RAE

1. TIPO DE DOCUMENTO: Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero de Sonido

2. TITULO: REDUCCIÓN DEL FENÓMENO DE LOMBARD MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN TRATAMIENTO ACÚSTICO EN UN VEHÍCULO DE SEGMENTO TIPO C.

3. AUTORES: Diego Arturo Rozo Falla, Andrés Felipe Vargas Andrade

4. LUGAR: Bogotá, D.C.

5. PUBLICACIÓN: noviembre de 2016

6. LUGAR: Universidad de San Buenaventura Bogotá – Colombia

PÁGINAS: 115 FIGURAS: 69 TABLAS: 21 GRÁFICAS: 11

7. PALABRAS CLAVES: Pérdida por impacto, Ventaneo Hanning, análisis TEF, ruido, fenómeno de Lombard, inteligibilidad, gravilla, guardabarros, chasis, ISO-5128.

8. FORMULACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA: ¿Cómo reducir el fenómeno de Lombard, producto del choque de gravilla en carros de producción segmento tipo C a través de un tratamiento acústico?

9. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN: Acústica Automotriz**.**

10. TIPO DE INVESTIGACIÓN: Empírico analítica.

REDUCCIÓN DEL FENÓMENO DE LOMBARD MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN TRATAMIENTO ACÚSTICO EN UN VEHÍCULO DE SEGMENTO TIPO C

DIEGO ARTURO ROZO FALLA

ANDRES FELIPE VARGAS ANDRADE

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA, SEDE BOGOTA

FACULTAD DE INGENIERIA

INGENIERÍA DE SONIDO

BOGOTA D.C.

2016

REDUCCIÓN DEL FENÓMENO DE LOMBARD MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN TRATAMIENTO ACÚSTICO EN UN VEHÍCULO DE SEGMENTO TIPO C

DIEGO ARTURO ROZO FALLA

ANDRES FELIPE VARGAS ANDRADE

Proyecto de grado para optar por el título de: Ingeniero de sonido

Asesor Temático:

Ingeniero. Luis Fernando Hermida Cadena

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA, SEDE BOGOTA

FACULTAD DE INGENIERIA

INGENIERÍA DE SONIDO

BOGOTA D.C.

2016

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por ser nuestra fortaleza en los momentos más difíciles de la vida, por su infinita gracia que nos guía día a día hasta lograr nuestras metas. A nuestros padres, quienes nos dieron su apoyo y nos llenaron de esperanza en todo momento. Al ingeniero Luis Fernando Hermida Cadena, cuya dirección del proyecto hizo posible la culminación y desarrollo del mismo. Al físico Luis Jorge Herrera por corregirnos y orientarnos para poder finalizar este proceso con excelencia; agradecemos y valoramos sus enseñanzas, apoyo, dedicación y confianza al guiar nuestro proyecto.

La experiencia que Dios nos da a través de la vida es lo que nos lleva a ser mejores.

Contenido

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 2

1.1.1 ANTECEDENTES 2

1.1.2 Globales 2

1.2 DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA 5

1.2.1 PREGUNTA PROBLEMA 6

1.3 JUSTIFICACIÓN 6

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN 7

1.4.1 Objetivo general 7

1.4.2 Objetivos específicos. 7

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES 7

1.5.1 Alcances 7

1.5.2 Limitaciones. 7

2. METODOLOGÍA 8

2.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN 8

2.2 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN 8

2.3 HIPÓTESIS 8

2.4 VARIABLES 8

2.4.1 Variables Independientes 8

2.4.2 Variables Dependientes 8

2.5 MATERIALES 9

2.6 PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN 9

2.7 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE LA UNIVERSIDAD/LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD/NÚCLEOS PROBLEMÁTICOS 11

2.7.1 NÚCLEO PROBLEMÁTICO 11

2.7.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA 11

2.7.3 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA 11

3. MARCO DE REFERENCIA 12

3.1 MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL 12

3.1.1 Aislamiento Acústico 12
3.1.4 Transmisión de ruidos de impacto 13
3.1.5 Caracterización de materiales acústicos 14
3.1.6 NVH (noise, vibration, and harshness) 16
3.1.7 Clasificación por segmento. 19
3.1.8 Labrado de las llantas 21
3.1.9 Influencia de la presión de aire en la estabilidad. 21
3.1.10 Clases de Llantas 22
3.1.11 Tipos de terreno 23
3.1.12 Procesamiento digital de señales 25
3.1.13 Procesamiento de Señales en Tiempo Discreto (Discrete-Time Signal Processing) 25
3.1.14 Transformada de Fourier 26
3.1.15 Aplicaciones en software de análisis 27
3.1.16.1 Ecualizador Paramétrico 28
3.1.16.2 Tamaño de la FFT 28
3.1.16.4 Funciones de ventana 29
3.1.16.5 Clases de ventana 29
3.1.16.6 Ventana Hanning 30
3.1.16.7 Blackman-Harris 31
3.1.16.8 Kaiser-Bessel 31
3.2 MARCO LEGAL O NORMATIVO 32
3.2.1 Método de medición según ISO 5128-1980 32
3.2.2 Consideraciones de medición 33
3.2.3 El equipo de medición 33
3.2.4 Configuración del equipo de medición: 34
3.2.5 Posicionamiento del micrófono y condiciones de medición 34
4. DESARROLLO INGENIERIL 36
4.1 SELECCIÓN DE PISTA DE PRUEBAS. 36
4.2 CARACTERIZACIÓN DEL RUIDO DEL MOTOR Y ESCAPE 38

4.3 CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURA PARA EL MONTAJE DE EQUIPOS DE MEDICIÓN 39

4.4 REALIZACIÓN DE MEDICIONES EN GRAVILLA Y ASFALTO. 41

4.5 SELECCIÓN DE MATERIALES 42

4.5.1 Inflamabilidad (UNE-EN 13501-1:2007) 43

4.5.2 Permeabilidad (UNE-EN 12087:1997/A1:2008) 43

4.5.3 Resistencia a la flexión (UNE-EN 12372:2007) 44

4.5.4 Resistencia a la compresión (UNE-EN 826:2013) 44

4.5.5 Absorción Acústica (UNE-EN ISO 11654:1998) 44

4.5.6 Evaluación de materiales 45

4.6 CONSTRUCCIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS 46

4.7 MEDICIÓN CON Y SIN EL MATERIAL 48

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS 49

5.1.1 Ruido de motor 49

5.1.2 Ruido del escape 51

5.1.3 Ruido de fondo con el motor apagado y encendido 52

5.2 CARACTERIZACIÓN DEL RUIDO DE GRAVILLA 54

5.2.1 Medición a 10 km/h gravilla vs asfalto 56

5.2.1.1 Análisis por segmentos de 1 segundo a 10 kilómetros por hora 58

5.2.2 MEDICIÓN A 30 KM/H 60

5.2.2.1 Análisis por segmentos de 1 segundo a 30 kilómetros por hora 62

5.2.3 MEDICIÓN A 40 KM/H 63

5.2.3.1 Análisis por segmentos de 1 segundo a 40 kilómetros por hora. 65

5.3 MEDICIÓN CON Y SIN RECUBRIMIENTO 66

5.3.1 VARIANZA Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR 66

5.3.3 Medición con recubrimiento de lana de roca 70

5.3.3.1 Medición con el recubrimiento de lana de roca a 10 kilómetros por hora 70

5.3.3.2 Medición con el recubrimiento de lana de roca a 30 kilómetros por hora 72

5.3.3.3 Medición con el recubrimiento de lana de roca a 40 kilómetros por hora 74

5.3.4 Medición con recubrimiento de corcho 76
5.3.4.1 Medición con el recubrimiento de corcho a 10 kilómetros por hora 77
5.3.4.2 Medición con el recubrimiento de corcho a 30 kilómetros por hora 78
5.3.4.3 Medición con el recubrimiento de corcho a 40 kilómetros por hora 80
5.4 COMPARACIÓN RECUBRIMIENTO DE LANA DE ROCA VS CORCHO 82
5.4.1 Comparación a 10 kilómetros por hora..... 82
5.4.2 Comparación a 30 kilómetros por hora..... 83
5.4.3 Comparación grabación corta a 40 kilómetros por hora..... 84
5.4.4 Análisis comparativo global..... 85
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....87
6.1 CONCLUSIONES 87
6.2 RECOMENDACIONES 89
6.3 TRABAJOS A FUTURO 90
7. BIBLIOGRAFÍA.....91
8. GLOSARIO 93
ANEXO A.....95
ANEXO B.....95
ANEXO C.....96
ANEXO D.....97

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características de aislamiento térmico de materiales. 16
Tabla 2. Características de Inflamabilidad de un material según norma UNE 13501-1 43
Tabla 3. Características de permeabilidad de un material según norma UNE 12087 44
Tabla 4. Características de absorción acústica de un material según norma ISO 11654..... 44
Tabla 5. Características de los materiales seleccionados. 45
Tabla 6. Características de los materiales seleccionados. 45
Tabla 7. Ruido de fondo motor apagado vs motor encendido y diferencia en nivel dB SPL..... 53
Tabla 8. Frecuencias Máximas Superiores de cada golpe de gravilla a 10Km/h. 60

Tabla 9. Frecuencias Máximas Superiores de cada golpe de gravilla a 30Km/h. 63

Tabla 10. Frecuencias Máximas Superiores de cada golpe de gravilla a 40Km. 66

Tabla 11. Desviación estándar y los niveles Leq de las tres mediciones a 10 Km/h con y sin recubrimiento de corcho y de lana de roca para las bandas de 200 a 6300 Hz. 67

Tabla 12. Desviación estándar y los niveles Leq de las tres mediciones a 30 Km/h con y sin recubrimiento de corcho y de lana de roca para las bandas de 200 a 6300Hz. 67

Tabla 13. . Desviación estándar y los niveles Leq de las tres mediciones a 10 Km/h con y sin recubrimiento de corcho y de lana de roca para las bandas de 200 a 6300 Hz. 67

Tabla 14. Niveles de Leq de cada medición y el ruido de motor (encendido y apagado) en dB SPL. 70

Tabla 15 . Sin recubrimiento vs lana de roca a 10 Km/h. 72

Tabla 16. Sin recubrimiento vs lana de roca a 30 Km/h. 74

Tabla 17. Sin recubrimiento vs lana de roca a 40 Km/h. 76

Tabla 18. . Sin recubrimiento vs corcho a 10 Km/h. 78

Tabla 19. Sin recubrimiento vs corcho a 30 Km/h. 80

Tabla 20. Sin recubrimiento vs corcho a 40 Km/h. 81

Tabla 21. Comparación de la diferencia de nivel con los dos recubrimientos a las tres velocidades. 86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Prueba de ruta sobre gravilla en Nardo, Italia. KEBIG, Johannes. Developing measures against gravel noise in cars. En: Frecuencias Prueba de campo. Figura 2.1. Chalmers University of technology. Applied acoustics. Göteborg, Sweden 2013. 2

Figura 2. Análisis espectral del ruido de grava KEBIG, Johannes. Developing measures against gravel noise in cars. En: Frecuencias relevantes del ancho de banda. Figura 1.1. Chalmers University of technology. Applied acoustics. Göteborg, Sweden 2013. 3

Figura 3. Rediseño del interior de una puerta del vehiculo Porsche panamera. KEBIG, Johannes. Developing measures against gravel noise in cars. En: Potencial de mejora en evaluación. Figura 4.3 Chalmers University of technology. Applied acoustics. Göteborg, Sweden 2013. 3

Figura 4. Fuentes de ruido que afectan al vehiculo. SANZ VILA. Carlos. Técnicas para el estudio acústico en vehículos (Noise, Vibration and Harshness). Universidad politécnica de Valencia. Figura 7. 2012. 5

Figura 5. Modelado de la estructura interna del coche. SANZ VILA. Carlos. Técnicas para el estudio acústico en vehículos (Noise, Vibration and Harshness). Universidad politécnica de Valencia. Figura 25. 2012. 5

Figura 6. Modelado interior/exterior del coche. SANZ VILA. Carlos. Técnicas para el estudio acústico en vehículos (Noise, Vibration and Harshness). Universidad politécnica de Valencia. Figura 28. 2012. 5

Figura 7. Diagrama de flujo de los posibles elementos estudiados en la NVH que afectan al vehículo. LEXUS. Technical Training. Fundaments of noise (Noise, Vibration and Harshness) Sección 1. Figura 1-21(traducción propia). 18

Figura 8. Posibles caminos de transmision de ruido estudiados en la NVH que afectan al vehiculo. LEXUS. Technical Training. Fundaments of noise (Noise, Vibration and Harshness). Sección 1. Figura 1-36. 19

Figura 9. Número de identificacion de un vehículo de acuerdo a la norma ISO 3780. Guisselle Montoya H. Ingeniería de tránsito. Página 4. 21

Figura 10. Carretera con bache. Guisselle Montoya H. Ingeniería de tránsito. Universidad nacional de ingeniería. Página 8. 23

Figura 11. Carretera con ahuellamiento. Guisselle Montoya H. Ingeniería de tránsito. Universidad nacional de ingeniería. Página 9. 23

Figura 12. Carretera con huecos. Guisselle Montoya H. Ingeniería de tránsito. Universidad nacional de ingeniería. Página 12. 24

Figura 13. Carretera con encalaminado. Guisselle Montoya H. Ingeniería de tránsito. Universidad nacional de ingeniería. Página 12. 24

Figura 14. Carretera con lodazal. Guisselle Montoya H. Ingeniería de tránsito. Universidad nacional de ingeniería. Página 13. 24

Figura 15. Bloques de un analizador FFT. Curso. Ingeniería de Telecomunicación. Medidas con el Analizador de Espectros. Figura 1. 27

Figura 1616. Pista seleccionada para las mediciones en gravilla. 36

Figura 1717. Banderines de demarcación de inicio y final. 37

Figura 180. Ubicación del micrófono de medición dentro del motor. 38

Figura 2119. Vista frontal del vehículo con el capo cerrado para iniciar la medición del ruido del motor. 38

Figura 2220. Micrófono ubicado a 50 cm de la salida del escape. 39

Figura 2421. Proceso de instalación del soporte del Sonómetro en el apoyacabeza del copiloto. 40

Figura 2522. Montaje de los dispositivos de medición en sus bases correspondientes al interior del vehículo. 41

Figura 23. Gravilla alojada en los surcos de la llanta previo a la medición a 40 Km/h. 42

Figura 24. Recubrimiento de corcho sobre el guardabarros delantero. 47

Figura 25. Recubrimiento de lana de roca en el interior del guardabarros trasero. 47

Figura 26. Recubrimiento de lana de roca sobre el guardabarros delantero. 48

Figura 27. Ubicación del sonómetro y micrófono de medición sobre sus respectivos soportes. 48

Figura 28. Filtro pasa banda (ecualizador paramétrico) utilizado para estimar las bandas de frecuencia del motor 50

Figura 29. Análisis espectral de antes (superior) y después (inferior) del filtro pasa banda. 50

Figura 30. Filtro pasa banda (ecualizador paramétrico) utilizado para estimar las bandas de frecuencia del escape. 51

Figura 31. Análisis espectral de antes (superior) y después (inferior) del filtro pasa banda. 52

Figura 32. Análisis de la pasada a 10 Km/h sobre gravilla. 54

Figura 33. Análisis de la pasada a 30 Km/h sobre gravilla. 54

Figura 34. Análisis de la pasada a 40 Km/h sobre gravilla. 55

Figura 35. Segmento de audio de un segundo a 10 Km/h. 55

Figura 36 Análisis en frecuencia de la captura de audio a 10 Km/h, tiempo (eje x) vs. frecuencia (eje y). 56

Figura 37. Gráfica y parámetros del filtro pasa-banda. 57

Figura 38. Análisis en frecuencia de la captura de audio a 10 Km/h aplicando un filtro pasa altos, tiempo (eje x) vs. frecuencia (eje y). 57

Figura 39. Análisis en frecuencia de la captura de audio a 10 Km/h en asfalto. 58

Figura 40. Análisis de la medición de gravilla vs asfalto. 58

Figura 41. División del audio en segmentos de un segundo; tiempo, (eje x) vs. frecuencia (eje y). 59

Figura 42. Análisis en frecuencia de la captura de audio a 30 Km/h, tiempo (eje x) vs. frecuencia (eje y). 60

Figura 43. Análisis en frecuencia de la captura de audio a 30 Km/h con el ruido de suspensión presente. 61

Figura 443. Análisis en frecuencia de la captura de audio a 30 Km/h filtrada con WaveLab 61

Figura 45. División del audio en segmentos de un segundo; tiempo, (eje x) vs. frecuencia (eje y). 62

Figura 46. Análisis en frecuencia de la captura de audio a 40 Km/h, tiempo (eje x) vs. frecuencia (eje y). 63

Figura 47. Análisis en frecuencia de la captura de audio a 40 Km/h con el filtro pasa-banda. 63

Figura 48. Señal filtrada con WaveLab. 64

Figura 49. Análisis en frecuencia de la captura de audio filtrada a 40 Km/h, tiempo (eje x) vs. frecuencia (eje y). 64

Figura 50. Análisis de la medición de gravilla vs. Asfalto a 40 km/h. 64

Figura 51. División del audio en segmentos de un segundo; tiempo, (eje x) vs. frecuencia (eje y). 65

Figura 52. Grabación sin recubrimiento a 10 km/h sobre gravilla. 68

Figura 53. Grabación sin recubrimiento a 30 km/h sobre gravilla. 68

Figura 54. Grabación sin recubrimiento a 40 km/h sobre gravilla. 69

Figura 55. Grabación a 10 Km/h con el recubrimiento de lana de roca. 71

Figura 56. Comparación sin recubrimiento (imagen superior) vs con recubrimiento (imagen inferior) a 10 Km/h. 71

Figura 57. Grabación a 30 Km/h con el recubrimiento de lana de roca. 73

Figura 58. Comparación sin recubrimiento (imagen superior) vs con recubrimiento (imagen inferior) a 30 Km/h. 73

Figura 59. Grabación a 40 Km/h con el recubrimiento de lana de roca. 75

Figura 60. Comparación sin recubrimiento (imagen superior) vs con recubrimiento (imagen inferior) a 40 Km/h. 75

Figura 61. Grabación a 10 Km/h con el recubrimiento de corcho. 77

Figura 62. Comparación sin recubrimiento (imagen superior) vs con recubrimiento (imagen inferior) a 10 Km/h. 77

Figura 63. Grabación a 30 Km/h con el recubrimiento de corcho. 78

Figura 64. Comparación sin recubrimiento (imagen superior) vs con recubrimiento (imagen inferior) a 30 Km/h. 79

Figura 65. Grabación a 40 Km/h con el recubrimiento de corcho. 80

Figura 66. Comparación sin recubrimiento (imagen superior) vs con recubrimiento (imagen inferior) a 40 Km/h. 80

Figura 67. Comparación del recubrimiento de lana de roca (imagen superior) vs el recubrimiento de corcho (imagen inferior) a 10 Km/h. 82

Figura 68. Comparación del recubrimiento de lana de roca (imagen superior) vs el recubrimiento de corcho (imagen inferior) a 30 Km/h. 83

Figura 69. Comparación corta del recubrimiento de lana de roca (imagen superior) vs el recubrimiento de corcho (imagen inferior) a 40 Km/h. 84

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Ruido de fondo del motor apagado vs motor encendido. 53

Gráfica 2. Comparación del recubrimiento de lana de roca vs sin recubrimiento a 10 Km/h. 72

Gráfica 3. Comparación del recubrimiento de lana de roca vs sin recubrimiento a 30 Km/h. 74

Gráfica 4. Comparación del recubrimiento de lana de roca vs sin recubrimiento a 40 Km/h. 76

Gráfica 5. Comparación del recubrimiento de corcho vs sin recubrimiento a 10 Km/h. 78

Gráfica 6. Comparación del recubrimiento de corcho vs sin recubrimiento a 30 Km/h. 79

Gráfica 7. Comparación del recubrimiento de corcho vs sin recubrimiento a 40 Km/h. 81

Gráfica 8. Comparación del recubrimiento de corcho vs recubrimiento de lana de roca sin recubrimiento a 10 Km/h. 82

Gráfica 9. Comparación del recubrimiento de corcho vs recubrimiento de lana de roca sin recubrimiento a 30 Km/h. 83

Gráfica 10. Comparación del recubrimiento de corcho vs recubrimiento de lana de roca sin recubrimiento a 40 Km/h. 84

Gráfica 11. Resultados globales a las tres velocidades (10, 30 y 40 Km/h). Escala de verdes (corcho) escala de azul (lana de roca). 85

INTRODUCCIÓN

El fenómeno de Lombard se puede presentar en el interior de un vehículo cuando se transita sobre el terreno de gravilla, este terreno está compuesto de piedras de tamaño variable; las cuales se alojan en el interior del labrado del neumático y por la rotación de la rueda son catapultadas hacia los guardabarros y la carrocería inferior del vehículo generando ruido. “Este fenómeno se caracteriza por generar un incremento involuntario en el nivel de voz cuando se sostiene una conversación en un lugar ruidoso; generando cambios en la sonoridad y el habla en general con respecto a la recepción del mensaje”. (Harlan Lane y Bernard Trane, 197l).

Este proyecto fue desarrollado mediante la implementación de dos recubrimientos (lana de roca y corcho) en el guardabarros de un vehículo de segmento C cuya función es amortiguar el impacto de la gravilla y así mismo reducir el nivel generado al interior del habitáculo, la efectividad de los mismos se midió con algunas de las consideraciones de la norma ISO 5128. Se realiza la caracterización del ruido de gravilla y se obtiene que está contenido en las bandas de 1/3 de octava de 200 a 6300 Hz, para confirmar la atenuación en dichas bandas se comparan los niveles Leq (promediados globales) con y sin recubrimiento; obteniendo niveles de 51.2 dB SPL (10km/h), 56.1 dB SPL (30km/h) y 57.9 dB SPL (40km/h) en las mediciones sin recubrimiento; comparando la medición sin recubrimiento vs lana de roca y corcho en una pista de 50 metros de largo, se obtiene que la disminución de nivel cuando se transita a una velocidad de 10 km/h fue de 1.24 dB SPL para el corcho y de 0.48 dB SPL para la Lana de roca, a una velocidad de 30 km/h fue de 2.46 dB SPL para el corcho y 2.69 dB SPL para la lana de roca y a una velocidad de 40 km/h fue de 4.08 dB SPL para el corcho y 3.72 dB SPL para la lana de roca. Se evidencia la disminución de nivel (dB SPL) con ambos materiales hasta 18.8 dB SPL en algunas bandas. Se debe tener en cuenta que la lana de roca presentó mayor disminución de nivel (dB SPL) en las bandas de 200 a 630 Hz y el mismo nivel a velocidades de 30 y 40 km/h en la banda de 800 Hz, por otra parte, el corcho fue capaz de disminuir mucho más el nivel en las bandas de 1000 a 6300 Hz.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1 ANTECEDENTES

1.1.2 Globales

En el año 2013, gracias a la división de acústica aplicada de la universidad de Chalmers, Suecia, el ingeniero Johannes Kebig planteó una propuesta para eliminar el ruido producto de choque de gravilla y demás, a partir del rediseño de las partes laterales, inferiores y traseras de un vehículo Porsche Panamera, haciendo uso de materiales como goma espuma, generando un aislamiento acústico interno. El ingeniero se basó en el concepto del "fenómeno acústico especifico que produce el terreno en la industria automotriz, ya que el ruido molesto que produce es percibido por los ocupantes de un vehículo, y es un problema con el que la industria ha tenido que lidiar" (Johannes Kebig) [1]. Esta investigación, plantea que la mejor forma para probar los resultados de la investigación, es a través de unas pruebas de campo con el vehículo.



Figura 1. Prueba de ruta sobre gravilla en Nardo, Italia. KEBIG, Johannes. Developing measures against gravel noise in cars. En: Frecuencias Prueba de campo. Figura 2.1. Chalmers University of technology. Applied acoustics. Göteborg, Sweden 2013.

Por otra parte, establece que, en el sector automovilístico, es importante la buena calidad de conducción (dinamismo de conducción), en donde no puede haber ruidos o molestias hacia los pasajeros del vehículo. Así mismo, el proyecto determinó las frecuencias sobre las que actúa determinado ruido de gravilla, a través del análisis wavelet de un vehículo conducido sobre este terreno, el resultado muestra que las frecuencias problemáticas se encuentran en medias y altas.

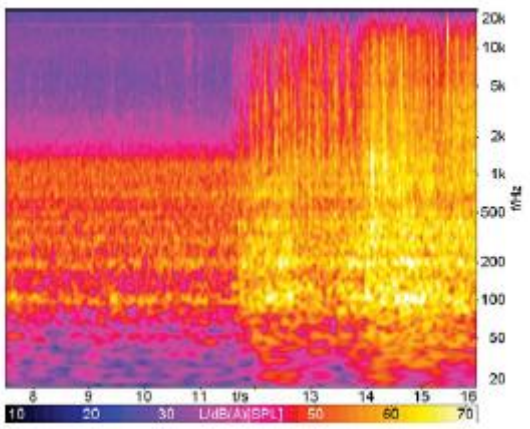


Figura 2. Análisis espectral del ruido de grava KEBIG, Johannes. Developing measures against gravel noise in cars. En: Frecuencias relevantes del ancho de banda. Figura 1.1. Chalmers University of technology. Applied acoustics. Göteborg, Sweden 2013.

Al final del proyecto, se logró rediseñar las partes del vehículo detalladas anteriormente, haciendo de la goma espuma un componente de aislamiento acústico interno, ya que como lo explica el autor, se necesitaba proteger este material del agua, nieve y demás, logrando la disminución del ruido producto de excitación de gravilla en el cuerpo del automóvil.



Figura 3. Rediseño del interior de una puerta del vehiculo Porsche panamera. KEBIG, Johannes. Developing measures against gravel noise in cars. En: Potencial de mejora en evaluación. Figura 4.3 Chalmers University of technology. Applied acoustics. Göteborg, Sweden 2013.

Así mismo, la universidad de Wonkwang en Corea en el año 2006, desarrolló una investigación minuciosa sobre la identificación de ruido inducido por las llantas en el interior de un automóvil, determinando que "la transmisión de sonido se da tanto por el aire como por la estructura de un vehículo, en la lucha contra el ruido, se requiere diferentes soluciones, ya que este problema puede ser transferido por caminos diferentes" (Kim Sam et al) [3]. Por otra parte, la investigación

dio a conocer la superación de ciertas dificultades con respecto al ruido inducido en una cabina de un automóvil, determinando ciertas variables con respecto a la velocidad del neumático.

Hablando un poco más a fondo en la industria automotriz, en 1997 la empresa alemana Daimler-Benz AG, asignó la división de investigación y tecnología en un proyecto acerca del uso de la fibra de vidrio para uso de fabricación de componentes estructurales de vehículos, ya que ciertos materiales en la primera y segunda capa de estructura estaban consiguiendo mucha más importancia, y se quería investigar acerca de un elemento que pudiese dar características parecidas a la fibra de carbono. Parte del interés de la compañía hacia la investigación del material en la estructura del vehículo parte de "la devoción por los paneles que, unidos junto con un compuesto laminado y núcleo aislante, podía ser usado también en la construcción de rieles en la fábrica" (Gaudenzi & Pascucci) [4]. Por otro lado, da ciertos parámetros, los cuales pueden ser identifican con el material, como lo es la reducción de peso, aislamiento acústico, térmico y demás.

Por otra parte, el ingeniero Carlos Sans Vila desarrollo su tesis de máster en ingeniería acústica titulada "Técnicas para el estudio acústico en vehículos (Noise, Vibration and Harshness)" (Carlos Vila) [2], en la cual define y aclara las técnicas existentes para el estudio acústico de vehículos en el campo del ruido y las vibraciones (NHV), conocida como una rama de la ingeniería automotriz la cual aumenta su importancia al hablar de la demanda tanto social como ambiental en donde se "invierten millones de dólares en el campo para desarrollar nuevos materiales y técnicas de disminución del nivel de ruido, que implican la evaluación y optimización de técnicas en el proceso de diseño para asegurar unas características adecuadas" (Carlos Vila) [2]. Por otra parte, el documento muestra un énfasis en automóviles de turismos, camiones, motocicletas, autobuses, trenes, etc. Para lograr un mejor dinamismo de conducción y una disminución significativa en el impacto de ruido (Figura 4, 5 y 6).



Figura 4. Fuentes de ruido que afectan al vehiculo. SANZ VILA. Carlos. Técnicas para el estudio acústico en vehículos (Noise, Vibration and Harshness). Universidad politécnica de Valencia. Figura 7. 2012.

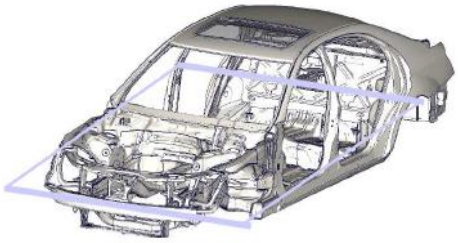


Figura 5. Modelado de la estructura interna del coche. SANZ VILA. Carlos. Técnicas para el estudio acústico en vehículos (Noise, Vibration and Harshness). Universidad politécnica de Valencia. Figura 25. 2012.

