraciones, finalmente se decidió fabricar 9 soportes para situar espacialmente tanto los micrófonos de la superficie semiesférica de medición de 1 m como los micrófonos de la de 2 m. A continuación se muestra, en la Figura 40, un boceto de los soportes.

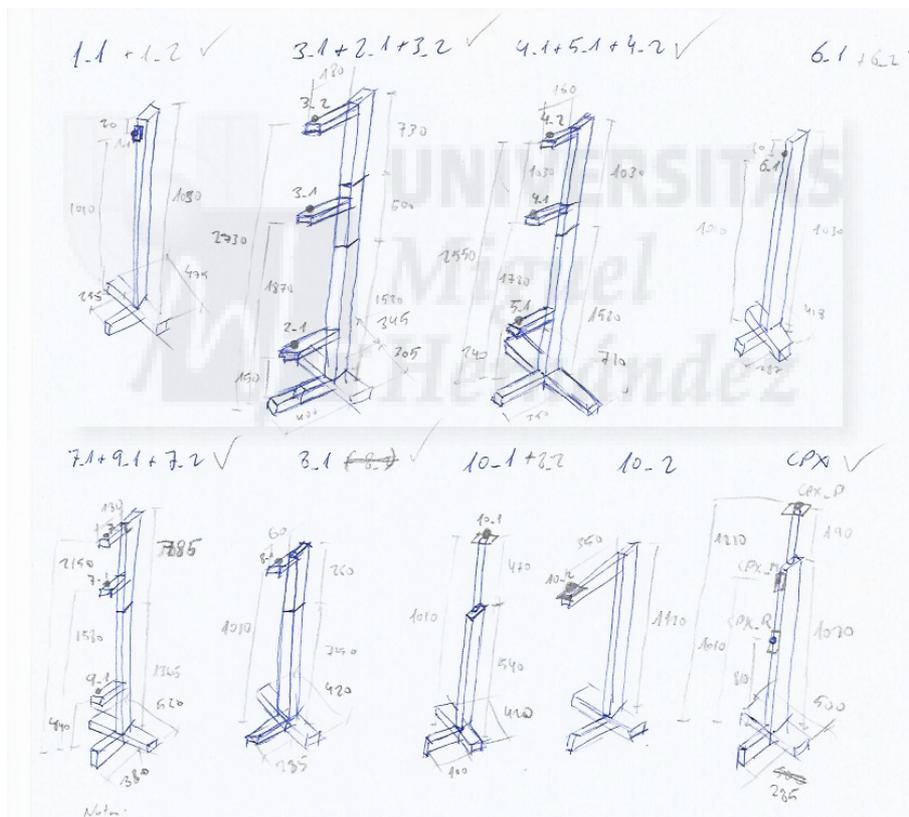


Fig. 40. Boceto de los soportes para situar espacialmente los micrófonos.

Los diferentes soportes de micrófono fueron diseñados y posicionados alrededor del paralelepípedo de referencia utilizando AutoCAD conforme a la norma ISO 3744 con el fin de cumplir los requisitos previos para la distribución espacial de los micrófonos.

Todas las bases fueron diseñadas para asegurar la estabilidad de los soportes, pues con esta configuración se comprobó que el soporte se mantenía rígido y totalmente estático sin ningún tipo de problema. En la siguiente Figura 41 podemos ver el diseño de una base:

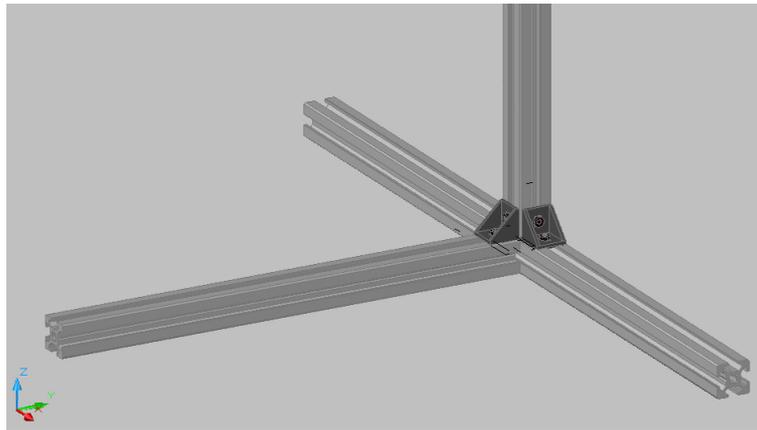


Fig. 41. Detalle del diseño de la base de un soporte para los micrófonos.

Los problemas asociados a los obstáculos en la colocación de los soportes en la sala de ensayos se suplieron con brazos de extensión que contaban con la longitud necesaria para alcanzar la cota exacta. En la siguiente Figura 42 vemos un ejemplo.

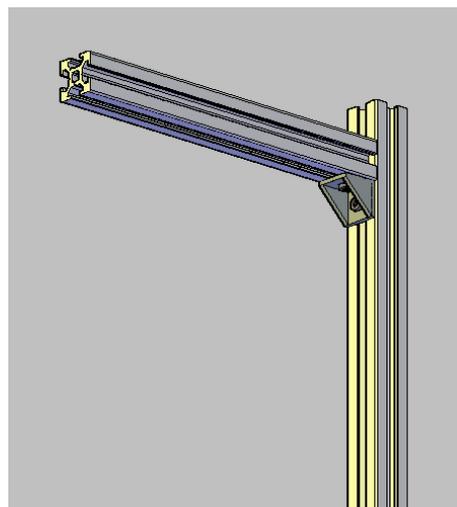


Fig. 42. Detalle del diseño del brazo de extensión de un soporte para los micrófonos.

En la siguiente Figura 43 se puede ver una simulación de la ubicación de los soportes para la superficie semiesférica de medición de 1 m situados alrededor del neumático en la sala de ensayo.

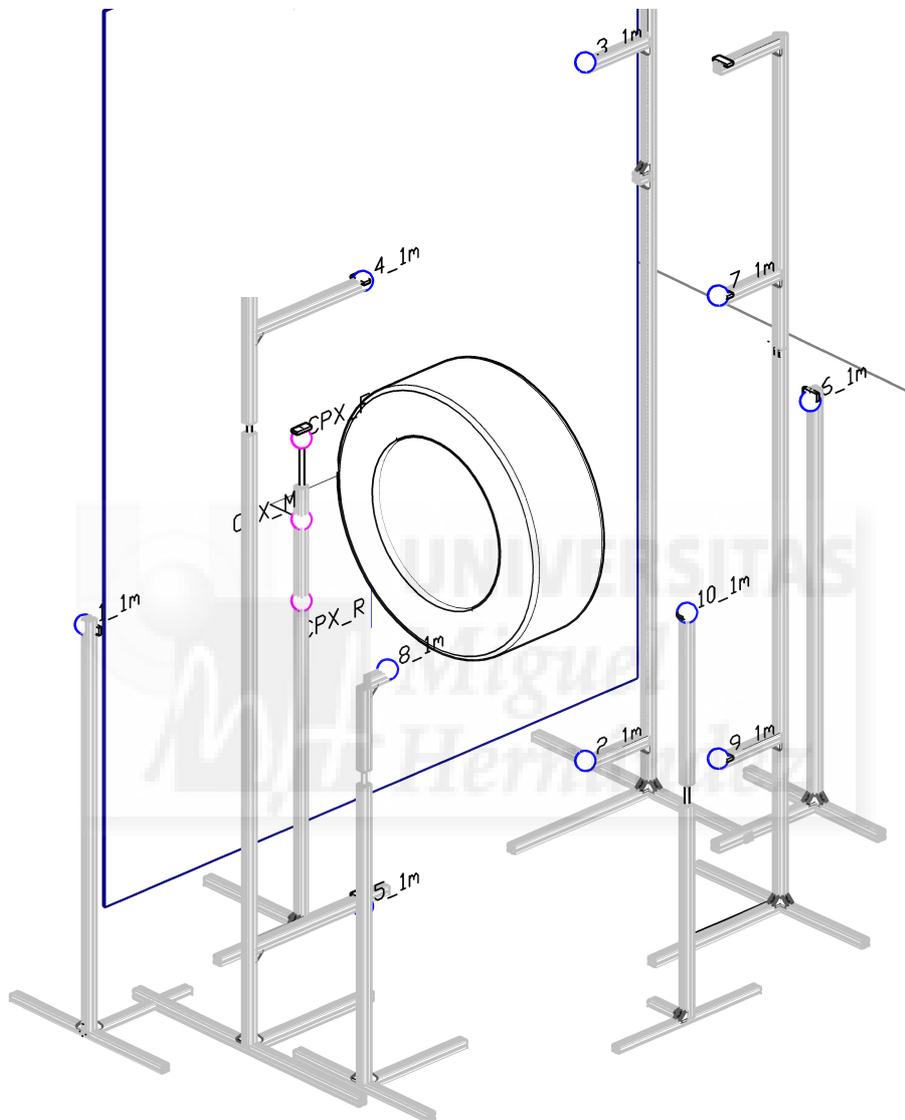


Fig. 43. Detalle de simulación de la ubicación de los soportes en la sala alrededor del neumático.

Adicionalmente, se añadió un soporte para situar 3 micrófonos según lo establecido en la norma ISO / CD 11819-2 Método CPX [31]. Esto se hizo para poder comparar los ensayos en pista con el método A-CPX descrito al final del capítulo 2 con los resultados en laboratorio *Drum* obtenidos con los micrófonos en posición CPX. En la siguiente Figura 44 se muestra el soporte CPX situado en su posición y con los micrófonos montados.



Fig. 44. Soporte CPX situado en su posición y con los micrófonos montados.

En la siguiente figura se puede ver el conjunto de soportes con los micrófonos montados en la sala de ensayos para la superficie semiesférica de medición de radio 1 m.



Fig. 45. Soportes montados en la sala de ensayos para la superficie de medición de radio 1 m

5.3.- CÁLCULO DEL FACTOR DE CORRECCIÓN POR RUIDO DE FONDO K_1

El laboratorio de ensayo de neumáticos tipo *Drum* ha sido caracterizado con la finalidad de ver si la cámara de ensayo satisface tanto el criterio de ruido de fondo como la adecuación por entorno acústico de ensayo. Además, ha sido necesario medir y registrar el nivel de presión sonora mientras todo el equipo está trabajando en el rango de velocidades de ensayo sin ningún neumático rodando contra el tambor, con el fin de caracterizar el ruido de fondo emitido por la máquina de ensayo de neumáticos.

La norma ISO 3744 prescribe tres grados de exactitud dependiendo principalmente del entorno de ensayo y la limitación por ruido de fondo. Estos son el método de Precisión de Grado 1, el método de Ingeniería de Grado 2 y el método de Control de Grado 3. Dado nuestro entorno de ensayo y el ruido de fondo existente durante los ensayos donde aplica el método de Ingeniería de Grado 2, el nivel medio de ruido de fondo debería ser, al menos, 6 dB inferior al nivel de presión sonora registrado cuando el neumático está girando. El factor de corrección por ruido de fondo K_1 se calcula, según establece la norma, mediante las siguientes ecuaciones:

$$K_1 = -10 \cdot \log(1 - 10^{-0.1\Delta L}) \quad \text{dB} \quad (5.3)$$

donde
$$\Delta L = \overline{L'_p} - \overline{L''_p} \quad (5.4)$$

$$\overline{L'_p} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0.1L'_{pi}} \right] \quad \text{dB} \quad (5.5)$$

$$\overline{L''_p} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0.1L''_{pi}} \right] \quad \text{dB} \quad (5.6)$$

siendo

L'_{pi} el nivel medio de presión sonora sobre la superficie semiesférica de medición con el neumático girando a la velocidad de ensayo;

L''_{pi} el nivel medio de presión sonora del ruido de fondo sobre la superficie de medición (es decir, el tambor girando a la velocidad de ensayo, pero sin neumático).

Cuando se cumple que ΔL está entre 6 y 15 dB, es necesario hacer una corrección por ruido de fondo utilizando la ecuación (5.3) mientras que si ΔL es superior a 15 dB no es necesario hacer ninguna corrección. Si sucede que ΔL es inferior a 6 dB, la exactitud de los resultados se reduce y los requisitos de ruido de fondo establecidos en la norma ISO 3744 no se cumplen.

5.4.- CÁLCULO DEL FACTOR DE CORRECCIÓN POR ENTORNO ACÚSTICO K_2

La corrección por entorno acústico de ensayo K_2 debe ser inferior a 2 dB con el fin de cumplir con el requisito de la norma. Se puede calcular mediante tres métodos diferentes.

El primero es un método teórico, que sólo tiene en cuenta las dimensiones de la sala de ensayo y las propiedades acústicas de las paredes y el techo. El segundo método, llamado el método de la reverberación, es empírico y calcula el área de absorción equivalente del recinto a partir del tiempo de reverberación medido. A pesar de ser mucho más preciso que el primero, este método no es adecuado para cámaras semianecoicas. El último, el método de las dos superficies, es un método experimental que se puede utilizar sólo si la longitud y la anchura del recinto son menos de tres veces la altura del techo.

Para obtener el factor de corrección por entorno acústico de ensayo K_2 con el método de las dos superficies, debe haber dos superficies que envuelvan a la fuente sonora. La primera de ellas es la superficie semiesférica de medición S explicada en el apartado 5.2.2 de este capítulo para la determinación del nivel de potencia acústica (véanse las Fig. 36 y 38). La segunda superficie semiesférica de medición, llamada S_2 es geoméricamente idéntica a la primera pero situada más lejos de S y es simétrica con respecto a la fuente de sonora. Además, las posiciones de los micrófonos sobre la segunda superficie de medición

deben tener las mismas coordenadas angulares que las de la primera superficie. El siguiente requisito que debe cumplirse es el determinado por la siguiente ecuación:

$$\frac{S_2}{S} > 2 \quad (5.7)$$

donde S es el área de la primera superficie semiesférica de medición y S_2 es el área de la segunda superficie y vendrán dadas por la siguiente ecuación genérica:

$$S = 2 \cdot \pi \cdot r^2 \quad (5.8)$$

Para cumplir con este requisito de la norma se eligió un radio de 2 m para la superficie semiesférica de medición S_2 . Los soportes de los micrófonos para esta segunda superficie de medición fueron diseñados montados de forma análoga a como se ha explicado anteriormente. En la figura 46 se puede ver un esquema de la ubicación de los soportes para la superficie semiesférica de medición de 2 m situados alrededor del neumático en la sala de ensayo.

Para calcular el factor de corrección por entorno acústico de ensayo K_2 se utiliza, según establece la norma, la siguiente ecuación:

$$K_2 = 10 \cdot \log \left[1 + 4 \cdot \left(\frac{S}{A} \right) \right] \quad \text{dB} \quad (5.9)$$

donde A es el área de absorción equivalente de la cámara y S es el área de la superficie de medición, ambas en metros cuadrados.

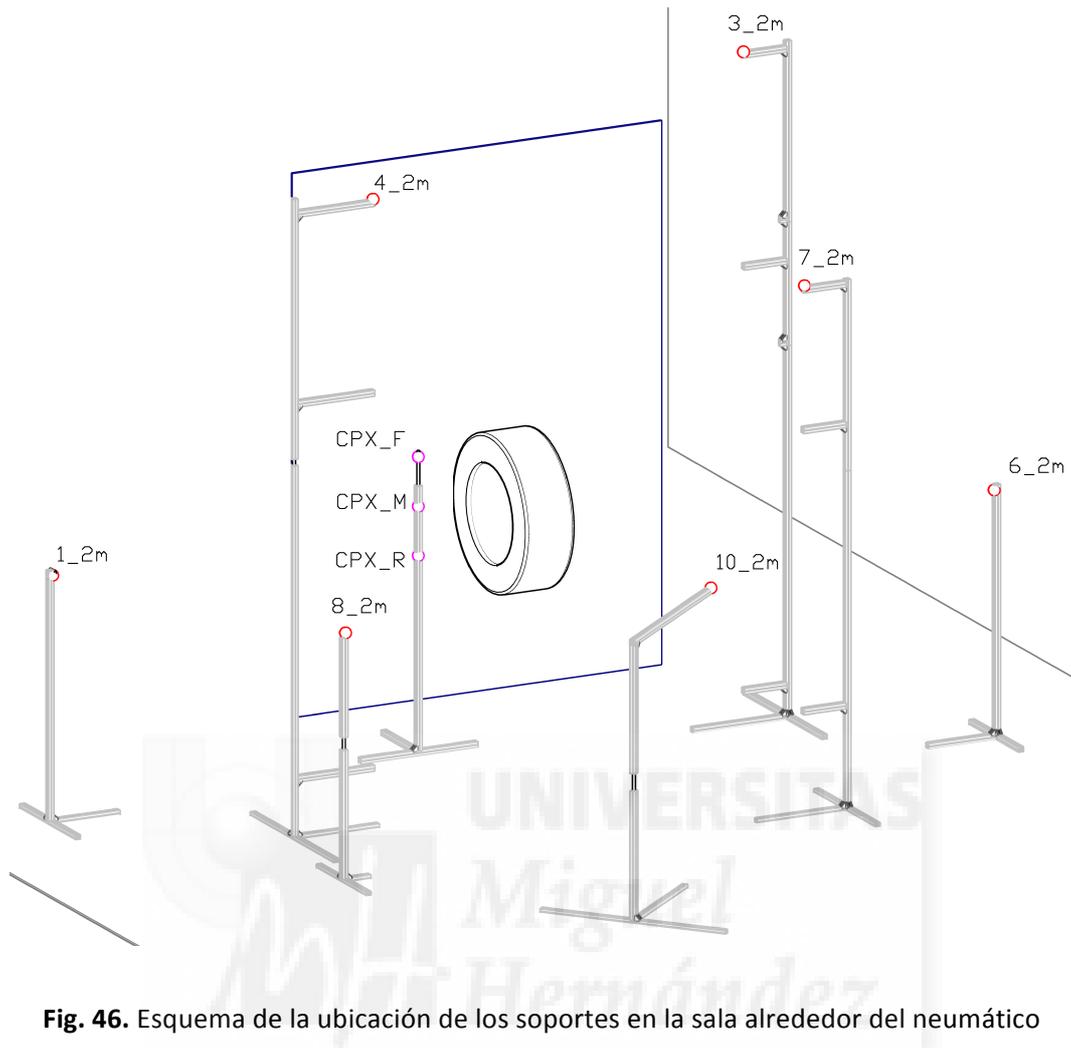


Fig. 46. Esquema de la ubicación de los soportes en la sala alrededor del neumático

El cociente A/S se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{A}{S} = \frac{4 \cdot (M - 1)}{1 - \frac{M \cdot S}{S_2}} \quad (5.10)$$

Mientras que la magnitud M puede ser obtenida mediante la ecuación

$$M = 10^{0.1(L'_{p1} - L'_{p2})} \quad (5.11)$$

donde L'_{p1} es el nivel de presión acústica medio en S (véase la ecuación (5.5)) en decibelios y L'_{p2} es el nivel de presión acústica medio en S_2 en decibelios.