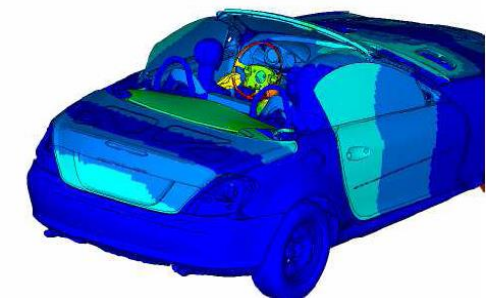


Figura 6. Modelado interior/exterior del coche. SANZ VILA. Carlos. Técnicas para el estudio acústico en vehículos (Noise, Vibration and Harshness). Universidad politécnica de Valencia. Figura 28. 2012.

1.2 DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA

La gravilla es un tipo de terreno compuesto de pequeñas piedras que, al ser transitado por un vehículo, se incrustan en el labrado de las llantas y con la rotación de las ruedas es lanzado hacia la carrocería inferior y guardabarros del vehículo, esto genera problemas dentro del habitáculo.

El ruido que genera la gravilla, afecta el confort de los ocupantes del vehículo y se conoce como el fenómeno de Lombard. Este fenómeno se caracteriza por generar un incremento involuntario en el nivel de voz cuando se sostiene una conversación en un lugar ruidoso; generando cambios en la sonoridad y el habla en general con respecto a la recepción de un mensaje. Por otro lado, este fenómeno está asociado con el aumento de estrés en el ser humano, ya que en algunos casos, como lo afirma el laboratorio de tecnología sobre el habla (propiedad de Panasonic) y el investigador (Jean Claude) [6] "está asociado con la información lingüística, o estrés de léxica, el cual reúne factores relacionados con el ambiente, la emoción y la carga de trabajo presentado por un problema general de comunicación de voz en un entorno ruidoso", afectando la dinámica de conducción, la cual investiga la respuesta del vehículo conforme a ciertos atributos (conducción, suavidad, dirección, frenada, confort, tracción y demás) que ofrecen un rendimiento deseado en el vehículo.

Las anteriores razones permiten cuestionar:

1.2.1 PREGUNTA PROBLEMA

¿Cómo reducir el fenómeno de Lombard, producto del choque de gravilla en carros de producción segmento tipo C a través de un tratamiento acústico?

1.3 JUSTIFICACIÓN

Esta propuesta fue planteada bajo la necesidad de mejorar la comodidad, el confort y la inteligibilidad al interior de vehículos pertenecientes al segmento tipo c a través del diseño de un tratamiento acústico, ya que, de esta forma, se interviene las partes afectadas por el choque del terreno de gravilla en la carrocería inferior del automóvil, aumentando la calidad acústica del mismo y disminuyendo la molestia auditiva en los pasajeros. Este problema se evidencia al encontrar que la industria automotriz busca encontrar nuevos materiales y técnicas de disminución del nivel de ruido desde el proceso de diseño y no solo en las etapas posteriores o post-venta.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 Objetivo general

Diseñar un tratamiento acústico para reducir el fenómeno de Lombard en un vehículo de segmento tipo C.

1.4.2 Objetivos específicos.

- Determinar las características de ruido generado por la gravilla en el guardabarros del vehículo.
- Determinar los materiales a usar teniendo en cuenta variables como costos, peso, resistencia térmica y resistencia al agua.
- Determinar el comportamiento acústico del sistema en el vehículo con y sin el material según parámetros de medición de la norma ISO 5128, analizando los niveles de presión sonora.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES

1.5.1 Alcances

- Lograr un mayor confort y comodidad en vehículos. Reduciendo una de las componentes más molestas de ruido.
- Reducir el estrés producido por exposiciones prolongadas al ruido de gravilla.
- Implementar el uso de un aislamiento acústico para vehículos de segmento tipo C, cuya función será reducir el fenómeno de Lombard.

1.5.2 Limitaciones.

- El monto para el desarrollo de la investigación es relativamente bajo y la propuesta debió limitarse al mismo impidiendo la posibilidad de medir con más de dos materiales.
- El recubrimiento acústico es externo por lo tanto los materiales a usar deben tener buena resistencia térmica, resistencia al agua y flexibilidad, estas propiedades reducen el número +de posibilidades a elegir.

2. METODOLOGÍA

2.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Este proyecto se desarrolla mediante investigación experimental, puesto que para la cuantificación de los resultados se realizan previamente diferentes experimentos (mediciones) analizando el comportamiento de las variables involucradas, como lo es el ruido producido por el choque de la gravilla y la relación del mismo con la velocidad del vehículo.

2.2 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

La información necesaria para determinar el grado de eficiencia de este proyecto es adquirida mediante algunas consideraciones de medición de la normativa ISO 5128, teniendo como variables el nivel de ruido presente en la cabina del vehículo, el ruido proveniente del golpe de la gravilla sobre los guardabarros y el chasis inferior del Vehículo.

2.3 HIPÓTESIS

El ruido generado por el choque de gravilla en los guardabarros es muy molesto, impide el dinamismo de conducción, generando molestias auditivas dentro del habitáculo del vehículo y daños en la parte inferior de la carrocería.

Mediante la implementación de un tratamiento acústico se reducirá el fenómeno de Lombard producto del choque de gravilla presente en la cabina del vehículo.

2.4 VARIABLES

2.4.1 Variables Independientes

Tipo del terreno (gravilla).

Ancho de Banda del ruido a Controlar

Características de los materiales a utilizar

2.4.2 Variables Dependientes

Fenómeno de Lombard.

Ruido estructural.

2.5 MATERIALES

- Sonómetro Bruel 2250.
- Micrófono de medición TEF Goldline 04.
- Interfaz de audio M- Audio Fast Track Ultra.
- Base para micrófono y sonómetro (construida a mano y a medida del vehículo a usar).
- Banderines de marca (inicio y fin de medición).
- Metro.
- Computador: TOSHIBA SATELLITE S55-B5157.
- Vehículo de segmento tipo C.

2.6 PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN

- Para la medición del ruido generado por el motor y el escape del vehículo. Se sitúa el micrófono de medición lo más cerca posible del múltiple de admisión y en un lugar donde no se generen la menor cantidad de vibraciones posible (parte frontal del motor con el capo cerrado); así mismo se coloca el micrófono de medición en la parte trasera del vehículo a 50 cm en eje con el escape (0 grados) y a una angulación de 45 grados de la salida del escape con una distancia de 50 cm. Con el propósito de caracterizar las bandas de frecuencias en las cuales se encuentra el ruido del motor.
- Analizar la fuente de ruido (gravilla) para determinar las diferentes componentes que este pueda presentar al chocar contra el guardabarros del vehículo. Para esto, se mide el nivel de ruido al interior del vehículo, mediante algunas de las consideraciones de la norma ISO 5128. Así mismo, se caracteriza el ruido del motor en ralentí para determinar sus características en frecuencia. El template del sonómetro utilizado no fue ajustado para analizar en función del tiempo sino en función de energía.
- Lo anterior se realiza llevando el vehículo a diferentes velocidades (10 Km/h, 30 Km/h, y 40 Km/h) en dos pistas de diferentes características (gravilla y asfalto) logrando así

determinar la variación en nivel de presión sonora (SPL) y frecuencia, según las revoluciones por minuto del motor (RPM). Considerando que a menor cantidad de revoluciones se presenta un menor SPL y sugiere que el ruido podrá no ser molesto a velocidades bajas.

- Teniendo en cuenta los resultados obtenidos por los pasos anteriores y al haber caracterizado la fuente de ruido, es posible seleccionar los materiales adecuados para el recubrimiento acústico.

- Diseñar 2 recubrimientos aptos para el amortiguamiento del impacto de gravilla que permitan conseguir una atenuación en el interior del vehículo, según el SPL y ancho de banda del ruido, se escogerán dos materiales para realizar la prueba.

- Implementar el recubrimiento acústico en una camioneta Nissan Frontier 2007 y volver a realizar la medición, llevando el vehículo a diferentes velocidades (10 Km/h, 30 Km/h, y 40 Km/h) en dos pistas de diferentes características (gravilla y asfalto) logrando así determinar la variación en nivel de presión sonora (SPL) y frecuencia.

- Comparar los niveles de obtenidos con y sin recubrimiento acústica. Para determinar cuál de los dos recubrimientos es más eficiente en la reducción de ruido.

- Aunque existen otros tipos de análisis acústico como es la perdida por transmisión la cual es una variable que está asociada con el aislamiento acústico calculada a partir del coeficiente de transmisión y perdida por inserción, no son útiles en este análisis debido a que el al ser un ruido generado por el impacto de la gravilla se busca corregir por medio de la amortiguación del impacto, para de esta manera reducir el ruido que genera al interior del vehículo. Debido a que los impactos de gravilla no se pueden controlar no se realiza medición exterior por la seguridad de los equipos de medición.

2.7 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE LA UNIVERSIDAD/LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD/NÚCLEOS PROBLEMÁTICOS

2.7.1 NÚCLEO PROBLEMÁTICO

Predicción y control de ruido: Este proyecto hace parte de este núcleo problemático debido a que trata directamente problemas relacionados con la acústica, como el aumento del confort en la cabina de un vehículo, por medio de la implementación de un recubrimiento acústica que atenué el ruido generado por el golpe de la gravilla contra los guardabarros y el chasis interior.

2.7.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA

Acústica y vibraciones: Este proyecto hace parte de la línea de investigación de acústica y vibraciones ya que para obtener la reducción eficaz del ruido que se genera en el habitáculo de un vehículo por el golpe de la gravilla, es necesario determinar el comportamiento del terreno cuando choca con los guardabarros y la carrocería inferior del vehículo, junto con los análisis acústicos de los materiales seleccionados para el diseño del tratamiento acústico; y posteriormente, analizar la eficiencia antes y después del tratamiento acústico en el vehículo.

2.7.3 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA

Tecnologías actuales y sociedad: Este proyecto, es parte de la línea de tecnologías actuales y la sociedad ya que diseña e implementa un aislamiento acústico para la investigación en reducción de ruido, basándose en materiales y dispositivos que hacen parte de la tecnología actual como sonómetros y software de análisis, beneficiando a un grupo social, al aumentar el confort acústico en el automóvil que se implemente el tratamiento acústico.

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1 MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL

3.1.1 Aislamiento Acústico

J. LLinares. A. LLopis. J. Sancho: (1991) comentan que el objetivo de realizar un aislamiento acústico es proveer comodidad a los ocupantes de una locación frente a sonidos no deseados dentro del mismo.

Los mecanismos que se utilizan en este aislamiento se encargarán de dificultar la propagación del sonido, o en términos energéticos, los que disminuyan la energía de las ondas acústicas.

Para poder controlar la transmisión del ruido dentro de una locación se debe tener en cuenta que el mecanismo de transmisión está formado por tres elementos básicos: la fuente de ruido, el canal que lo transmite y el espacio receptor.

La fuente se caracteriza por su localización y por la descripción del sonido que produce:

- Tipo de Fuente.
- Intensidad Sonora.
- Espectro en frecuencias.
- Variación temporal.

El canal de transmisión se constituye por todos los elementos a través de los cuales llega el sonido desde la fuente hasta el receptor. En el caso de un automóvil son:

- Chasis.
- guardabarros.

Por último, el canal de transmisión se constituye por los elementos constructivos de la locación y como la vibración de estos elementos produce las ondas sonoras en los mismos.

3.1.2 Pérdida Por Transmisión (TL)

La USAC de Guatemala comenta que para determinar el aislamiento acústico de diferentes materiales y sus estructuras se utilizan dos parámetros: la pérdida de transmisión, (TL), y la clase de transmisión sonora, STC (Estados Unidos). La pérdida de transmisión, (TL), es un parámetro expresado en dB que depende de la frecuencia e indica en cuánto se atenúa la energía sonora incidente al atravesar un material. Así, una pérdida de transmisión de 30 dB SPL significa que la

energía sonora que pasa al otro lado es 30 dB SPL menor que la energía incidente; la ecuación para el cálculo de TL se muestra a continuación:

$$TL = 10\ log \frac{1}{a_t}$$

En donde el coeficiente de transmisión a_t es igual a:

$$a_t = \frac{w_{transmitida}}{w_{incidente}}:$$

La clase de transmisión sonora, STC, es de valor promediado de la pérdida de transmisión a varias frecuencias. Es un valor único que permite evaluar rápidamente la calidad del aislamiento acústico de un material; asociado a la privacidad de la palabra. Así, un valor de STC inferior a 25 implica que la voz normal se entiende.

3.1.3 Pérdida por Inserción (IL)

Como comenta A.D Pierce, La pérdida por inserción (IL) representa la reducción en dB SPL, cuando entre emisor y receptor se inserta un material; los efectos de difracción y refracción habrán sido tomados en cuenta y eliminados. Esta pérdida se debe a una combinación del sonido reflejado y absorbido por el mismo.

3.1.4 Transmisión de ruidos de impacto

Cuando se habla de ruido de impacto se habla de golpes de corta duración sobre los elementos constructivos de la locación receptora y lo que los hace vibrar, en otras palabras, se genera por choque entre sólidos (J. LLinares. A. LLopis. J. Sancho. 1991). En el impacto las vibraciones se transmiten a los elementos constructivos y esto provoca ondas sonoras dentro de la locación.

Las vibraciones de los elementos estructurales generan un ruido de muy corta duración que se propaga fácilmente al interior del recinto, con muy poca atenuación, por lo que el ruido producido por el impacto también será de corta duración (J. LLinares. A. LLopis. J. Sancho. 1991).

Los mecanismos de aislamiento a ruido de impacto buscan disminuir la vibración de un elemento constructivo amortiguando el impacto para que este transmita mucha menor energía; Es importante realizar un adecuado diseño de las uniones con los elementos estructurales, para evitar la propagación de las vibraciones a los mismos (J. LLinares. A. LLopis. J. Sancho. 1991). [8]

3.1.5 Caracterización de materiales acústicos

Ernesto Julía Sanchis y su documento de investigación modelización, simulación y caracterización acústica de materiales para su uso en acústica arquitectónica, destaca la importancia de los materiales a la hora de realizar un diseño de aislamiento acústico y demás usos, como dice el autor "la acústica está presente en prácticamente todos los ámbitos que ocupan nuestras vidas, música, ingeniería medicina, salud, etc." (Ernesto Julía Sanchis) [16].

Los materiales acústicos poseen diferentes parámetros como los siguientes:

- α_n = coeficiente de absorción acústica.
- Z = impedancia característica compleja
- Z_0= impedancia de referencia, aire ($Z_0 = \rho_0 + C_0$)
- ρ_0 = densidad del aire
- ρ_m = densidad volumétrica del material (en Kg/m^3)
- ρ_f = densidad de la fibra del material (en Kg/m^3).
- σ = resistencia especifica al flujo (en N*s/m^4).
- Características térmicas del material.
- Impedancia característica compleja
- Constante de propagación compleja.

Siendo estas dos últimas "los parámetros que relacionan directamente la absorción del material" (Ernesto Julía Sanchis) [16].

Los materiales en términos de construcción, poseen un índice de resistencia al fuego que se mide a través de toda la estructura (no de un solo componente) y en horas, como bien lo indica el documento de la empresa Armstrong soluciones acústicas.

La resistencia al fuego es una de las variables más importantes cuando se habla de materiales acústicos, las consecuencias de una mala resistencia al fuego pueden ser totalmente devastadoras, ya sea por ignición o por humo tóxico proveniente de la ignición de materiales. En el documento mencionado anteriormente, se habla de la norma británica BS476, esta es la norma para los test de estándares británicos en materiales de construcción, contempla la estabilidad de los materiales, propagación de fuego, etc.

A través del portal de las normas británicas de la empresa TATA Steel (colorcoat), se observa que la BS476 parte 6 indica la tasa de liberación de calor durante la combustión, esto es importante debido a que afecta la temperatura del exterior.

Por otro lado, a través del portal mencionado anteriormente, también es posible observar la norma BS476 parte 7, la cual habla sobre la prueba de la propagación de la flama. Esta prueba se realiza con el objetivo de conocer cuál es la capacidad para extender el fuego de un material, dando como resultado un valor de uno (1) a cuatro (4) siendo uno el mejor y cuatro el peor.

Por otro lado, ATECOS (la herramienta de libre acceso) ofrece información relevante con respecto a temas de construcción sostenible. Esta herramienta describe como buenos materiales con propiedades de aislamiento térmico los minerales, vegetales y demás).

En este documento, se establecen varios factores que tienen gran importancia en este tema:

- Λ: conductividad térmica
- M: resistencia a la difusión del vapor de agua.
- Cp: calor especifico.

La resistencia a la difusión del vapor de agua es de suma importancia, debido a que "si el aislamiento permite que la humedad del aire se ponga en contacto con la superficie fría, se condensa y se moja el aislamiento, generando problemas de higiene y moho" (ATECOS) [11]. Por otra parte, en términos de conductividad térmica, es un factor realmente importante, debido a que "cuanto más bajo sea su valor, más capacidad aislante tiene el material" (ATECOS) [11]

El artículo presentado anteriormente y desarrollado por ATECOS también da una información relevante acerca de los siguientes aspectos: clasificación según de su origen, estructura interna, resistencia a ciertos niveles de temperatura.

- Estructura de tipo fibroso, granular; de origen natural (sea mineral) o de origen sintético.

Por otro lado, ATECOS da una lista de clasificación por origen:

- Sintético orgánico (polietileno expandido, extruido, Poliuretano, etc.).
- Inorgánico (lanas minerales, Hormigón, consolidado, etc.).

- Natural orgánico (corcho, madera, fibra de madera, pasta de celulosa, lana de oveja.

Así mismo, nos presenta información suficiente con la cual se construye la siguiente tabla con la clasificación de temperaturas máximas de empleo.

Material	Temperatura máxima °C
Aislante cerámico	1500
Lana de roca	750
Lana de vidrio	500
Espuma elastomérica	-50 hasta 175
Espuma de polietileno	10 hasta 90
Espuma de poliuretano	-50 hasta 175
Poliestireno extruido	75
Poliestireno expandido	70

Tabla 1. Características de aislamiento térmico de materiales.

3.1.6 NVH (noise, vibration, and harshness)

En la actualidad, las empresas dedicadas a la fabricación de autos buscan una forma de aumentar la calidad de sus productos, afianzando la relación con sus clientes y aumentando sus ventas en el mercado otorgando una mejor insonorización de la cabina y reduciendo ruidos que afectan el confort o los ocupantes de un vehículo. La Ingeniería NVH (noise, vibration, and harshness) traducido al español ruido, vibración y dureza estudia la importancia de la retroalimentación que da una persona o cliente de forma sonora (por la escucha) o táctil de un vehículo; como ejemplo, se puede tomar en la parte acústica cualquier sonido que se pueda identificar como un chillido o ruido que provenga de cualquier parte del vehículo, y para la parte de retroalimentación por el tacto de la persona se puede dar como ejemplo la respuesta a la vibración del asiento, un zumbido en el volante o vibración indeseada. La retroalimentación se da a través de los componentes de un automóvil, que da paso a la siguiente clasificación de NVH:

- Ruido por tren de tracción.
- ruido de la carretera.
- ruido aerodinámico.
- ruido estructural.

Por otro lado, Carlos Vila afirma que [2] “se ha convertido en un área cada vez más importante en el diseño de los vehículos, como resultado de la búsqueda del aumento de la calidad de los mismos”.

Este tipo de conceptos está asociado integralmente con la dinámica de conducción, la cual estudia la respuesta del vehículo a ciertos atributos como la suavidad de rodaje, la conducción, sensibilidad de dirección, respuesta de frenado, confort (acústico) y capacidad de tracción, junto con el estudio de la estructura interna del mismo, como lo es el diseño del chasis, la caja y la columna de la dirección, la efectividad de la suspensión, estructura o chasis (esqueleto), carrocería externa, neumáticos, y sistemas electrónicos de ayuda como el ABS (antibloqueo de frenos), ESP (control de estabilidad y demás); todo para ofrecer la máxima calidad en el sector automotriz.

Así mismo, las categorías de vehículos entran en el campo del estudio de la dinámica de conducción, ya que dependiendo del segmento cambian las dimensiones del vehículo y las normativas de seguridad que lo rigen.

Por otro lado, cuando se habla de clasificación NVH también se habla de fuentes de vibración, cuyas características en frecuencia y tiempo son de vital importancia. Algunas perturbaciones pueden ser aleatorias, como ejemplo, el contacto de los neumáticos del vehículo con un terreno determinado. Por otra parte, las estructuras de los vehículos pueden producir altos niveles de vibración no deseadas, uno de los elementos del vehículo que pueden causar este problema es el motor, debido a que en el arranque y en la etapa de funcionamiento, se produce una fuente de vibración, la cual varia con el régimen de funcionamiento del mismo, este problema es causado debido a la fuerza de cada pistón, manipulación o estilo de conducción del vehículo (sea adaptándose o no al tipo de calzada por el cual se transite) , oscilación del cigüeñal al acelerar, y demás; el problema de esto radica al momento de aislar el movimiento no deseado o excesivo del

motor junto con la exaltación de los movimientos que se presenta en el chasis que generan un inestabilidad en el vehículo (figura 7).

Una forma bastante adecuada para el análisis de este tipo de problema son los analizadores de espectro; así mismo, ayuda a identificar las bandas de frecuencia del ruido para posteriormente desarrollar un método de control. Así mismo, puede ser necesario el uso de filtros en este tipo de programas para eliminar todo lo que no sea de importancia y dejar el audio lo suficientemente limpio para el análisis.

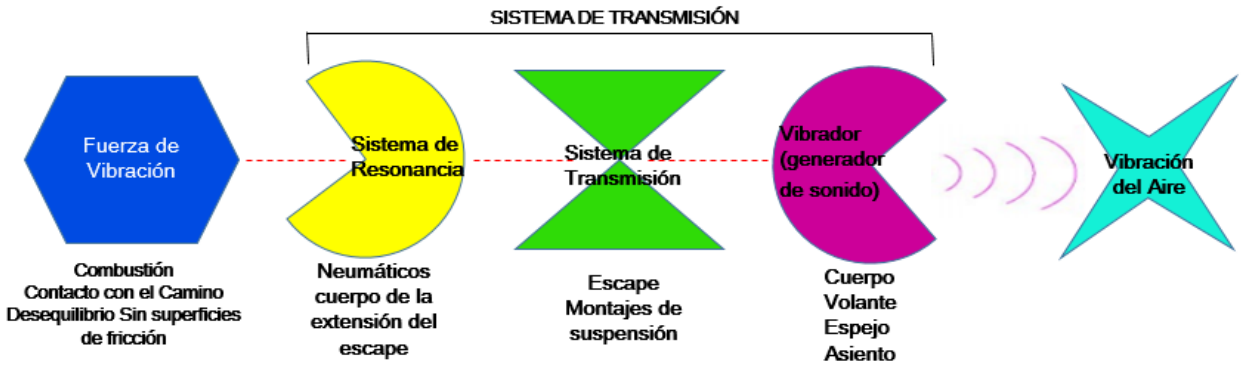


Figura 7. Diagrama de flujo de los posibles elementos estudiados en la NVH que afectan al vehículo. LEXUS. Technical Training. Fundaments of noise (Noise, Vibration and Harshness) Sección 1. Figura 1-21(traducción propia).

La compañía automotriz Lexus en su artículo Fundaments of noise da las principales fuentes que producen algún tipo de vibración (figura 8) las cuales se dividen en tres aspectos:

- Motor
- Transmisión
- Neumáticos.

“Cada una de estas fuentes generalmente giran a velocidades diferentes o frecuencias en un vehículo. Un componente problema se puede asociar a uno de los grupos de origen si la frecuencia se puede determinar” (LEXUS Fundaments of noise) [13].

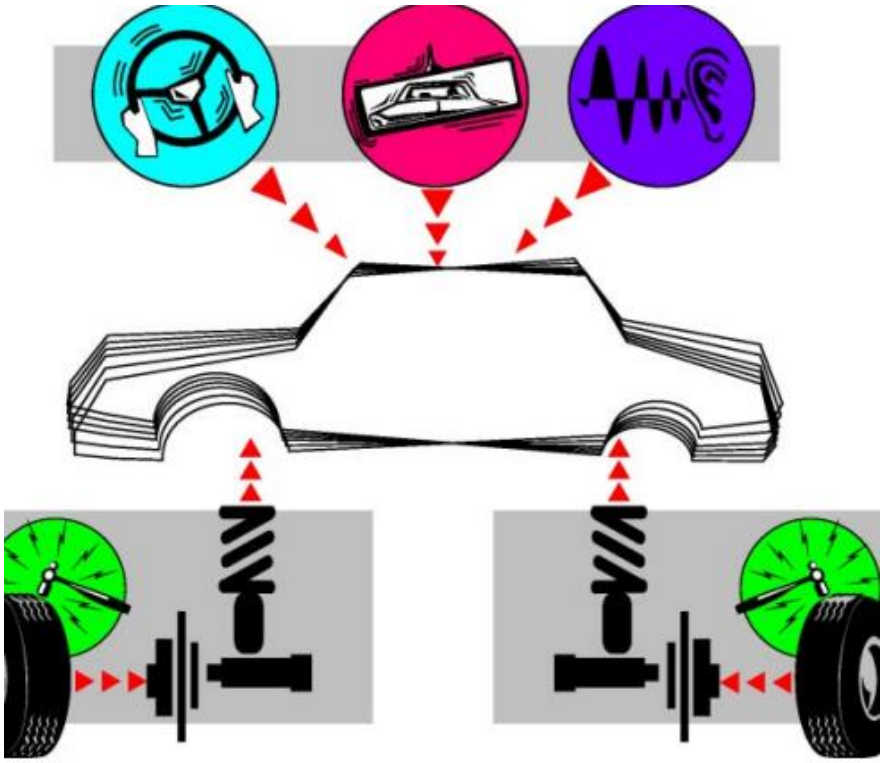


Figura 8. Posibles caminos de transmision de ruido estudiados en la NVH que afectan al vehiculo. LEXUS. Technical Training. Fundaments of noise (Noise, Vibration and Harshness). Sección 1. Figura 1-36.

3.1.7 Clasificación por segmento.

La clasificación de los vehículos por segmento se refiere a automóviles de tipo micro coche, tipo A, tipo B, tipo C, tipo D, tipo E y tipo F, cada uno aumentando sus dimensiones, número de pasajeros y peso total de carga al aumentar la letra.

En el mundo automotriz, los vehículos suelen agruparse de diferentes maneras, puede ser:

- según el segmento.

- según el tipo de carrocería.

- según su precio.

-según su uso.

- Según su tamaño.

Sin embargo, la forma más completa de clasificarlos es por segmentos, esta forma reúne los vehículos teniendo en cuenta la potencia y el precio respectivo, sin dejar de lado algunas otras características.

Por otro lado, existen 7 categorías de clasificación por segmento, estas categorías se nombran con las letras del alfabeto (de A hasta la F) haciendo una excepción con una introducida recientemente la cual se nombre como micro coches. La lista de segmentos se muestra a continuación:

- Micro coches: automóviles de dos plazas, de tamaño inferior al segmento A, de tamaño inferior a 3.3 metros.
- Tipo A: automóviles de cuatro plazas de tamaños más pequeños, actualmente entre 3.3 y 3.7 metros.
- Tipo B: tienen lugar para cuatro adultos y un niño; los hatchback y monovolúmenes rondan los 3.9 metros, mientras que los sedanes y familiares llegan a los 4.2 metros.
- Tipo C: agrupa vehículos pueden sedanes, Vehículo utilitario deportivo (SUV), todoterrenos (4x4) hasta autos deportivos de tracción trasera o delantera.
- Tipo D: también tienen cinco plazas, pero tienen motores más potentes y maletero más grande. El tamaño es de aproximadamente 4.6 metros.
- Tipo E: son los modelos más grandes de las fábricas de automóviles generalistas. El tamaño promedio es de 4.8 metros.
- Tipo F: comprenden sólo modelos de alta gama. Siempre superan los 5 metros.

Por otra parte, Guisselle Montoya muestra que cada vehículo debe estar identificado según parámetros establecidos por la norma ISO 3780 (identificación del fabricante de vehículos), la cual específica y establece a nivel mundial la identificación de vehículos (figura 9), en donde se observan los siguientes factores:

- NIV (número de identificación del vehículo).
- Numero de chasis y motor

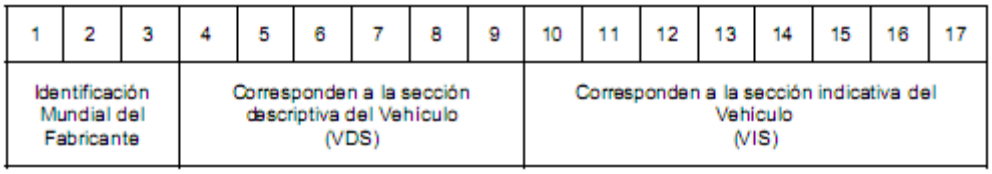


Figura 9. Número de identificacion de un vehículo de acuerdo a la norma ISO 3780. Guisselle Montoya H. Ingeniería de tránsito. Página 4.

3.1.8 Labrado de las llantas

La empresa fabricante de Neumáticos Michelin describe que, exceptuando las llantas especiales de alto empuje, como las de algunas máquinas de la construcción, tractores y algunas de uso muy especial, todas las llantas en la zona de contacto con el pavimento tienen unos surcos de diferentes formas de acuerdo al uso del mismo. Estos surcos tienen la función de permitir la salida del agua, el lodo, o la nieve, que tiende a acuñarse debajo del neumático cuando el vehículo rueda en caminos cubiertos por algunos de estos materiales.

Contrariamente a lo que se piensa, estos surcos no juegan un papel trascendental en la adherencia de la llanta con el concreto limpio y seco, pero su profundidad es muy importante en caminos húmedos y cubiertos de nieve, sin ellos, la rueda puede literalmente “flotar” producto de agua apresada debajo de la misma y perder toda la adherencia al camino y con ello verse comprometida la estabilidad del vehículo. Por este motivo las autoridades viales de muchos países establecen; límites mínimos de profundidad de estos surcos a partir de los cuales el neumático no puede seguir circulando.

3.1.9 Influencia de la presión de aire en la estabilidad.

La empresa fabricante de Neumáticos Michelin comenta que cuando un neumático se infla en exceso, es más rígido y “rebota” con mayor facilidad en los obstáculos de la vía, durante estos rebotes la llanta puede perder el contacto con el suelo y con ello la capacidad direccional de las ruedas delanteras o la posibilidad de derrape lateral en las curvas en cualquiera de las ruedas. Así por el contrario si el neumático se infla menos de lo requerido, la llanta sufrirá mayor desgaste y deformación.

Existe una gran variedad de surcos y combinación de dimensiones de las llantas, lo cual es una indicación de que no existe un diseño óptimo de la banda de rodadura. Cuanto mayor sea la superficie de contacto de la llanta sobre el pavimento menor será la presión superficial y aumentará la adherencia. Por ello llantas con gran superficie de contacto son los más adecuados para transmitir la máxima tracción. En general los tacos (dibujo positivo) y los surcos (dibujo negativo) se reparten de manera homogénea sobre la banda de rodadura. Las llantas estrechas suelen tener un porcentaje alto en torno al 70% de tacos frente a surcos. En los neumáticos anchos el porcentaje de tacos disminuye hasta el 60%. Esto se debe al importante cometido que realizan los surcos recogiendo el agua del suelo mojado y evacuándola. Los dibujos presentan una gran cantidad de ranuras de menor tamaño distribuidas regularmente pero no necesariamente comunicadas entre sí. Su función es reducir el ruido producido por la llanta al rodar. Esta complicada combinación responde a los requisitos que debe cumplir la banda de rodadura como son: máxima transmisión de fuerzas, distancia de frenado corta, desgaste regular, alta estabilidad en curvas, buena adherencia, ofrecer seguridad en condiciones sobre suelo mojado o nieve, nivel de ruido reducido, y estética del dibujo.

3.1.10 Clases de Llantas

La empresa Michelin tiene varias clasificaciones de Neumáticos dentro de las que se encuentran:

- Simétricas: en la sección vertical de la banda de rodadura de la llanta, el dibujo debería ser simétrico a los dos lados de esa sección, son los más comunes.
- Direccionales: El dibujo indica la dirección de la marcha, de manera que establece como se montarán las llantas, por norma general, sus ranuras describen una forma de V. principalmente son neumáticos deportivos, muy atractivos para el gran público.
- Asimétricos: Para aumentar el apoyo a alta velocidad, el lado exterior de la cubierta tiene muy poco dibujo, que se concentra en el interior para ofrecer un mayor agarre en condicione como con suelo mojado, son llantas deportivas con elevados códigos de velocidad.

3.1.11 Tipos de terreno

Guisselle Montoya de la universidad de ingeniería civil, determina que el terreno por el cual se transita “es un factor que influye directamente en el tráfico, es así que la velocidad que alcanza un vehículo que circula por una trocha, difiriere significativamente de la velocidad que este puede alcanzar al transitar una vía pavimentada”.

Asfalto: Es un material viscoso que se utiliza junto con gravilla o arena para pavimentar caminos.

Gravilla: la grava es un terreno que puede ser formado intencionalmente o puede ser producto de la naturaleza, se compone de piedras de diferentes tamaños (entre 2 y 64 mm).

El artículo presentado anteriormente aclara diferentes tipos de pavimento los cuales son enseñados a continuación.

Bache: carretera con deformación y bordes irregulares (figura 10).



Figura 10. Carretera con bache. Guisselle Montoya H. Ingeniería de tránsito. Universidad nacional de ingeniería. Página 8.

- Ahuellamientos: deformaciones del pavimento o de la carretera que afecta uno o más carriles (figura 11).



Figura 11. Carretera con ahuellamiento. Guisselle Montoya H. Ingeniería de tránsito. Universidad nacional de ingeniería. Página 9.

- Huecos: son resultado del estancamiento de aguas sobre caminos (figura 12).



Figura 12. Carretera con huecos. Guisselle Montoya H. Ingeniería de tránsito. Universidad nacional de ingeniería. Página 12.

- Encalaminado: Están presentes en terrenos compuestos por gravilla o materiales granulados y son producto de las vibraciones del tránsito vehicular (figura 13).



Figura 13. Carretera con encalaminado. Guisselle Montoya H. Ingeniería de tránsito. Universidad nacional de ingeniería. Página 12.

- Lodazal: Es un tipo de camino poco transitable en especial cuando hay lluvia o agua presente (figura 14).



Figura 14. Carretera con lodazal. Guisselle Montoya H. Ingeniería de tránsito. Universidad nacional de ingeniería. Página 13.

3.1.12 Procesamiento digital de señales

“Las señales son patrones codificados que representan información; una señal se define como una magnitud física que varía en tiempo y espacio o cualquier otra variable independiente y permite transmitir información” (Barchiesi, J. V. 2008)
El procesamiento digital de señales (DSP) está enfocado al análisis y el procesamiento de señales digitales, es decir que están discretizadas en función de la amplitud y el tiempo.

Este análisis requiere de dos componentes básicos: una máquina calculadora (computador) y un algoritmo (software de análisis)

El procesamiento digital de señales, como lo afirma Barchiesi, J. V. (2008) es un área de la Ingeniería Electrónica que se concentra en la representación, transformación y manipulación de señales, y de la información contenida en ellas.

El primer tipo de procesamiento electrónico fue el procesamiento análogo, el cual se lleva a cabo por medio de circuitos electrónicos compuestos por resistencias, capacitores, amplificadores operacionales, etc.

Barchiesi, J. V. (2008) Añade a la característica anterior la de manejar la amplitud en forma discreta, la cual es una condición necesaria para que la señal pueda ser procesada en un computador. La amplitud de la señal sólo puede tener un número finito de valores diferentes.

3.1.13 Procesamiento de Señales en Tiempo Discreto (Discrete-Time Signal Processing)

Según Barchiesi, J. V. (2008) la discretizacion en el tiempo es la diferencia más importante entre el procesamiento digital y el procesamiento análogo.

Modifica las fórmulas de las transformadas, convolución, correlación, etc., e introduce un posible problema que no existe en el mundo análogo, denominado aliasing el cual se origina cuando la tasa de muestreo es insuficiente, generando una pérdida irrecuperable de la información contenida en la señal.

Por otro lado, la discretización en la amplitud puede ser casi imperceptible, como cuando se efectúan los cálculos en punto flotante con doble precisión (cerca de 15 decimales) en un lenguaje de programación de alto nivel, o notoria, si se cuantiza la señal con pocos bits. La discretización en la amplitud puede provocar algunos efectos indeseados, tales como.

- Si proviene de la conversión A/D de la señal, es equivalente a sumarle un cierto tipo de ruido, el cual se denomina "ruido de cuantización".
- Si afecta a los cálculos, y es significativa, puede producir errores importantes, e incluso inestabilidad en algunos sistemas.

3.1.14 Transformada de Fourier

Barchiesi, J. V. (2008) La transformada de Fourier es una transformación matemática empleada para transformar señales entre el dominio del tiempo y la frecuencia y viceversa.

En el caso de una función periódica en el tiempo, la transformada de Fourier se puede simplificar para el cálculo de un conjunto discreto de amplitudes complejas, llamado coeficientes de las series de Fourier. Estos representan el espectro de frecuencia de la señal del dominio-tiempo original.

La transformada de Fourier es una aplicación que hace corresponder a una función f de valores complejos y definida en la recta, con otra función g definida como:

$$g(\in) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-i \in x} dx$$

Ecuación 1. Transformada de Fourier en función las variables x y asociadas a dimensiones como el tiempo (s) y frecuencia (Hz). Barchiesi, J. V. (2008). Introducción al Procesamiento Digital de Señales. Valparaíso: Ediciones Universitarias de Valparaíso. Sección 3.3. Ecuación (3.28) pág. 188.

El factor, que acompaña la integral en definición facilita el enunciado de algunos de los teoremas referentes a la transformada de Fourier. Aunque esta forma de normalizar la transformada de

Fourier es la más comúnmente adoptada, no es universal. En la práctica las variables x y ϵ suelen estar asociadas a dimensiones como el tiempo (s) y frecuencia (Hz) respectivamente, si se utiliza la fórmula alternativa:

$$g(\epsilon) = \frac{\beta}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-i\beta x} dx$$

Ecuación 2.Ttransformada de Fourier en función de asociada a dimensiones como el tiempo (s) y frecuencia (Hz). Barchiesi, J. V. (2008). Introducción al Procesamiento Digital de Señales. Valparaíso: Ediciones Universitarias de Valparaíso. Sección 3.3. Ecuación (3.29) pág. 189.

La constante β cancela las dimensiones asociadas a las variables obteniendo un exponente adimensional.

Sus aplicaciones son diversas, en áreas de la ingeniería, la física, la ciencia, la teoría de los números, el procesamiento de señales, la propagación de ondas y otras áreas. En procesamiento de señales la transformada de Fourier suele considerarse como la descomposición de una señal en componentes de frecuencias diferentes, es decir, g corresponde al espectro de frecuencias de la señal f.

3.1.15 Aplicaciones en software de análisis

Una buena forma de analizar una señal o una grabación es a través de un analizador espectral FFT (transformada de Fourier). Estos analizadores obtienen el espectro de una señal a través de un algoritmo que permite calcular la transformada discreta de Fourier a partir del dominio del tiempo. El programa toma los valores discretos de la señal aplicada a la entrada de un filtro, eliminando ruidos no deseados que luego se muestrea y se codifica, generando una señal digital y finalmente el espectro de la misma.

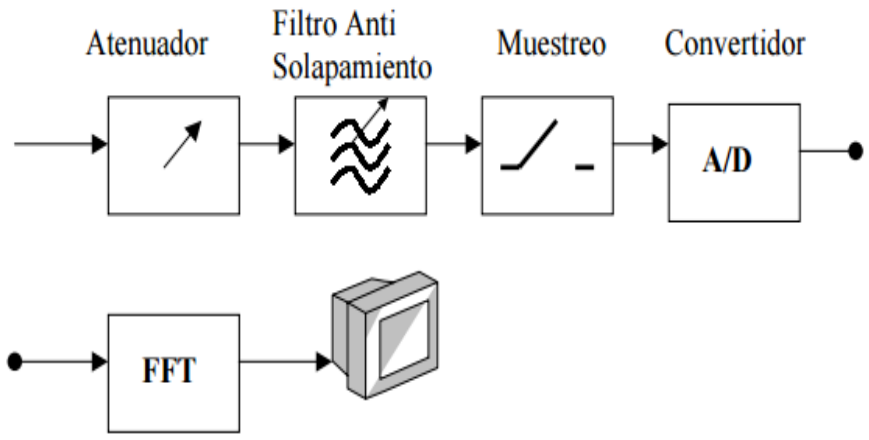


Figura 15. Bloques de un analizador FFT. Curso. Ingeniería de Telecomunicación. Medidas con el Analizador de Espectros. Figura 1.

Los analizadores representan un número de líneas (las cuales son normalmente 256, 400 y 800) que corresponden a una banda de frecuencia determinada; de estas líneas depende la resolución del analizador o la calidad y precisión del mismo, haciendo posible un acercamiento o alejamiento de la zona que se desea analizar directamente en la pantalla.

3.1.16 Análisis Tiempo, Energía y Frecuencia (TEF)

La empresa McSquared System Design Group, Inc. Establece el tiempo, la energía y la frecuencia como tres aspectos importantes al realizar un análisis de señales de audio, se debe tener en cuenta el contenido de frecuencia (espectro) y el cambio de energía a lo largo del tiempo.

Al analizar una señal se puede hacer uso de varias herramientas digitales (como ecualizadores paramétricos, tamaño de la FFT y sus funciones de ventana) que ayudan a cumplir los objetivos propuestos.

3.1.16.1 Ecualizador Paramétrico

La información que proporciona adobe explica que el ecualizador paramétrico proporciona mayor control de la ecualización tonal, control total de la ganancia, los ajustes de frecuencia y el Q.

El Ecualizador paramétrico utiliza los filtros IIR (Respuesta infinita al impulso) de segundo orden, con una resolución en frecuencia muy precisa y mejor procesamiento. Por ejemplo, puede aumentar con precisión una banda de frecuencia.

3.1.16.2 Tamaño de la FFT

Adobe permite especificar el tamaño de la Transformada rápida de Fourier, determinando la precisión entre el paso del dominio del tiempo a la frecuencia. Para reducir el efecto transitorio en el audio de audio de impacto, se seleccionan valores de muestreo entre 1024 y 8192 que funcionan bien en este tipo de aplicación.

3.1.16.3 Resolución de frecuencia: “zero-padding” y “windowing”

Los impactos de gravilla ocurren en fragmentos de tiempo subjetivamente cortos, de ahí que, el análisis del contenido frecuencial debe ser exhaustivo, con el fin de que el sistema de detección logre una discriminación acertada. Para ello se recurre a procesos explicados a continuación.

En primer lugar, la función “zero-padding” funciona como una herramienta para mejorar y aprovechar el proceso matemático de la FFT. Esta función aumenta la resolución de frecuencia al momento de producir el análisis del espectro de la señal. La referencia está en la adición de ceros en una muestra.

“Para aumentar la resolución de frecuencia en el análisis del espectro se toman más muestras para el algoritmo FFT. Los números más utilizados para la resolución FFT son N = 256, 512, 1024, 2048, 4096 y 8192. Si sólo es de interés el cálculo del espectro de 64 muestras y se quiere aumentar la resolución de frecuencia de 64 a 1024, se debe extender la secuencia de 64 muestras de audio mediante la adición de ceros hasta la 40 longitud 1024 y luego realizar una FFT. Esta técnica se llama zero-padding” (Zolzer, 2011, p. 26)

Posteriormente la función de ventaneo o “windowing” permite corregir el efecto fuga que se presenta en la FFT al procesar una parte de una señal de N muestras. Zolzer (2011) ejemplifica en la forma como el espectro de un coseno se ve afectado por frecuencias cercanas. Dice que al aplicar una función de ventana como “Blackman” o “Hanning”, el fenómeno se reduce.

3.1.16.4 Funciones de ventana

Al realizar una FFT (Transformada rápida de Fourier) de una señal puede dar una buena comprensión, es importante conocer las limitaciones de la FFT y cómo mejorar la claridad de la señal usando Funciones Ventana.

Las ventanas reducen la amplitud en los límites discontinuos de cada secuencia finita adquirida por el conversor digital. Para esto se multiplica el registro de tiempo por una ventana de longitud finita con una amplitud que varía poco a poco hacia cero. Esto hace que los extremos de la forma de onda se encuentren y se obtenga una forma de onda continua y sin transiciones fuertes. (National Instruments, 2015).

3.1.16.5 Clases de ventana

Los diferentes tipos de ventanas que se pueden aplicar dependiendo de la señal. Para comprender cómo una ventana determinada afecta el espectro de frecuencia, se necesita comprender más sobre las características de frecuencia de las ventanas.

Una gráfica real de una ventana muestra que la característica de frecuencia de un espectro continuo con un lóbulo principal y varios laterales. El lóbulo principal se centra en cada componente de frecuencia de la señal de dominio del tiempo y los lóbulos laterales se aproximan a cero. La altura de los lóbulos laterales indica el efecto que la función de ventanas tiene en las frecuencias alrededor de los lóbulos principales. La respuesta del lóbulo lateral de una señal puede dominar la respuesta del lóbulo principal de una señal débil cercana. Por lo general, los lóbulos laterales más bajos reducen la fuga en la FFT medida, pero aumentan el ancho de banda del lóbulo mayor. El rango de corte del lóbulo lateral es el rango de caída asintótica de los picos del lóbulo lateral. Al aumentar el rango de caída del lóbulo lateral, usted puede reducir la fuga espectral (National Instruments, 2015).

Seleccionar una función de ventana depende de las características de la misma y sus diferentes aplicaciones:

- Si la señal contiene componentes de interferencia en frecuencia alejados de la frecuencia de interés, se elige una ventana con un rango alto de caída del lóbulo lateral.
- Si la señal contiene componentes de interferencia en frecuencia cerca de la frecuencia de interés, se elige una función de ventana con un nivel bajo de lóbulo lateral máximo.
- Si la frecuencia de interés contiene dos o más señales cerca una de la otra, la resolución espectral es importante. En este caso, es mejor elegir una ventana con un lóbulo principal muy estrecho.
- Si la precisión de la amplitud de un solo componente de frecuencia es más importante que la ubicación exacta del componente en un contenedor de frecuencia determinado, elija una ventana con un lóbulo principal amplio.
- Si el espectro de la señal es más bien plano o de banda ancha en el contenido de frecuencia, utilice la ventana uniforme o ninguna ventana.

3.1.16.6 Ventana Hanning

National instruments explica que la ventana Hanning es útil el 95% de los casos. Tiene buena resolución de frecuencia y menor fuga espectral.

Esta ventana tiene una forma sinusoidal. Tiene en un pico amplio, pero lóbulos laterales bajos. Sin embargo, llega al cero en ambos extremos, eliminando toda discontinuidad de la señal. Esta ventana es útil para medidas de ruido en las que se busca mejor resolución de frecuencia que algunas de las otras ventanas, pero los lóbulos laterales moderados no representan un problema.

3.1.16.7 Blackman-Harris

Esta ventana es similar a la ventana Hanning. El espectro resultante tiene un pico amplio, pero buena compresión del lóbulo lateral. Existen dos tipos de esta ventana. La 4-term Blackman-Harris es una buena ventana de uso general, que tiene el rechazo de lóbulo lateral en los 90s dB y un lóbulo principal moderadamente amplio. La función de ventana 7-term Blackman-Harris tiene todo el rango dinámico que usted puede necesitar, pero tiene un lóbulo principal más amplio. (National Instruments, 2015).

3.1.16.8 Kaiser-Bessel

Según National instruments esta ventana establece un equilibrio entre los diferentes objetivos contradictorios de la amplitud que son la distancia y la altura del lóbulo lateral. Tiene funciones similares a la ventana Blackman-Harris, pero para el mismo ancho del lóbulo principal, los lóbulos laterales cercanos tienden a ser más altos, pero los otros lóbulos laterales alejados son más bajos.

La ventana de superficie plana también es sinusoidal, pero en realidad cruza la línea del cero. Esto provoca un pico mucho más amplio en el dominio de frecuencia, que está más cerca de la verdadera amplitud de la señal que con otras ventanas.

3.2 MARCO LEGAL O NORMATIVO

Carlos Sanz Vila afirma que, en el control del ruido emitido por vehículos automotores, se consideran dos tipos de ruido. (Carlos Vila) [2]:

- Puesta en marcha.
- Posición Estacionaria.

Estos dos tipos de ruido dependen de factores como:

- tipo de llanta
- tipo de asfalto,
- pendiente de la carretera.

Las determinaciones mencionadas anteriormente vienen definidas por las normas internacionales:
- ISO 5128 (1980) Acoustics -- Measurement of noise inside motor vehicles.

- ISO 362 (2015) Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles. Engineering method

- ISO 5130 (2007) Acoustics — Measurements of sound pressure level emitted by stationary road Vehicles.

Como primera consideración se debe tener en cuenta que no existe una norma destinada para la medición del ruido de gravilla; por lo tanto, se hace una búsqueda exhaustiva de normas que tengan consideraciones similares para poder medir el fenómeno que se desea estudiar.

3.2.1 Método de medición según ISO 5128-1980

Esta norma proporciona métodos para la medición del ruido en el interior de vehículos de todo tipo; se hace la claridad que para el desarrollo de este trabajo solo se acataron las consideraciones útiles para poder medir los niveles (dB SPL) generados por los impactos de gravilla; especificando ciertas condiciones para medir, comparar niveles y espectros.

Los resultados obtenidos se utilizan para:

- Decidir si el ruido en el interior del vehículo se encuentra en conformidad con las especificaciones de los niveles (dB SPL) permitidos.

- Para evaluar el grado de interferencia de las conversaciones;

- Para orientar un programa de mediciones más elaboradas para los fines de estudio de procedimientos de reducción de ruido.

3.2.2 Consideraciones de medición

A continuación, se mencionan solo las consideraciones útiles de la norma ISO 5128 para la recolección de los datos en esta investigación:

- Toda lectura del medidor de nivel de sonido mediante la toma con las características dinámicas.

- Los valores que se midieron en todas las posiciones del micrófono en todas las pruebas son niveles de presión sonora expresados en decibeles (dB).

- Para el análisis especial se selecciona posiciones del micrófono durante las pruebas adicionales, los valores han de medirse en banda de octava o de 1/3 de octava; que cubran al menos el rango de frecuencias de 45 a 11.200 Hz.

- Medición por 1/3 - banda de octava a niveles de presión sonora preferida.

3.2.3 El equipo de medición

- El medidor de nivel de sonido debe ser de la clase Tipo 1. Especificando el tipo de micrófono.
- El rendimiento acústico del sonómetro y micrófonos deberá ser calibrado utilizando un pistófono, al principio de cada medición.
- El equipo de medición debe tener una banda de frecuencia de 45 Hz hasta 11200 Hz mínimo.

3.2.4 Configuración del equipo de medición:

- Canal de entrada (1)
- Tipo de transductor: 4189 (referencia del micrófono de medición)
- Sound field correction (corrección de campo sonoro): free-field (campo libre)
- Pantalla anti viento: no
- Low frecuency (baja frecuencia): normal
- broadband weight (ponderación de banda ancha): A, C
- Broadband peak weighting (ponderación de pico de Banda Ancha): A
- Control de medición: Manual
- Template: Analizador de frecuencia – 1/3 octava
- Valores medidos: LpA, nivel de presión sonora en dB.
- Radio del nivel medido/ruido de fondo (instrumentos de medición): >10dBA.
- El template del sonómetro utilizado no fue ajustado para analizar en función del tiempo sino en función de energía.

3.2.5 Posicionamiento del micrófono y condiciones de medición

- Se debe realizar dos capturas una con micrófono de medición y otra con sonómetro, ubicados en el asiento del conductor y el asiento del pasajero
- La altura de ambos dispositivos deberá ser en el oído derecho de cada posición y a la altura normal de los oídos.
- El vehículo debe recorrer la pista a 3 diferentes velocidades (10, 30 y 40 Km/h)
- El vehículo debe estar totalmente cerrado durante todo el proceso de medición.

Las normas a continuación solo se mencionan brevemente debido a que ninguna de sus consideraciones es útil en el desarrollo de este trabajo.

3.2.6 ISO 362 (2015)

El procedimiento de medición descrito consiste en acelerar el vehículo a una velocidad establecida situando un micrófono sobre el suelo (superficie dura) a una altura de 1,2 m y a 7,5 m del trazado del vehículo. La pista de prueba debe ser plana, con un nivel de ruido de fondo bajo, sin superficies reflejantes cercanas.

3.2.7 ISO 5130: 2007

Determina los parámetros de medición, instrumentación y entorno para obtener los niveles de presión sonora exterior de los vehículos de carretera en posición estacionaria, proporcionando una medición continúa del nivel de presión sonora (dB SPL) a revoluciones del motor determinadas.

Las dos normas mencionadas anteriormente (ISO 362 y 5130) no son utilizadas debido a que establecen ruido de medición exterior y una medición de ruido en posición estacionaria y en estas condiciones el ruido de gravilla no se está presente, por la tanto solo se utilizan algunas consideraciones de la norma ISO 5128.

4. DESARROLLO INGENIERIL

A continuación, se presenta el proceso desarrollado para la consecución de los objetivos planteados en este proyecto. De forma general el lector encontrará en este capítulo:

- Selección del terreno adecuado para las mediciones.
- Caracterización del ruido de gravilla para velocidades de 10 Km/h, 30 Km/h, 40 Km/h.
- Caracterización del ruido de motor del vehículo (motor y escape).
- Selección de materiales y montaje de sistema.
- Proceso de medición del ruido de gravilla con y sin sistema.

De esta manera se logra realizar un estudio ordenado del fenómeno evaluado.

4.1 SELECCIÓN DE PISTA DE PRUEBAS.

La pista de pruebas seleccionada para el desarrollo del proyecto es una vía rural de poco tránsito vehicular perteneciente al municipio de Sopó (a 35 kilómetros de Bogotá). El terreno está compuesto por tierra y grava, no es totalmente liso debido a las condiciones meteorológicas variables y la falta de zanjas para la canalización del agua de lluvia, la cual genera baches e irregularidades en el terreno. Se delimitaron 50 metros para la medición, los cuales fueron señalizados con banderines al inicio y final de los 50 metros como se observa en las siguientes imágenes.



Figura 1616. Pista seleccionada para las mediciones en gravilla.



Figura 1717. Banderines de demarcación de inicio y final.



Figura 18. Tramo de 50 metros, demarcado con banderín de inicio (verde) y final (rojo).



Figura 19. Vista desde el banderín de inicio (verde) y final (rojo).

Con el propósito de identificar las características del ruido de grava, se realizó una medición de referencia en una vía asfaltada para poder hacer la comparación entre los dos tipos de terreno.

4.2 CARACTERIZACIÓN DEL RUIDO DEL MOTOR Y ESCAPE

Para identificar las diferencias en frecuencia del motor (diésel) frente a las de los impactos generados por el choque de gravilla, se analiza la señal del motor en ralentí: como se observa en las siguientes figuras. Ubicando el micrófono de medición dentro del motor en un lugar donde se produzcan la mínima cantidad de vibraciones posible y lo más cercano al múltiple de admisión.

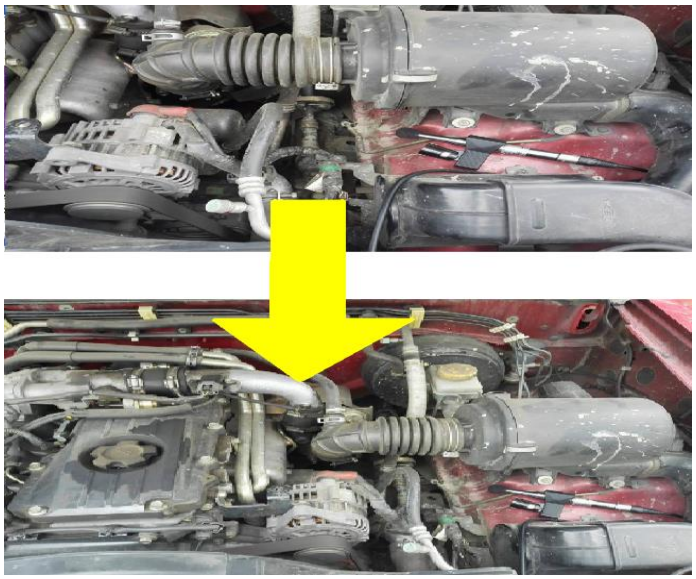


Figura 180. Ubicación del micrófono de medición dentro del motor.



Figura 2119. Vista frontal del vehículo con el capo cerrado para iniciar la medición del ruido del motor.

La duración de la medición tanto del motor como del escape es de 15 segundos. Se realiza la medición del ruido del escape a 50 centímetros de la boca del mismo con angulaciones de 0˚y 45.



Figura 2220. Micrófono ubicado a 50 cm de la salida del escape.

El resultado del análisis de estas mediciones será utilizado para verificar las bandas de frecuencia en la que se encuentran el motor y el escape del vehículo; con el propósito de comparar los análisis en frecuencia del ruido producido por los impactos de gravilla vs. Motor y escape.

4.3 CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURA PARA EL MONTAJE DE EQUIPOS DE MEDICIÓN

Se construye una base para el micrófono y el sonómetro tomando las medidas de los apoyacabezas del vehículo en uso (figura 23 y 24). La separación de las varillas del apoyacabeza es de 26 cm; con esto, se unen dos placas de madera en los extremos y en el centro por medio de arandelas barras y tornillos. En el extremo de la barra que sobresale de las dos placas de madera a una tercera, se ubican los dispositivos de medición. Para anular el efecto de las vibraciones se colocó material absorbente bajo el sonómetro y el micrófono. Las dos barras de madera paralelas se sujetan a las barras del apoyacabeza con firmeza, la tercera placa de madera unida con una barra a las placas anteriores varía su posición (lateral o verticalmente) según la posición requerida y la torsión en los tornillos y arandelas que la sujetan.