5.5.- CÁLCULO DEL NIVEL DE POTENCIA SONORA

El nivel medio de presión sonora $\overline{L'_p}$ sobre el área de medición puede calcularse a partir del nivel de presión acústica con ponderación A medido por cada micrófono por medio de la ecuación (5.5). A continuación, el nivel de presión de sonora superficial $\overline{L_{pf}}$ puede obtenerse mediante la modificación de $\overline{L'_p}$ utilizando los factores de corrección por ruido de fondo y por entorno acústico de ensayo K_1 y K_2 respectivamente mediante la siguiente ecuación:

$$\overline{L_{pf}} = \overline{L'_p} - K_1 - K_2 \quad (5.12)$$

Finalmente, según establece la norma [12], el nivel de potencia sonora L_w puede calcularse mediante la ecuación

$$L_w = \overline{L_{pf}} + 10 \cdot \log\left(\frac{S}{S_0}\right) \text{ dB} \quad (5.13)$$

donde

$$S_0 = 1 \text{ m}^2$$

S es el área de la superficie de medición en m^2 (para una superficie semiesférica tenemos que $S = 2 \cdot \pi \cdot r^2$)

5.6.- CONCLUSIONES

En el presente capítulo se ha descrito el entorno acústico de ensayo y se ha explicado la metodología para realizar los ensayos en laboratorio tipo *Drum*. Para ello, se ha definido la localización de los micrófonos, la obtención de los factores de corrección por ruido de fondo K_1 y por entorno acústico de ensayo K_2 y el procedimiento operativo para la obtención de la potencia sonora a partir de la medición de la presión sonora que emite el neumático según la norma ISO 3744. Se puede concluir, por tanto, que se han satisfecho los objetivos planteados al inicio de este capítulo.



CAPÍTULO 6

ENSAYOS EN LABORATORIO *DRUM*



En el presente capítulo se describe cómo se llevaron a cabo los ensayos en laboratorio *DRUM* y los resultados obtenidos en los mismos, pasando por el equipo de adquisición de datos y la instrumentación empleados, la configuración de los ensayos y los neumáticos estudiados así como los resultados obtenidos tras la caracterización de las instalaciones de medida.

Por otro lado, como se ha visto en el capítulo anterior, tanto el ruido de fondo como el entorno acústico de ensayo deben superar unos requisitos mínimos para la determinación de los niveles de potencia acústica establecidos en la norma ISO 3744. En esta sección se explica con detalle cómo se cumplen estos requisitos.

6.1.- INSTRUMENTACIÓN E INSTALACIONES DE ENSAYO

Como se ha explicado en el capítulo 1, el laboratorio de vehículos de la Universidad Miguel Hernández de Elche cuenta con una máquina de ensayo de neumáticos tipo *Drum* compuesta por un tambor de acero de 1700 mm de diámetro accionado por un motor eléctrico de 380 V - 50 Hz - 110 kW. Las instalaciones del Laboratorio de Vehículos de la Universidad Miguel Hernández de Elche, se pueden llevar a cabo ensayos de carga-velocidad, así como de resistencia a la rodadura y de ruido de rodadura de neumáticos.

Tanto el techo como las paredes de la celda de ensayos están hechos de materiales acústicamente absorbentes. Por ello y teniendo en cuenta las dimensiones de la celda de ensayo (altura: 3920 mm, anchura: 9350 mm y longitud: 4840 mm) se satisfacen las condiciones para el cálculo del factor de corrección por entorno acústico K_2 por el método de las dos superficies que se explica en la sección 5.4 del capítulo anterior.

Los instrumentos de medición tales como el tacómetro, las células de carga, los micrófonos, el manómetro y el termómetro, se inspeccionan y son calibrados regularmente por laboratorios externos acreditados por ENAC.

En la siguiente Tabla 12 puede verse un listado de la instrumentación utilizada en los ensayos.

INSTRUMENTO DE MEDIDA	FABRICANTE	MODELO
Tacómetro	RS	163-5348
Célula de Carga	Interface	1220AJ
Micrófonos	Bruel & Kjaer	4935 1/4-inch
Manómetro	Samoa	98-ND
Termómetro	Omron	E5CN-C2MT-500
Sistema de adquisición de datos	LMS International	LMS Scadas Mobile 16 canales
Medidor de distancias láser	Bosch	GLM80

Tabla 12. Listado de instrumentación empleada en los ensayos de laboratorio

Para situar los soportes con los micrófonos de manera precisa alrededor de la fuente sonora de acuerdo con la distribución de la superficie semiesférica de medición y con el método CPX vistos en el capítulo anterior (fig. 43 y 45), se utilizó un medidor de distancias láser calibrado Bosch GLM80. Con el fin de buscar la repetibilidad de las pruebas futuras, la posición de los soportes se marcó mediante agujeros perforados y tacos de plástico rojo y todas las posiciones fueron etiquetadas para evitar cualquier posibilidad de error en pruebas posteriores.

En las siguientes figuras 47 y 48 se muestra cómo se ubicaron los soportes y cómo se marcó su posición.

Adicionalmente, como puede apreciarse en la figura 48, las etiquetas de posicionamiento indican además del soporte, los micrófonos que van montados en dicho soporte, con lo que se facilita notablemente el montaje.

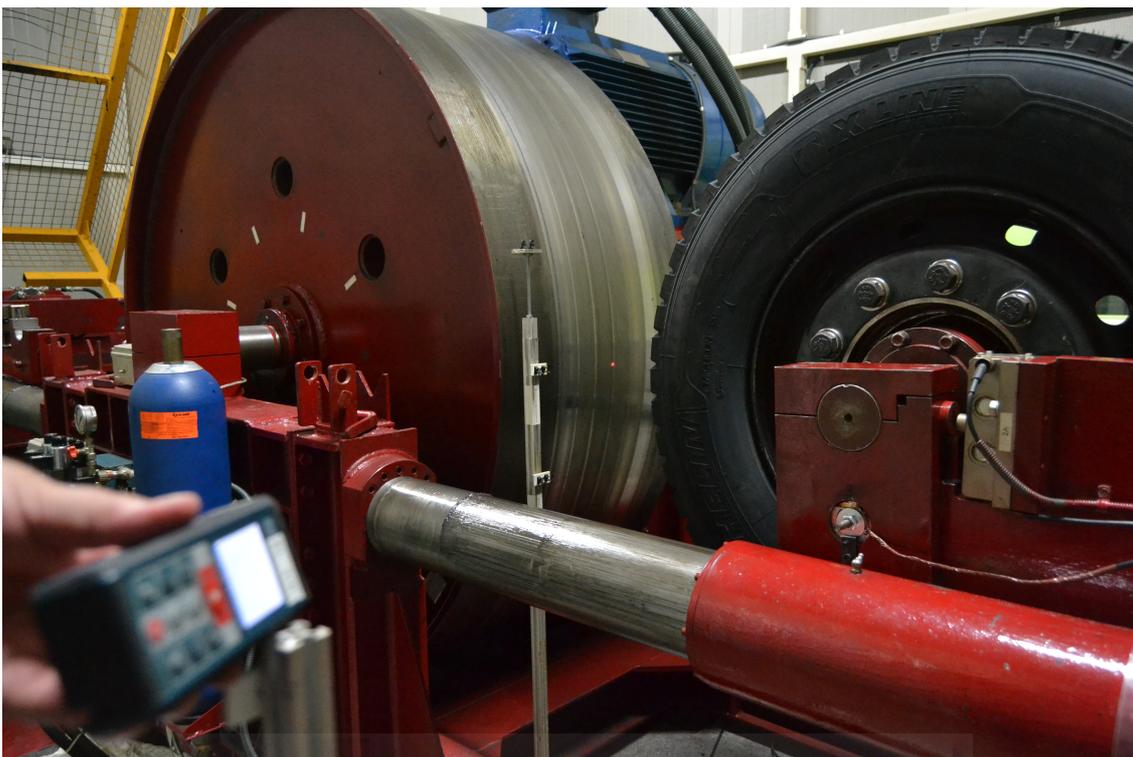


Fig. 47. Posicionado de los soportes utilizando un medidor de distancias láser



Fig. 48. Marcado de la posición de los soportes mediante agujeros y tacos de plástico rojo

6.2.- CARACTERIZACIÓN DE LAS INSTALACIONES DE ENSAYO DE NEUMÁTICOS

Como ya se ha explicado en el capítulo 5, durante el proceso de diseño del método de ensayo *Drum* en laboratorio siguiendo la Norma ISO 3744, ha sido necesario caracterizar la celda de ensayos con el propósito de verificar que la misma satisface los criterios de ruido de fondo y de adecuación del entorno acústico de ensayo establecidos para un grado de precisión 2 (tabla 8).

Para ello, se ha obtenido de manera empírica el factor de corrección de ruido de fondo K_1 dependiente de la diferencia de los niveles medios de presión sonora sobre la superficie semiesférica de medición con el neumático girando a la velocidad de ensayo y los niveles medios de presión sonora del ruido de fondo sobre la superficie semiesférica de medición con el tambor girando a la velocidad de ensayo pero sin neumático.

Igualmente se ha obtenido, también de manera experimental, el factor de corrección por entorno acústico de ensayo K_2 mediante el método de las dos superficies descrito en el apartado 5.4 del capítulo anterior.

Aplicando estos dos factores de corrección se puede obtener el nivel de potencia sonora que emite la fuente considerando las peculiaridades de la celda de ensayos.

A continuación se detallan los resultados obtenidos para cada uno de los citados factores de corrección.

6.2.1.- OBTENCIÓN DEL FACTOR DE CORRECCIÓN POR RUIDO DE FONDO K_1

Para obtener el factor de corrección por ruido de fondo K_1 , se procedió tal y como se describe en el apartado 5.5 del capítulo anterior. Se ha registrado el nivel de presión sonora L'_{pi} sobre la superficie semiesférica de medición con el neumático girando a la velocidad de

ensayo y el nivel de presión sonora L''_{pi} sin neumático para posteriormente calcular K_1 e ΔL según las ecuaciones (5.3) y (5.4).

Los resultados han mostrado para todos los casos que $\Delta L > 10 \text{ dB}$ en todas las posiciones del micrófono (1 m, 2 m y CPX). Esto significa que ΔL supera la limitación mínima de ruido de fondo que prescribe la norma ISO 3745 [32] Método de Precisión Grado 1 para salas semianecoicas, lo que nos da una idea de la idoneidad del entorno acústico de ensayo en el que estamos trabajando para poder llevar a cabo los ensayos cumpliendo los estándares de una norma, la ISO 3744, mucho menos restrictiva.

Los resultados de los ensayos pueden verse en la Tabla 13.

POSICIÓN MICRÓFONOS	L'_p (dB)	L''_p (dB)	ΔL (dB)	K_1 (dB)
1 m	91.01	77.93	13.08	0.219
2 m	87.38	77.04	10.35	0.4205
CPX	99.14	76.93	22.22	Sin corr.

Tabla. 13. Resultados de los ensayos para determinar el factor de corrección por ruido de fondo

Se puede ver que en todos los casos se cumple sobradamente la limitación por ruido de fondo establecida en la norma ISO 3744 Grado 2 que establece que $K_1 \leq 1.3 \text{ dB}$. De hecho, también se cumple con el criterio de limitación por ruido de fondo establecido en la norma ISO 3745 Grado 1 en las posiciones CPX y 1 m, quedando muy próximo en el caso de la posición 2 m. La limitación en este caso es $K_1 < 0.4 \text{ dB}$. (Véase tabla 8).

6.2.2.- OBTENCIÓN DEL FACTOR DE CORRECCIÓN POR ENTORNO ACÚSTICO DE ENSAYO K_2

Para caracterizar el entorno acústico de ensayo y obtener el factor de corrección K_2 , se llevaron a cabo una serie de ensayos utilizando las superficies de medición semiesférica de radio 1 y 2 m explicadas en el apartado 5.6 del capítulo anterior, así como el conjunto de

micrófonos CPX. La velocidad del tambor se fijó en 80 km/h tal y como establece el Reglamento 117 para los ensayos en pista.

Durante los ensayos se registró el nivel de presión sonora L'_{p1} sobre la superficie semiesférica de medición S de 1 m así como el nivel de presión sonora L'_{p2} sobre la superficie semiesférica de medición S_2 de 2 m.

Con todas las consideraciones descritas en el capítulo 5, después de la realización de varias pruebas, K_2 se calculó, según establece la norma [12], de la siguiente manera:

$$M = 10^{0.1(\overline{L'_{p1}} - \overline{L'_{p2}})} = 10^{0.1(91.20 - 86.78)} = 2.766 \text{ dB}$$

$$\frac{A}{S} = \frac{4 \cdot (2.766 - 1)}{1 - \frac{2.766 \cdot 6.28}{25.12}} = 22.89$$

$$K_2 = 10 \cdot \log \left[1 + 4 \cdot \left(\frac{1}{22.89} \right) \right] = 0.699 \text{ dB}$$

Una vez más, los resultados han mostrado que el criterio de idoneidad del entorno acústico de ensayo ha sido ampliamente conseguido ya que el valor de K_2 obtenido ha sido muy inferior a 2 dB, que es el límite establecido para el Grado 2. No sólo se ha cumplido el requisito establecido en la norma ISO 3744 sino que los resultados obtenidos está muy próximos al criterio de idoneidad establecido en la norma ISO 3745 Método de Precisión Grado 1 para salas semianecoicas la cual establece un valor máximo para K_2 de 0.5 dB (Véase la Tabla 8).

6.3.- CONFIGURACIÓN DE LOS ENSAYOS Y NEUMÁTICOS ANALIZADOS

Como el objetivo de esta investigación es desarrollar y validar una metodología alternativa para medir el ruido de rodadura de un neumático en las instalaciones de ensayo tipo *Drum*, ha sido necesario ensayar diferentes neumáticos mientras que otros factores tales como la superficie, la temperatura o la carga del neumático han permanecido constantes [22]. La principal ventaja del método propuesto es obtener un parámetro, el nivel de potencia acústica, que no está afectado por factores externos tales como atenuaciones, distancias o entornos de medición. Por esta razón se han ensayado ocho neumáticos de marcas y modelos diferentes así como dos tamaños diferentes a velocidades entre 40 y 120 km/h a intervalos de 10 km/h. Se llevó a cabo un total de 144 ensayos con los neumáticos y 18 pruebas adicionales sin neumático para registrar el ruido de fondo a las mismas velocidades. Se inflaron los neumáticos a la presión nominal de 2 bar y la carga aplicada a ellos fue el 80% del índice de carga según lo prescrito en el Reglamento 117. Los neumáticos seleccionados para realizar las pruebas fueron dos neumáticos marca Insa Turbo recauchutados con especificaciones opuestas (Ecológico vs. Sport), un neumático de calidad estándar marca Nexxen y un neumático premium marca Michelin. Los cinco modelos de neumáticos se ensayaron en las medidas 185/65R15 88H y 205/55R16 91V. Toda la información relativa a los neumáticos puede verse en la Tabla 14.

MARCA Y MODELO	DIMENSIONES	ÍNDICE DE CARGA	CARGA DE ENSAYO
Insa Turbo Ecosaver 88H	185/65R15 88H	88 (560 kg)	439 daN
Insa Turbo Sport 88H			
Nexxen Classe Premiere CP461			
Michelin Energy Saver			
Insa Turbo EcoEvolution 91V	205/55R16 91V	91 (615 kg)	482 daN
Insa Turbo TVS 91V			
Nexxen Classe Premiere CP461			
Michelin Energy Saver			

Tabla 14. Listado de neumáticos ensayados, sus dimensiones y carga de ensayo

Como la sala de ensayo tiene aire acondicionado, la temperatura se ajustó a 25 °C. La temperatura registrada durante los ensayos se mantuvo entre 24.2 y 24.9 °C. El sistema de adquisición de datos LMS SCADAS registró los niveles de presión sonora en intervalos de 5 s entre 100 Hz y 10 kHz, con un tiempo de integración de 125 ms. Todos los datos han sido procesados en bandas de tercio de octava.

Las condiciones de funcionamiento durante los ensayos fueron las siguientes:

- 1) Máquina bajo condiciones de carga y funcionamiento especificadas: este caso corresponde a la máquina funcionando con un neumático instalado y girando con la carga y velocidad establecidas en el Reglamento 117 sobre el rodillo.
- 2) Máquina sin carga (en vacío): correspondiente a la máquina funcionando en vacío, es decir, sin neumático, solo girando el rodillo a la velocidad de referencia y con la unidad hidráulica en marcha.

6.4.- RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados que se muestran a continuación corresponden a los niveles de potencia acústica con ponderación A, tanto para el ruido de fondo como para el ruido de los neumáticos.

Uno de los aspectos clave a tener en cuenta durante la evaluación de los resultados fue analizar y comparar el comportamiento de los diferentes micrófonos con el fin de ver si su recepción se veía afectada por la propia máquina de ensayo, las rejillas de seguridad o cualquier otro elemento de la sala de ensayo que pudiera interferir en el registro del nivel de ruido. El bastidor de la máquina o la rejilla de protección, por ejemplo, podrían haber causado la reflexión del ruido o el apantallamiento de manera que afectase a algunos

micrófonos según su ubicación. Sin embargo, ninguno de estos fenómenos se ha producido como se puede ver en la Figura 49. En ella se muestran similares espectros de ruido, del neumático Nexxen Class Premiere CP461 185/65R15-88H a 80 km/h, para cada uno de los diferentes micrófonos de la superficie semiesférica de medición S.

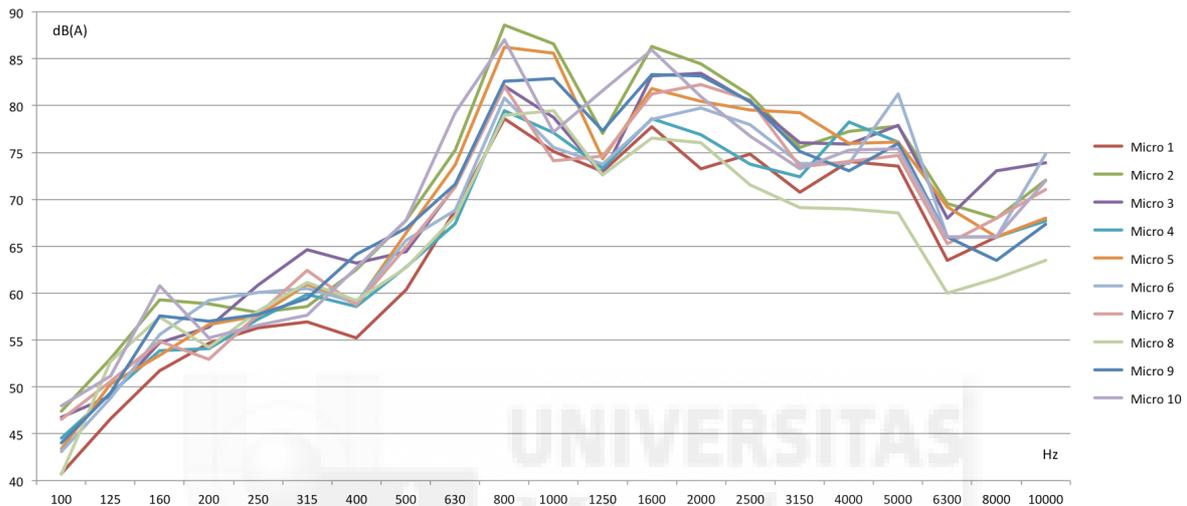


Fig. 49. Comparación de los espectros de ruido de los diferentes micrófonos

La figura 49 muestra los típicos espectros de ruido de neumáticos con un incremento alrededor de 315 Hz debido a la banda de rodadura del neumático y el pico característico alrededor de 1 kHz. Un incremento de ruido inusual, en torno a 5 kHz aparece debido a la emisión de ruido de alta frecuencia del motor eléctrico. Sin embargo, el comportamiento de todos los micrófonos ha demostrado ser estable, no pudiéndose apreciar variaciones notables entre los mismos.

En la figura 50 se muestra un espectro del nivel de potencia acústica con ponderación A en bandas de tercio de octava para un neumático Michelin Energy Saver 185/65R15-88H a una velocidad de 80 km/h.

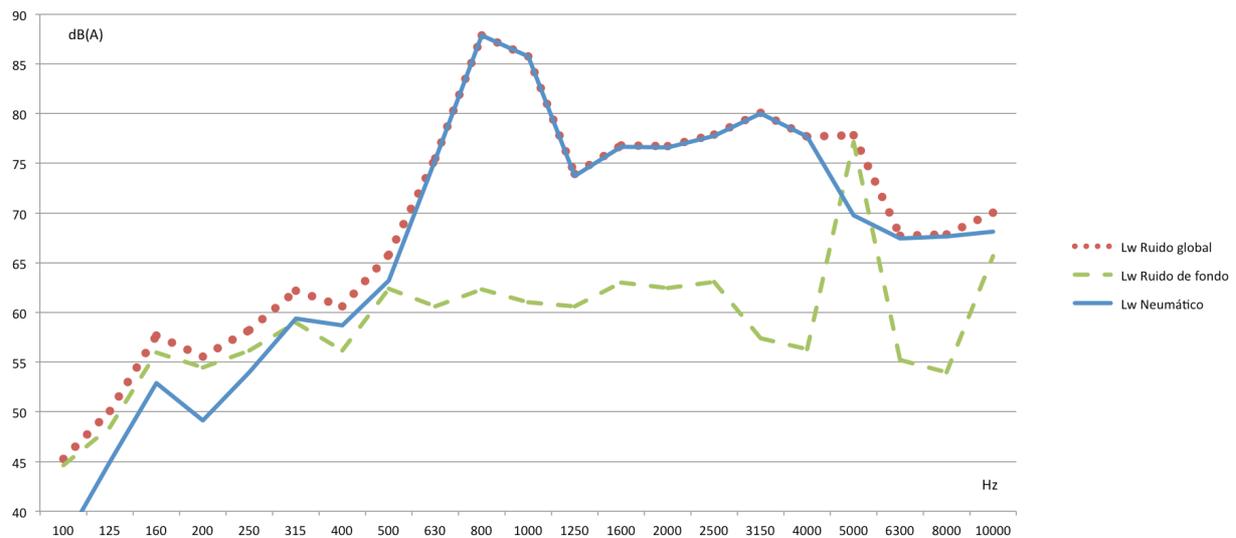


Fig. 50. Espectro registrado para un neumático Michelin Energy Saver 185/65R15-88H a 80 km/h

La línea de puntos roja muestra el nivel de potencia sonora global, que incluye el ruido del neumático y el ruido del tambor cuando está girando 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 ensayo cuando el rodillo está girando, en este caso sin neumático, a la misma velocidad de 250 rpm. Por último, la línea continua azul es el nivel de potencia acústica emitida por el propio neumático, que se obtiene mediante la resta logarítmica del ruido de fondo al nivel de potencia sonora global.

Estos resultados son similares a los mostrados en la literatura [1] y en otras investigaciones publicadas [11] y [29]. La figura 50 muestra un espectro típico de ruido de rodadura de neumáticos en el rango comprendido entre 315 Hz y 4 kHz, donde está la mayor parte del contenido en energía sonora. El pico alrededor de la frecuencia de 1 Hz es también característico. A pesar de que la banda correspondiente a 5 kHz difiere del espectro del ruido de neumático/carretera característico, esto es debido a la influencia de la máquina de ensayo y, más concretamente al motor eléctrico que acciona a todo el conjunto. 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 situadas

entre 315 Hz y 4 kHz y la principal emisión sonora del ruido de neumáticos se concentra entre 800 y 1600 Hz.

La figura 51 muestra una comparación de los espectros de potencia sonora entre diferentes neumáticos de medida 185/65R15-88H a 80 km/h y el espectro de ruido de tráfico Europeo Normalizado según la norma EN 1793-3 [33]. La figura muestra el nivel de potencia acústica de los neumáticos aislado del ruido emitido por la máquina de ensayo. Los resultados han demostrado que ambos neumáticos recauchutados Insa Turbo son los más ruidosos mientras que el neumático Michelin y el Nexxen tienen espectros similares. Esto es causado, entre otros factores, por el tipo de neumáticos ensayados -recauchutados vs. nuevos-.

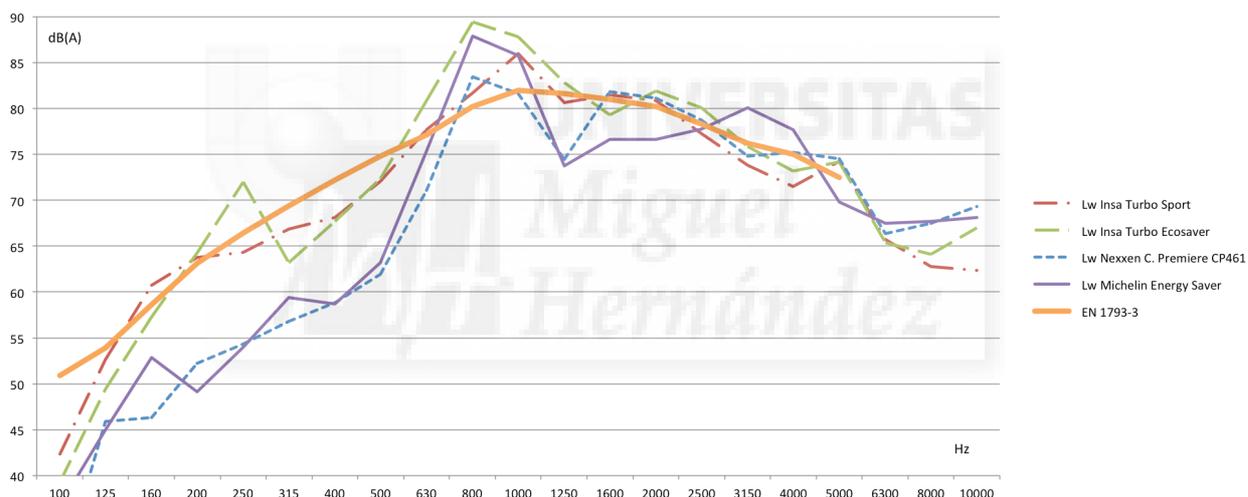


Fig. 51. Comparación entre los espectros de diferentes neumáticos medida 185/65R15 88H y el espectro de ruido de tráfico Europeo Normalizado según la norma EN 1793-3

Como puede verse, los espectros de ruido de los cuatro neumáticos son bastante similares al espectro de ruido de tráfico Europeo Normalizado según la norma EN 1793-3. Sin embargo, se produce un pico de ruido alrededor de 250 Hz en el neumático Insa Turbo Ecosaver el cual es causado debido a los tacos de la banda de rodadura como ocurre en otros neumáticos con similar dibujo.

Respecto a este fenómeno, se ha realizado un estudio con mayor detalle para comprobar lo argumentado anteriormente y descartar cualquier ruido parásito ocasionado por la máquina de ensayo o cualquier otro componente. Para ello se ha realizado un análisis detallado de los dibujos de la banda de rodadura de todos los neumáticos ensayados, midiendo la anchura de los tacos para calcular las frecuencias características de impacto que pudieran dar lugar al fenómeno descrito en el párrafo anterior.

En primer lugar se ha analizado el espectro de ruido de rodadura de todos los neumáticos en el rango de velocidades de ensayo en busca de picos de ruido que fuesen desplazándose hacia bandas de frecuencia superiores conforme aumentase la velocidad de ensayo. Se ha podido comprobar cómo se cumple este supuesto de manera más acusada en algunos neumáticos mientras que en otros este fenómeno pasa más desapercibido. En la siguiente Figura 52 se puede ver una comparativa de los espectros de ruido para un neumático Insa Turbo EcoEvolution 205/55R16 91V, dónde éste fenómeno se produce notoriamente. Nótese que solo se ha representado el rango de velocidades entre 70 y 120 km/h con la finalidad de que pueda apreciarse, de manera más clara el fenómeno descrito.

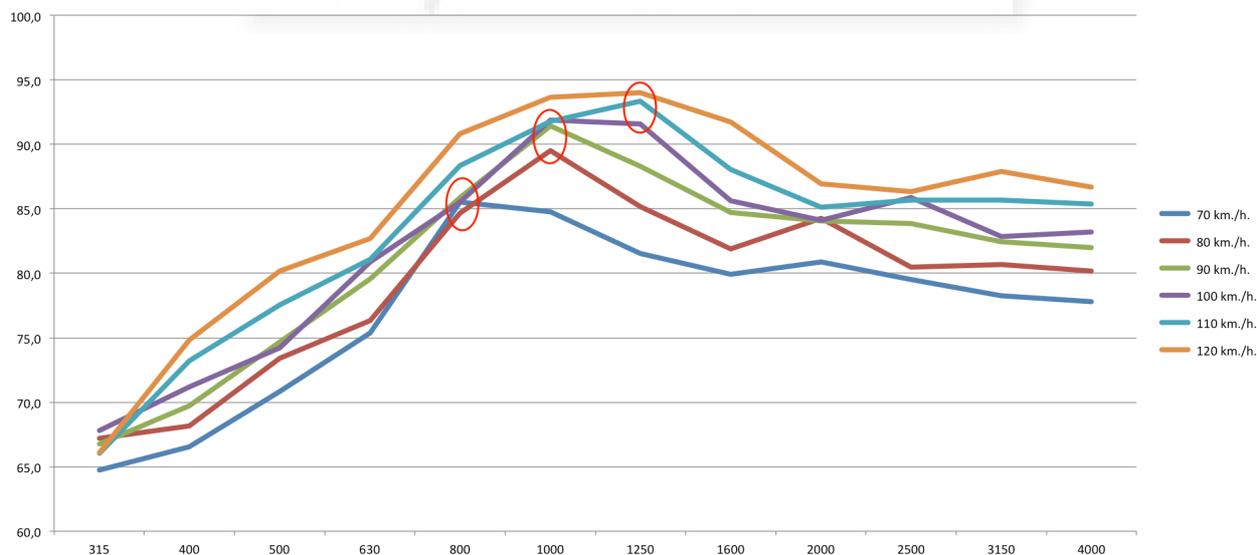


Fig. 52. Comparación de los espectros sonoros de un neumático Insa Turbo EcoEvol 205/55R16 91V para un rango de velocidades entre 70 y 120 km/h

En la figura 52 puede apreciarse, marcado en rojo, como el pico de ruido se va desplazando hacia bandas de frecuencia superiores conforme aumenta la velocidad de ensayo. Puede verse claramente que a 70 km/h se produce un pico en la banda de frecuencias de 800 Hz mientras que a velocidades entre 80 y 90 km/h dicho pico de ruido se ha desplazado a la banda de 1000 Hz para ser predominante en la banda de 1250 Hz a velocidades superiores.

Por otro lado, se ha medido la longitud de los tacos principales de la banda de rodadura de todos los neumáticos tal y como se muestra en la figura 53 para el neumático Insa Turbo EcoEvolution 205/55R16 91V con la finalidad de calcular de manera teórica la frecuencia característica de impacto de los tacos para las distintas velocidades de ensayo:



Figura 53. Medida de la longitud del taco para el cálculo de la frecuencia característica de impacto

A continuación se muestra la Tabla 15 con las medidas de longitud de los tacos de todos los neumáticos:

MARCA / MODELO DE NEUMÁTICO	DIMENSIONES	REF. MUESTRA	LONGITUD TACOS (mm)
Insa Turbo Ecosaver 88H	185/65R15 88H	UMH12EN021	23
Insa Turbo Sport 88H		UMH12EN002	51
Nexxen Classe Premiere CP461		UMH12EN176	30
Michelin Energy Saver		UMH12EN087	34
Insa Turbo EcoEvolution 91V	205/55R16 91V	UMH12EN027	22
Insa Turbo TVS 91V		UMH12EN009	52
Nexxen Classe Premiere CP461		UMH12EN178	30
Michelin Energy Saver		UMH12EN088	30

Tabla 15. Listado de neumáticos ensayados y longitud de los tacos de la banda de rodadura.

Para calcular la frecuencia característica de impacto en función de la velocidad del neumático, se utiliza la siguiente expresión:

$$f_{\text{impacto}} = \frac{v}{l} \quad (\text{Hz}) \quad (6.1)$$

donde v es la velocidad en m/s y l es la longitud del taco en m.

Utilizando la ecuación (6.1) se calculó la frecuencia característica de impacto de todos los neumáticos para el rango de velocidades de ensayo y se pudo comprobar que coincidía de manera bastante ajustada con el fenómeno registrado en los ensayos para dichas velocidades.

A continuación puede verse una tabla con los datos de frecuencia característica de impacto calculados mediante la ecuación anterior para el mismo neumático Insa Turbo

EcoEvolution 205/55R16 91V cuya gráfica de espectros en función de la velocidad se ha mostrado en la figura 52.

Velocidad (km/h)	70	80	90	100	110	120
$f_{\text{impacto}} = v/l$ (Hz)	884	1010	1136	1263	1389	1515

Tabla. 16. Frecuencias de impacto en función de la velocidad para el neumático Insa EcoEvolution.

Como puede apreciarse en la tabla el pico de ruido se va desplazando hacia bandas de frecuencia superiores conforme aumenta la velocidad de ensayo. A 70 km/h se produce un pico en la banda de frecuencias de 800 Hz. Para velocidades entre 80 y 90 km/h dicho pico de ruido se mueve a la banda de 1000 Hz mientras que a velocidades superiores se centra en las bandas de 1250 y 1600 Hz.

Estos datos obtenidos de manera teórica, coinciden significativamente con los obtenidos experimentalmente por lo que se puede afirmar que el pico de ruido alrededor de 250 Hz en el neumático Insa Turbo EcoEvolution mostrado en la figura 51 es causado debido a los tacos de la banda de rodadura y no debido a cualquier ruido parásito ocasionado por la máquina de ensayo o cualquier otro componente.

Finalmente, la figura 54 muestra la relación entre el nivel de potencia acústica y la velocidad para diferentes neumáticos de tamaño 205/55R16 91V a velocidades entre 40 y 120 km/h.

Como era de esperar, el aumento del ruido de rodadura del neumático con la velocidad es considerable y similar al mostrado en otras investigaciones llevadas a cabo con los métodos *Coast-By*, *Statistical Pass-By* y *Close-Proximity*, donde la variación del ruido de rodadura con velocidad ha demostrado ser mayor que la variación con cualquier otro parámetro [1].

Es ampliamente conocido que los niveles de ruido de rodadura son proporcionales al logaritmo de la velocidad. Los niveles están bien modelados por la siguiente ecuación:

$$L = A + B \cdot \log(v) \quad (6.2)$$

donde A y B son coeficientes de velocidad (constantes) y v es la velocidad en km/h.

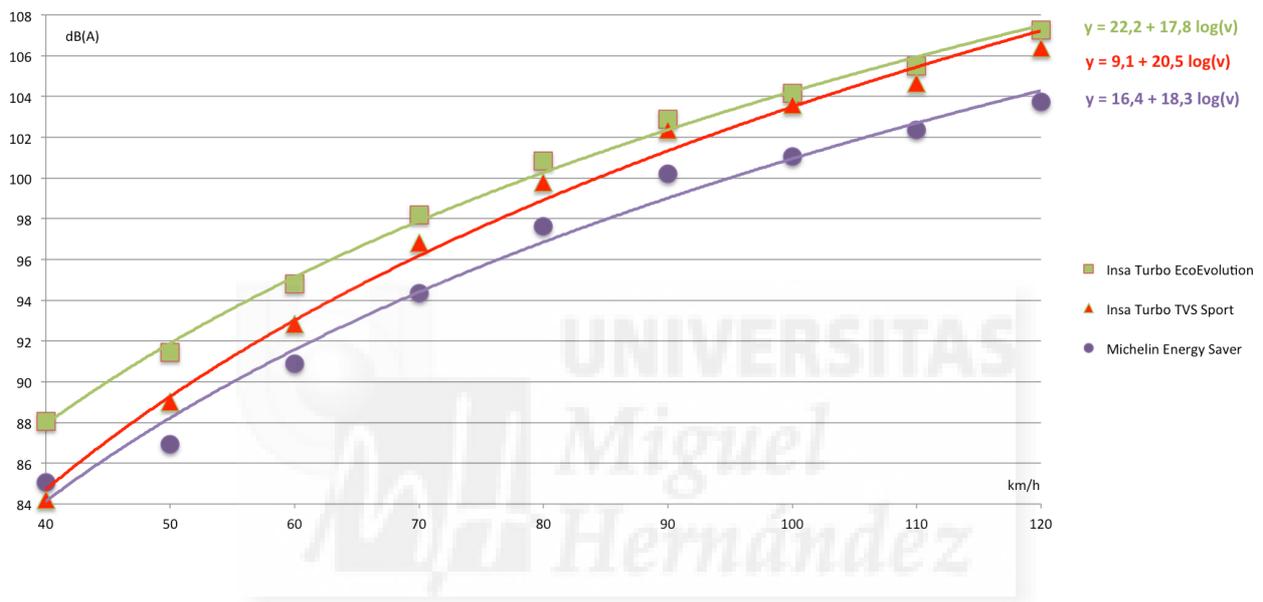


Fig. 54. Relación entre el nivel de potencia acústica y la velocidad de ensayo para diferentes neumáticos de tamaño 205/55R16 91V y sus correspondientes regresiones logarítmicas.

Se ha trazado una regresión logarítmica para cada neumático, mientras que sus ecuaciones correspondientes se muestran a la derecha de la Figura 54. Los coeficientes de velocidad A y B obtenidos en los ensayos en pista con los métodos *Coast-By*, *Statistical Pass-By* y *Close-Proximity* convencionales han sido ampliamente reportados en la literatura técnica [1] y son similares a los mostrados en la gráfica.

6.5.- CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LABORATORIO

Una vez analizados los resultados obtenidos durante los ensayos y por todo lo argumentado anteriormente, podemos concluir que el método de ensayo en laboratorio desarrollado en la presente Tesis no solo es fiable en términos de repetibilidad y reproducibilidad, sino que además, sus resultados coinciden de manera significativa con los obtenidos experimentalmente utilizando métodos de ensayo en pista convencionales tal y como se puede comprobar analizando los resultados de estos métodos publicados con anterioridad.