En las figuras posteriores se pueden observar los soportes terminados.

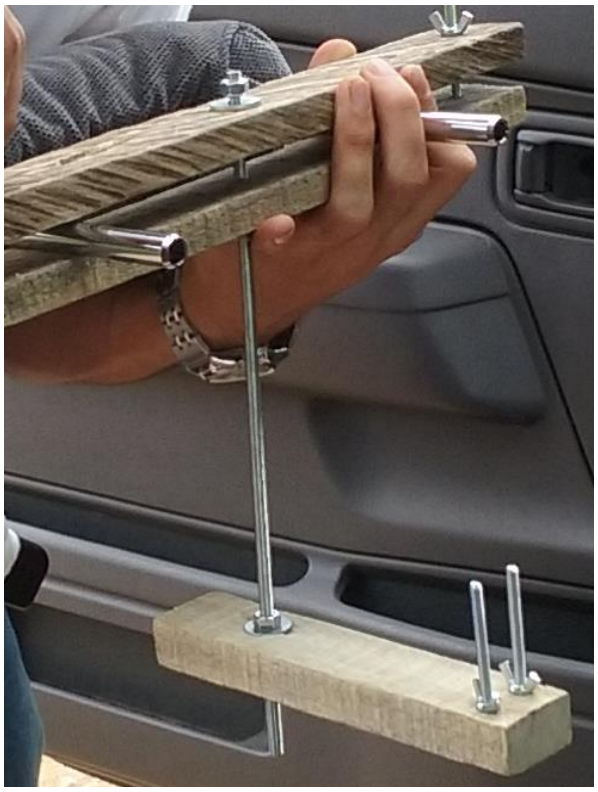


Figura 23. Proceso de instalación del soporte del micrófono en el apoyacabeza del conductor.



Figura 2421. Proceso de instalación del soporte del Sonómetro en el apoyacabeza del copiloto.



Figura 2522. Montaje de los dispositivos de medición en sus bases correspondientes al interior del vehículo.

Los dispositivos son montados en sus estructuras e instalados dentro del vehículo (figura 25) tanto en el apoyacabeza del conductor como el del pasajero, según la norma ISO 5128. Se realizaron pasadas a 10, 30 y 40 kilómetros por hora sobre gravilla y asfalto.

4.4 REALIZACIÓN DE MEDICIONES EN GRAVILLA Y ASFALTO.

Es necesario calibrar los equipos de medición antes de iniciar la prueba. El sonómetro se calibra utilizando el pistófono a 94 dB SPL.

Así mismo, el software utilizado para la grabación de los audios con el micrófono de medición es Protools 10 y la calibración del sistema se realiza con el pistófono a 94 dB SPL, usando el mismo nivel de ganancia en todas las mediciones.

Posteriormente se realizan tres mediciones a velocidades de 10, 30 y 40 Km/h, sin el sistema de aislamiento acústico tanto en la pista de gravilla como en la pista de asfalto. Debido a que el terreno no es uniforme ni plano, una velocidad más alta podría poner en peligro la seguridad de

los ocupantes del vehículo y de los dispositivos de medición. La figura 26 muestra el resultado final del labrado de las llantas después de transitar a una velocidad de 40 km/h, lo cual muestra gran presencia de gravilla sobre la superficie del neumático.



Figura 23. Gravilla alojada en los surcos de la llanta previo a la medición a 40 Km/h.

4.5 SELECCIÓN DE MATERIALES

Teniendo en cuenta que el ruido que se está tratando tiene características de ruido de impacto se buscaron materiales que permitieran amortiguar el golpe de la gravilla al recubrir los guardabarros.

Los materiales además de sus propiedades acústicas deben cumplir los requisitos de seguridad, resistencia y facilidad en su manejo, debido a esto las propiedades a tener en cuenta son:

- Inflamabilidad
- Permeabilidad
- Resistencia a la compresión
- Resistencia a la flexión

Todos los aspectos mencionados anteriormente son importantes, ya que, al instalar el tratamiento acústico en un vehículo, debe primar la seguridad de los ocupantes, el material tiene que tener una alta resistencia ya que está expuesto a condiciones tales como: lluvia, fuego o accidentes de cualquier tipo; con base en estos análisis se escogieron 5 materiales, para su estudio, con el propósito de seleccionar los 2 que tengan las mejores propiedades en las categorías evaluadas.

Los 5 materiales escogidos se eligieron porque tienen buenas propiedades acústicas y de esto se partió para su selección. Los materiales escogidos son:

- Lana de roca.
- Corcho.
- Fibra de vidrio.
- Espuma de poliuretano.
- Espuma elastomérica.

A continuación, se explican cada una de las categorías tenidas en cuenta y a partir de que normas los fabricantes categorizan los materiales, se hace la claridad que las normas mencionadas a continuación son de carácter informativo ya que es el fabricante de cada material quien haces los ensayos prácticos para su respectiva clasificación:

4.5.1 Inflamabilidad (UNE-EN 13501-1:2007)

Este parámetro es evaluado por la Norma europea EN 13501-1 titulada: Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. En donde se realiza una clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de reacción al fuego. Los materiales se clasifican según las clases A, B, C, D, E y F en donde A es la mejor clasificación y F la peor, tal como se muestra en la tabla 2 a continuación:

Categoría	Definición
A	Materiales no combustibles
B	Materiales combustibles - contribución muy limitada al fuego
C	Materiales combustibles - contribución limitada al fuego
D	Materiales combustibles - Contribución media al fuego
E	Materiales combustibles - gran contribución al fuego
F	Materiales combustibles - fácil inflamables

Tabla 2. Características de Inflamabilidad de un material según norma UNE 13501-1

4.5.2 Permeabilidad (UNE-EN 12087:1997/A1:2008)

La absorción de agua es evaluada por la Norma europea EN 12087 titulada: Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación. Determinación de la absorción de agua a largo plazo

por inmersión. Los materiales son divididos en tres categorías (bueno, malo e impermeable) dependiendo de la absorción de agua del material en cm/seg como se muestra en la tabla 3:

Bueno						Pobre			Impermeable	
100	10	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}
cm/seg										

Tabla 3. Características de permeabilidad de un material según norma UNE 12087

4.5.3 Resistencia a la flexión (UNE-EN 12372:2007)

Esta propiedad es evaluada por la Norma europea EN 12372 titulada: Determinación de la resistencia a la flexión bajo carga concentrada.

4.5.4 Resistencia a la compresión (UNE-EN 826:2013)

Esta propiedad es evaluada por la Norma europea EN 826 titulada: Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación. Determinación del comportamiento a compresión.

4.5.5 Absorción Acústica (UNE-EN ISO 11654:1998)

Esta propiedad es evaluada por la Norma ISO 11654 titulada: Acústica. Absorbentes acústicos para su utilización en edificios. Evaluación de la absorción acústica. Esta norma evalúa el rendimiento de absorción acústica y clasifica los materiales en cinco categorías de la A a la E siendo A el material con más absorción y E el material con menos absorción. Como se observa en la tabla 4 a continuación:

α_w	Clases de absorción acústica
0.90 - 1.00	A
0.80 - 0.85	B
0.60 - 0.75	C
0.30 - 0.55	D
0.15 - 0.25	E

Tabla 4. Características de absorción acústica de un material según norma ISO 11654

4.5.6 Evaluación de materiales

Las propiedades de cada material fueron obtenidas en las especificaciones técnicas entregadas por los proveedores: Sofalca, Fiberglass, Biohaus; en la tabla número 5 se observan las cinco categorías tenidas en cuenta para la implementación:

Material	Inflamabilidad	Permeabilidad	Resistencia a la flexión	Resistencia a la compresión	Absorción acústica (α_w)	Precio (COP)
Lana de roca	Categoría A	1	320 lbs/pulg^2 · 1000	3.8 kg/cm^2	A	$21000
Corcho	Categoría A	1	26 lbs/pulg^2 · 1000	2.1 kg/cm^2	A	$50000
Fibra de vidrio	Categoría A	10^-8	220 lbs/pulg^2 · 1000	18000 kg/cm^2	B	$111200
espuma de poliuretano	Categoría F	10^-3	109 lbs/pulg^2 · 1000	1,7 kg/cm^2	B	$198500
Espuma elastomérica	Categoría F	10^-4	385 lbs/pulg^2 · 1000	17.1 kg/cm^2	B	$40000

Tabla 5. Características de los materiales seleccionados.

A continuación, se realiza la evaluación de los materiales dando una calificación del 1 al 5 por categoría en donde 5 es la mejor calificación y 1 es la calificación inferior. Se saca un promedio aritmético total para ver cuales materiales cumplen mejor con los requisitos.

Material	Inflamabilidad	Permeabilidad	Resistencia a la flexión	Resistencia a la compresión	Absorción acústica (α_w)	Precio	Total Promediado
Lana de roca	5	4	5	3	5	5	4.5
Corcho	5	4	3	3	5	5	4.1
Fibra de vidrio	5	5	4	5	4	4	4.5
espuma de poliuretano	1	4	4	3	4	2	3.2
Espuma elastomérica	1	4	5	3	4	5	3.6

Tabla 6. Características de los materiales seleccionados.

Los dos materiales escogidos deben tener excelente rendimiento en las seis (6) categorías evaluadas teniendo como prioridad la seguridad (Inflamabilidad y Permeabilidad), segundo la absorción acústica del material y por último la manejabilidad (resistencia a la flexión y compresión) para facilidad en su instalación y el precio; de acuerdo a esto las dos espumas son descartadas en primera instancia debido a que son materiales inflamables y no cumplen con los requisitos de seguridad, lo que reduce las opciones a tres (lana de roca, corcho y fibra de vidrio) los cuales cumplen con los parámetros de seguridad. Se evalúan las tres (3) categorías faltantes en las cuales la fibra de vidrio tiene un mejor desempeño que los otros dos materiales (Lana de Roca y Corcho) pero debido a que cambia sus características al hacer uso de resina y por su precio este material también se descarta. De acuerdo a lo mencionado anteriormente los materiales escogidos para realizar el tratamiento en un vehículo de segmento C son la lana de roca y el corcho.

4.6 CONSTRUCCIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS

Para la construcción de los recubrimientos son necesarias 4 láminas de lana roca y un rollo de corcho cuyas dimensiones permitan el recubrimiento exterior de los guardabarros. En el caso específico de esta investigación las dimensiones del guardabarros son:

- 140 x 90 centímetros.

El grosor de los recubrimientos es:

- Lana de roca: 50.8 milímetros.
- Corcho: 5 milímetros.

Para evitar reacciones alérgicas producto de la manipulación de la Lana de roca es necesario la utilización de guantes, tapabocas y gafas protectoras.

Para instalar los recubrimientos en los guardabarros se utilizó un pegamento multiusos de alta adherencia y secado rápido, es importante destacar que en el proceso de instalación la Lana de roca fue complicada debido a las características fibrosas del material y de su peso, en cambio el manejo del corcho resultó menos complicado debido a que es un material mucho más liviano y compacto.

Para las mediciones, se han colocado los recubrimientos sobre los cuatro guardabarros del vehículo: cuatro de lana de roca, cuatro de corcho y las mediciones se realizaron por separado con cada uno de los materiales utilizados para el recubrimiento. El corcho resulta ser el material de más fácil instalación ya que es mucho más maleable que la lana de roca, y no genera ningún tipo de reacción alérgica.

A continuación, se presentan las figuras 24, 25 y 26 donde se puede observar los recubrimientos instalados.



Figura 24. Recubrimiento de corcho sobre el guardabarros delantero.



Figura 25. Recubrimiento de lana de roca en el interior del guardabarros trasero.



Figura 26. Recubrimiento de lana de roca sobre el guardabarros delantero.

4.7 MEDICIÓN CON Y SIN EL MATERIAL

Para el proceso de medición se realizaron múltiples pasadas a las velocidades de 10, 30, 40km/h en un tramo de 50 m con y sin recubrimiento con el fin de comparar y obtener la efectividad de los materiales utilizados.

Es importante aclarar que en la primera medición el terreno no estaba completamente nivelado, presentaba baches, en la siguiente medición el terreno había sido reparado lo cual permitió un mejor desarrollo de la práctica.



Figura 27. Ubicación del sonómetro y micrófono de medición sobre sus respectivos soportes.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presenta el análisis de resultados de las mediciones realizadas anteriormente:

- Medición del ruido de motor y escape.
- Medición a 10, 30 y 40 Km/h sin recubrimiento sobre pista de gravilla y asfalto.
- Medición con y sin recubrimiento a 10, 30 y 40 Km/h sobre la pista de gravilla.

Se hace uso de los softwares de análisis: Adobe Audition, AudaCity, Wavelab, y la suite de medición Bz-5503 de Bruel & Kjaer para el análisis espectral y de niveles de presión sonora. Las mediciones se hacen siguiendo la pista de 50 metros previamente demarcada con los banderines y con unos tiempos de medición máximo de 15 segundos.

5.1 ANÁLISIS DE RUIDO DE MOTOR Y ESCAPE

Para el siguiente análisis se elige una función de ventana con un nivel bajo de lóbulo lateral y por esto se analiza con la ventana Hanning por su buena resolución de frecuencia y menor fuga espectral.

Esta ventana tiene una forma sinusoidal, un pico amplio pero lóbulos laterales bajos. Sin embargo, llega al cero en ambos extremos, eliminando toda discontinuidad de la señal. Esta ventana es útil para el análisis de ruido en las que se busca mejor resolución de frecuencia que algunas de las otras ventanas, pero los lóbulos laterales moderados no representan un problema.

Para reducir el efecto transitorio en el audio, se selecciona la frecuencia de muestreo 1024 ya que es lo ideal en este tipo de aplicación, el eje de las ventanas se pone en eje logarítmico debido a que el oído escucha de manera logarítmica.

5.1.1 Ruido de motor

Para el análisis se utiliza un ecualizador paramétrico en el software de edición de audio AudaCity. Con este ecualizador, se busca estimar las bandas de frecuencia en la cuales actúa el motor del vehículo, para el análisis del ruido del motor se pusieron todas las bandas del ecualizador en cero, posteriormente se normaliza cada una de las bandas de frecuencia del ecualizador hasta escuchar claramente el motor.

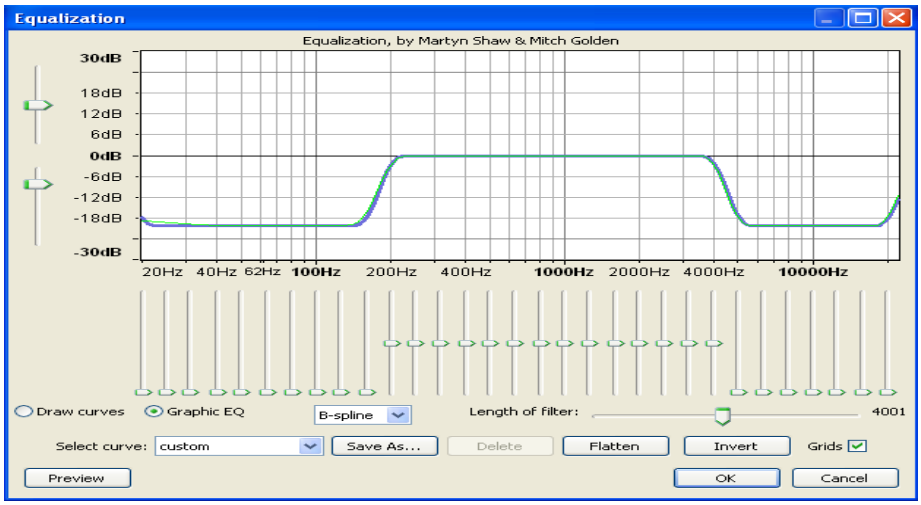


Figura 28. Filtro pasa banda (ecualizador paramétrico) utilizado para estimar las bandas de frecuencia del motor

El análisis auditivo da como resultado que el motor está contenido en las bandas de frecuencias desde 200 hasta 4000 Hz. Luego, se hace un análisis espectral a través del mismo software, donde se compara el antes y después del filtro pasa banda y se verifica su efectividad.

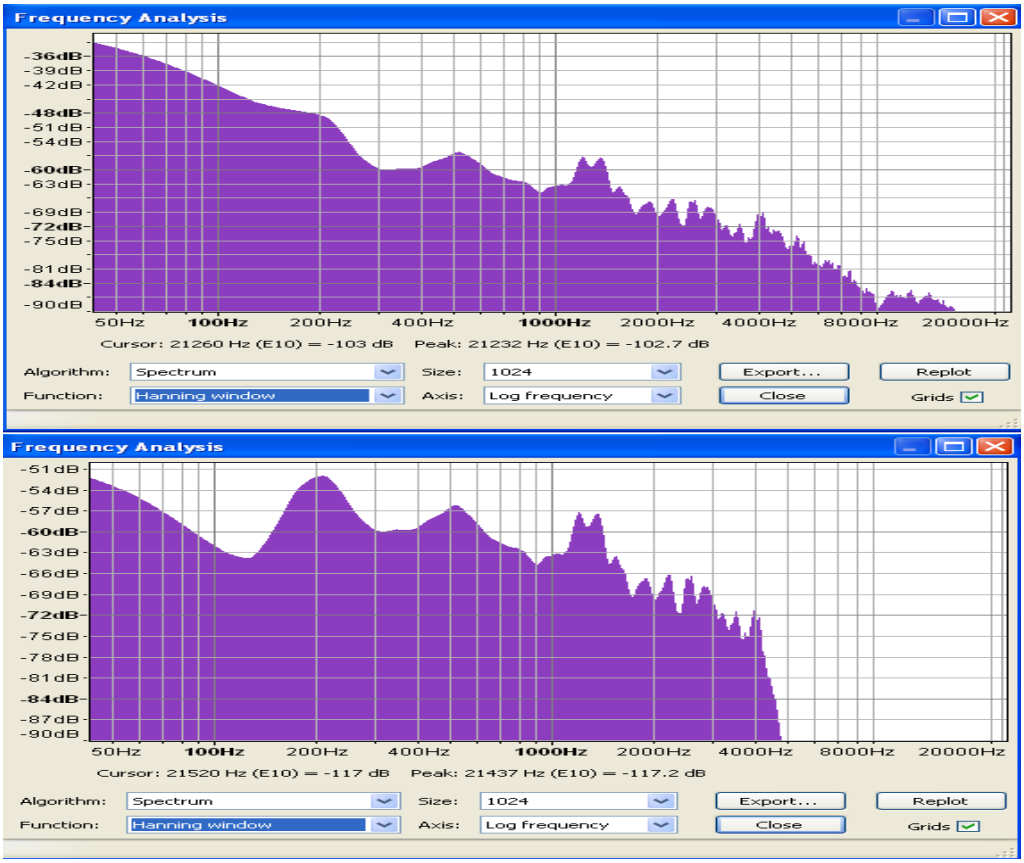


Figura 29. Análisis espectral de antes (superior) y después (inferior) del filtro pasa banda.

5.1.2 Ruido del escape

Para el análisis del ruido del escape se utiliza un ecualizador paramétrico en el software de edición de audio AudaCity. Con este ecualizador, se busca estimar las bandas de frecuencia en la cuales actúa el escape del vehículo, para el análisis del ruido del escape se pusieron todas las bandas del ecualizador en cero, posteriormente se normaliza cada una de las bandas de frecuencia del ecualizador hasta escuchar claramente el ruido del escape.

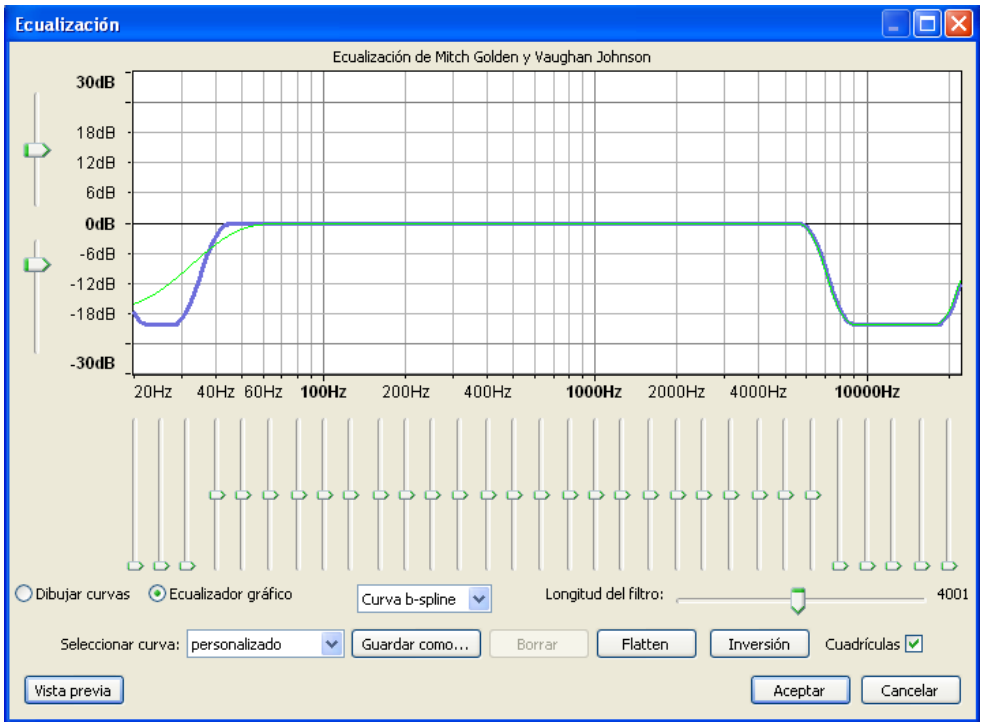


Figura 30. Filtro pasa banda (ecualizador paramétrico) utilizado para estimar las bandas de frecuencia del escape.

El análisis auditivo da como resultado que el escape está contenido en las bandas de frecuencias desde 40 hasta 6300 Hz. Luego, se hace un análisis espectral a través del mismo software, donde se compara el antes y después del filtro pasa banda. El analizador posee las mismas características mencionadas anteriormente.

El uso del espectrograma tanto para el análisis del ruido de escape como para el ruido de motor (sección 5.1) es necesario para verificar las componentes frecuenciales del ruido y verificar el trabajo del ecualizador paramétrico.

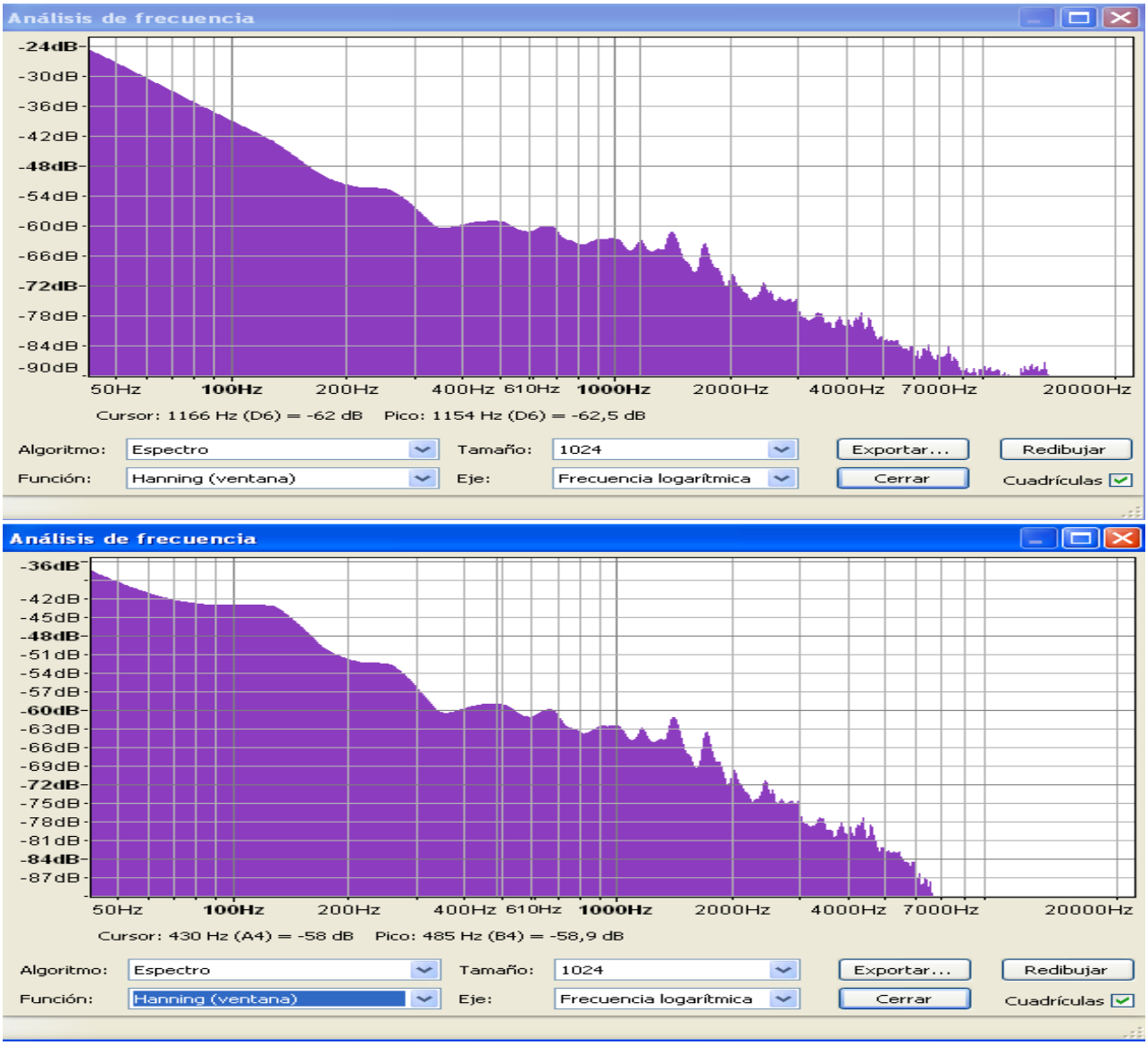
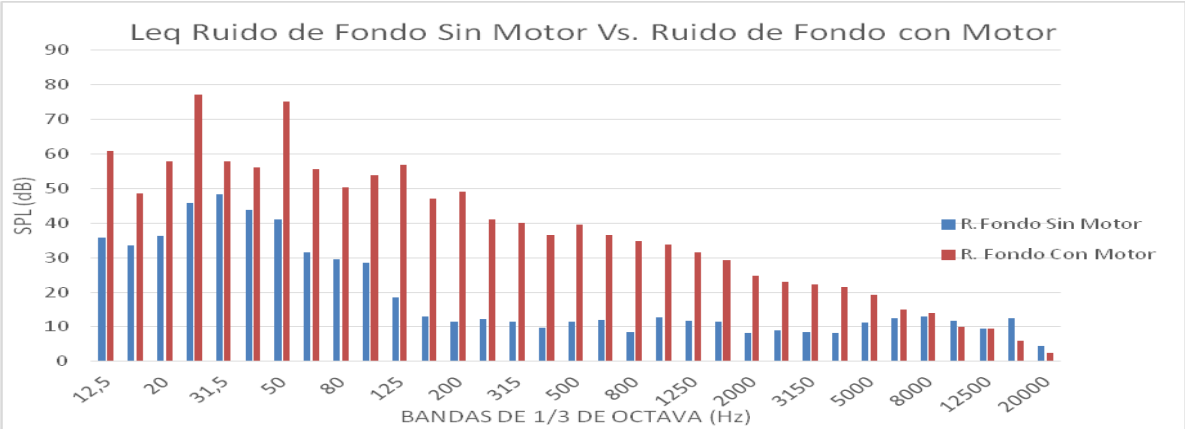


Figura 31. Análisis espectral de antes (superior) y después (inferior) del filtro pasa banda.

5.1.3 Ruido de fondo con el motor apagado y encendido

A continuación, se muestran la medición del ruido de fondo con el motor apagado (azul) vs el motor encendido (rojo), en este punto no se hace análisis TEF ni análisis en frecuencia debido a que ya se determinaron las bandas de frecuencia del motor y se quiere saber qué tan determinante

son los niveles de ruido del motor y como pueden afectar el análisis de los impactos de gravilla.



Gráfica 1. Ruido de fondo del motor apagado vs motor encendido.

En la gráfica 1 se observa que el ruido de fondo con el motor encendido aumenta considerablemente con respecto al ruido del motor apagado, estas condiciones deben tenerse en cuenta al analizar el ruido del choque de gravilla ya que el ruido del motor y el de los impactos gravilla están sucediendo al tiempo.

A continuación, se observa la resta aritmética del Leq del motor encendido menos el Leq del motor apagado:

$$49.7\ dB\ spl - \ 25.2\ dB\ spl = 24.5\ dB\ spl$$

Ecuación 3. Resta entre el Leq del ruido de fondo con el motor encendido y apagado.