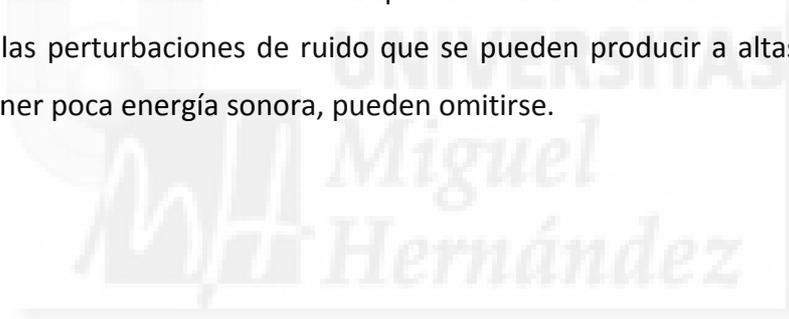
Asimismo, una vez realizada la caracterización de las instalaciones de ensayo de neumáticos del Laboratorio de Vehículos de la Universidad Miguel Hernández de Elche, se ha podido comprobar que para la superficie de medición semiesférica de 1 m se supera ampliamente tanto la limitación por ruido de fondo establecida en la norma ISO 3744 que establece que el factor de corrección por ruido de fondo $K_1 \leq 1.3$ dB como la limitación mínima de ruido de fondo que prescribe la norma ISO 3745 Método de Precisión Grado 1 para salas semianecoicas $K_1 \leq 0.4$ dB.

Del mismo modo, el criterio de idoneidad establecido en la norma ISO 3744 para el entorno acústico de ensayo ha sido ampliamente conseguido y los resultados obtenidos están muy próximos al criterio establecido en la norma ISO 3745 Método de Precisión Grado 1 para salas semianecoicas.

Por consiguiente, se puede afirmar que el entorno acústico de ensayo en el que estamos trabajando cumple sobradamente los estándares de la norma ISO 3744 lo cual garantiza que los resultados obtenidos presentarán, además de una desviación típica de reproducibilidad del nivel de potencia acústica ponderado A, inferior o igual a 1.5 dB según establece esta norma, un grado de precisión cercano al establecido en la norma ISO 3745 que, como se ha explicado anteriormente, es mucho más restrictiva que la norma en que se basa el método de ensayo propuesto en la presente Tesis.

Por todo lo argumentado se puede decir que los ensayos realizados en el banco de ensayo de neumáticos del laboratorio de vehículos de la Universidad Miguel Hernández son válidos para la obtención de los niveles de potencia sonora L_W que emite un neumático en su rodadura contra el tambor y que los registros obtenidos a partir de dichos ensayos corresponden con los resultados obtenidos por otros grupos de investigación en instalaciones tipo *Drum* y por los ensayos normalizados CB, CPX, SPB o CPB así como con el espectro de ruido de tráfico Europeo Normalizado según la norma EN 1793-3.

Por último, como se desprende de los resultados y como se ha detallado a lo largo del presente capítulo, el estudio del ruido de rodadura de un neumático girando contra un tambor se debería centrar en el rango de 315 Hz a 4000 Hz, ya que dicho rango de frecuencias contiene la información más importante de las emisiones sonoras, evitando al mismo tiempo las perturbaciones de ruido que se pueden producir a altas frecuencias, las cuales, al contener poca energía sonora, pueden omitirse.



CAPÍTULO 7

VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE ENSAYO



Hasta ahora hemos podido ver, por un lado, los resultados obtenidos en los ensayos en pista siguiendo la metodología *Coast-By* descrita en el Reglamento 117 y, por otro lado, los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio mediante el método de laboratorio *Drum* desarrollado en la presente tesis y descrito detalladamente en el capítulo 5.

Es importante recordar que los valores obtenidos en los ensayos en pista corresponden a los niveles de presión sonora a 7.5 m de distancia mientras que los obtenidos en los ensayos de laboratorio corresponden a los niveles de potencia sonora en campo cercano obtenidos según establece la norma ISO 3744 utilizando la superficie de medición semiesférica de un metro de diámetro.

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos mediante ambos métodos de manera conjunta para posteriormente obtener el nivel de presión sonora que se obtendría en un ensayo en pista a partir de los datos de potencia sonora obtenidos en el ensayo en laboratorio utilizando un modelo de propagación adecuado a las características del ensayo. Se pretende, con ello, validar el método de ensayo de laboratorio desarrollado en el marco de esta tesis.

7.1.- COMPARATIVA DE RESULTADOS EN PISTA VS. LABORATORIO *DRUM*

En los capítulos 4 y 6 se mostraban los resultados obtenidos para los ensayos en pista y los ensayos en laboratorio respectivamente. En la figura 55 se muestran los resultados de dichos ensayos en una sola gráfica.

En la parte superior de la gráfica, 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.

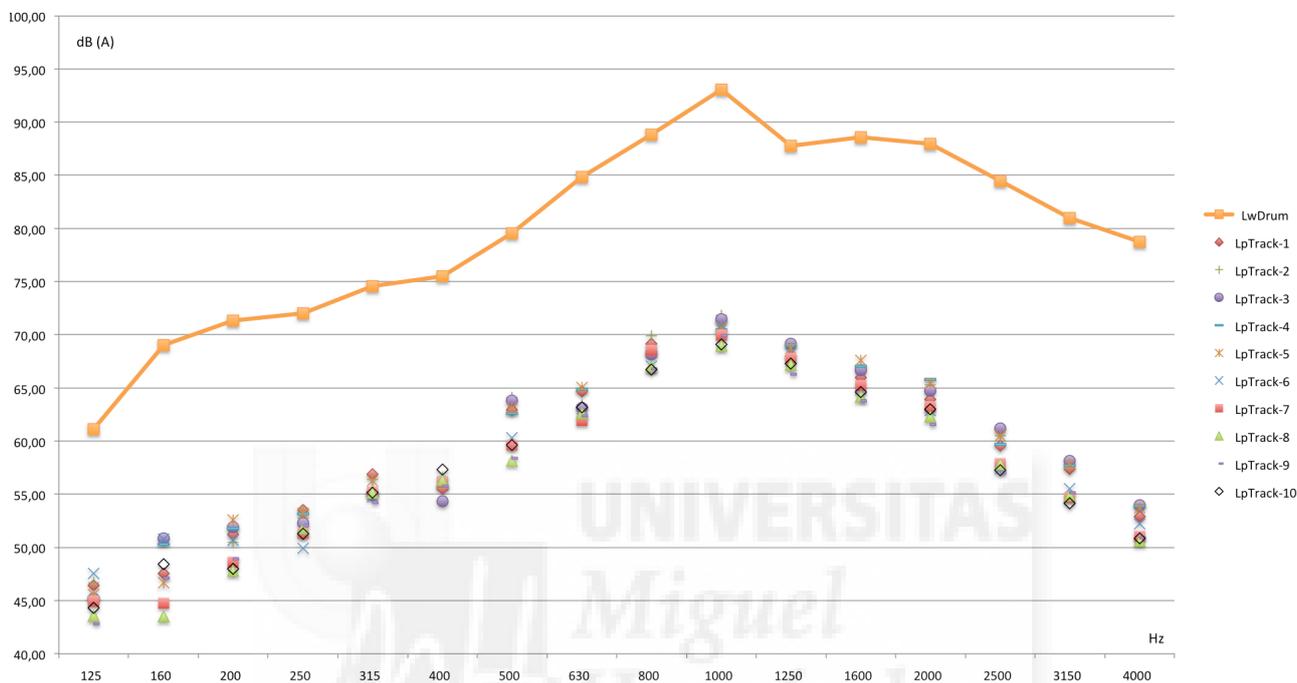


Fig. 55. Gráficas del espectro de nivel de potencia sonora obtenido en laboratorio *Drum* a 80 km/h y de los espectros de nivel de presión sonora en pista entre 75 y 85 km/h.

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 ensayos 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_Drum} registrado en el banco de ensayos y el nivel de presión sonora L_{p_Track} registrado en pista.

Para poder comparar los resultados obtenidos mediante ambos métodos, es necesario obtener el nivel de presión sonora L_p a 7.5 m utilizando un modelo de propagación sonora.

En el siguiente apartado se verá cómo obtener el nivel de presión sonora a 7.5 m de distancia a partir del nivel de potencia sonora en campo cercano obtenido mediante el ensayo en laboratorio *Drum* según el método propuesto en el capítulo 5 de manera que ambos resultados sean comparables entre sí.

7.2.- CÁLCULO DE LA PRESIÓN SONORA A PARTIR DE LA POTENCIA SONORA

Una vez obtenido el resultado experimental de potencia sonora mediante el método de ensayo en laboratorio *Drum*, a partir de un modelo de comportamiento sonoro en el que se considera el efecto de la propagación sonora entre fuente y receptor, es posible obtener el nivel de presión sonora que se recogerá a 7.5 m de distancia del vehículo, por lo que será posible comparar los resultados de ambos ensayos para validar el nuevo método propuesto en esta Tesis.

7.2.1.- MODELO DE PROPAGACIÓN

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 [34] 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 [35] o Rudnik [36], 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:

$$L_p = L_W + D_l - A \quad (\text{dB}) \quad (7.1)$$

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 [27].

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

$$A_{total} = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc} \quad (\text{dB}) \quad (7.2)$$

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

7.2.1.1.- ATENUACIÓN POR DIVERGENCIA GEOMÉTRICA

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

$$A_{div} = 20 \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + 8 \quad (\text{dB}) \quad (7.3)$$

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 (7.3) tenemos que:

$$A_{div} = 20 \cdot \log\left(\frac{7.5}{1}\right) + 8 = 25.5 \text{ dB} \quad (7.3b)$$

para todas las frecuencias de banda de tercio de octava .

7.2.1.2.- ATENUACIÓN POR ABSORCIÓN ATMOSFÉRICA

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

$$A_{atm} = \frac{\alpha \cdot d}{1000} \quad (\text{dB}) \quad (7.4)$$

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 [37]. 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, el coeficiente de atenuación atmosférica α es el siguiente:

f (Hz)	125	160	200	250	315	400	500	630
α (dB/km)	0.0296	0.0460	0.0706	1.060	1.570	2.240	3.080	4.05
f (Hz)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
α (dB/km)	5.09	6.19	7.35	8.68	10.40	12.80	16.30	21.10

Tabla 17. Coeficiente de atenuación atmosférica α a 25 °C y 60% HR según ISO 9613-1

Teniendo en cuenta la ecuación (7.4), que la distancia entre la fuente y el receptor es de 7.5 m y el coeficiente de atenuación atmosférica de la Tabla 17, el valor del factor de atenuación por absorción atmosférica A_{atm} para cada banda de tercio de octava será:

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

Como era de esperar, dada la cercanía entre la fuente y el receptor, el factor de atenuación por absorción atmosférica A_{atm} es prácticamente despreciable para todas las bandas de tercio de octava.

7.2.1.3.- ATENUACIÓN POR EFECTO SUELO

La atenuación por efecto del suelo A_{gr} depende de los factores de atenuación para tres distintas regiones: la región de la fuente, la región del receptor y la región intermedia [34].

La región de la fuente, medida desde la fuente hasta el receptor, tiene una longitud $30 \cdot h_s$ siendo h_s la altura de la fuente.

La región del receptor, medida desde el receptor hasta la fuente, tiene una longitud $30 \cdot h_r$ siendo h_r la altura del receptor.

La región intermedia, estará situada entre la región de la fuente y la región del receptor. Sin embargo, la distancia entre la fuente y el receptor d_p cumple que

$$d_p < (30 \cdot h_s + 30 \cdot h_r) \quad (7.5)$$

Entonces las regiones de la fuente y del receptor se solapan, no existiendo región intermedia, como es el caso que nos ocupa. La atenuación por efecto suelo dependerá, entonces, de la atenuación para 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 vendrá dada por la siguiente ecuación:

$$A_{gr} = 1.5 \cdot (3.5 \cdot G_s + 2.5 \cdot G_r) \quad (\text{dB}) \quad (7.6)$$

Las propiedades acústicas del suelo de cada región se tienen en consideración a través del factor de suelo G , especificándose tres categorías para la superficie reflectante de la siguiente manera:

Para suelos duros, entre los que se incluye pavimento, agua, hielo, hormigón y otras superficies de baja porosidad, $G=0$.

Para suelos porosos, entre los que se incluye tierra cubierta por hierba, árboles u otra vegetación y otras superficies de suelo válidas para el crecimiento de vegetación como puede ser las tierras de cultivo, $G=1$.

Para suelos mixtos, en los cuales la superficie consista en una mezcla de suelo duro y poroso, $0 < G < 1$, ponderando el valor de G en función de la fracción de suelo que es dura y la que es porosa [34].

En nuestro caso, Campillo [27] 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 [34], será.

$$A_{gr} = 1.5 \cdot (3.5 \cdot 0.1 + 2.5 \cdot 0.1) = 0.9 \text{ dB} \quad (7.6b)$$

7.2.1.4.- ATENUACIÓN POR BARRERAS

Para considerar atenuación por barreras debe haber un objeto situado entre fuente y receptor que cumpla con todos y cada uno de los siguientes requisitos:

- Que la densidad de su superficie sea, al menos, de 10 kg/m^2 .
- Que el objeto tenga una superficie cerrada sin grandes aperturas.
- Que su dimensión horizontal perpendicular a la línea fuente-receptor sea mayor que la longitud de onda λ de la frecuencia nominal de la banda de octava de interés.

En nuestro caso no se cumple ninguna de las condiciones anteriores ya que, de hecho, no existe ninguna barrera entre la fuente y el receptor por lo que $A_{bar} = 0$.

7.2.1.5.- ATENUACIÓN POR OTROS EFECTOS

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 $A_{misc} = 0$.

7.2.1.6.- ATENUACIÓN TOTAL

Por tanto, el factor de atenuación A dadas las características de nuestro ensayo vendrá dado por la siguiente expresión:

$$A_{total} = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} \quad (\text{dB}) \quad (7.7)$$

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 y vendrá determinado por la suma de las siguientes tablas:

f (Hz)	125	160	200	250	315	400	500	630
A_{div} (dB)	25.48	25.48	25.48	25.48	25.48	25.48	25.48	25.48
f (Hz)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
A_{div} (dB)	25.48	25.48	25.48	25.48	25.48	25.48	25.48	25.48

Tabla 19. Factor de atenuación por divergencia geométrica A_{div} 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 20. 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_{gr} (dB)	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
f (Hz)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
A_{gr} (dB)	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90

Tabla 21. Factor de atenuación por efecto suelo para cada banda de tercio de octava

Luego sumando los valores de las tablas anteriores 19, 20 y 21 tenemos el valor del factor de atenuación total A_{total} para cada frecuencia central de la banda de tercio de octava.

f (Hz)	125	160	200	250	315	400	500	630
A_{total} (dB)	26.3833	26.3834	26.3836	26.3910	26.3948	26.3998	26.4061	26.4134
f (Hz)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
A_{total} (dB)	26.4212	26.4295	26.4382	26.4481	26.4610	26.4790	26.5053	26.5413

Tabla 22. Factor de atenuación total A_{total} para cada banda de tercio de octava

7.2.2.- OBTENCIÓN DE LA PRESIÓN SONORA A PARTIR DE LA POTENCIA SONORA

Una vez desarrollada la ecuación (7.1) a lo largo del apartado anterior 7.2.1, 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:

$$L_p = L_W + 10 \cdot \log 4 - A_{total} \quad (\text{dB}) \quad (7.8)$$

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 (7.8) obtendremos la curva del modelo de propagación sonora para obtener 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. Por tanto, el valor de la presión sonora, para cada

banda de tercio de octava, será el resultado de restar al valor de potencia sonora L_w obtenido para cada frecuencia la siguiente curva de atenuación:

f (Hz)	125	160	200	250	315	400	500	630
10·log 4 - A_{total} (dB)	-20.3627	-20.3628	-20.3630	-20.3704	-20.3742	-20.3792	-20.3855	-20.3928
f (Hz)	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
10·log 4 - A_{total} (dB)	-20.4006	-20.4089	-20.4176	-20.4275	-20.4404	-20.4584	-20.4847	-20.5207

Tabla 23. Curva del modelo de propagación sonora según ISO 9613 para obtener L_p a partir de L_w .

En la siguiente gráfica 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.

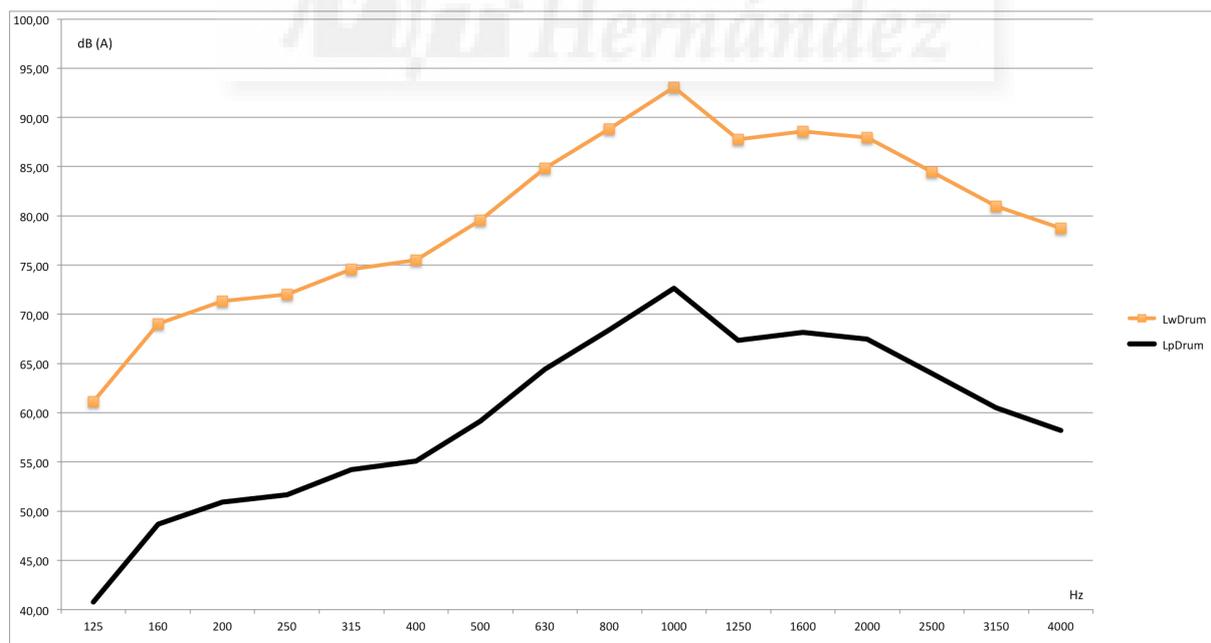


Fig. 56. Nivel de potencia sonora L_{wDrum} medido en banco de ensayos y nivel de presión sonora L_{pDrum} obtenido a partir de éste mediante el modelo de propagación sonora establecido en la ISO 9613-2.