Ruido de fondo (dB spl)\Frecuencia (Hz)	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300
Motor apagado	11,6	12,3	11,5	9,7	11,5	12,1	8,6	12,8	11,8	11,5	8,2	9,0	8,6	8,3	11,3	12,5
motor encendido	49	41,1	40	36,6	39,5	36,5	34,7	33,9	31,5	29,3	24,8	23,1	22,3	21,5	19,3	15,1
Diferencia	37,4	28,8	28,5	26,9	28,0	24,4	26,1	21,1	19,7	17,8	16,6	14,1	13,7	13,2	8,0	2,6

Tabla 7. Ruido de fondo motor apagado vs motor encendido y diferencia en nivel dB SPL.

En la ecuación anterior se demuestra lo significativa que es la diferencia entre el ruido de fondo con el motor apagado vs el motor encendido. Así mismo, la tabla 7 muestra la diferencia de nivel de ruido de fondo del motor apagado vs motor encendido en una banda de frecuencias de 200 Hz a 6300 Hz, en donde se puede observar diferencias de 2.6 dB SPL hasta 37.4 dB SPL demostrando que el ruido de fondo con el motor en marcha es mucho mayor. En este capítulo no

se analiza el ruido de fondo en el dominio de la frecuencia debido a que nos interesa saber cuánto aumenta el nivel apenas se pone en marcha el motor. Sin embargo, en la sección 5.1 ya se analizó el ruido de motor encendido en dominio de la frecuencia.

5.2 CARACTERIZACIÓN DEL RUIDO DE GRAVILLA

En las figuras 35, 36 y 37 siguiente se observa el análisis por frecuencia del audio a 10 km/h, 30 Km/h y 40 Km/h, En el no se puede identificar cuál es el contenido en frecuencia de los impactos de la gravilla, del ruido del motor y del ruido de escape, pero si se logra determinar que los golpes de gravilla están contenidos las mismas bandas de frecuencia.

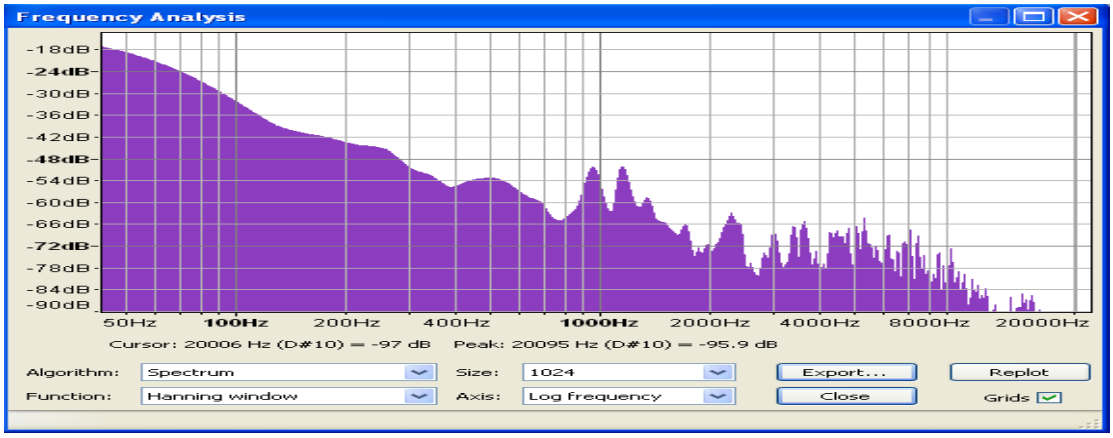


Figura 32. Análisis de la pasada a 10 Km/h sobre gravilla.

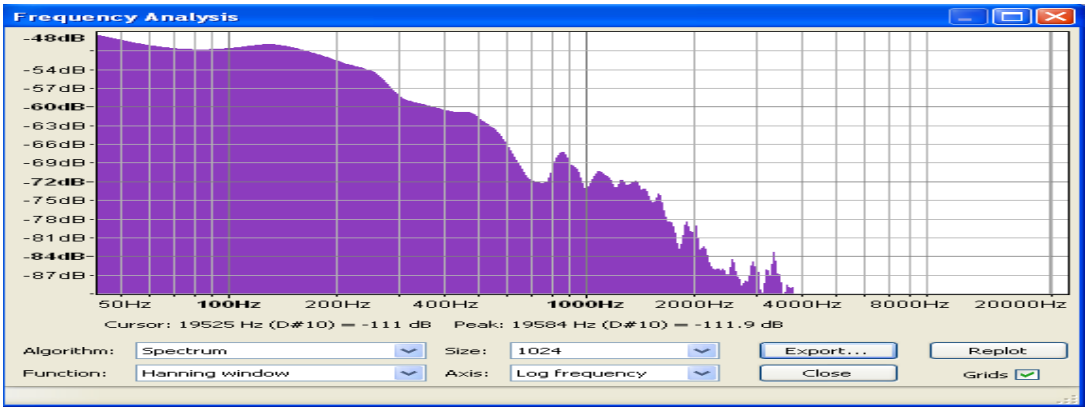


Figura 33. Análisis de la pasada a 30 Km/h sobre gravilla.

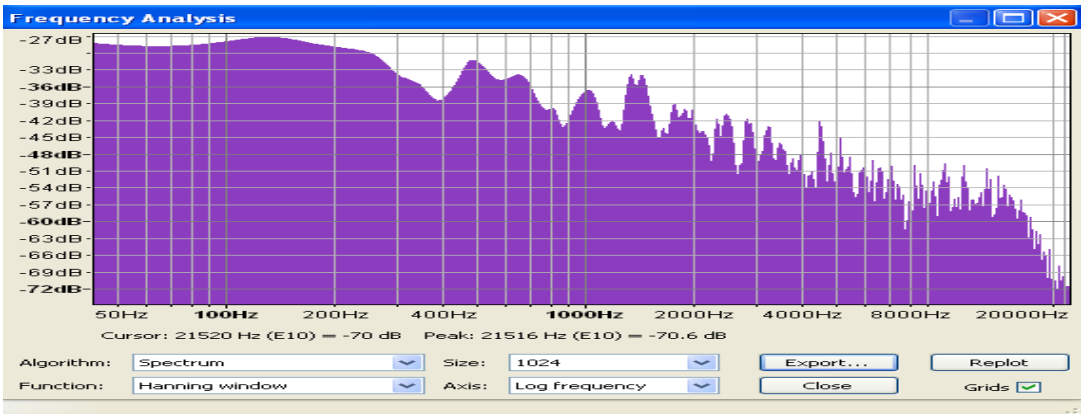


Figura 34. Análisis de la pasada a 40 Km/h sobre gravilla.

A través de este análisis en frecuencia no es posible determinar o visualizar los golpes de gravilla comparando con el ruido propio del vehículo (escape y motor) ya que están en el mismo rango de frecuencias, por esta razón se procede a dividir el audio en segmentos de un (1) segundo; duración suficiente para realizar un análisis más específico de cada uno de los golpes de gravilla (Figura 35).

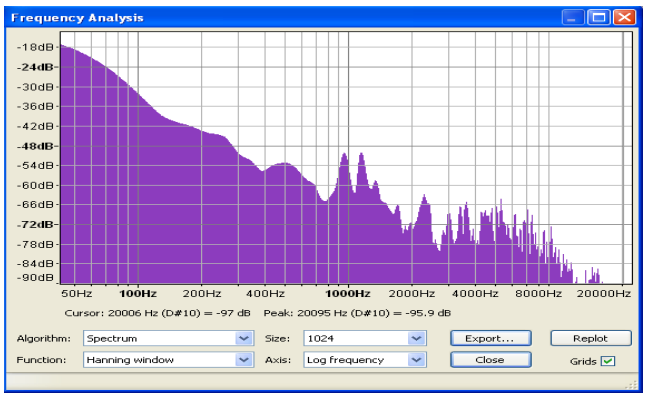


Figura 35. Segmento de audio de un segundo a 10 Km/h.

La figura 35 muestra un segmento de un segundo del audio a una velocidad de 10 Km/h en donde se encuentran golpes de gravilla. Aunque se segmento el audio y se analizó sigue sin ser claro este tipo de análisis puesto que es muy complicado conocer el comportamiento en frecuencia. Conociendo esto, se procede a realizar el análisis de audio utilizando solo el espectrograma (análisis TEF) el cual, si permite diferenciar los impactos en función de la amplitud, o de la energía.

5.2.1 Medición a 10 km/h gravilla vs asfalto

El análisis del audio se realiza por medio de un espectrograma (análisis TEF) en el software de edición de audio Adobe Audition. Ya no se realiza el análisis por ventaneo porque como se demostró anteriormente este análisis no es útil debido a que los contenidos en frecuencia del motor el escape y la gravilla están en las mismas bandas y no se pueden analizar por dicho método. Vale aclarar que el análisis en esta parte la investigación se realiza de manera visual y auditiva.

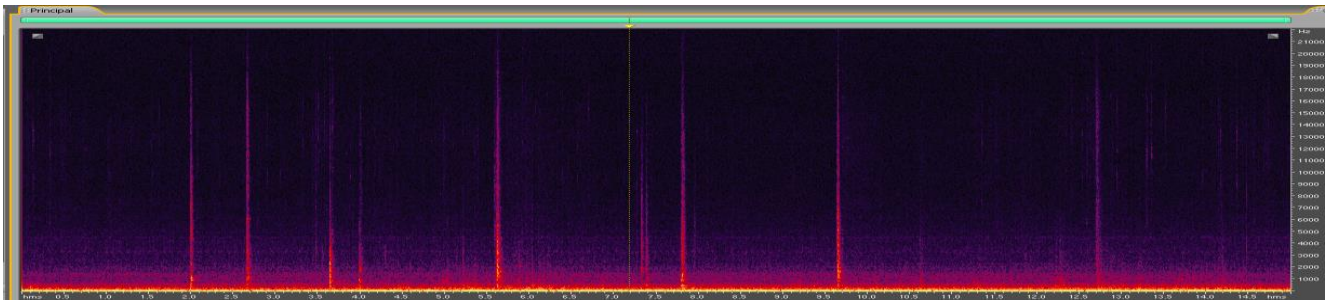


Figura 36 Análisis en frecuencia de la captura de audio a 10 Km/h, tiempo (eje x) vs. frecuencia (eje y).

El análisis del audio (figura 36) muestra alto contenido en frecuencias medias y altas, por lo que se hace necesario usar un filtro pasa altos para limpiar la señal con una frecuencia de corte ubicada en 200 Hz que es donde inicia el ruido de gravilla; esto se logra a través de un plug in del software Adobe Audition (figura 37). El motor sigue estando presente durante toda la duración del audio debido a que está contenido en las mismas bandas de frecuencia que los impactos de gravilla.

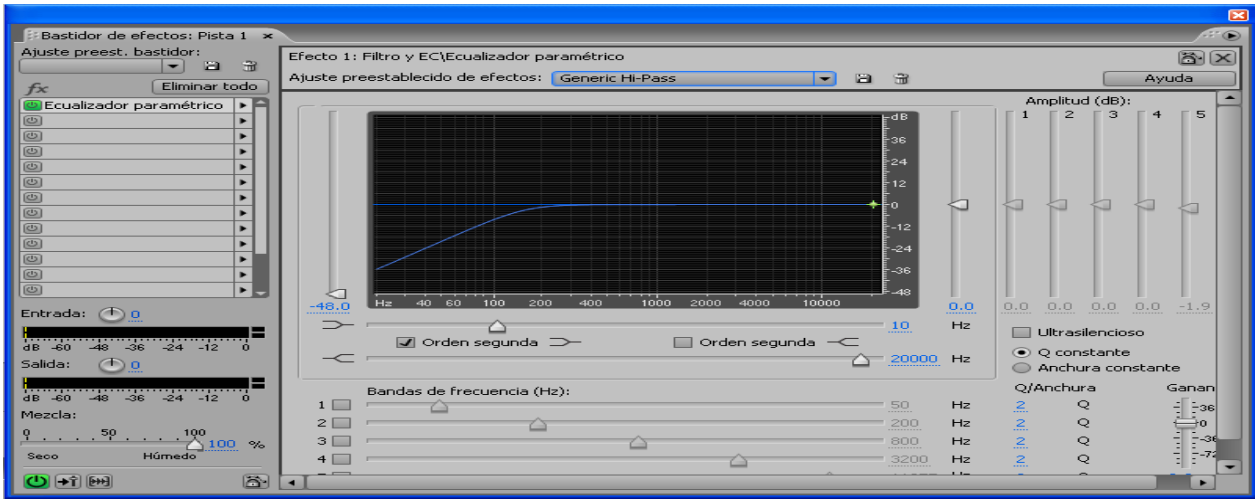


Figura 37. Gráfica y parámetros del filtro pasa-banda.

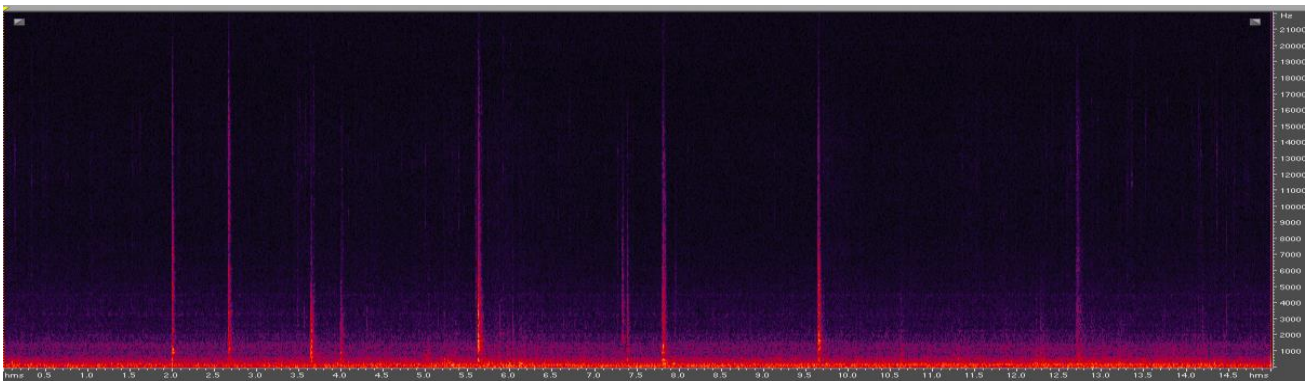


Figura 38. Análisis en frecuencia de la captura de audio a 10 Km/h aplicando un filtro pasa altos, tiempo (eje x) vs. frecuencia (eje y).

En la figura 38 se observa los golpes de la gravilla contra el guardabarros del vehículo en determinado tiempo. El espectrograma de la medición en asfalto (Figura 39), es necesario para tener un audio de referencia con el cual comparar el ruido de gravilla a las tres velocidades mencionadas (10 Km/h, 30 Km/h y 40 Km/h). En esta se observa la presencia de ruido del motor y la respuesta de amplitud es igual en toda la duración del audio debido a que se circula por un camino homogéneo. Esta pista de asfalto posee las mismas características que la pista de gravilla y está ubicada en el mismo sector, 50 metros de largo usando banderines para marcar el inicio y final del tramo.

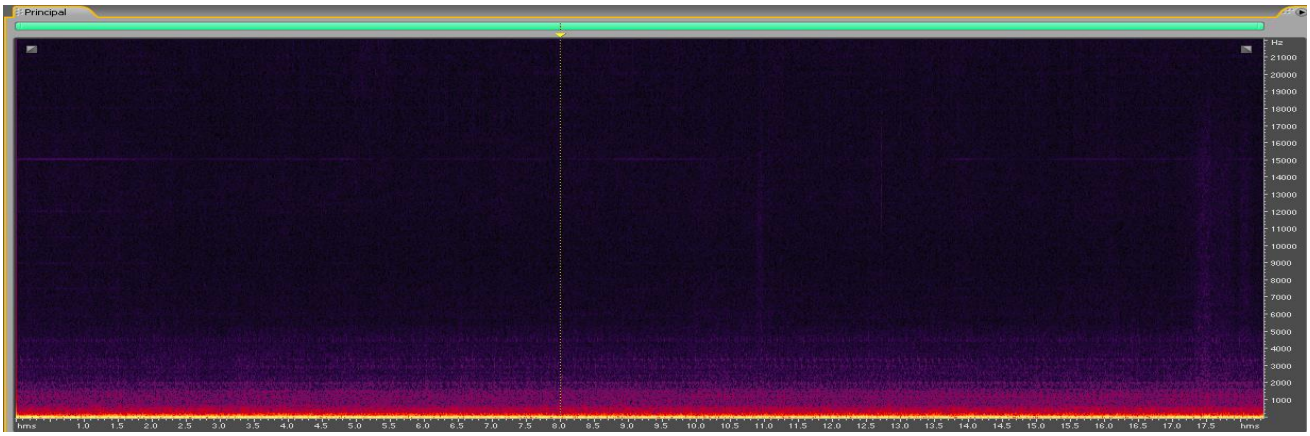


Figura 39. Análisis en frecuencia de la captura de audio a 10 Km/h en asfalto.

La diferencia entre la medición de la gravilla y la medición en asfalto es significativa debido a que la gravilla presenta grandes picos de amplitud que no se dan en el asfalto.

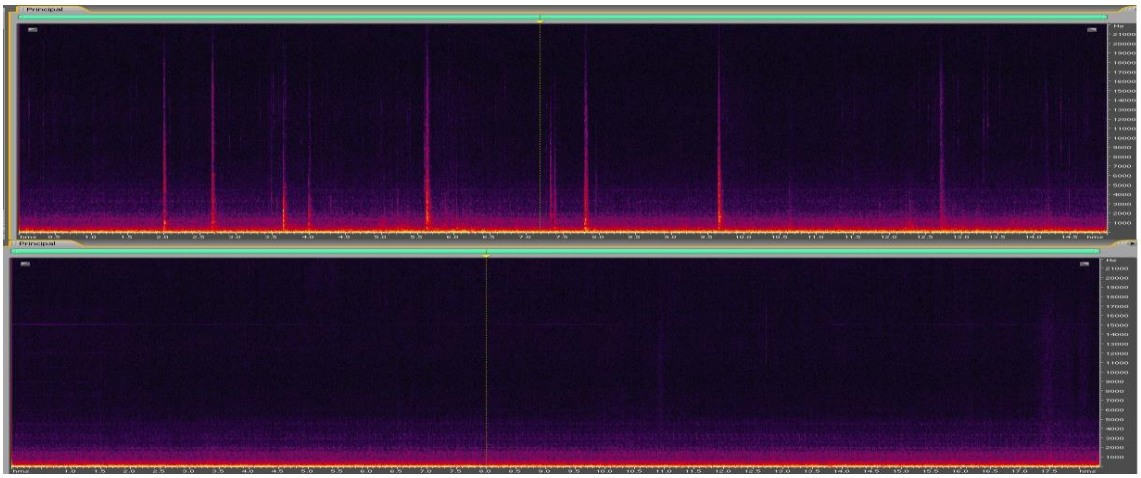


Figura 40. Análisis de la medición de gravilla vs asfalto.

Comparando los espectrogramas de la pista de gravilla vs asfalto (figura 40) se puede observar que el ruido de motor está presente sobre todo el recorrido en ambas mediciones y de aquí se logra determinar que es toda la concentración de energía ubicada en el fondo del espectro (línea de color amarillo en el fondo de los espectros) la cual es constante y se encuentra en ambos espectros es el ruido del motor.

5.2.1.1 Análisis por segmentos de 1 segundo a 10 kilómetros por hora

Debido a la presencia permanente del ruido de motor en las grabaciones, es necesario realizar una segmentación del audio para realizar un análisis por amplitud de la señal y de esta manera

determinar las características en frecuencia de los golpes a través del análisis visual. Se analizan solamente los fragmentos en los que hay presencia de impactos en instantes de un segundo. Al realizarlo se observa la cantidad de energía que posee el impacto de una mejor manera siendo el color amarillo (el cual se ubica dentro del margen color rojo) la mayor cantidad de energía presentada y en la cual se puede ubicar la frecuencia. A continuación (figura 41) se muestran los segmentos de los impactos de gravilla, señalando con una línea de color verde la frecuencia determinada por la mayor cantidad de energía con respecto a la amplitud.

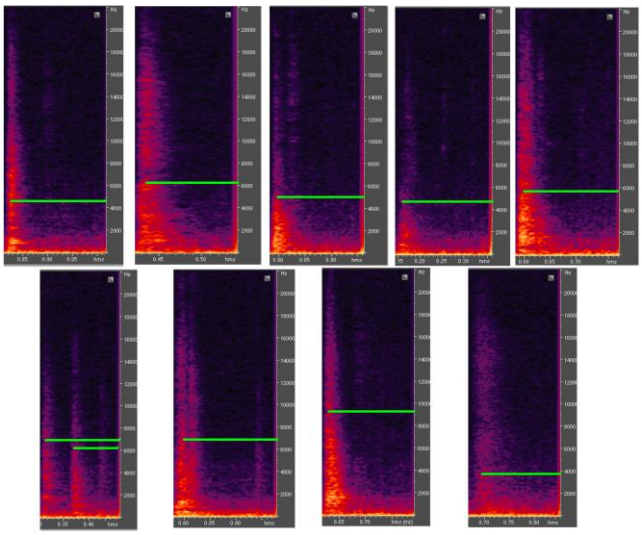


Figura 41. División del audio en segmentos de un segundo; tiempo, (eje x) vs. frecuencia (eje y).

En la figura 41 se observan segmentos de un segundo con impactos de gravilla presentes, las frecuencias máximas superiores son demarcadas con una la línea verde y pueden observarse en la tabla 8 a continuación:

Golpe Gravilla	Frecuencia máxima superior (Hz)
Golpe 1	1012
Golpe 2	1402
Golpe 3	1357
Golpe 4	4623

Golpe 5	2071
Golpe 6	1204
Golpe 7	2776

Tabla 8. Frecuencias Máximas Superiores de cada golpe de gravilla a 10Km/h.

De esta forma se encuentran siete impactos de gravilla con frecuencias máximas superiores desde 1012 Hz hasta 4623 Hz. A través de esta segmentación es posible reconocer los impactos de gravilla por su comportamiento en amplitud con respecto a los demás ruidos presentes en la grabación.

5.2.2 MEDICIÓN A 30 KM/H

El análisis del audio se realiza por medio de un espectrograma (análisis TEF) en el software de edición de audio Adobe Audition y alterno a este se realizará el análisis por frecuencia con la misma configuración utilizada en el ruido del motor y el escape.

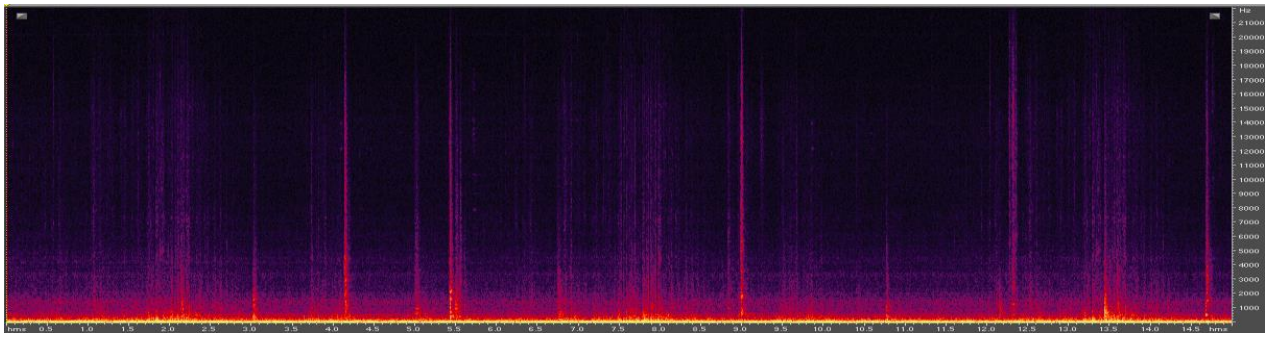


Figura 42. Análisis en frecuencia de la captura de audio a 30 Km/h, tiempo (eje x) vs. frecuencia (eje y).

Después de utilizar un filtro pasa altos, se puede observar que la señal no está del todo limpia debido a que por los baches y las imperfecciones de la vía se generó ruido producto del movimiento de los ejes y la suspensión. A través de la sección 5.2.1.1 donde se analiza el audio por segmentos, es posible determinar el comportamiento de un golpe de gravilla y separarlo visualmente de lo que es el ruido producto de la vía, como se puede observar en la figura 43 se demarca en un cuadro color amarillo este ruido. Visualmente se puede diferenciar de los golpes de gravilla debido a que el comportamiento y cantidad de energía que poseen es realmente bajo, por otro lado, la duración es del ruido es mucho mayor a la presentada por los impactos de grava

y su presencia es poco notoria, es posible determinar el ruido de una forma más concisa realizando un análisis auditivo.

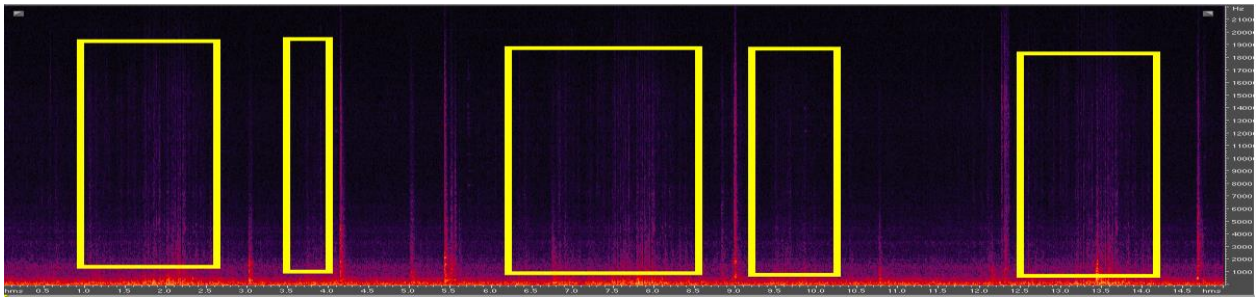


Figura 43. Análisis en frecuencia de la captura de audio a 30 Km/h con el ruido de suspensión presente

A través del software WaveLab fue posible eliminar todos los segmentos del ruido no deseado y de esta manera obtener una señal solo con el contenido de importancia (Impactos de gravilla a 30 km/h) como se muestra en la figura a continuación.

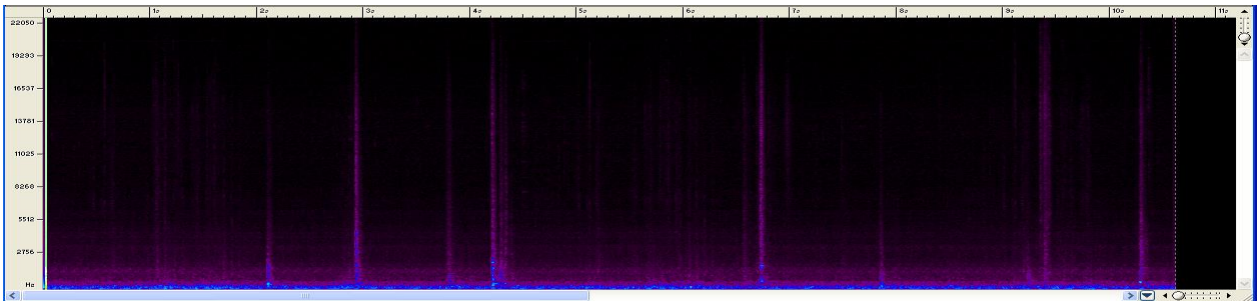


Figura 443. Análisis en frecuencia de la captura de audio a 30 Km/h filtrada con WaveLab

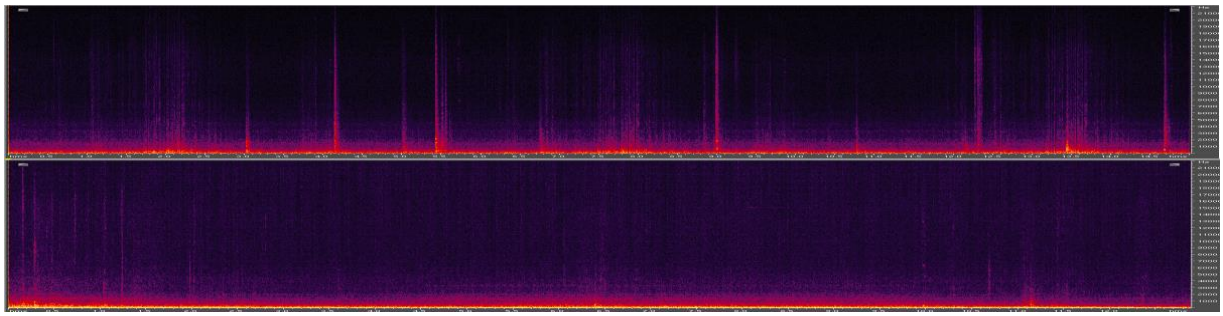


Figura 44. Análisis de la medición de gravilla vs. Asfalto a 30 km/h.

El número de impactos a 30 km/h fue mayor que a la velocidad de 10 Km/h. La comparación de los dos terrenos muestra un comportamiento muy diferente debido a que la señal del asfalto tiene un comportamiento homogéneo y continuo, contrario a la gravilla la cual posee grandes cambios

en amplitud. Las frecuencias pico de los impactos de gravilla se encuentran en la siguiente sección (5.2.2.1).

5.2.2.1 Análisis por segmentos de 1 segundo a 30 kilómetros por hora

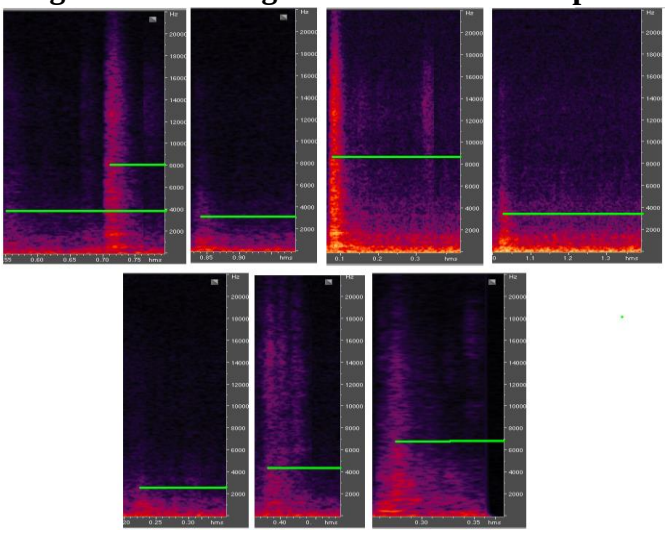


Figura 45. División del audio en segmentos de un segundo; tiempo, (eje x) vs. frecuencia (eje y).

En la figura 45 se observan los 8 segmentos de un segundo con impactos de gravilla presentes, las frecuencias máximas superiores son demarcadas con una la línea verde y pueden observarse en la tabla a continuación:

Golpe Gravilla	Frecuencia máxima superior (Hz)
Golpe 1	1217
Golpe 2	2094
Golpe 3	1983
Golpe 4	2071
Golpe 5	3232
Golpe 6	1417
Golpe 7	2491
Golpe 8	1141

Tabla 9. Frecuencias Máximas Superiores de cada golpe de gravilla a 30Km/h.

Las frecuencias máximas superiores de los 8 impactos de gravilla van desde 1000 Hz a 3232 Hz. A través de esta segmentación es posible reconocer los impactos de gravilla por su comportamiento en amplitud con respecto a los demás ruidos presentes en la grabación.

5.2.3 MEDICIÓN A 40 KM/H

El análisis del audio se realiza por medio de un espectrograma (análisis TEF) en el software de edición de audio Adobe Audition y alterno a este se realizará el análisis en frecuencia con la misma configuración utilizada en el ruido del motor y el escape (figura 46).

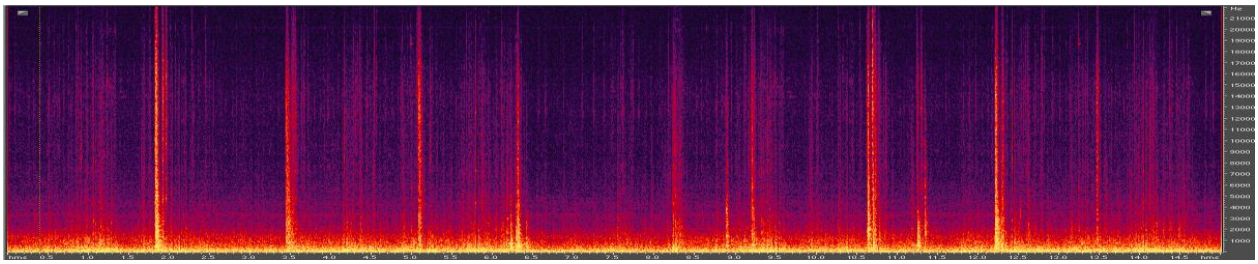


Figura 46. Análisis en frecuencia de la captura de audio a 40 Km/h, tiempo (eje x) vs. frecuencia (eje y).

Por medio de un filtro pasa altos se limpia la señal para solo tener el contenido producto de los golpes de gravilla (figura 47).

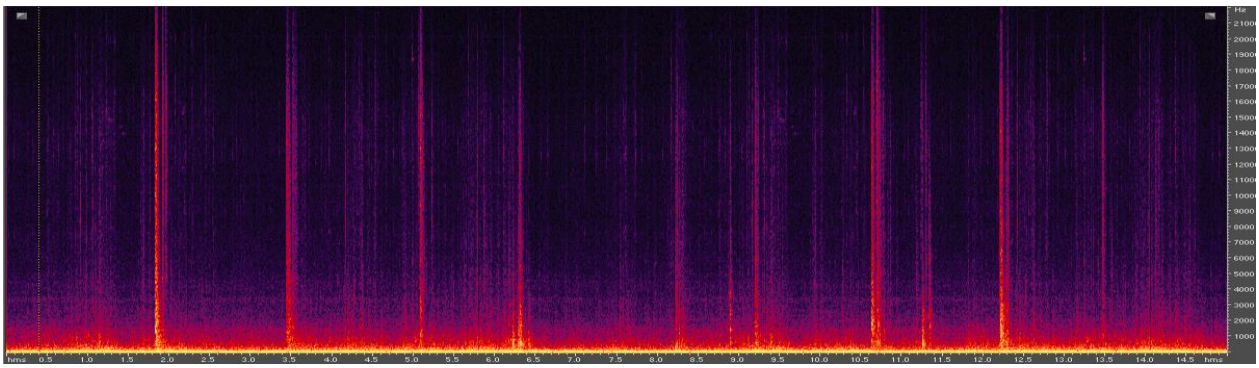


Figura 47. Análisis en frecuencia de la captura de audio a 40 Km/h con el filtro pasa-banda.

En la figura 47 se observa que el ruido de motor está presente en toda la captura como se ha mencionado anteriormente, debido a los baches y las imperfecciones de la vía se generó ruido producto del movimiento de los ejes y la suspensión; dicho ruido presenta un comportamiento totalmente diferente al ruido de gravilla en amplitud y cantidad de energía, a esta velocidad los impactos de las rocas son están mucho mejor marcados y poseen mayor presencia lo que hace

mucho más fácil determinar visualmente el ruido producto de las imperfecciones de la vía. Es necesario recurrir al software de edición de audio WaveLab para limpiar la señal haciendo uso de un filtro pasa altos (figura 48).

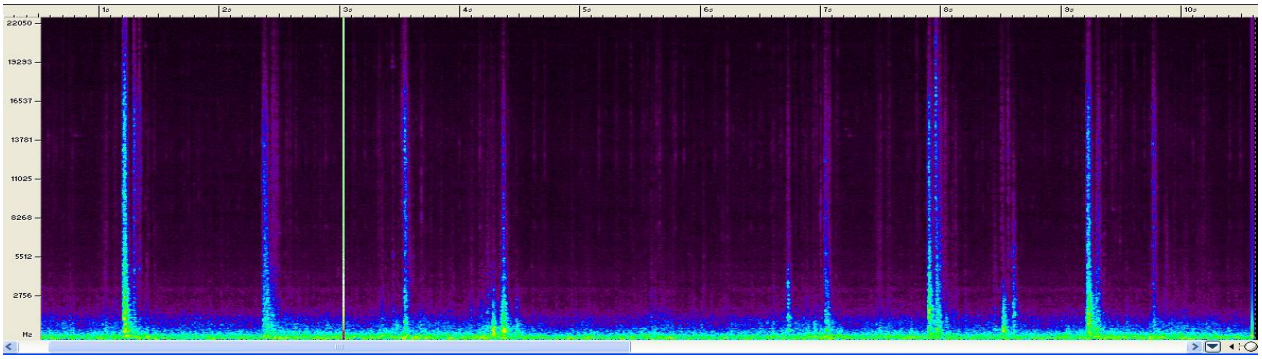


Figura 48. Señal filtrada con WaveLab.

Gracias a que el motor funciona a una revolución más alta al transitar a una velocidad de 40 Km/h el ruido del mismo y el ruido de la suspensión por el estado de la pista fue mayor. Aunque no fue posible eliminar la totalidad del ruido no deseado, la figura 49 y 50 resaltan con un recuadro amarillo el contenido de audio no deseado restante, eliminando la mayoría del ruido de suspensión y minimizando el ruido del motor.

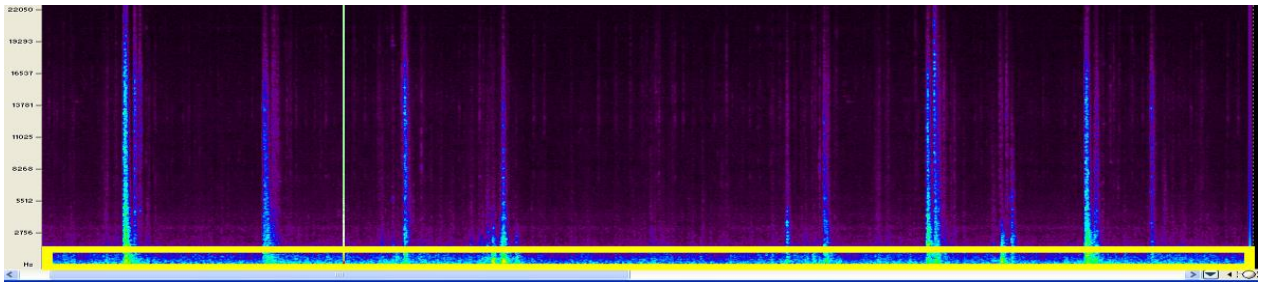


Figura 49. Análisis en frecuencia de la captura de audio filtrada a 40 Km/h, tiempo (eje x) vs. frecuencia (eje y).

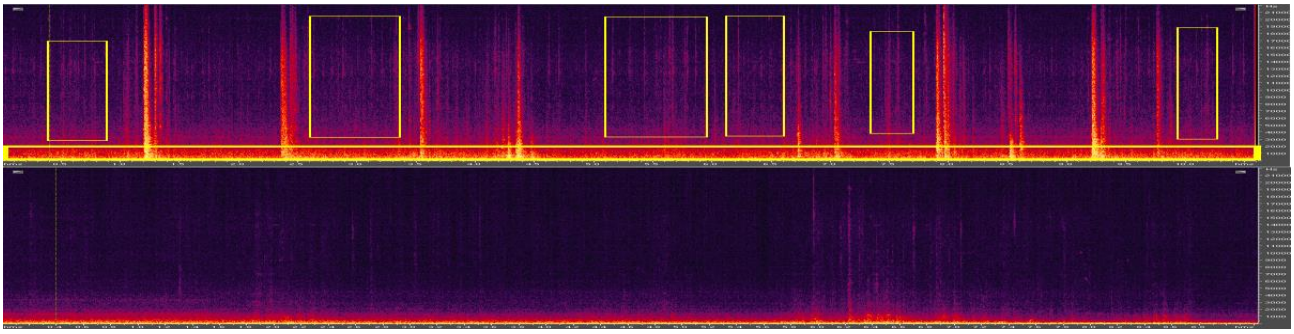


Figura 50. Análisis de la medición de gravilla vs. Asfalto a 40 km/h.

En la figura 50 se observa el número de impactos a 40 km/h y se denota la gran diferencia comparando con la medición en la pista de asfalto en la cual no existe presencia de golpes o impactos de ningún tipo. La comparación de los dos terrenos muestra un comportamiento muy diferente debido a que la señal del asfalto es realmente homogénea a esta velocidad. En cambio, la de gravilla tiene grandes cambios en amplitud.

5.2.3.1 Análisis por segmentos de 1 segundo a 40 kilómetros por hora.

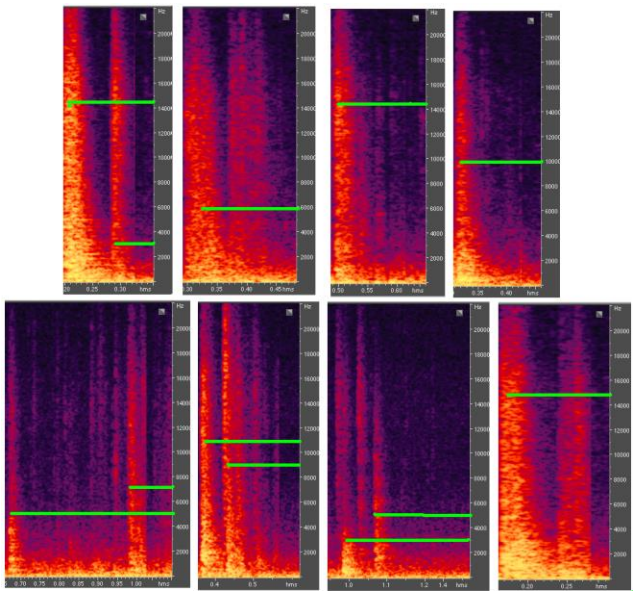


Figura 51. División del audio en segmentos de un segundo; tiempo, (eje x) vs. frecuencia (eje y).

En la figura 51 se observan segmentos de un segundo con impactos de gravilla presentes, las frecuencias máximas superiores son demarcadas con una la línea verde y pueden observarse en la tabla 10 a continuación:

Golpe Gravilla	Frecuencia máxima superior (Hz)
Golpe 1	1417
Golpe 2	1204
Golpe	1342

Golpe 4	1342
Golpe 5	1402
Golpe 6	1464
Golpe 7	2309
Golpe 8	2140
Golpe 9	1920
Golpe 10	1649
Golpe 11	2071
Golpe 12	1500

Tabla 10. Frecuencias Máximas Superiores de cada golpe de gravilla a 40Km.

Como se observa en la tabla 10, el número de golpes de gravilla es el más alto hasta el momento, lo que da un indicio de a mayor velocidad mayor cantidad de golpes de gravilla existen. Para esta velocidad la banda de frecuencias presentada es de 1000 Hz hasta 2309. Aunque aumentaron los impactos de gravilla no se observan cambios grandes frente a la banda de frecuencia que presentan los impactos.

5.3 MEDICIÓN CON Y SIN RECUBRIMIENTO

5.3.1 VARIANZA Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR

Para verificar que el promedio estudiado es consecuente en cada una de las mediciones es necesario realizar una desviación estándar de los datos.

$$S = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Ecuación 4. Ecuación para calcular la desviación estándar.

Se halla la varianza de las dos mediciones sin recubrimiento a las tres velocidades realizadas, se suma el resultado con los niveles ponderados de las mediciones a las tres velocidades con

recubrimiento de corcho y de lana de roca; se divide el resultado entre el número de datos para hallar su promedio; posteriormente se resta el ponderado del recubrimiento de lana de roca, del recubrimiento de corcho y de las dos mediciones sin recubrimiento, realizadas independientemente y su resultado se eleva al cuadrado (media aritmética). La desviación estándar se obtiene con la raíz de la suma de los cuadrados de la diferencia de los datos de las mediciones y la media aritmética sobre el número de datos menos 1.

A continuación, se observan las tablas con el resultado del cálculo de las desviaciones estándar.

Leq (dB spl)\Frecuencia (Hz)	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300
Sin Recubrimiento	48,195	41	39,9	39,77	42,3	39,4	36,8	37	35,6	35,9	34,4	33,5	31,7	32,3	29,5	26,24
Desviación estándar	0,9018	0,32	0,666	1,595	0,98	1,84	1,36	1,38	0,59	0,74	1,31	0,87	2,14	4,02	4,88	6,445
Con recubrimiento de corcho	47,04	42,5	39,78	39,45	39,8	38,5	35,2	33,3	32	31,1	27,1	23,4	22,2	22,1	20,2	15,4
Desviación estándar	0,3055	1,68	1,473	1,185	0,75	0,35	1,27	1,01	0,87	0,76	0,29	0,53	0,49	0,4	0,4	0,666
Con recubrimiento de lana de roca	47,27	41,3	38,79	38,41	38,8	36,2	33,7	33,7	34,3	35,1	29,9	26,9	26,6	23,7	20,9	16,35
Desviación estándar	0,2082	0,36	0,611	0,4	0,38	0,25	0,25	0,32	0,35	0,21	0,5	0,36	1,97	1,78	1,76	1,21

Tabla 11. Desviación estándar y los niveles Leq de las tres mediciones a 10 Km/h con y sin recubrimiento de corcho y de lana de roca para las bandas de 200 a 6300 Hz.

Leq (dB spl)\Frecuencia (Hz)	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300
Sin Recubrimiento	50,512	49,9	49,01	45,76	46,1	45,9	45,1	44,9	44,9	44	43,2	41,5	40,2	38,6	37	33,12
Desviación estándar	0,4	0,5	0,361	0,854	0,86	1,06	0,52	2,96	2,06	1,2	1,67	1,06	0,46	3,6	1,9	1,05
Con recubrimiento de corcho	49,924	48,9	47,78	45,31	43,9	42,3	41,5	38,6	37,8	38,3	34,4	29,7	30,3	25,7	23,2	17,54
Desviación estándar	0,5568	0,86	0,379	0,436	0,4	0,99	1,06	0,38	1,13	0,92	0,55	0,44	0,5	0,64	0,55	0,351
Con recubrimiento de lana de roca	47,771	48,3	47,01	44,77	41,9	40,5	41,5	39	40,7	41,1	38,6	33,6	34,1	27,1	23,6	18,31
Desviación estándar	0,2309	0,49	0,265	0,208	0,7	0,1	0,29	0,12	0,4	0,51	0,31	0,17	0,15	0,3	0,1	0,265

Tabla 12. Desviación estándar y los niveles Leq de las tres mediciones a 30 Km/h con y sin recubrimiento de corcho y de lana de roca para las bandas de 200 a 6300Hz.

Leq (dB spl)\Frecuencia (Hz)	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300
Sin Recubrimiento	50,31	49,9	49,2	45,87	46,2	48,8	45,5	48,8	49,1	44,6	43,7	45,3	44,7	42	39,4	37,31
Desviación estándar	0,3606	0,31	0,681	0,723	1,8	4,19	2,86	6,07	7,12	4,17	4,62	6,45	4,83	4,19	4,01	2,778
Con recubrimiento de corcho	50,171	49	47,4	44,7	44,2	42	40,8	39,2	37	38,2	34,8	31	30,8	26,6	24,6	19,38
Desviación estándar	0,7024	0,15	0,1	0,173	0,65	0,52	0,87	1,1	0,62	0,3	1,18	1,62	2,02	2,02	2,57	2,714
Con recubrimiento de lana de roca	48,368	49,3	47,11	44,92	43	40,9	40,9	39,3	40,2	41,4	38,5	33,6	33,8	27,6	24	18,54
Desviación estándar	0,6658	0,42	0,265	0,458	0,29	0,32	0,51	0,06	0,21	0,26	0,15	0,17	0,26	0,2	0,46	0,321

Tabla 13. . Desviación estándar y los niveles Leq de las tres mediciones a 10 Km/h con y sin recubrimiento de corcho y de lana de roca para las bandas de 200 a 6300 Hz.

El resultado de la desviación estándar de las mediciones con los recubrimientos de corcho y lana de roca vs las mediciones sin recubrimiento a las tres velocidades es bajo, lo que significa que los resultados de las mediciones tienen baja variabilidad entre cada una de sus repeticiones (3 repeticiones por cada una).

5.3.2 MEDICIONES DE CAMPO

A continuación, se muestran los espectrogramas de las capturas a 10, 30 y 40 km/h sin recubrimiento. Para estas mediciones se hace una repetición de 3 tomas por cada velocidad y posteriormente se hace el análisis del audio con más presencia de impactos.

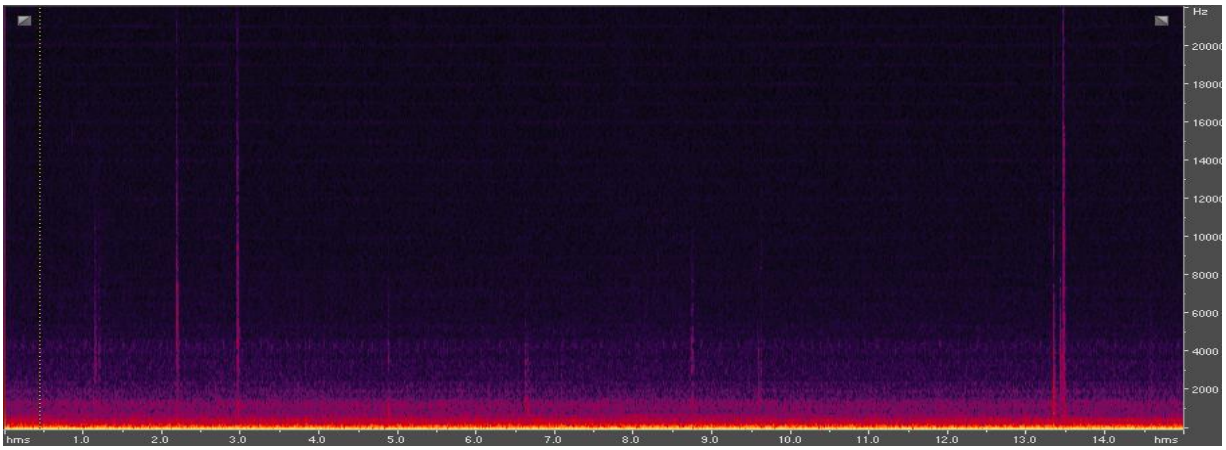


Figura 52. Grabación sin recubrimiento a 10 km/h sobre gravilla.

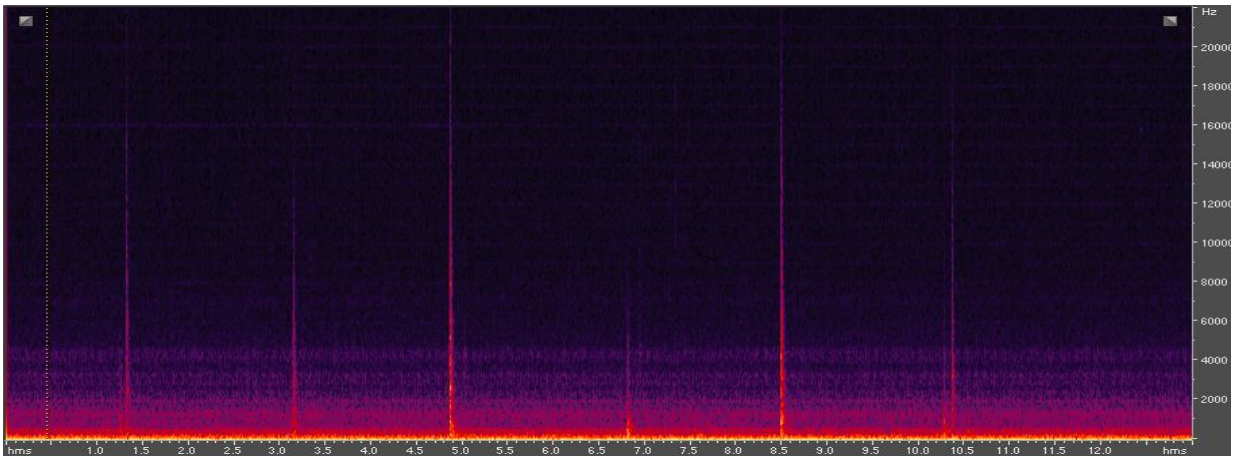


Figura 53. Grabación sin recubrimiento a 30 km/h sobre gravilla.

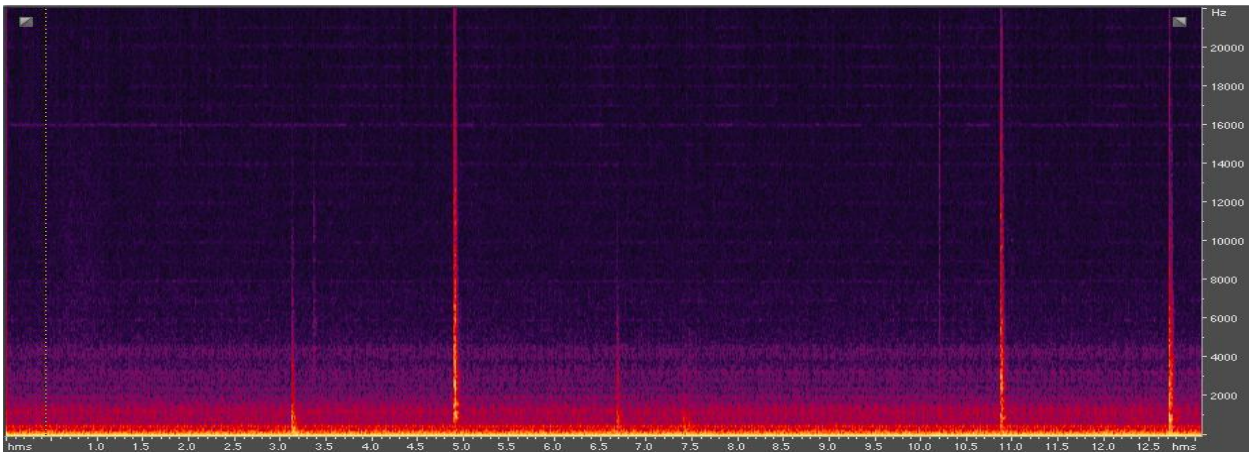


Figura 54. Grabación sin recubrimiento a 40 km/h sobre gravilla.

En la tabla 14 se muestran los niveles Leq en dB por medición, estos niveles de presión son ponderados en todas las bandas de frecuencias analizadas. Se realizaron 31 mediciones de campo de la siguiente manera:

- Medición ruido de fondo (2); una con motor apagado y una con motor encendido (sección 5.1.3).
- Medición de ruido de motor (1).
- Medición de ruido de escape (1).
- Medición sin recubrimiento (9); tres por cada velocidad.
- Medición con recubrimiento de corcho (9); tres por cada velocidad.
- Medición con recubrimiento de lana de roca (9); tres por cada velocidad.
- Total, de mediciones (31)

Como el terreno de gravilla es un terreno que no se puede controlar es necesario realizar tres diferentes velocidades para las tres velocidades diferentes con y sin recubrimiento, de esta forma se afirma la fiabilidad de los datos obtenidos. El template del sonómetro utilizado no fue ajustado para analizar en función del tiempo sino en función de energía.

	Para 10 Km/h				
	medición 1 (dB SPL)	medición 2 (dB SPL)	medición 3 (dB SPL)	Leq total (dB SPL)	Diferencia (dB SPL)
Sin recubrimiento	51,6	50,9	51,3	51,28	
Con recubrimiento de corcho	49,9	50,4	49,8	50,04	1,23
Con recubrimiento de lana de roca	50,8	50,9	50,7	50,80	0,48
	Para 30 Km/h				
Sin recubrimiento	55,2	56	57,1	56,17	
Con recubrimiento de corcho	53,4	54,1	53,6	53,71	2,46
Con recubrimiento de lana de roca	50,7	54,4	54,4	53,48	2,69
	Para 40 Km/h				
Sin recubrimiento	57,1	60,4	54,4	57,98	
Con recubrimiento de corcho	54,1	53,9	53,8	53,03	4,95
Con recubrimiento de lana de roca	54,3	54,2	54,2	54,23	3,75

Tabla 14. Niveles de Leq de cada medición y el ruido de motor (encendido y apagado) en dB SPL.

Por otra parte, se realizar una resta aritmética de los niveles Leq sin recubrimiento vs. Con recubrimiento de Lana de roca y de corcho para ver cuánto disminuye nivel de ruido generado por el choque de gravilla.

5.3.3 Medición con recubrimiento de lana de roca

Se instalan los recubrimientos en los cuatro guardabarros utilizando un pegamento multiusos de alta adherencia y secado rápido, se realizan las pasadas a 10, 30 y 40 km/h y los resultados obtenidos son.

5.3.3.1 Medición con el recubrimiento de lana de roca a 10 kilómetros por hora

A continuación, se muestra el espectrograma de la captura obtenida sobre terreno de gravilla a 10 km/h con el recubrimiento de lana de roca.

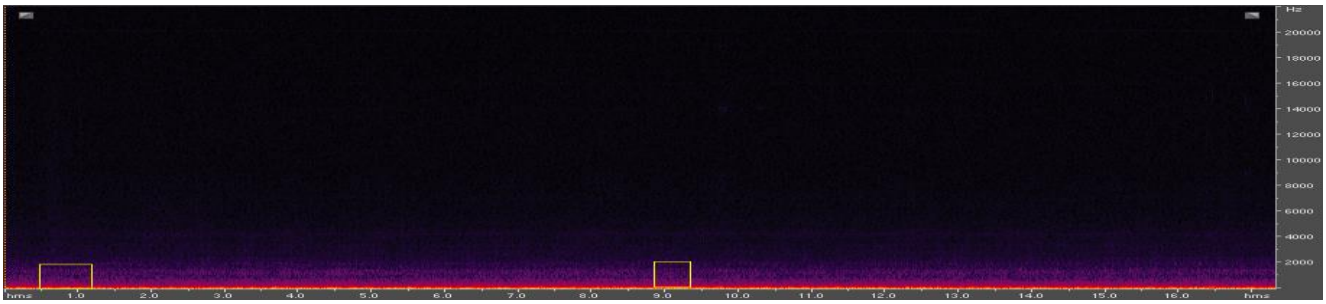


Figura 55. Grabación a 10 Km/h con el recubrimiento de lana de roca.