7.3.- RESULTADOS Y VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE ENSAYO EN LABORATORIO

Como ya se ha explicado en el apartado anterior, utilizando el modelo de propagación sonora entre la fuente y el receptor según el modelo propuesto en la norma ISO 9613, es posible obtener 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. De esta manera, aplicando la curva del modelo de propagación al espectro de la potencia sonora obtenida en el laboratorio L_{wDrum} de la figura 55, obtenemos el espectro de presión sonora L_{pDrum} que se obtendría en un ensayo en pista a partir de la potencia sonora registrada en el rodillo.

En la siguiente Figura 57 podemos ver la comparación entre el nivel de presión sonora L_{pDrum} obtenido a partir de la potencia sonora registrada en el laboratorio utilizando el modelo de propagación sonora de la norma ISO 9613 y la presión sonora obtenida en pista según el ensayo *Coast-By* para un neumático Insa Turbo Sport 185/65R15 88H.

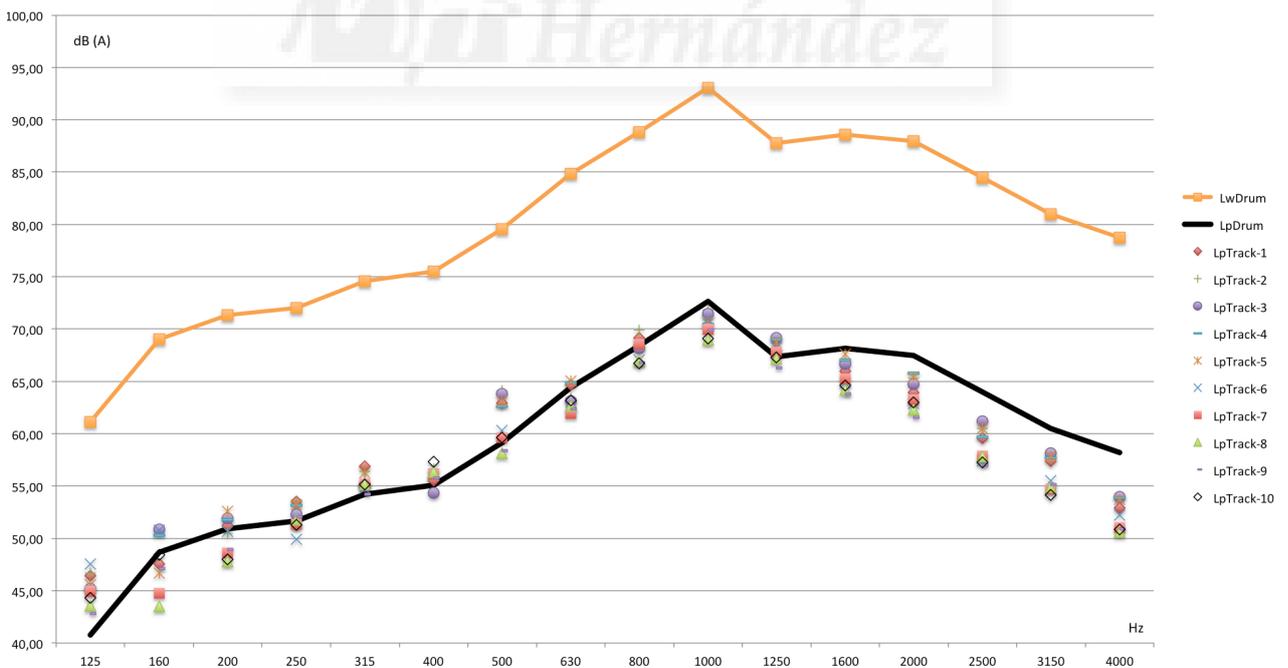


Fig. 57. Comparación entre los niveles de potencia sonora L_{wDrum} y presión sonora L_{pDrum} obtenidos en banco de ensayo y los niveles de presión sonora L_{pTrack} obtenidos según el método *Coast-By*.

Como puede apreciarse en la figura 57, el espectro del nivel de presión sonora L_{pDrum} obtenido a partir de la potencia sonora registrada en el laboratorio utilizando el modelo de propagación sonora de la norma ISO 9613 muestra una similitud razonable para el rango de frecuencias comprendido entre 125 y 2000 Hz con la nube de puntos que representa los espectros de nivel de presión sonora L_{pTrack} obtenidos mediante los ensayos en pista según el método *Coast-By* a unas velocidades comprendidas entre los 75 y los 85 km/h.

En la siguiente Tabla 24 podemos ver los valores de presión sonora L_{pDrum} obtenidos a partir de la potencia sonora registrada en el laboratorio para cada frecuencia así como la diferencia entre dichos valores y el valor medio de la presión sonora, calculado según establece [2], obtenido mediante los ensayos en pista según el método *Coast-By*:

f (Hz)	125	160	200	250	315	400	500	630
L_{pDrum} (dB)	40.76	48.67	50.94	51.65	54.19	55.10	59.16	64.45
$L_{pDrum} - L_{pTrack}$ (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_{pDrum} (dB)	68.43	72.67	67.34	68.18	67.50	64.00	60.52	58.20
$L_{pDrum} - L_{pTrack}$ (dB)	0.93	2.73	-0.17	3.04	4.21	5.65	4.76	6.32

Tabla 24. Presión sonora L_{pDrum} y su diferencia con el valor medio de la presión sonora L_{pTrack}

En el rango de frecuencias comprendido entre 2 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 $L_{p_{eq}}$, debido al peso de dichas bandas de frecuencias en el valor global $L_{p_{eq}}$ ya que la concentración de la mayor cantidad de energía sonora se da en torno a 1 kHz.

Por otro lado en la figura 58 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.

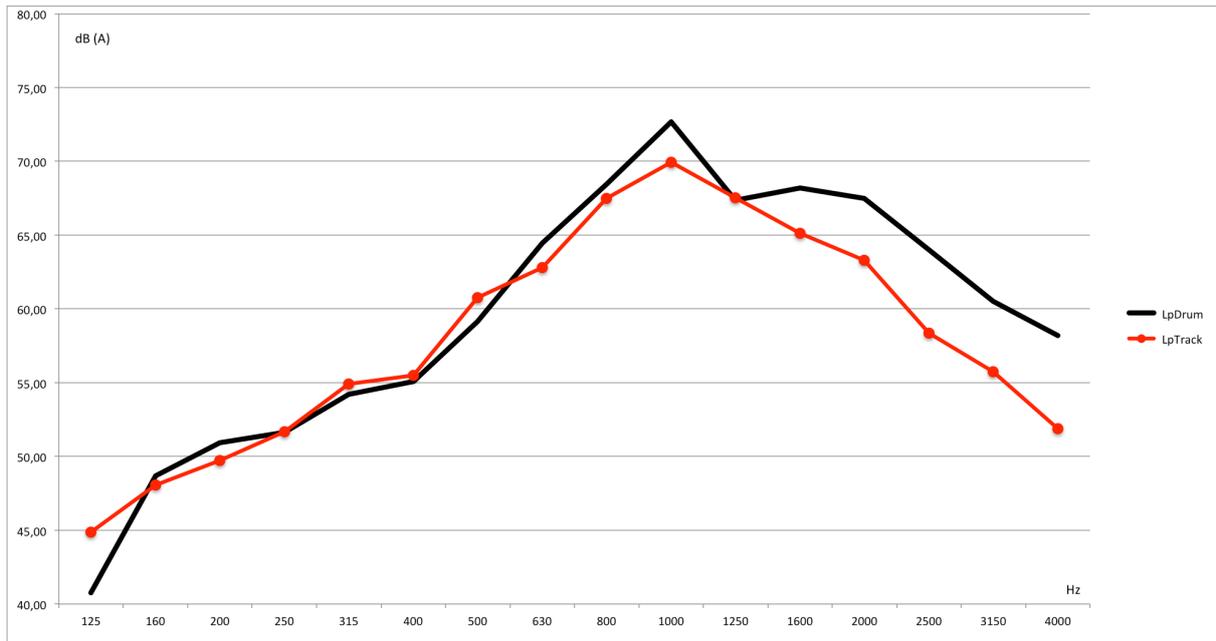


Fig. 58. Comparación entre el nivel de presión sonora L_{pDrum} obtenido a partir de la potencia sonora en banco de ensayo utilizando el modelo de propagación establecido en la ISO 9613, y los niveles de presión sonora L_{pTrack} registrados mediante un ensayo en pista *Coast-By*.

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

$$L_{p_{eq}} = 10 \cdot \log \left[\sum_{i=1}^N 10^{0.1L'_{pi}} \right] \quad (\text{dB}) \quad (7.9)$$

Sustituyendo los valores de la Tabla 24 para cada frecuencia de banda de tercio de octava en la ecuación (7.9) tenemos que el valor de presión sonora equivalente $L_{p_{eqDrum}}$ obtenido a partir de los ensayos en laboratorio para el neumático Insa Turbo Sport 185/65R15 88H es $L_{p_{eqDrum}} = 77.2$ dB

Mientras que el valor de presión sonora equivalente $L_{p_{eqTrack}}$ 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 $L_{p_{eqTrack}} = 75.1$ 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 $\overline{\Delta L_{p_{eq}}} = 1.98$ dB

Dicho valor medio tiene una desviación típica de 2.09 dB en la muestra analizada en el marco de esta tesis.

Estos valores están en la línea e incluso son sensiblemente inferiores a otras desviaciones obtenidas durante diversos ensayos en pista según el método convencional descrito en el Reglamento 117 y cuyas estimaciones han sido publicadas por otros autores con anterioridad y están recogidas en [18]. Estas desviaciones han sido clasificadas en desviaciones debidas a factores como la pista de ensayo (3-9 dB), el vehículo (1.6 dB) o la temperatura de ensayo (2 dB) tal y como se explica con mayor detalle en el siguiente apartado 7.4.

En la figura 59 se muestran, para todos los neumáticos ensayados, los resultados de presión sonora L_{pTrack} obtenidos durante los ensayos *Coast-By* así como los resultados de nivel de presión sonora L_{pDrum} obtenidos a partir de la potencia sonora registrada en banco de ensayo L_{wDrum} utilizando el modelo de propagación establecido en la Norma ISO 9613.

Los resultados obtenidos en todos los casos son muy similares, apreciándose diferencias en torno a los 2 dB entre los ensayos realizados en pista y los ensayos realizados en banco de ensayo. Como ya se ha comentado anteriormente, estas diferencias son aceptables y se estudian con mayor detalle en el siguiente apartado del presente capítulo.

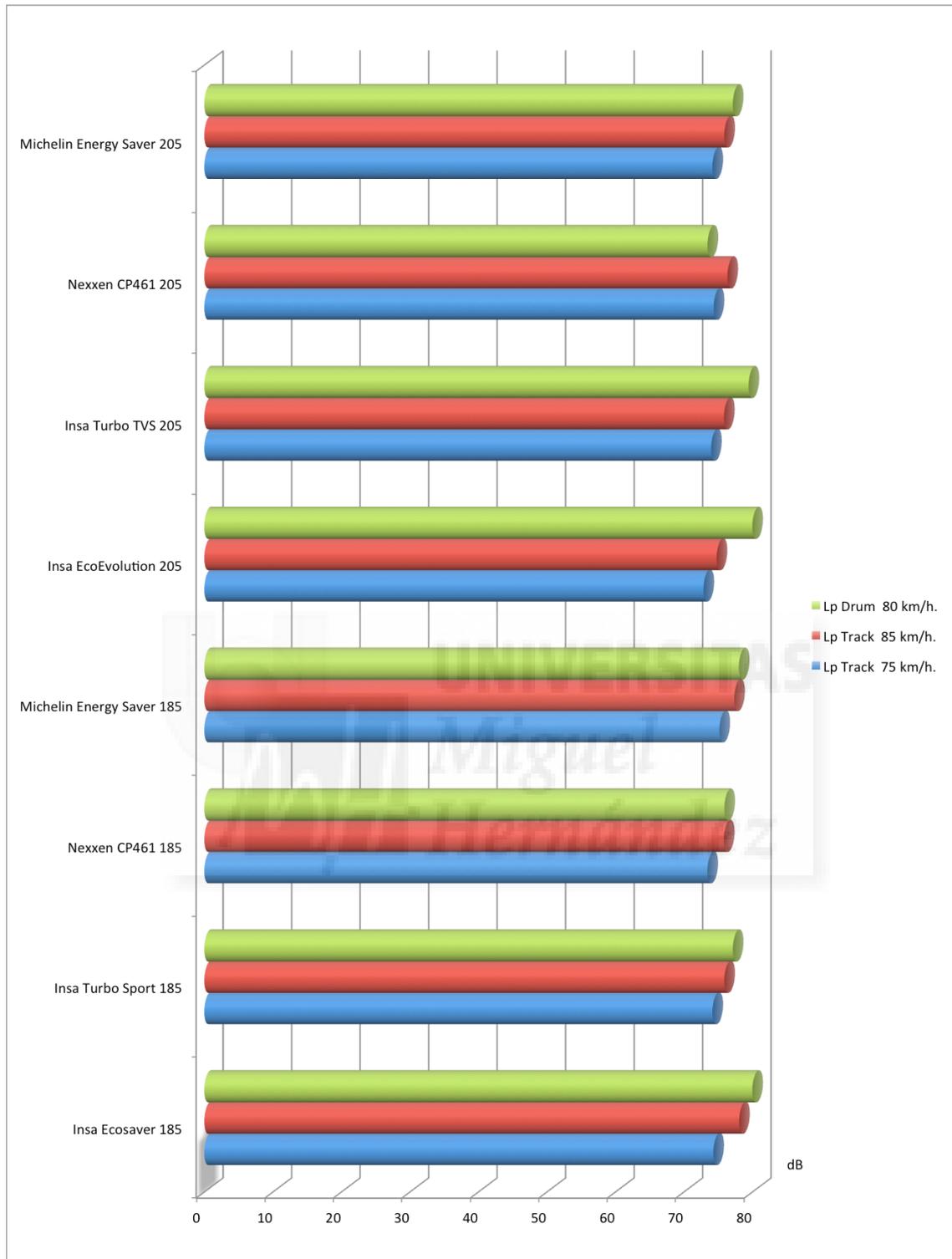


Fig. 59. Comparación, para todos los neumáticos ensayados, entre los niveles de presión sonora L_{pDrum} obtenidos a partir de la potencia sonora registrada en banco de ensayo y los niveles de presión sonora L_{pTrack} registrados mediante un ensayo en pista *Coast-By*.

7.4.- ESTUDIO DE LA INCERTIDUMBRE DE LAS MEDIDAS.

Con la finalidad de evaluar la exactitud de los resultados obtenidos, a continuación se va a realizar un análisis de las incertidumbres asociadas a las medidas de ruido de rodadura. Para ello, se van a explicar las estimaciones sobre las principales fuentes de incertidumbre realizadas por Sandberg [18] tanto para el método *Coast-By* como para el método *Drum* utilizando réplicas de asfalto ISO. Adicionalmente, se explica la incertidumbre de las medidas según la Norma ISO 3744.

Posteriormente, se realiza un cálculo de la incertidumbre de medida de los ensayos realizados en laboratorio teniendo en cuenta la ley de propagación de la incertidumbre y las ecuaciones utilizadas para el cálculo de la potencia sonora según establece la Norma ISO 3744.

7.4.1.- FUENTES DE INCERTIDUMBRE ASOCIADAS A LOS MÉTODOS *COAST-BY* Y *DRUM*.

La determinación de la incertidumbre de medida para ensayos tan complejos como los ensayos *Coast-By* o *Drum* es una tarea complicada en la que intervienen multitud de factores. Determinar dicha incertidumbre con exactitud es, cuanto menos, un trabajo casi tan laborioso como la propia realización de los ensayos o el pos procesado y evaluación de los resultados obtenidos.

Este apartado pretende hacer una revisión de las principales fuentes de incertidumbre asociadas a los ensayos *Coast-By* y *Drum* con la finalidad de mostrar una visión general de la precisión de cada uno de los métodos y, por tanto, poder compararlos en aras de decidir cuál de ellos proporciona resultados más exactos.

7.4.1.1.- INCERTIDUMBRE DEL MÉTODO *COAST-BY*

Las principales fuentes de incertidumbre del método *Coast-By* así como la estimación de sus valores son las siguientes [18]:

Variabilidad de la pista de pruebas: Una prueba llevada a cabo recientemente mostró desviaciones de entre 3 y 9 dB(A) entre nueve pistas de ensayo normalizadas según ISO 10844, dependiendo del tipo de neumático (los valores más altos para los neumáticos normales de verano, los más bajos para los neumáticos de invierno). Sandberg cree que mediante la mejora de la norma ISO 10844, sería posible reducir esta desviación 4 dB (A), es decir, ± 2 dB(A) con un intervalo de confianza del 95%.

Influencia del vehículo de ensayo: Los siguientes factores pueden influir potencialmente en las mediciones del ruido de rodadura debido a la diferencia entre los modelos de vehículos de ensayo y sus condiciones:

- Alineado de la dirección (caída, convergencia, avance...)
- Suspensión (tipo de suspensión, estado...)
- Carga de los neumáticos y presión de inflado de los mismos
- Altura libre al suelo de la carrocería. Propiedades de apantallamiento y reflexión.
- Llantas de ensayo.
- Ruido de la transmisión.
- Rodamientos.
- Ruido de frenos (frenos no liberados completamente)
- Forma de la carrocería. Ruido aerodinámico y equipamiento extra.

El *Tyre/Road Noise Reference Book* [1] hace referencia a un estudio según el cual 8 vehículos equipados con los mismos neumáticos dieron una diferencia entre los niveles más altos y más bajos de 1.6 dB(A). Un informe reciente mostró que la variación de grado de protección contra el ruido de los neumáticos del lado más alejado del vehículo de ensayo puede influenciar los resultados fácilmente de 1 a 1.5 dB(A). Además, puede haber muchos otros errores no listados anteriormente. De este modo, parece que una desviación de $\pm 0,8$ dB(A) con un intervalo de confianza del 95% sería una estimación razonable para el efecto del vehículo.

Influencia de la temperatura ambiente: Los ensayos se realizan en diversas regiones del mundo con temperaturas ambiente que difieren en, al menos, ± 15 °C de la temperatura de referencia nominal de 20 °C. Si el error en el coeficiente de corrección de la temperatura que establece el ensayo Coast-By es de 0.06 dB/°C, lo que es razonable a partir de la experiencia, esto equivale a un error máximo de alrededor de ± 1 dB(A).

Determinación de $L_{Am\acute{a}x}$: Siempre hay una variación entre ensayos, incluso entre los realizados de manera consecutiva en un mismo día, no atribuible a la temperatura, que según la experiencia es de entre 0.3 y 0.4 dB(A) como una variación máximo-mínimo para un nivel medio, calculado basándose en el procedimiento EC 43/2001.

Teniendo en cuenta todos los factores explicados anteriormente y según puede apreciarse en la Tabla 25, la incertidumbre global de las medidas utilizando un método Coast-By podría llegar a ser de hasta 8 dB.

Pista de ensayo	Vehículo	Temperatura	Procesado	Total
4 dB	1.6 dB	2 dB	0.4 dB	8 dB

Tabla 25. Incertidumbres asociadas al método de ensayo Coast-By.

7.4.1.2.- INCERTIDUMBRE DEL MÉTODO *DRUM* UTILIZANDO RÉPLICAS DE ASFALTO ISO

Las principales fuentes de incertidumbre del método *Drum* así como la estimación de sus valores son las siguientes [18]:

Variabilidad entre las superficies del tambor: Se supone que se fabrica una superficie de referencia Europea o Internacional para laboratorios tipo *Drum* a partir de un molde de plástico (negativo) de una superficie ISO existente de la mejor calidad. A partir de esta superficie se pueden hacer réplicas negativas de plástico, que pueden ser utilizadas en cualquier tambor en el mundo para hacer una réplica "exacta" de la superficie de referencia ISO. Inevitablemente, habrá ligeras desviaciones de una réplica "exacta". Se estima una variación máxima de ± 0.8 dB(A) con un intervalo de confianza del 95%.

Efecto del desgaste de la superficie del tambor: Se debe dar a la superficie réplica algún tipo de microtextura adicional que mejore la fricción con el fin de generar un ruido más representativo de una superficie ISO 10844 en una pista de pruebas. Esto se puede realizar mediante la adición de granos muy finos sobre el material de la superficie de réplica. Sin embargo, esto tarde o temprano se desgastará. Cuando la resistencia al deslizamiento disminuya por debajo de cierto valor mínimo, la superficie de réplica deberá ser reemplazada. Se estima que el efecto de la variación de la microtextura puede suponer hasta un máximo de ± 0.8 dB(A).

Efecto de la curvatura del tambor: El efecto potencial de curvatura es obvio. La curvatura de la superficie del tambor influye en el ángulo de ataque, en las distribuciones de presión en la zona de contacto del neumático, en las tensiones en la carcasa del neumático (especialmente en las lonas y la zona de los hombros), así como en el deslizamiento. De los tambores conocidos hoy en día, se utiliza para mediciones de ruido un diámetro que varía

entre 1.5 y 6.5 m. Los tambores grandes afectan a la zona de contacto del neumático sólo marginalmente en comparación con una pista de ensayo convencional totalmente plana; mientras que los tambores más pequeños darán significativamente diferentes propiedades de contacto.

La deformación "extra" del neumático debido a la curvatura del tambor se calculó en el Tyre/Road Noise Reference Book [1], y se encontró que era sorprendentemente pequeña, especialmente para los tambores con diámetros de más de 2 m. Incluso para tambores pequeños, de 1.5 m, la desviación adicional en comparación con una superficie plana de una pista de ensayo no es más de un 2% de la longitud típica de contacto de un neumático con la carretera. Para una longitud de contacto 100 mm, la deformación adicional sería sólo de 2 mm (3 mm para 140 mm longitud de contacto). Esto no es una "distorsión" dramática.

Por lo tanto, parece seguro asumir que el efecto de la curvatura del tambor para tambores de 1.5 a 6.5 m de diámetro puede ser cuantificado por una desviación estándar de 0.7 dB(A).

Efecto de la rigidez de la superficie del tambor: Un tambor de acero cubierto con una réplica de epoxi de una superficie de la carretera no será igualmente rígido o blando como una superficie real de carretera. Es difícil decir si es más rígido o más blando. Para estar en el lado de la seguridad, Sandberg supone que la variación en la rigidez podría causar una influencia máxima de ± 0.6 dB(A).

Influencia de la temperatura: Con la misma justificación que para las mediciones de los ensayos *Coast-By*, pero con la suposición de que las mediciones de laboratorio se harán dentro de un rango comprendido entre los 15 y los 25 ° C, la influencia de la temperatura máxima se estima en ± 0.3 dB(A).

Configuración del entorno acústico de ensayo: Puede haber algunos objetos acústicamente reflectantes cerca del tambor o que los micrófonos no estén suficientemente cubiertos por material absorbente. Se estima que la variación debida a las reflexiones (o difracciones) podría causar una influencia máxima de ± 1.0 dB(A). Esto es probablemente un valor conservador.

Determinación de L_{Aeq} : Siempre hay una variación entre ensayos, incluso entre los realizados de manera consecutiva en un mismo día, no atribuible a la temperatura, que según la experiencia es de entre 0.2 dB(A) como una variación máximo-mínimo para un nivel medio, calculado basándose del procedimiento EC 43/2001.

Teniendo en cuenta todos los factores explicados anteriormente y según puede apreciarse en la Tabla 26, la incertidumbre global de las medidas utilizando un método Coast-By podría llegar a ser de hasta 4.4 dB.

Variabilidad	Desgaste	Curvatura	Rigidez	Temperatura	Configuración	Procesado	Total
0.8 dB	0.8 dB	0.7 dB	0.6 dB	0.3 dB	1 dB	0.2 dB	4.4 dB

Tabla 26. Incertidumbres asociadas al método de ensayo *Drum*.

7.4.2.- INCERTIDUMBRE DE LAS MEDIDAS SEGÚN ISO 3744

Las determinaciones hechas de acuerdo a la norma internacional ISO 3744 tienen, salvo excepciones, una desviación típica de reproducibilidad del nivel de potencia acústica ponderado A, inferior o igual a 1.5 dB [12].

Hay una probabilidad dada de que un valor de potencia acústica de una fuente de ruido, determinado según los métodos de la norma ISO 3744, tenga una desviación,

comprendida dentro del intervalo de incertidumbre de medición, con respecto al valor verdadero. Esta incertidumbre en la determinación del nivel de potencia acústica viene dada por diversos factores, algunos debidos al entorno en el laboratorio de medición y otros a las técnicas experimentales.

Si se determinase el nivel de potencia acústica de un neumático durante su rodadura en un banco de ensayo de acuerdo a la norma ISO 3744, en una serie de laboratorios distintos, los resultados de todos ellos mostrarían una dispersión. La desviación típica de estos niveles podría calcularse en función de la frecuencia según establece la Norma ISO 7574-4, anexo B [38].

Con algunas excepciones, estas desviaciones típicas no excederían de 1.5 dB. Estos valores son desviaciones típicas de reproducibilidad, σ_R , definidas en la Norma ISO 7574-1 [39]. En ellos se han tenido en cuenta los efectos acumulativos de la incertidumbre de las mediciones que se obtienen al aplicar la norma ISO 3744, pero no las variaciones del nivel de potencia acústica debidas a cambios en las condiciones de montaje o funcionamiento (por ejemplo, velocidad de rotación del tambor, temperatura de la sala...).

7.4.3.- CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA EN LOS ENSAYOS REALIZADOS EN LABORATORIO. PROPAGACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE.

7.4.3.1.- INTRODUCCIÓN.

Como ya se ha comentado en el apartado anterior, la determinación de la incertidumbre de medida con exactitud en un ensayo donde intervienen multitud de factores es un proceso complejo. En este apartado se realiza un cálculo de la incertidumbre de medida de los ensayos realizados en el laboratorio de ensayo de neumáticos de la Universidad Miguel Hernández de Elche teniendo en cuenta la ley de propagación de la incertidumbre y las ecuaciones que rigen el cálculo de la potencia sonora según establece la Norma ISO 3744.

El cálculo de la incertidumbre de una medida cuando se ha realizado a partir de una medición indirecta se debe llevar a cabo utilizando la propagación de incertidumbre.

Nuestro instrumento de medida aporta mediciones directas $X \pm I$; donde I es la incertidumbre calculada habitualmente con un factor de cobertura de $k=2$, por lo que tenemos $X \pm k \cdot U$, donde U es la incertidumbre típica.

Nuestra medida indirecta se denominará Y y su incertidumbre I_c ; por lo expuesto en el párrafo anterior podemos decir $I_c = k \cdot u_c$,

Habitualmente podemos expresar $Y = f(x_i)$, donde x_i es el resultado de la medida directa con nuestros instrumentos de medida. Conocida esa relación funcional podemos calcular la incertidumbre de Y calculando primero u_c mediante la ecuación:

$$u_c^2(Y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 \cdot u^2(x_i) \quad (7.10)$$

7.4.3.2.- CÁLCULO DE $u_c^2(L_{pDrum_{7.5}})$

Para calcular $L_{pDrum_{7.5}}$ utilizamos la siguiente ecuación:

$$L_{pDrum_{7.5}} = L_{wDrum} + D_c + A_{div} + A_{atm} + A_{gr} \quad (7.11)$$

Donde sustituyendo D_c , A_{div} , A_{atm} y A_{gr} por sus expresiones queda de la siguiente manera:

$$L_{pDrum_{7.5}} = L_{wDrum} + 10 \cdot \log 4 - 10 \cdot \log(2 \cdot \pi \cdot d^2) - \frac{\alpha \cdot d}{1000} - 1.5 \cdot (3.5 \cdot G_s + 2.5 \cdot G_r)$$

Por otro lado, para calcular la incertidumbre combinada utilizaremos la siguiente expresión:

$$u_c^2(L_{pDrum_{7.5}}) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial L_{pDrum_{7.5}}}{\partial x_i} \right]^2 \cdot u^2(x_i) \quad (7.12)$$

Donde todos los factores salvo L_{wDrum} son constantes (d , α , G_s y $G_r = \text{ctes.}$), por lo que al hacer la derivada parcial de la función respecto a las variables de L_{wDrum} darán todos 0 salvo L_{wDrum} .

Quedando la expresión anterior de la siguiente forma:

$$u_c^2(L_{pDrum_{7.5}}) = 1 \cdot u_{L_{wDrum}}^2 \quad (7.13)$$

7.4.3.3.- CÁLCULO DE $u_{L_{wDrum}}^2$

A su vez, L_{wDrum} vendrá dada por la siguiente expresión:

$$L_{wDrum} = \overline{L_{pf}} + 10 \cdot \log\left(\frac{S}{S_0}\right) \quad (7.14)$$

Siendo

$$S_0 = 1 \text{ m}^2; \quad S = 2 \cdot \pi \cdot r^2$$

Donde r es el radio de la semiesfera, equivalente a la distancia de cada micrófono con el punto de contacto entre el neumático y zona de rodadura, medido con el medidor de distancias láser Bosch GLM80 calibrado cuya incertidumbre expandida $l = 0.003 \text{ m}$. Luego como $l = 2 \cdot U$ para un factor de cobertura $k=2$, $U = l / 2 = 0.0015 \text{ m}$.

Análogamente, para calcular la incertidumbre $u_{L_{wDrum}}^2$ utilizaremos la siguiente expresión:

$$u_c^2(L_{wDrum}) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial L_{wDrum}}{\partial x_i} \right]^2 \cdot u^2(x_i) \quad (7.15)$$

$$u_c^2(L_{wDrum}) = 1 \cdot u^2(L_{pf}) + \left[\frac{\partial(10 \cdot \log(\frac{2\pi r^2}{1}))}{\partial r} \right]_{r=1}^2 \cdot u^2(r) \quad (7.16)$$

$$u_c^2(L_{wDrum}) = 1 \cdot u^2(L_{pf}) + \left[10 \cdot \frac{4\pi r}{2\pi r^2} \log(e) \right]_{r=1}^2 \cdot u^2(r) \quad (7.17)$$

$$u_c^2(L_{wDrum}) = 1 \cdot u^2(L_{pf}) + [10 \cdot 2 \log(e)]^2 \cdot (0.0015)^2 \quad (7.18)$$

$$u_c^2(L_{wDrum}) = 1 \cdot u^2(L_{pf}) + 1.6975 \cdot 10^{-4} \quad (7.19)$$

7.4.3.4.- CÁLCULO DE $u^2(L_{pf})$

Del mismo modo, $\overline{L_{pf}}$ vendrá dada por la siguiente expresión:

$$\overline{L_{pf}} = \overline{L'_p} - K_1 - K_2 \quad (7.20)$$

Por lo que para calcular la incertidumbre $u^2_{L_{pf}}$ utilizaremos la siguiente expresión:

$$u^2_c(L_{pf}) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial L_{pf}}{\partial x_i} \right]^2 \cdot u^2(x_i) \quad (7.21)$$

Quedando de la siguiente forma:

$$u^2_c(L_{pf}) = 1 \cdot u^2(\overline{L'_p}) + 1 \cdot u^2(K_1) + 1 \cdot u^2(K_2) \quad (7.22)$$

7.4.3.5.- CÁLCULO DE $u^2(L'_p)$

Puesto que $\overline{L'_p}$ viene dado por la siguiente expresión:

$$\overline{L'_p} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N 10^{0.1 \cdot L'_{pi}} \right] \quad (7.23)$$

La incertidumbre $u^2_{\overline{L'_p}}$ se calculará mediante:

$$u^2_c(\overline{L'_p}) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial \overline{L'_p}}{\partial x_i} \right]^2 \cdot u^2(x_i) \quad (7.24)$$

$$u^2_c(\overline{L'_p}) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial (10 \cdot \log \left[\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N 10^{0.1 \cdot L'_{pi}} \right])}{\partial L'_{pi}} \right]^2 \cdot u^2(x_i) \quad (7.25)$$

$$u^2_c(\overline{L'_p}) = \left[\frac{\partial (10 \cdot \log \left[\frac{1}{10} \cdot (10^{0.1 \cdot L'_{p1}} + 10^{0.1 \cdot L'_{p2}} + \dots + 10^{0.1 \cdot L'_{p10}}) \right])}{\partial L'_{pi}} \right]^2_{L'_{pi}} \cdot u^2(L'_{pi}) =$$

$$= \left[10 \cdot \frac{\frac{1}{10} \cdot \left[(0.1 \cdot 10^{0.1 \cdot L'_{p1}} \cdot \ln 10) + \dots + (0.1 \cdot 10^{0.1 \cdot L'_{p10}} \cdot \ln 10) \right]}{\left[\frac{1}{10} \cdot (10^{0.1 \cdot L'_{p1}} + 10^{0.1 \cdot L'_{p2}} + \dots + 10^{0.1 \cdot L'_{p10}}) \right]} \log(e) \right]^2_{L'_{pi}} \cdot u^2(L'_{pi})$$

Evaluando la expresión anterior con los distintos valores de L'_{pi} obtenidos para cada micrófono durante la medición en el laboratorio para la obtención del nivel de presión sonora sobre la superficie de medición tenemos que:

$$u_c^2(\overline{L'_p}) = \left[10 \cdot \frac{\frac{1}{10} \cdot [(0.1 \cdot 10^{0.1 \cdot L'_{p1}} \cdot \ln 10) + \dots + (0.1 \cdot 10^{0.1 \cdot L'_{p10}} \cdot \ln 10)]}{\left[\frac{1}{10} \cdot (10^{0.1 \cdot L'_{p1}} + 10^{0.1 \cdot L'_{p2}} + \dots + 10^{0.1 \cdot L'_{p10}}) \right]} \log(e) \right]_{L'_{pi}}^2 \cdot u^2(L'_{pi})$$

$$u_c^2(\overline{L'_p}) = \left[10 \cdot \frac{\frac{1}{10} \cdot [(0.1 \cdot 10^{0.1 \cdot 89.54} \cdot \ln 10) + \dots + (0.1 \cdot 10^{0.1 \cdot 90.10} \cdot \ln 10)]}{\left[\frac{1}{10} \cdot (10^{0.1 \cdot 89.54} + 10^{0.1 \cdot 93.10} + \dots + 10^{0.1 \cdot 90.10}) \right]} \log(e) \right]_{L'_{pi}}^2 \cdot u^2(L'_{pi})$$

$$u_c^2(\overline{L'_p}) = 2.645 \cdot u^2(L'_{pi}) \quad (7.26)$$

La incertidumbre expandida de los micrófonos Bruel & Kjaer 4935 según el certificado aportado por el fabricante de los mismos es $l = 1$ dB. Luego como $l = 2 \cdot U$ para un factor de cobertura $k=2$, $U = l / 2 = 0.5$ dB. Por tanto la incertidumbre $u_c^2(\overline{L'_p})$ será:

$$u_c^2(\overline{L'_p}) = 2.645 \cdot 0.5^2 = 0.6613 \quad (7.27)$$

7.4.3.6.- CÁLCULO DE $u^2(K_1)$

Puesto que K_1 viene dado por la siguiente expresión:

$$K_1 = -10 \cdot \log(1 - 10^{-0.1\Delta L}) \quad (7.28)$$

donde

$$\Delta L = \overline{L'_p} - \overline{L''_p} \quad (7.29)$$

$$K_1 = -10 \cdot \log(1 - 10^{-0.1(\overline{L'_p} - \overline{L''_p})}) \quad (7.30)$$

Siendo

$$\overline{L'_p} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0.1L'_{pi}} \right] \quad (7.31)$$

$$\overline{L''_p} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0.1L''_{pi}} \right] \quad (7.32)$$

La incertidumbre $u^2_{K_1}$ se calculará mediante:

$$u^2_c(K_1) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial K_1}{\partial x_i} \right]^2 \cdot u^2(x_i) \quad (7.33)$$

$$u^2_c(K_1) = \left[\frac{\partial K_1}{\partial L'_{pi}} \right]^2 \cdot u^2(L'_{pi}) + \left[\frac{\partial K_1}{\partial L''_{pi}} \right]^2 \cdot u^2(L''_{pi}) \quad (7.34)$$

$$\begin{aligned}
 u_c^2(K_1) &= \left[\frac{\partial(-10 \cdot \log(1 - 10^{-0.1(\overline{L}'_p - \overline{L}''_p)}))}{\partial L'_{pi}} \right]^2 \cdot u^2(L'_{pi}) + \\
 &+ \left[\frac{\partial(-10 \cdot \log(1 - 10^{-0.1(\overline{L}'_p - \overline{L}''_p)}))}{\partial L''_{pi}} \right]^2 \cdot u^2(L''_{pi}) \\
 u_c^2(K_1) &= \left[-10 \cdot \frac{-0.1 \cdot (-10^{-0.1(\overline{L}'_p - \overline{L}''_p)}) \cdot \text{Ln}(-10)}{1 - 10^{-0.1(\overline{L}'_p - \overline{L}''_p)}} \log(e) \right]_{L'_{pi}}^2 \cdot u^2(L'_{pi}) + \\
 &+ \left[-10 \cdot \frac{-0.1 \cdot (-10^{-0.1(\overline{L}'_p - \overline{L}''_p)}) \cdot \text{Ln}(-10)}{1 - 10^{-0.1(\overline{L}'_p - \overline{L}''_p)}} \log(e) \right]_{L''_{pi}}^2 \cdot u^2(L''_{pi})
 \end{aligned}$$

Evaluando la expresión anterior con los distintos valores de L'_{pi} obtenidos para cada micrófono durante la medición en el laboratorio para el cálculo de K_1 tenemos que:

$$u_c^2(K_1) = 2.679 \cdot 10^{-3} \cdot u^2(L'_{pi}) + 2.679 \cdot 10^{-3} \cdot u^2(L''_{pi}) \quad (7.35)$$

La incertidumbre expandida de los micrófonos Bruel & Kjaer 4935 según el certificado aportado por el fabricante de los mismos es $l = 1$ dB. Luego como $l = 2 \cdot U$ para un factor de cobertura $k=2$, $U = l / 2 = 0.5$ dB. Por tanto la incertidumbre $u_c^2(K_1)$ será:

$$u_c^2(K_1) = 2.679 \cdot 10^{-3} \cdot 0.5^2 + 2.679 \cdot 10^{-3} \cdot 0.5^2 = 1.34 \cdot 10^{-3} \quad (7.36)$$