Realizando una comparación de la medición con y sin recubrimiento, se puede observar la atenuación producto del material al pasar por este tipo de terreno; también se resalta en rectángulos amarillos los impactos que se presentan a esta velocidad (figura 55). En la figura 56 se puede observar la comparación sin recubrimiento vs con recubrimiento.

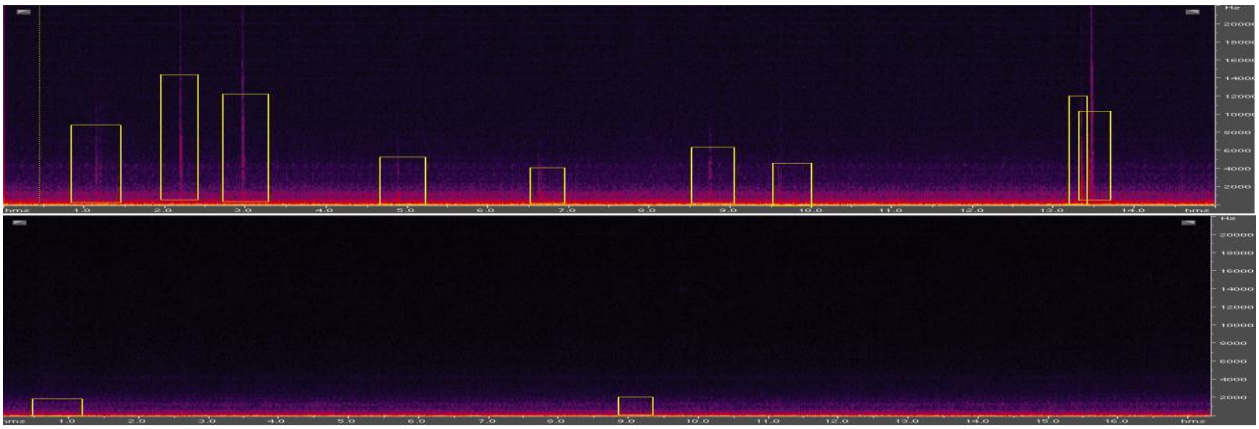
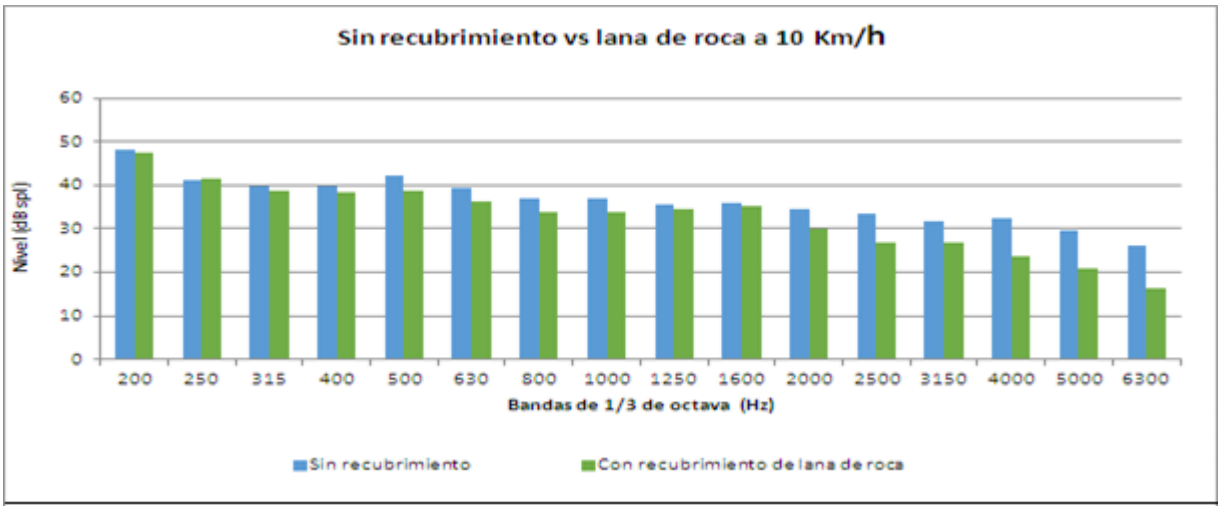


Figura 56. Comparación sin recubrimiento (imagen superior) vs con recubrimiento (imagen inferior) a 10 Km/h.

De esta forma, se puede comprobar que al transitar a esta velocidad la lana de roca genera una atenuación en las bandas de 1/3 de octava en las que se encuentra presente el ruido de gravilla. Es posible comprobar la fiabilidad y veracidad de los datos debido a que se desarrollan tres mediciones para cada velocidad con y sin recubrimiento (9 mediciones sin recubrimiento, 9 mediciones con recubrimiento de lana de roca y 9 mediciones con recubrimiento de lana de roca). La desviación estándar calculada para cada velocidad por banda de tercio de octava (tabla 11, 12 y 13) muestra valores muy bajos entre las mediciones afirmando la alta calidad de las mismas. Para analizar el nivel de atenuación del recubrimiento se recurre a los datos del sonómetro obtenidos.



Gráfica 2. Comparación del recubrimiento de lana de roca vs sin recubrimiento a 10 Km/h.

Como se puede observar en la gráfica 2, se hace la comparación de los niveles Leq en las bandas de 1/3 de octava de 200 a 6300 Hz de la medición sin recubrimiento vs. Con recubrimiento de lana de roca a 10 km/h, debido a que estas son las bandas en las que esta contenido el ruido de gravilla, existe una disminucion de ruido de los impactos de la gravilla a través de la lana de roca y se hace una resta aritmetica los niveles Leq por bandas para demostrar la disminución en dB producto del recubrimiento. De la misma forma se hace una diferencia de nivel a traves de una resta aritmetica como se muestra en la tabla 15, donde se obtienen valores de atenuacion de 0.27 dBSPL hasta 9.891 dBSPL.

- Sin recubrimiento – lana de roca a 10 Km/h:

Diferencia en dB spl\Frecuencia	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300
Sin recubrimiento VS lana de roca	0,925	0,27	1,106	1,36	3,57	3,14	3,04	3,24	1,25	0,77	4,58	6,58	5,1	8,68	8,56	9,891

Tabla 15 . Sin recubrimiento vs lana de roca a 10 Km/h.

5.3.3.2 Medición con el recubrimiento de lana de roca a 30 kilómetros por hora

A continuación, la figura 57 muestra el espectrograma de la captura obtenida sobre terreno de gravilla a 30 km/h con el recubrimiento de lana de roca.

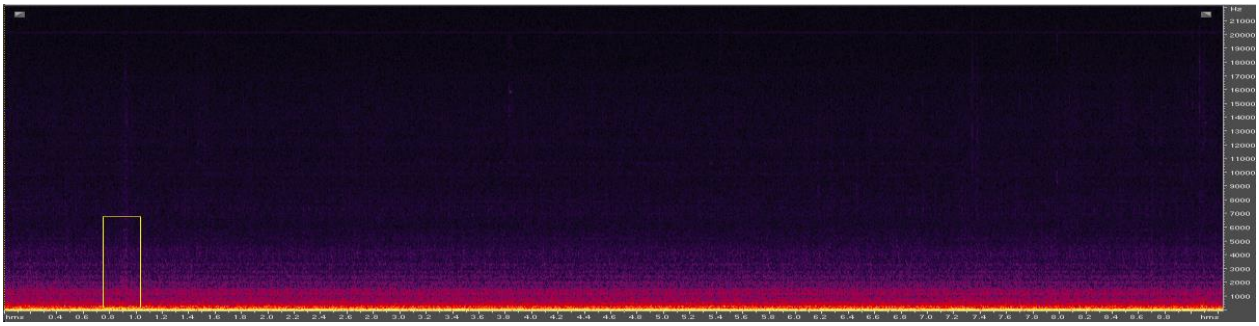


Figura 57. Grabación a 30 Km/h con el recubrimiento de lana de roca.

El análisis del antes y después del recubrimiento a esta velocidad demuestra la eficacia del uso de la lana de roca (figura 58). En el espectrograma del antes se observan los impactos productos del golpe de la gravilla resaltados en recuadros amarillos y en el después solo se ve un impacto y con mucha menor amplitud que sin el recubrimiento.

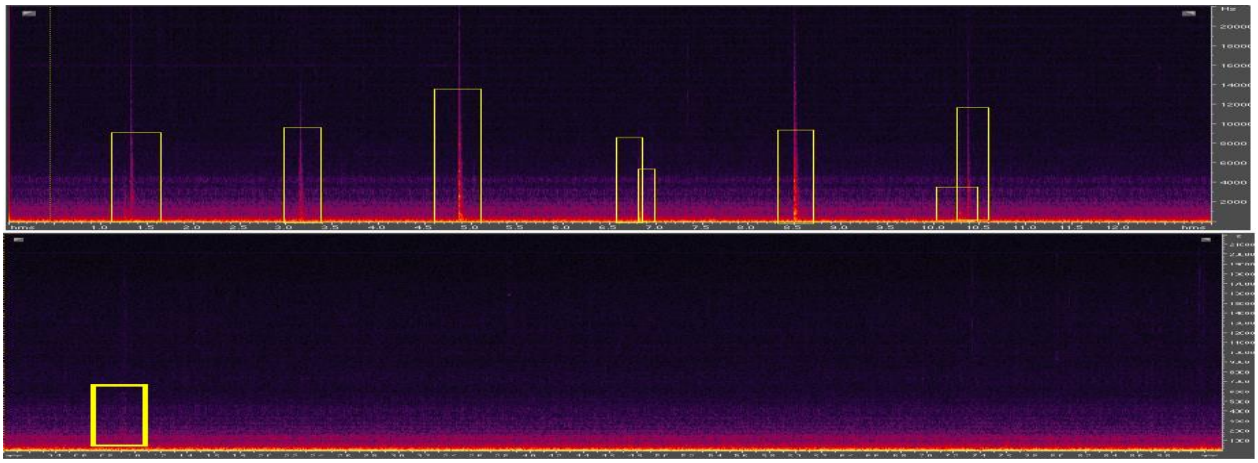
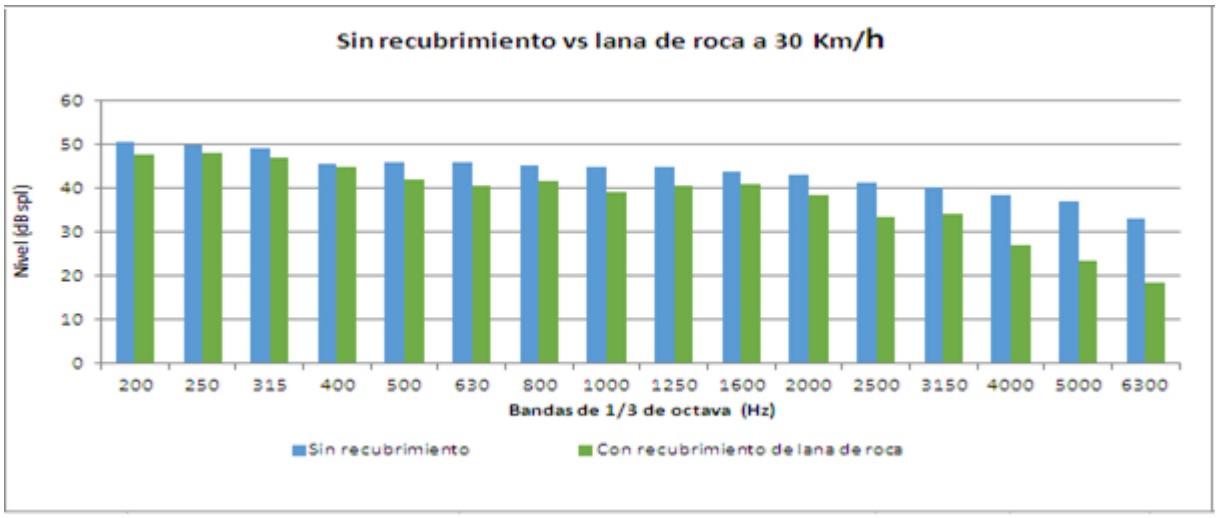


Figura 58. Comparación sin recubrimiento (imagen superior) vs con recubrimiento (imagen inferior) a 30 Km/h.

Se puede observar que sin el recubrimiento se han registrado hasta ocho golpes de gravilla en la grabación, el recubrimiento disminuye este número a uno que posee características de amplitud mucho más bajas, lo que quiere decir que el impacto de la gravilla es amortiguado por el material. Para verificar este análisis, se observan en la gráfica 3 la comparación de niveles.



Gráfica 3. Comparación del recubrimiento de lana de roca vs sin recubrimiento a 30 Km/h.

Como se puede observar en la gráfica anterior, se hace la comparación de los niveles Leq en las bandas de 1/3 de octava de 200 a 6300 Hz de la medición sin recubrimiento vs. Con recubrimiento de lana de roca a 30 km/h, debido a que estas son las bandas en las que esta contenido el ruido de gravilla, existe una disminucion de ruido de los impactos de la gravilla a traves de la lana de roca y se hace una resta aritmetica los niveles Leq por bandas para demostrar la disminución en dB producto del recubrimiento. En la tabla 16 se puede observar que la disminucion de nivel esta en valores de 0.985 hasta 14.81 a esta velocidad.

- Sin recubrimiento – lana de roca a 30 Km/h:

Diferencia en dB spl\Frecuencia	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300
Sin recubrimiento VS lana de roca	2,7416	1,67	2,004	0,985	4,25	5,42	3,58	5,89	4,2	2,89	4,56	7,89	6,18	11,5	13,4	14,81

Tabla 16. Sin recubrimiento vs lana de roca a 30 Km/h.

5.3.3.3 Medición con el recubrimiento de lana de roca a 40 kilómetros por hora

A continuación, se muestra el espectrograma de la captura obtenida sobre terreno de gravilla a 30 km/h con el recubrimiento de lana de roca.

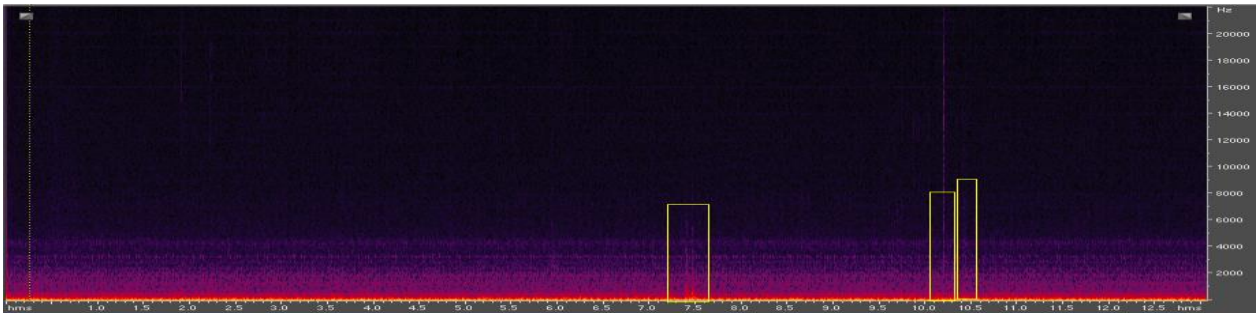


Figura 59. Grabación a 40 Km/h con el recubrimiento de lana de roca.

El análisis del antes y después del recubrimiento a esta velocidad demuestra la eficacia del uso de la lana de roca (figura 60). En el espectrograma del antes se observan los impactos productos del golpe de la gravilla resaltados en recuadros amarillos y en el después solo se ven tres impactos y con mucha menor amplitud que sin el recubrimiento. Se puede observar que a esta velocidad hay más presencia de golpes de gravilla que en las velocidades anteriores, lo que quiere decir que el terreno golpea con más fuerza el material.

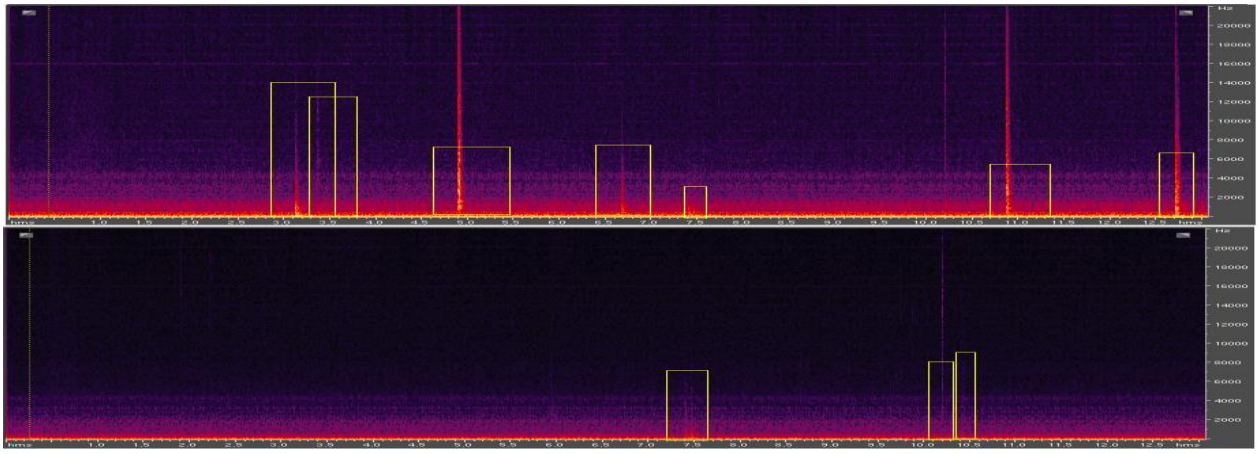
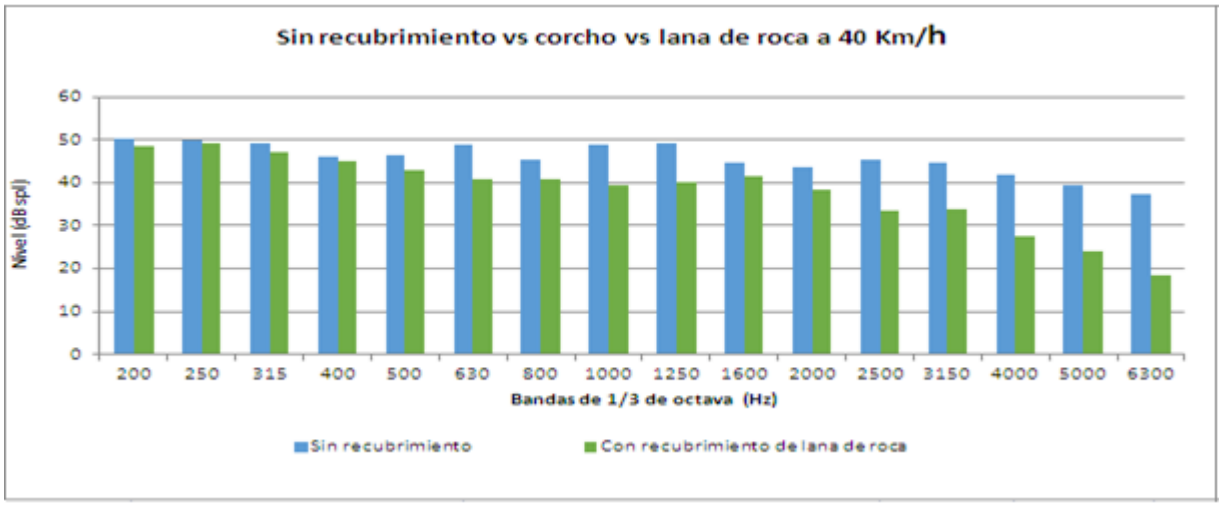


Figura 60. Comparación sin recubrimiento (imagen superior) vs con recubrimiento (imagen inferior) a 40 Km/h.

Se puede observar que sin el recubrimiento se han registrado siete golpes de gravilla en la grabación, el recubrimiento disminuye este número a tres que poseen características de amplitud mucho más bajas, lo que quiere decir que los impactos de la gravilla son amortiguados por el material.



Gráfica 4. Comparación del recubrimiento de lana de roca vs sin recubrimiento a 40 Km/h.

Como se puede observar en la gráfica 4, la comparación con y sin el recubrimiento de lana de roca a una velocidad de 40 km/h denota una disminucion existente del ruido de los impactos de la gravilla a través de la lana de roca, la resta aritmetica presentada en la tabla 17 denota niveles de disminucion de 0.66 dBSPL hasta 18.77 dB SPL como el nivel mas alto.

- Sin recubrimiento – lana de roca a 40 Km/h:

Diferencia en dB spl\Frecuencia	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300
Sin recubrimiento VS lana de roca	1,9416	0,66	2,096	0,956	3,16	7,96	4,57	9,5	8,82	3,22	5,21	11,7	10,9	14,4	15,4	18,77

Tabla 17. Sin recubrimiento vs lana de roca a 40 Km/h.

Comparando las tablas 15, 16 y 17 se observa que al recubrimiento cumple con su función atenuando los niveles del ruido de gravilla. Sin embargo, es posible notar un aumento de atenuación en frecuencias medias y altas a medida que aumenta la velocidad, verificando esto al comparar los valores de 100 Hz a 6300 Hz a las tres diferentes velocidades.

5.3.4 Medición con recubrimiento de corcho

Se instalan los recubrimientos en los cuatro guardabarros utilizando un pegamento multiusos de alta adherencia y secado rápido, se realizan las pasadas a 10, 30 y 40 km/h y los resultados obtenidos son.

5.3.4.1 Medición con el recubrimiento de corcho a 10 kilómetros por hora

A continuación, se muestra el espectrograma de la captura obtenida sobre terreno de gravilla a 10 km/h con el recubrimiento de corcho.

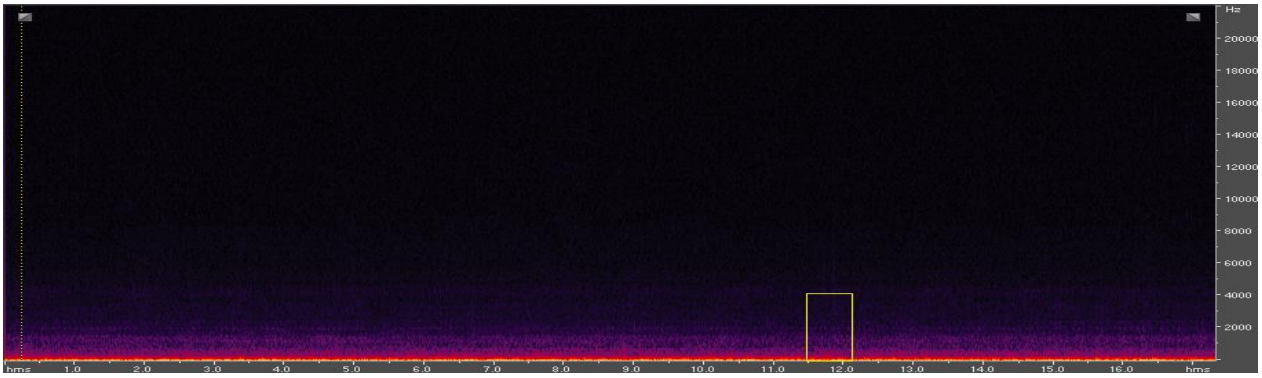


Figura 61. Grabación a 10 Km/h con el recubrimiento de corcho.

El análisis del antes y después del recubrimiento a esta velocidad demuestra la eficacia del uso del corcho. En el espectrograma del antes se observan los impactos productos del golpe de la gravilla resaltados en recuadros amarillos y en el después solo se ve un impacto y con mucha menor amplitud que sin el recubrimiento.

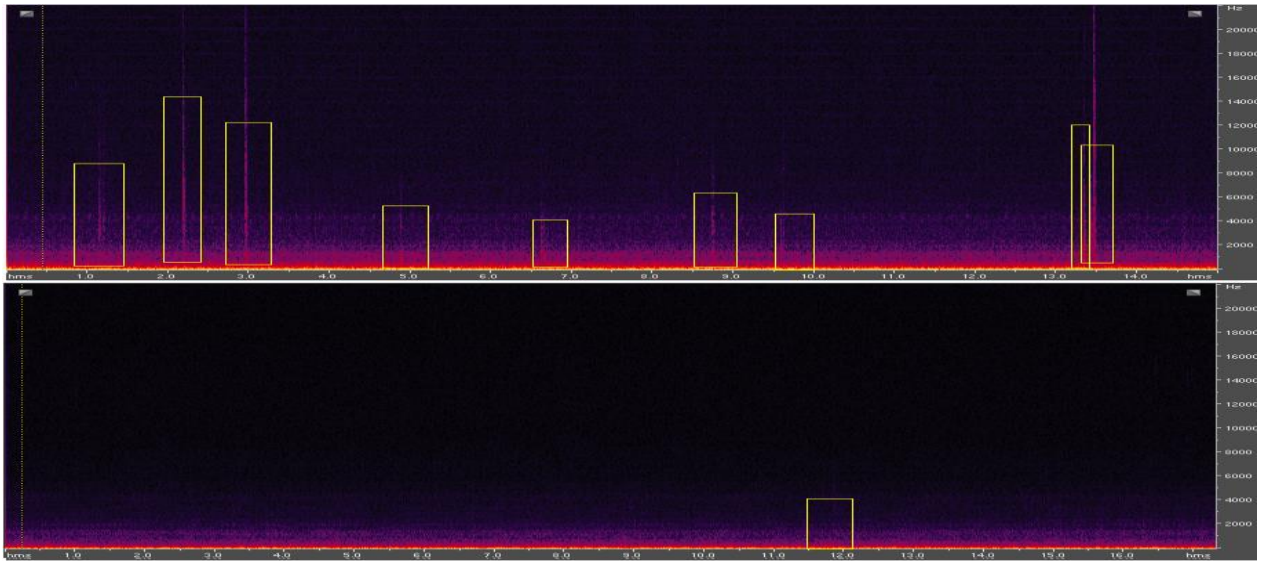
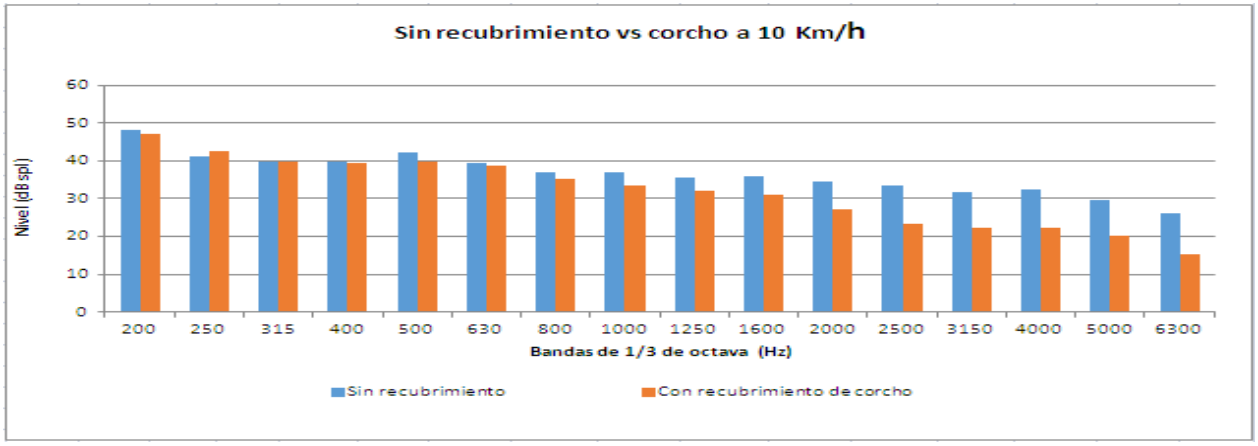


Figura 62. Comparación sin recubrimiento (imagen superior) vs con recubrimiento (imagen inferior) a 10 Km/h.

De esta forma, se puede comprobar que al transitar a esta velocidad el corcho genera una atenuación en las bandas de 1/3 de octava en las que se encuentra presente el ruido de gravilla.



Gráfica 5. Comparación del recubrimiento de corcho vs sin recubrimiento a 10 Km/h.

Como se puede observar en la gráfica 5, el corcho realiza su trabajo y logra una disminucion de ruido de los impactos de la gravilla, la resta aritmetica los niveles Leq por bandas presente en la tabla 18 demuestra la disminución en dB producto del recubrimiento atenuando desde 0.12 dB SPL hasta 10.84

Diferencia en dB spl\Frecuencia	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300
Sin recubrimiento VS corcho	1,1546	1,49	0,126	0,327	2,53	0,86	1,62	3,67	3,63	4,83	7,35	10,1	9,6	10,2	9,26	10,84

Tabla 18. . Sin recubrimiento vs corcho a 10 Km/h.