7.4.3.7.- CÁLCULO DE $u^2(K_2)$

Por último K_2 se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$K_2 = 10 \cdot \log \left[1 + 4 \cdot \left(\frac{S}{A} \right) \right] \quad (7.37)$$

Donde

$$\frac{A}{S} = \frac{4 \cdot (M - 1)}{1 - \frac{M \cdot S}{S_2}}$$

$$S = 2 \cdot \pi \cdot r^2 \text{ con } r = 1 \text{ m} \quad S_2 = 2 \cdot \pi \cdot r^2 \text{ con } r = 2 \text{ m}$$

$$M = 10^{0.1(L'_{p1} - L'_{p2})}$$

Luego K_2 queda de la siguiente forma:

$$K_2 = 10 \cdot \log \left[1 + 4 \cdot \left(\frac{1 - \frac{10^{0.1(L'_{p1} - L'_{p2})} \cdot 6.283}{25.13}}{4 \cdot (10^{0.1(L'_{p1} - L'_{p2})} - 1)} \right) \right]$$

La incertidumbre $u_{K_2}^2$ se calculará mediante:

$$u_c^2(K_2) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial K_2}{\partial x_i} \right]^2 \cdot u^2(x_i) \quad (7.38)$$

$$u_c^2(K_2) = \left[\frac{\partial 10 \cdot \log \left[1 + 4 \cdot \left(\frac{1 - \frac{10^{0.1(\overline{L}'_{p1} - \overline{L}'_{p2})} \cdot 6.283}{25.13}}{4 \cdot (10^{0.1(\overline{L}'_{p1} - \overline{L}'_{p2})} - 1)} \right) \right]}{\partial \overline{L}'_{p1}} \right]_{L'_{p1}}^2 \cdot u^2(L'_{p1}) +$$

$$+ \left[\frac{\partial 10 \cdot \log \left[1 + 4 \cdot \left(\frac{1 - \frac{10^{0.1(\overline{L}'_{p1} - \overline{L}'_{p2})} \cdot 6.283}{25.13}}{4 \cdot (10^{0.1(\overline{L}'_{p1} - \overline{L}'_{p2})} - 1)} \right) \right]}{\partial \overline{L}'_{p2}} \right]_{L'_{p2}}^2 \cdot u^2(L'_{p2})$$

$$u_c^2(K_2) = \left[10 \cdot \frac{4 \cdot \left[\left(-0.1 \cdot 10^{0.1(\overline{L}'_{p1} - \overline{L}'_{p2})} \cdot \ln 10 \cdot \frac{6.283}{25.13} \right) \cdot \left(4 \cdot \left(10^{0.1(\overline{L}'_{p1} - \overline{L}'_{p2})} - 1 \right) \right) - \left[\left(1 - \frac{10^{0.1(\overline{L}'_{p1} - \overline{L}'_{p2})} \cdot 6.283}{25.13} \right) \cdot \left(4 \cdot 0.1 \cdot 10^{0.1(\overline{L}'_{p1} - \overline{L}'_{p2})} \cdot \ln 10 \right) \right]}{\left(4 \cdot \left(10^{0.1(\overline{L}'_{p1} - \overline{L}'_{p2})} - 1 \right) \right)^2} \cdot \log(e) \right]_{L'_{p1}}^2 \cdot u^2(L'_{p1})$$

$$+ \left[10 \cdot \frac{4 \cdot \left[\left(0.1 \cdot 10^{0.1(\overline{L}'_{p1} - \overline{L}'_{p2})} \cdot \ln 10 \cdot \frac{6.283}{25.13} \right) \cdot \left(4 \cdot \left(10^{0.1(\overline{L}'_{p1} - \overline{L}'_{p2})} - 1 \right) \right) - \left[\left(1 - \frac{10^{0.1(\overline{L}'_{p1} - \overline{L}'_{p2})} \cdot 6.283}{25.13} \right) \cdot \left(4 \cdot (-0.1) \cdot 10^{0.1(\overline{L}'_{p1} - \overline{L}'_{p2})} \cdot \ln 10 \right) \right]}{\left(4 \cdot \left(10^{0.1(\overline{L}'_{p1} - \overline{L}'_{p2})} - 1 \right) \right)^2} \cdot \log(e) \right]_{L'_{p2}}^2 \cdot u^2(L'_{p2})$$

Evaluando la expresión anterior con los valores de L'_{p1} y L'_{p2} obtenidos para cada micrófono durante la medición en el laboratorio para el cálculo de K_2 tenemos que:

$$u_c^2(K_2) = 0.3204 \cdot u^2(L'_{pi}) + 0.3204 \cdot u^2(L''_{pi}) \quad (7.39)$$

Luego la incertidumbre será:

$$u_c^2(K_2) = 0.3204 \cdot 0.5^2 + 0.3204 \cdot 0.5^2 = 0.1602 \quad (7.40)$$



7.4.3.8.- CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE COMBINADA

Por tanto, la incertidumbre combinada de las medidas tomadas en el laboratorio será:

$$u_c^2(L_{pDrum_{7.5}}) = 1 \cdot u_{L_{wDrum}}^2 \quad (7.41)$$

$$u_c^2(L_{wDrum}) = 1 \cdot u^2(L_{pf}) + 1.6975 \cdot 10^{-4} \quad (7.42)$$

$$u_c^2(L_{pf}) = 1 \cdot u^2(\overline{L'_p}) + 1 \cdot u^2(K_1) + 1 \cdot u^2(K_2) \quad (7.43)$$

$$u_c^2(L_{pDrum_{7.5}}) = 1 \cdot u^2(\overline{L'_p}) + 1 \cdot u^2(K_1) + 1 \cdot u^2(K_2) + 1.6975 \cdot 10^{-4} \quad (7.44)$$

Y sustituyendo los valores de $u^2(\overline{L'_p})$, $u^2(K_1)$ y $u^2(K_2)$ por los obtenidos anteriormente, tenemos que:

$$u_c^2(L_{pDrum_{7.5}}) = 0,6613 + 1,34^{-3} + 0.1602 + 1.6975 \cdot 10^{-4}$$

$$u_c^2(L_{pDrum_{7.5}}) = 0.823$$

$$u_c(L_{pDrum_{7.5}}) = 0.907 \text{ dB}$$

7.5.- CONCLUSIONES SOBRE LA VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE ENSAYO

Como se ha explicado a lo largo del capítulo, utilizando el modelo de propagación sonora entre la fuente y el receptor propuesto en la norma ISO 9613, es posible determinar el nivel de presión sonora L_p , en bandas de tercio de octava, a partir del nivel de potencia sonora L_W medido en el laboratorio.

Una vez empleado dicho modelo, se ha podido ver que los valores de presión sonora L_{pDrum} obtenidos a partir de los niveles de potencia acústica medidos en laboratorio con el método desarrollado a partir de la norma ISO 3744 son muy similares a aquellos obtenidos mediante el ensayo en pista con el método convencional *Coast-By*.

Además, la diferencia entre los valores de presión sonora equivalente $L_{p_{eqDrum}}$ obtenidos en el laboratorio y los de presión sonora equivalente $L_{p_{eqTrack}}$ calculados a partir de ensayos en pista según el método *Coast-By* es similar, incluso inferior, que la variabilidad que se produce en los ensayos en pista debido a factores como el vehículo o la variación de la propia superficie de ensayo.

Como se ha explicado anteriormente, la incertidumbre asociada al método de ensayo en pista *Coast-By* se ha estimado en torno a 8 dB mientras que la incertidumbre asociada al método de ensayo convencional *Drum* supera los 4 dB. En los ensayos llevados a cabo en el marco de esta Tesis, la diferencia media entre los valores obtenidos en el laboratorio y los obtenidos a partir de ensayos en pista ha sido en torno a 2 dB.

Asimismo, una vez llevado a cabo el análisis de la incertidumbre de medida de los ensayos realizados en el laboratorio *Drum* teniendo en cuenta la ley de propagación de la incertidumbre y las ecuaciones que rigen el cálculo de la potencia sonora según establece la norma ISO 3744, se ha determinado que el valor de la incertidumbre combinada es inferior a 1 dB. Esto demuestra que el procedimiento descrito en el capítulo 5 es apto para la evaluación del ruido de rodadura en neumáticos.

Por otro lado, se ha podido comprobar que las diferencias de los valores registrados en los ensayos en pista entre distintos neumáticos son análogas a las diferencias obtenidas en las pruebas realizadas con el método propuesto entre esos mismos neumáticos, lo cual demuestra la repetibilidad y validez del mismo.

Por todo lo argumentado, se puede afirmar que el método propuesto en la presente tesis es válido para la medida del ruido de rodadura de neumáticos y debería considerarse como método alternativo al método convencional para la obtención de datos para la prueba de homologación del ruido, dadas las ventajas que aporta respecto a éste. Además con este método podría obtenerse un resultado en todo el espectro de ruido o bien un valor único de potencia sonora equivalente.



CAPÍTULO 8



CONCLUSIONES FINALES
TRABAJOS FUTUROS

8.1.- CONCLUSIONES FINALES

Los resultados obtenidos durante el desarrollo del nuevo método de ensayo propuesto en esta Tesis han dado lugar a nuevas contribuciones a la investigación en el campo del ruido de rodadura de neumáticos y a la relación entre la interacción entre el neumático y la carretera en los ensayos en pista y entre el neumático y el rodillo en los ensayos en laboratorio.

Como se ha explicado en la introducción, es más importante medir la potencia sonora que la presión sonora de una fuente. La magnitud que se mide de acuerdo con el Reglamento 117 es el nivel de presión sonora. Sin embargo, esta magnitud depende de factores tales como el medio en el que viajan las ondas sonoras, la atenuación o la distancia de la fuente sonora. Esto no sucede con el nivel de potencia acústica, que es una magnitud inherente a la fuente sonora y que no depende de otros factores externos. Por lo tanto, mediante la medición de la presión sonora no es posible cuantificar la potencia del sonido de la fuente a menos que todos y cada uno de los factores anteriormente mencionados estén estrictamente controlados y definidos.

La investigación llevada a cabo en la presente Tesis no evalúa la presión sonora sino la potencia acústica que emite un neumático en rodadura utilizando una nueva metodología que combina las normas internacionales ISO 3744 e ISO 11819-2. Se utiliza una instalación de ensayo de neumáticos tipo *Drum* con la finalidad de mejorar los resultados obtenidos mediante el método descrito en el Reglamento 117 o mediante otros métodos convencionales.

Tras realizar numerosos ensayos en pista siguiendo la metodología convencional según el procedimiento establecido para la realización del ensayo *Coast-By*, se ha desarrollado un nuevo método de ensayo alternativo en laboratorio, basado en la norma ISO 3744 que mide el nivel de potencia sonora emitido por el neumático. Dicho método ha sido validado no sólo mediante la comparación de sus resultados con los obtenidos en los

ensayos en pista realizados por el grupo de investigación de Mecánica Aplicada de la Universidad Miguel Hernández de Elche según el procedimiento establecido en el Reglamento 117, sino también con los resultados obtenidos mediante otros métodos, tanto en pista como en laboratorio, por diversos grupos de investigación durante las últimas décadas. Además, se ha validado la relación existente entre el nivel de potencia sonora obtenido mediante el nuevo método desarrollado en la presente Tesis con el nivel de presión sonora registrado en los ensayos en pista siguiendo la metodología convencional mediante el empleo del modelo de propagación sonora propuesto en la norma ISO 9613. En ambos casos, los resultados obtenidos han sido satisfactorios, lo que permite dar la validez al nuevo método.

Otros estudios publicados anteriormente han demostrado que rodar contra un tambor de acero no es lo mismo que rodar sobre el asfalto [1]. Se han ensayado algunas soluciones como montar segmentos recubiertos de una réplica de asfalto en la superficie del tambor. Sin embargo, uno de los principales problemas con los segmentos es el efecto de la fuerza centrífuga que causa un importante ruido parásito. Esto no ocurre con los tambores de acero. Por consiguiente, debería considerarse el estudio de la potencia sonora emitida por un neumático usando tambores de acero con la metodología propuesta en la presente Tesis, ya que ha demostrado múltiples ventajas respecto a los métodos convencionales, siendo sus resultados comparables con los obtenidos mediante estos métodos.

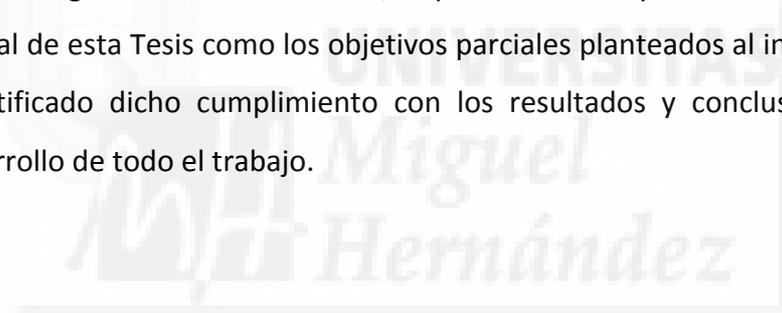
La metodología propuesta ha demostrado ser válida, repetible y precisa, con unos valores de incertidumbre en las medidas sensiblemente inferiores a los de la prueba de homologación actual. Además, los parámetros esenciales de la prueba son más controlables que los del ensayo *Coast-By* por lo que la metodología desarrollada en esta Tesis presenta menos variabilidad y, por tanto, mayor reproducibilidad.

Por consiguiente, esta nueva metodología debería ser tenida en cuenta como alternativa para la obtención de valores de emisión sonora de neumáticos y, por tanto, para la homologación y el etiquetado europeo de los neumáticos en cuanto al ruido de rodadura

se refiere. El objetivo final de estos ensayos es reducir la emisión de ruido de rodadura del neumático durante su interacción con la carretera. En consecuencia, se debería emplear un método con mayor repetibilidad y mucho más preciso, que no dependa de factores externos.

Además, es importante tener en cuenta que la finalidad de esta Tesis no es encontrar un método de ensayo que sustituya al establecido en el Reglamento 117, sino diseñar un método de ensayo alternativo que evite o reduzca las desventajas y limitaciones que posee el actual. Con el nuevo método propuesto, podrían clasificarse los neumáticos según el ruido de rodadura emitido tal y como establece el Reglamento 1222/2009 con un nivel de exactitud, repetibilidad y reproducibilidad superior al método actual.

Por todo lo argumentado hasta ahora, se puede afirmar que se ha alcanzado tanto el objetivo principal de esta Tesis como los objetivos parciales planteados al inicio de la misma, habiéndose justificado dicho cumplimiento con los resultados y conclusiones obtenidos durante el desarrollo de todo el trabajo.



8.2.- LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

Las conclusiones obtenidas en esta Tesis abren nuevas líneas de investigación para seguir desarrollando el estudio en el campo del ruido de rodadura. A continuación se enumeran diversas propuestas para continuar con esta investigación:

8.2.1.- MEJORA DE LAS CONDICIONES DE ENSAYO

Podrían mejorarse las condiciones de ensayo, optimizando acústicamente la sala de ensayo con la finalidad obtener resultados más precisos. Para ello podría trabajarse en las siguiente líneas de actuación:

- Aunque se ha explicado que tanto las paredes como el techo están formados, en parte, por material acústicamente absorbente, en el caso del suelo, dadas sus características acústicas, tenemos un plano reflectante. A pesar de ello, ya se ha demostrado que el entorno acústico de ensayo cumple sobradamente los requisitos establecidos en la norma ISO 3744 quedando muy próximo a los establecidos en la norma ISO 3745, más precisa y por tanto restrictiva. Sin embargo, podrían mejorarse aún más las características acústicas de la sala de ensayos si se forrase el suelo con material acústicamente absorbente. Se podría, por tanto volver a realizar todas las mediciones para ver como dicha modificación repercute en los niveles de potencia acústica registrados. Un paso más, sería construir una cámara anecoica para las mediciones.
- Durante el desarrollo del nuevo método, se vio que para la superficie semiesférica de medición S_2 , de radio 2 m, había tres micrófonos que quedaban por debajo del nivel del suelo, por lo que fue necesario descartarlos. Se podrían obtener más medidas del ruido de rodadura, realizando nuevas consideraciones, tales como no descartar los micrófonos que se quedan por debajo del suelo de la sala en la

semiesfera de 2 m, sino colocarlos sobre el suelo (el resto de coordenadas donde corresponda), de forma que no se perdería ningún micrófono. De esta manera se podrían comparar los resultados para ver la influencia de estos micrófonos.

- Se podría fabricar una plancha plana vertical con una superficie réplica de asfalto para colocarla alrededor del punto de contacto entre el rodillo y el neumático, simulando así la superficie plana de una carretera de manera que el método en laboratorio sea más parecido al método de ensayo en pista al simular las condiciones de reflexión y absorción acústica del plano reflectante. En la siguiente Figura 60 se muestra un diseño preliminar de la misma.

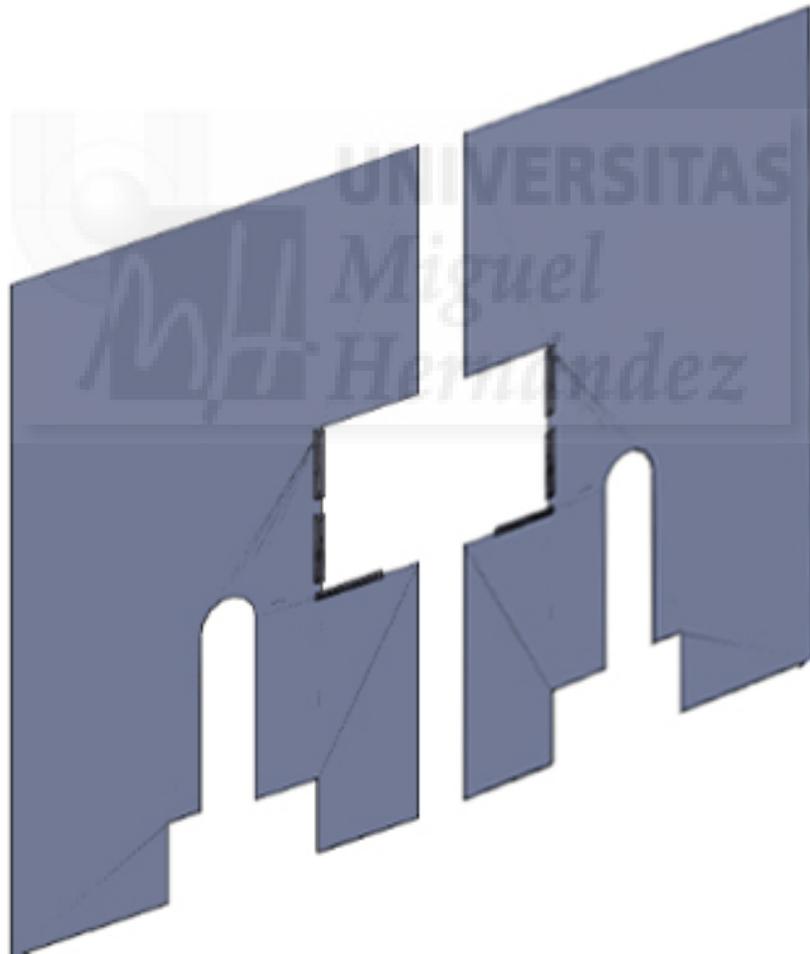


Fig. 60. Diseño en dos secciones de una plancha plana vertical para simular la carretera en el punto de contacto entre el neumático y el rodillo.

8.2.2.- MEDICIÓN DE LA POTENCIA SONORA EN ENSAYOS CB, CPX, SPB Y CPB.

Cuando se conoce la potencia sonora, el nivel de presión sonora se puede calcular para cualquier posición del receptor mediante los modelos de propagación del sonido. Por esta razón, se deberían llevar a cabo más estudios sobre la obtención de la potencia sonora que emite un neumático durante su interacción con la carretera para profundizar en esta área del conocimiento. Estos estudios deberían considerar la realización de mediciones de potencia sonora con todos los métodos convencionales (*Coast-By, Close-Proximity, Statistical Pass-By, Controlled Pass-By...*) en futuras etapas de investigación.

8.2.3.- COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE LOS MÉTODOS CPX Y ALTERNATIVE CPX.

Durante el desarrollo de los ensayos en laboratorio se han medido y registrado gran cantidad de valores utilizando la posición de los micrófonos según el método CPX (ISO 11819-2). Una futura línea de investigación sería profundizar en el análisis de las medidas tomadas con los resultados obtenidos mediante el método *Alternative CPX* de Campillo [11].



Fig. 61. Montaje para ensayo según el método *Alternative CPX* propuesto por Campillo.

8.2.4.- MEJORA EN LA APLICACIÓN DEL MODELO DE PROPAGACIÓN SONORA.

Para la aplicación del modelo de propagación sonora entre la fuente y el receptor propuesto en la norma ISO 9613, se han considerado cuatro fuentes sonoras (neumáticos) situadas a 7.5 m del receptor (micrófono). Sin embargo esto no es totalmente cierto. Si tenemos en cuenta las condiciones del ensayo Coast-By y el ancho de vías del vehículo de ensayo (1474 mm) tal y como puede observarse en la siguiente Figura 62, tenemos que dos neumáticos, los de mayor contribución sonora, estarán situados a 6.76 m de distancia mientras que los otros dos estarán a 8.24 m. Con la finalidad de aplicar el modelo de propagación sonora con mayor precisión, se podría tener en cuenta este efecto en una línea de investigación futura.



Fig. 62. Distancia real entre las fuentes sonoras y micrófono teniendo en cuenta el ancho de vías.

8.2.5.- OBTENCIÓN DEL UMBRAL DE ACEPTACIÓN O RECHAZO PARA LA HOMOLOGACIÓN.

Para finalizar se propone ensayar, mediante el nuevo método propuesto en la presente tesis, una muestra considerable de neumáticos ya homologados previamente mediante el método convencional con la finalidad de establecer un nuevo criterio de aceptación o rechazo -un umbral- utilizando los valores de potencia sonora, para cumplir con la normativa europea.

BREVE CURRÍCULUM DEL AUTOR



PUBLICACIONES

David Clar García (Alicante, 1977) es Ingeniero Técnico Industrial, especialidad en Mecánica (1999) por la Universidad Politécnica de Valencia (E.U.I.T.I. Valencia) e Ingeniero Industrial (2002) por la Universidad Miguel Hernández (E.P.S. Elche). También posee el título *Mitsubishi Service Engineer* expedido por la empresa Mitsubishi tras la formación específica recibida en Yokohama (Japón).

A excepción de sus inicios, donde trabajó brevemente en el sector naval (2002-2003), su trayectoria profesional ha estado siempre vinculada al sector de la automoción. Ha trabajado ocupando diversos puestos en empresas del sector y como docente especialista en automoción e ingeniería mecánica.

Durante una primera etapa fue Jefe del Servicio Postventa en Mercedes-Benz (2004-2006) al tiempo que ejercía la profesión libre de ingeniero realizando peritaciones, informes técnicos y proyectos para la homologación de reformas de vehículos en colaboración con el Laboratorio de Automóviles de la Universidad Politécnica de Valencia (1999-2005).

Posteriormente pasó a ocupar el puesto de Director de Postventa del grupo Volkswagen-Audi (2006-2009) donde, al cabo de unos años, comenzó de manera paralela su actividad docente en Ciclos Formativos en la rama de mantenimiento de vehículos autopropulsados (2007-)

Actualmente compagina su labor docente en Ciclos Formativos con la de profesor asociado del Departamento de Ingeniería Mecánica y Energía de la Universidad Miguel Hernández (2009-), de cuyo Laboratorio de Vehículos es Director de Calidad (2010-).

Su interés por la Ingeniería de Vehículos Automóviles le llevó a iniciar los estudios de Tercer Ciclo en el programa de doctorado de Tecnologías Industriales, obteniendo el Diploma de Estudios Avanzados en 2009. Su actividad investigadora se enmarca en el campo de la ingeniería acústica y el ruido del tráfico rodado, y principalmente en el estudio del ruido de rodadura en neumáticos en banco de ensayos. Es miembro del grupo de

investigación de Ingeniería Mecánica Aplicada, donde ha participado en diversos proyectos de investigación.

En el marco de la actividad investigadora de la presente tesis doctoral ha realizado las siguientes publicaciones:

- Clar García, D., Velasco Sánchez, E., Campillo Davo, N., Campello Vicente, H., Sánchez Lozano, M., *A new methodology to assess sound power level of tyre/road noise under laboratory controlled conditions*. Applied Acoustics, Vol 110, pp 23-32. Marzo 2016.
- Clar García, D., Velasco Sánchez, E., *Metodología para la medición de la potencia sonora de neumáticos en banco de ensayos tipo Drum*. XXI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. Elche, noviembre de 2016.

Por otro lado, dentro de su actividad académica ha publicado, como único autor, el siguiente libro en lengua inglesa:

- Clar García, D. *Automotive Technology. Vocational Training*. Ed. Ofibook. 2013. ISBN 978-84-941740-0-1. Registro General de la Propiedad Intelectual nº 09/2014/2452.

Por último, los resultados de la presente tesis doctoral serán presentados tanto en el XIII Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica como en el *15th EAEC European Automotive Congress* que se celebrarán en Lisboa y Madrid respectivamente, en octubre del presente año. En ambos casos, el Comité Científico ha comunicado la aceptación de los trabajos remitidos, habiendo confirmado la contribución al *EAEC* como presentación oral.

BIBLIOGRAFÍA



BIBLIOGRAFÍA REFERENCIADA

- [1] U. Sandberg, J.A. Ejsmont, Tyre/road noise reference book, ISBN 91-631-2610-9 Ed. 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 and/or to rolling resistance. 2007.
- [3] International Organization for Standardization ISO 13325:2003 Coast-By methods for measurement of tyre-to-road sound emission. Geneva, Switzerland, 2003.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] G. van Blokland, J. Kragh, 30 different tyres on 4 surface types – How do truck tyre noise levels relate to the test surface, Euro-Noise 2015, Maastrich, (2015) 2147-2152.
- [7] 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 2006 129-132.
- [8] Ka-Yee Ho, Wing-Tat Hung, et al., The effects of road surface and tyre deterioration on tyre/road noise emission, Applied Acoustics 74 (2013) 921-925.
- [9] B. Peeters, G. v. Blokland, The noise emission model for European road traffic. Deliverable 11 of the IMAGINE project, IMA55TR-060821-MP10. January 11th. 2007.
- [10] F. Anfosso-Lédée, A Former LCPC Experimental Campaign about Repeatability and Reproducibility of SPB and CPB Measurement Methods. SILVIA project. Report SILVIA-LCPC-002-00-WP2-170403.
- [11] N. Campillo Davo, R. Peral Orts, E. Velasco Sanchez, An experimental procedure to obtain sound power level of tyre/road noise under Coast-By conditions. Applied Acoustics 74 (2013) 718-727

[12] 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.

[13] Reglamento 30 de la Comisión económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE/ONU) - Disposiciones uniformes para la homologación de neumáticos para vehículos de motor y sus remolques.

[14] Reglamento 54 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE) - Prescripciones uniformes relativas a la homologación de neumáticos para vehículos industriales y sus remolques.

[15] Reglamento 108 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas sobre la homologación de la producción de neumáticos recauchutados para los vehículos automóviles y sus remolques.

[16] Reglamento 109 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas sobre la homologación de la producción de neumáticos recauchutados para los vehículos industriales y sus remolques.

[17] International Organization for Standardization ISO/IEC 17025, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, 2005.

[18] U. Sandberg, Possibilities to Replace Outdoor Coast-by Tyre/Road Noise Measurements with Laboratory Drum Measurements, Swedish Road and Transport Research Institute (VTI), Silence Consortium (2005).

[19] Guidelines for Community Noise. B. Berglund, T. Lindvall, D. Schwela. World Health Organisation. Geneva, 2009.

[20] Kaye, G.W.C., Dadson, R.S. Noise measurement and analysis in relation to motor vehicles. Proc. of the Inst. of Automobile Engineers, Vol. 33. 1939.

[21] ISO 10844, Acoustics – Specification of test tracks for measuring noise emitted by road vehicles and their tyres. International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland, 2011.

[22] P. Donovan, 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

[23] NFS 31-119-2, Acoustique – Caractérisation in situ des qualités acoustiques des revêtements de chaussées – Mesurages acoustiques au passage – Procédure « Véhicules Maîtrisés ». National French Standard, AFNOR, Paris. 2001.

[24] ISO/CD 11819-2, Acoustics – Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: “The Close Proximity Method”. International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland, 2000.

[25] Reglamento 64 de la Comisión Económica para Europa (CEPE) de las Naciones Unidas sobre disposiciones uniformes relativas a la homologación de vehículos por lo que se refiere a sus equipos que pueden incluir una unidad de repuesto de uso provisional, neumáticos autoportantes y/o un sistema autoportante y/o un sistema de control de la presión de los neumáticos.

[26] Form 4: New Work Item Proposal. Reference number: ISO/TC 31/SC 5T. “Tyre noise test - Methods of Drum”. International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland, 2015.

[27] Campillo, N. Modelización experimental del ruido de rodadura en ensayo de homologación de neumáticos. Tesis doctoral. Universidad Miguel Hernández de Elche. Marzo 2013.

[28] Van der Heijden, L.A.M., Van Son, R.J.J.H. A note on the neglect of the Doppler effect in the modelling of traffic flow as a line of stationary point sources. Journal of Sound and Vibration. Vol 85 (3), pp 442-444. 1982.

[29] U. Sandberg, The multi-coincidence peak around 1000Hz in tyre/road noise spectra, Proceedings of Euro-Noise 2003, Naples, Italy, paper ID 498.

[30] Hamet, J.F., Measurement of Power and Directivity of Tyre/Road Surface Noise, Proceedings of Inter-Noise 88, Avignon, France.

[31] International Organization for Standardization ISO/CD 11819-2, Acoustics – Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: “The Close Proximity Method”, 2000.

[32] 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.

[33] EN 1793-3:1998 Road traffic noise reducing devices. Test method for determining the acoustic performance. Part 3: Normalized traffic noise spectrum.

[34] ISO 9613-2, Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 2: General method of calculation, International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland, 1996.

[35] Rasmussen, K.B. A note on the calculation of sound propagation over impedance jumps and screens. *Journal of Sound and Vibration*. Vol 84 (4), pp 598-602. 1982.

[36] Rudnick, I. The propagation of an acoustic wave along a boundary. *Journal of the Acoustical Society of America*. Vol 19, pp 348-357. 1947.

[37] ISO 9613-1, Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere, International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland, 1996.

[38] ISO 7574-4 Acoustics. Statistical methods for determining and verifying stated noise emission values of machinery and equipment. Part 4: Methods for stated values for batches of machines, International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland, 1985.

[39] ISO 7574-1 Acoustics. Statistical methods for determining and verifying stated noise emission values of machinery and equipment. Part 1: General considerations and definitions, International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland, 1985.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- [40] International Organization for Standardization ISO/IEC 17020, Conformity assessment. Requirements for the operation of various types of bodies performing inspection, 2012.
- [41] ISO 3741, Acoustics – Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure – Precision methods for reverberation test rooms, International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland, 2010.
- [42] ISO 3743-1, Acoustics – Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure – Engineering methods for small movable sources in reverberant fields. Part 1: Comparison method for a hard-walled test room, International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland, 2010.
- [43] ISO 3743-2, Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure – Engineering methods for small, movable sources in reverberant fields – Part 2: Methods for special reverberation test rooms, International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland, 1994.
- [44] ISO 3745, Acoustics – Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure – Precision methods for anechoic rooms and hemianechoic rooms, International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland, 2012.
- [45] ISO 3746, Acoustics – Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure – Survey method using an enveloping measurement surface over a reflecting plane, , International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland, 2010.
- [46] ISO 3747, Acoustics – Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure – Engineering/survey methods for use in situ in a reverberant environment, International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland, 2010.
- [47] Abbott, P; Watts, G. The relationship between coast-by and close-proximity car tyre noise levels for different road surfaces. Proceedings of INTER-NOISE 2004. Praga.
- [48] Adams, G; Kamst, F; Pugh, S; Claughton, D. Dynamic measurement of tyre/road noise. Proceedings of ACOUSTICS 2006. Christchurch, Nueva Zelanda.

- [49] Anfosso-Lédée, F. Modeling the local propagation effects of tire-road: propagation filter between CPX and CPB measurements. Proceedings of INTER-NOISE 2004. Praga.
- [50] Anfosso-Lédée, F. The development of a new tire-road measurement device in France. Proceedings of the 5th Symposium on Pavement Surface Characteristics – SURF 2004. Toronto, Canadá.
- [51] Bendtsen, H; Kragh, H; Nielsen, E. Use of noise reducing pavements – European experience. Danish Road Institute. Technical note 69. 2008.
- [52] Byoung Sam, K; Gi Jeon, K; Tae Keun, L. The identification of sound generating mechanisms of tyres. Applied Acoustics, Vol 68, pp 114-133. 2007.
- [53] Campillo Davó, N; Peral Orts, R; Velasco Sánchez, E. Global review of tyre/road noise assessment methodologies. Proceedings of INTER-NOISE 2008. Shanghai.
- [54] Campillo Davó, N; Peral Orts, R; Velasco Sánchez, E. Evaluation of the sound power level from rolling tyres. Proceedings of INTER-NOISE 2010. Lisboa.
- [55] Campillo Davó, N; Peral Orts, R; Campello Vicente, H; Velasco Sánchez, E. Analysis of the sound propagation in an alternative Close-Proximity tyre-road noise test. Proceedings of Forum Acusticum 2011. Aalborg, Dinamarca.
- [56] Campillo Davó, N; Amorós Peral, D; Peral Orts, R; Velasco Sánchez, E. Determination of the relative importance of aerodynamic noise in the Close-Proximity method. Proceedings of EURONOISE 2012. Praga.
- [57] Cho, D.S; Mun, S. Determination of the sound power levels emitted by various vehicles using a novel testing method. Applied Acoustics, Vol 69 (3), pp 185-195. 2008.
- [58] Directiva 2001/43/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 27 de junio de 2001 por la que se modifica la Directiva 92/23/CEE del Consejo sobre los neumáticos de los vehículos de motor y de sus remolques así como de su montaje.
- [59] Ejsmont, J.A; Sandberg, U. Tire/road noise. Trailer measurements in practice. Proceedings of INTER-NOISE 85. Munich.

- [60] Embleton, T.F.W; Piercy, J.E; Olson, N. Outdoor sound propagation over ground of finite impedance. *Journal of the Acoustical Society of America*. Vol 59, pp 267-277. 1976.
- [61] Expósito Paje, S; Viñuela, U; Terán, F; López Querol, S; Sanz, A. Caracterización acústica de diferentes superficies de rodadura en tramos urbanos de Ciudad Real. *Proceedings of Tecniacustica 2006*. Gandia.
- [62] Graf, R.A.G; Kuo, C.-Y; Dowling, A.P; Graham, W.R. On the horn effect of a tyre/road interface, Part I: Experiment and computation. *Journal of Sound and Vibration*. Vol 256(3), pp 417-431. 2002.
- [63] Hamet, J.-F; Bérengier, M. Acoustical characteristics of porous pavements: a new phenomenological model. *Proceedings of INTER-NOISE 93*. Leuven, Belgium.
- [63] Harris, C.M. *Manual de medidas acústicas y control del ruido*. McGraw-Hill. 1995.
- [64] Hung, W.T; Wong, W.G; Ng, C.F; Li, C.W. Comparison of newly devised methods to measure road tire noise. *Proceedings of the 9th Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies*. Hong Kong, China. 2004.
- [65] ISO 10844, Acoustics – Specification of test tracks for measuring noise emitted by road vehicles and their tyres. International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland, 2011.
- [66] ISO 11819-1, Acoustics – Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise – Part 1: “The Statistical Pass-By Method”. International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland, 1997
- [67] ISO/CD 11819-2, Acoustics – Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: “The Close Proximity Method”. International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland, 2000.
- [68] ISO 362, Acoustics - Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles – Engineering method, International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland, 1998.
- [69] ISO 9614-1, Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity – Part 1: Measurement at discrete points, International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland, 1993.

- [70] Iwao, K; Yamazaki, I. A study on the mechanism of tire/road noise. JSAE Review. Vol 17, pp 139-144. Society of Automotive Engineers, Japan. 1996.
- [71] JASO 1981, Test procedures for tire noise. Japanese Automobile Standards Organization, C606-81.
- [72] Kuijpers, A; van Blokland, G. Tyre/road noise models in the last two decades: a critical evaluation. Proceedings of INTER-NOISE 2001. La Haya, Holanda.
- [73] Kuijpers, A; van Blokland, G. Simulation tool for road/tyre modelling: the influence of road parameters on tyre/road noise. SILENCE project. Deliverable C.D2. 2006.
- [74] Libro Verde de la Comisión Europea sobre "Política futura de lucha contra el ruido". ES/11/96/03030100.P00. Bruselas, 1996.
- [75] López López, J.G; Campillo Davó, N; Peral Orts, R; Velasco Sánchez, E. Análisis sonoro y vibracional de una estructura empleada para soporte de micrófonos en ensayos de ruido de rodadura de neumáticos. Anales de Ingeniería Mecánica. 2012.
- [76] Morcillo, M.A; González, J.A; Hernández, M.J; Hidalgo, A. Influencia de la porosidad de los asfaltos en la generación del ruido de rodadura. Actas del congreso Acústica 2008. Coimbra.
- [77] Peral Orts, R. Directividad sonora horizontal de un vehículo automóvil circulando a alta velocidad. Tesis Doctoral. Universidad Miguel Hernández de Elche. 2009.
- [78] Ruhala, R.J. A study of tire/pavement interaction noise using near-field acoustical holography. Tesis Doctoral. Penn State University. 1999.