Comparando con la tabla 15, los niveles atenuados por el corcho resultan der más altos en todas las bandas de frecuencia realzando la eficiencia del material frente a la lana de roca.

5.3.4.2 Medición con el recubrimiento de corcho a 30 kilómetros por hora

A continuación, se muestra el espectrograma de la captura obtenida sobre terreno de gravilla a 30 km/h con el recubrimiento de corcho.

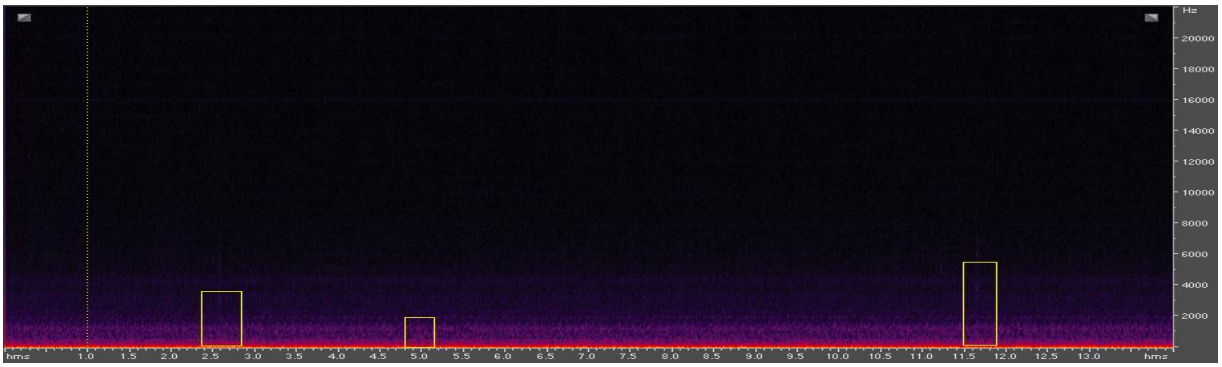


Figura 63. Grabación a 30 Km/h con el recubrimiento de corcho.

El análisis del antes y después del recubrimiento a esta velocidad (figura 64) demuestra la eficacia del uso del corcho. En el espectrograma del antes se observan los impactos productos del golpe de la gravilla resaltados en recuadros amarillos y en el después se ven tres impactos con mucha menor amplitud que sin el recubrimiento.

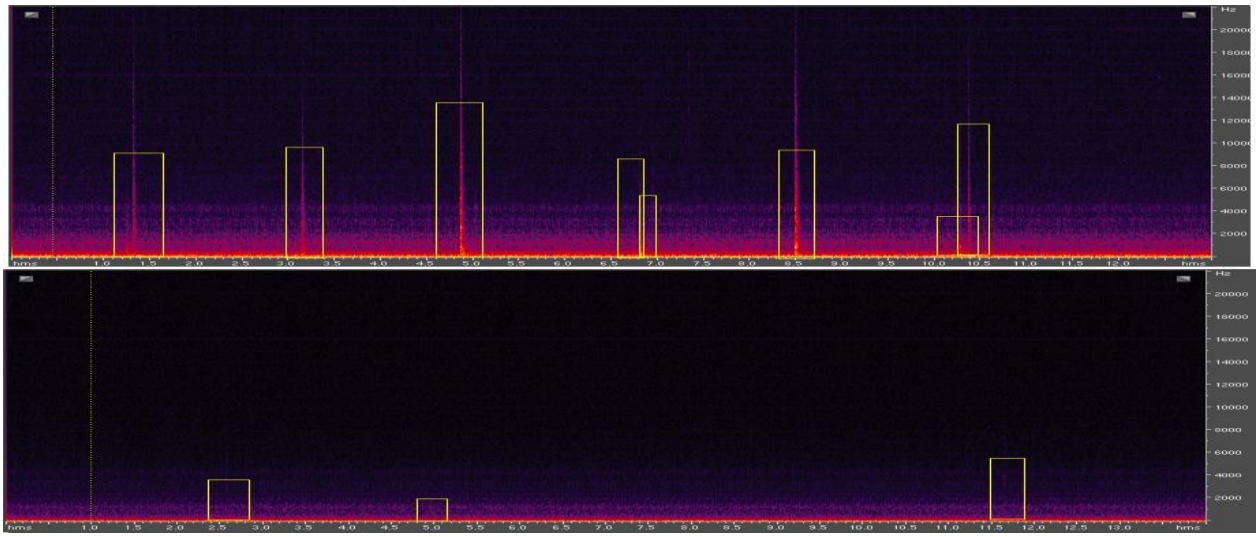
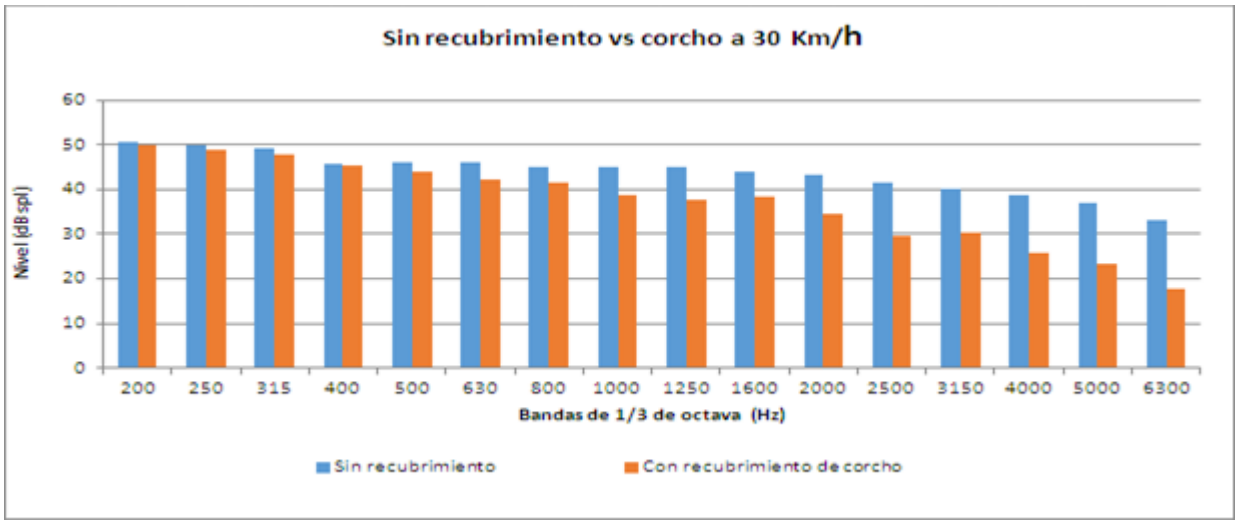


Figura 64. Comparación sin recubrimiento (imagen superior) vs con recubrimiento (imagen inferior) a 30 Km/h.

De esta forma, se puede comprobar que al transitar a esta velocidad el corcho genera una atenuación en las bandas de 1/3 de octava en las que se encuentra presente el ruido de gravilla. Sin embargo, comparando con la figura 55, existe una mayor presencia de golpes de gravilla con respecto a la medición con lana de roca.



Gráfica 6. Comparación del recubrimiento de corcho vs sin recubrimiento a 30 Km/h.

La gráfica 6 resalta la disminucion del ruido por bandas de 1/3 de octava aunque la disminucion debe ser verificada a través de la resta aritmetica los niveles Leq presente en la tabla 19:

Diferencia en dB spl\Frecuencia	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300
Sin recubrimiento VS corcho	0,5882	0,99	1,232	0,44	2,25	3,61	3,63	6,35	7,08	5,71	8,81	11,8	9,96	12,9	13,8	15,58

Tabla 19. Sin recubrimiento vs corcho a 30 Km/h.

A esta velocidad el material presenta niveles más bajos si se compara con la tabla 18 (velocidad de 10 Km/h), sin embargo, la disminución del ruido es eficiente alcanzando niveles de 0.44 dB SPL hasta 15.58 dB SPL.

5.3.4.3 Medición con el recubrimiento de corcho a 40 kilómetros por hora

A continuación, se muestra el espectrograma de la captura obtenida sobre terreno de gravilla a 40 km/h con el recubrimiento de corcho.

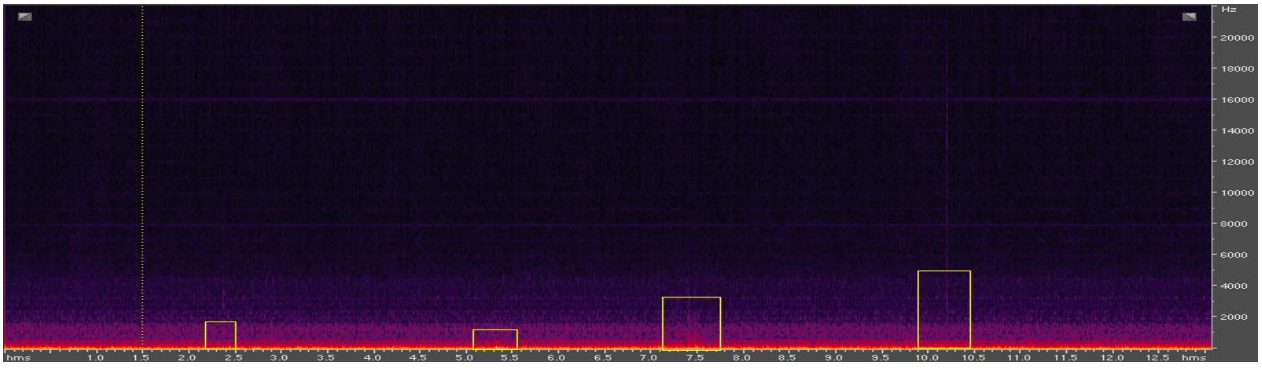


Figura 65. Grabación a 40 Km/h con el recubrimiento de corcho.

Posteriormente la figura 66 muestra el antes y después del material a una velocidad de 40 Km/h.

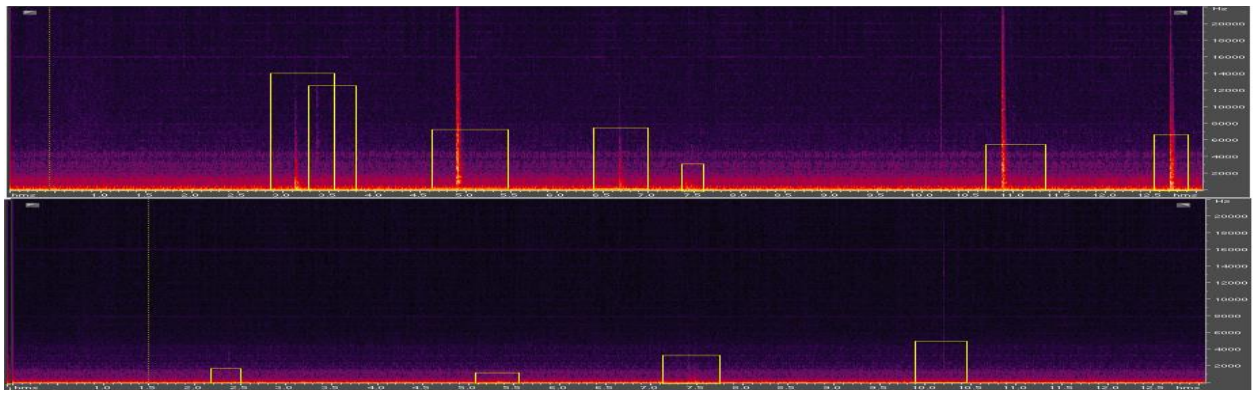
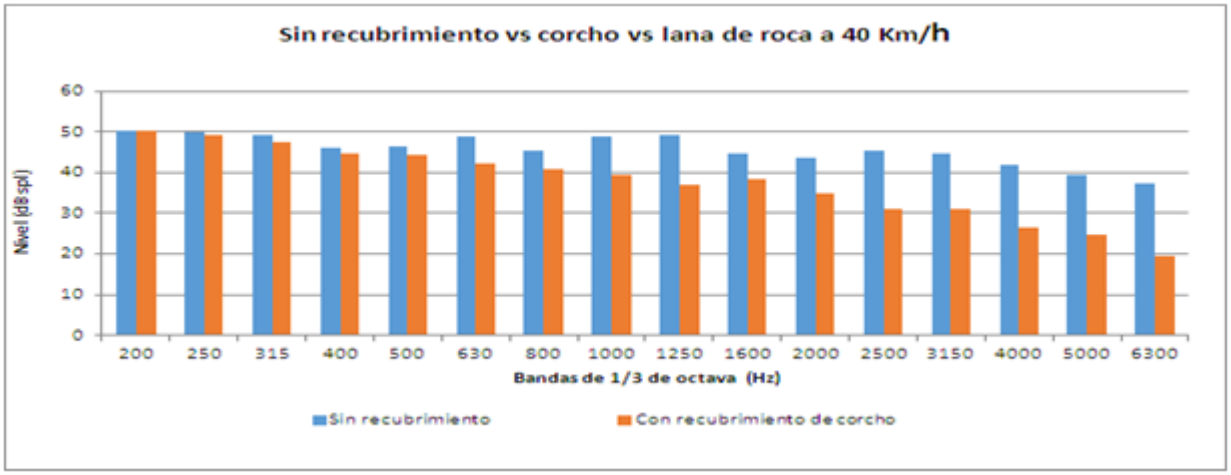


Figura 66. Comparación sin recubrimiento (imagen superior) vs con recubrimiento (imagen inferior) a 40 Km/h.

El análisis del antes y después del recubrimiento a esta velocidad demuestra la eficacia del uso del corcho. En el espectrograma del antes se observan los impactos productos del golpe de la gravilla resaltados en recuadros amarillos y en el después se ven cuatro impactos con mucha menor amplitud que sin el recubrimiento. La gráfica 66 muestra una atenuación a solo cuatro golpes, si se compara con la figura 60 (velocidad de 40 Km/h y recubrimiento de lana de roca), presenta un golpe más.



Gráfica 7. Comparación del recubrimiento de corcho vs sin recubrimiento a 40 Km/h.

La gráfica 7 compara los niveles a la velocidad de 40 Km/h denotando la existencia de una disminucion de ruido de los impactos de la gravilla a traves del corcho y se hace una resta aritmetica los niveles Leq por bandas para demostrar la disminución en dB SPL producto del recubrimiento (tabla 20):

- Sin recubrimiento – corcho a 40 Km/h

Diferencia en dB spl\Frecuencia	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300
Sin recubrimiento VS corcho	0,139	0,91	1,801	1,17	2,03	6,82	4,69	9,54	12	6,42	8,83	14,3	13,8	15,4	14,8	17,93

Tabla 20. Sin recubrimiento vs corcho a 40 Km/h.

Si se comparan estos resultados con la tabla 20 es posible observar un comportamiento parecido entre las dos velocidades (30 Km/h y 40 Km/h). El recubrimiento logra una atenuación de 0.139 dB SPL hasta 17.93 dB SPL. Sin embargo, la tabla 18 muestra niveles de atenuación mayores a una velocidad de 10 Km/h, lo que da una idea de la eficiencia del material conforme aumenta la velocidad.

5.4 COMPARACIÓN RECUBRIMIENTO DE LANA DE ROCA VS CORCHO

A continuación, se muestra la comparación de las capturas del recubrimiento de lana de roca vs el recubrimiento de corcho a las velocidades de 10, 30 y 40 km/h.

5.4.1 Comparación a 10 kilómetros por hora

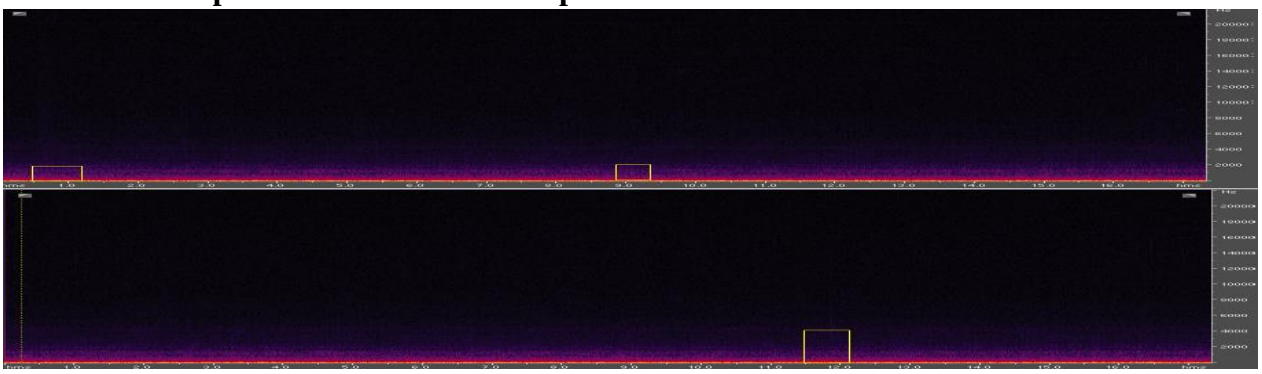
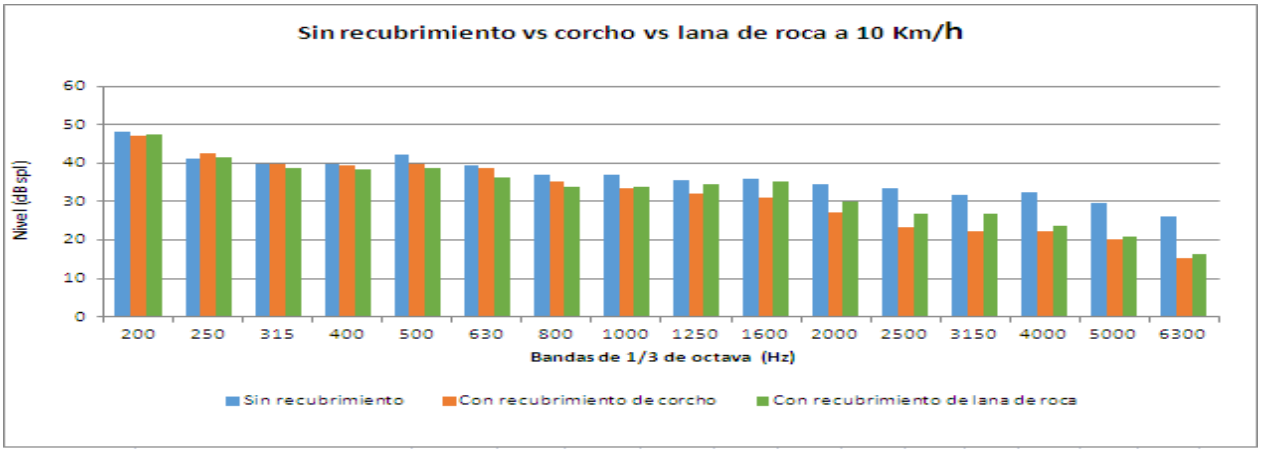


Figura 67. Comparación del recubrimiento de lana de roca (imagen superior) vs el recubrimiento de corcho (imagen inferior) a 10 Km/h.

En la imagen del espectrograma anterior se observa que tanto el recubrimiento de lana de roca como recubrimiento de corcho funcionan para amortiguar los impactos de la gravilla y esto se evidencia en lo pequeños que se vuelven los picos de amplitud con ambos recubrimientos.



Gráfica 8. Comparación del recubrimiento de corcho vs recubrimiento de lana de roca sin recubrimiento a 10 Km/h.

En la gráfica 8 se observa la efectividad de ambos materiales al transitar a una velocidad de 10 Km/h; existe una disminucion de ruido de los impactos de la gravilla tanto con el corcho como con Lana de Roca pero con comportamientos diferentes, La lana de roca atenua más que el corcho en las bandas de 200 hasta 800 Hz en cambio el corcho es más efectivo en las bandas de

1000 a 6300 Hz. El nivel Leq promediado global en todas las bandas ya mencionadas de la lana de roca es de 50,04 dB SPL y el del corcho es de 50,80 dB SPL.

5.4.2 Comparación a 30 kilómetros por hora

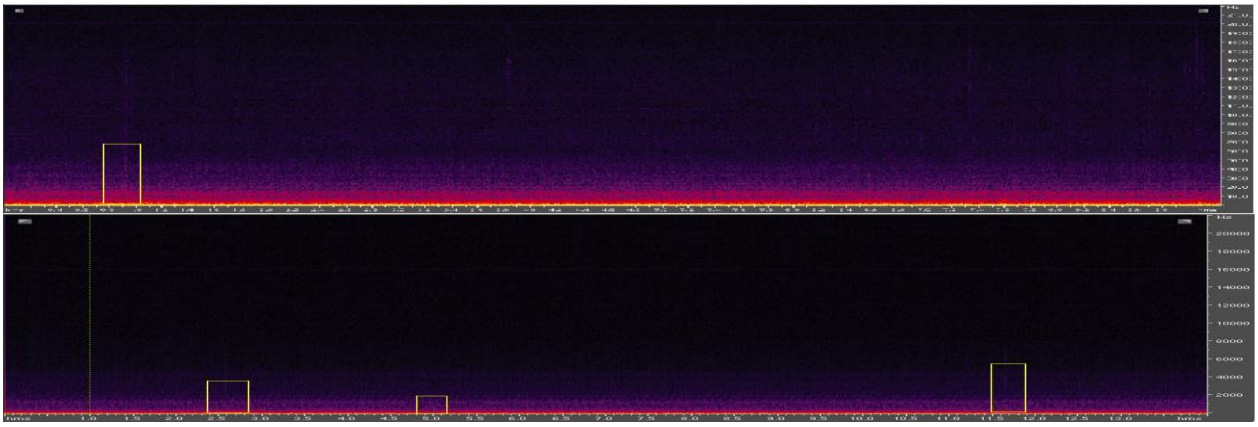
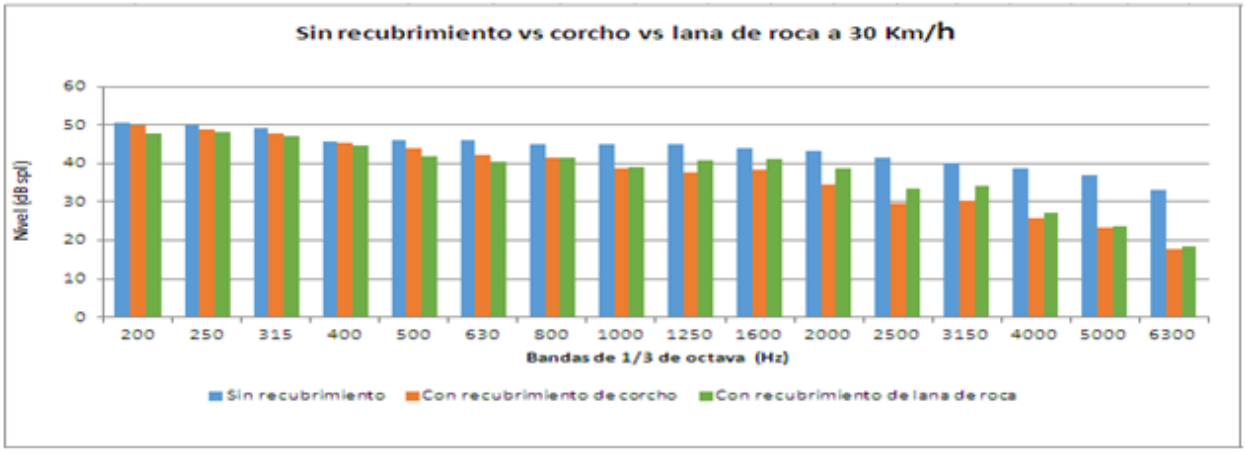


Figura 68. Comparación del recubrimiento de lana de roca (imagen superior) vs el recubrimiento de corcho (imagen inferior) a 30 Km/h.

En la figura 68 del espectrograma anterior se observa que tanto el recubrimiento de lana de roca como recubrimiento de corcho funcionan para amortiguar los impactos de la gravilla y esto se evidencia en lo pequeños que se vuelven los picos de amplitud con ambos recubrimientos.



Gráfica 9. Comparación del recubrimiento de corcho vs recubrimiento de lana de roca sin recubrimiento a 30 Km/h.

En la gráfica 9, se logra evidenciar una disminucion de ruido de los impactos de la gravilla con ambos recubrimientos pero con comportamientos diferentes en ambos materiales, La lana de roca atenua más que el corcho en las bandas de 200 hasta 630 Hz y en la banda 800 Hz se tiene el

mismo nivel de SPL con ambos recubrimientos, en cambio el corcho es más efectivo en las bandas de 1000 a 6300 Hz. El nivel Leq promediado global en todas las bandas ya mencionadas de la lana de roca es de 53.4 dB SPL y el del corcho es de 53.7 dB SPL; lo que implica que al promediar todas las bandas la Lana de Roca es mejor por la diferencia de 0.3 dB SPL.

5.4.3 Comparación grabación corta a 40 kilómetros por hora

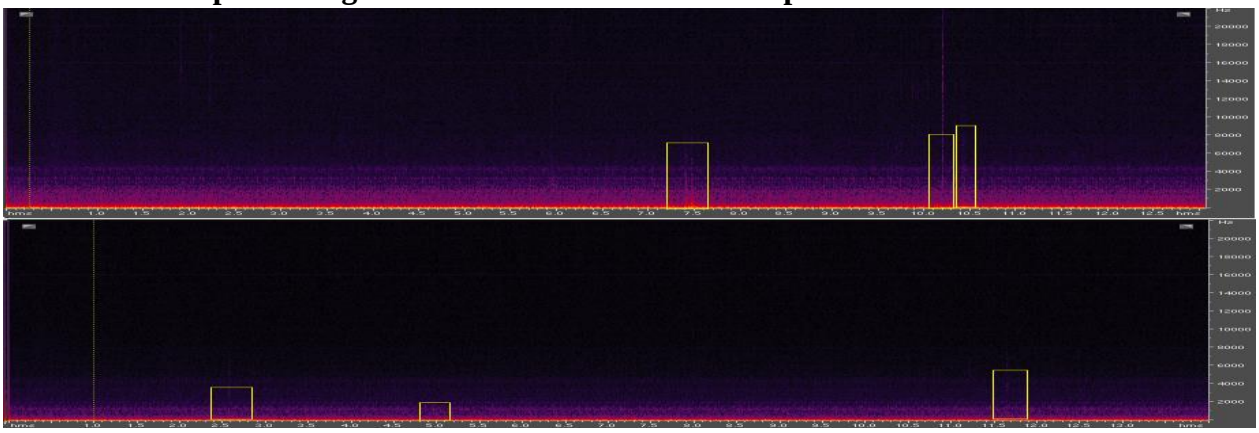
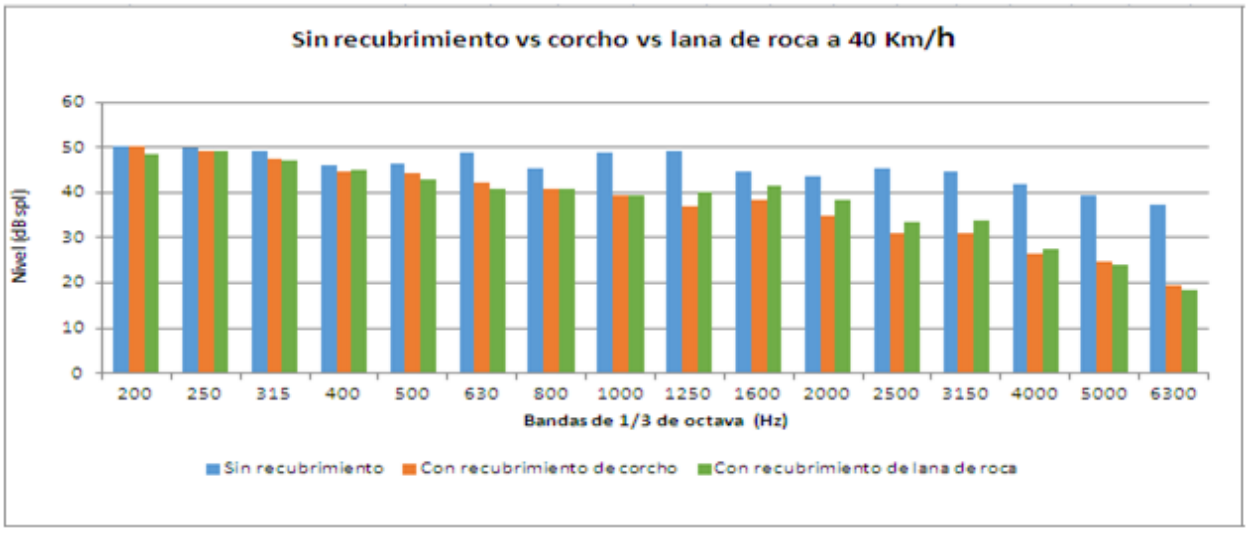


Figura 69. Comparación corta del recubrimiento de lana de roca (imagen superior) vs el recubrimiento de corcho (imagen inferior) a 40 Km/h.

La figura 69 muestra la amortiguación de los impactos de la gravilla y esto se evidencia en lo pequeños que se vuelven los picos de amplitud con ambos recubrimientos.

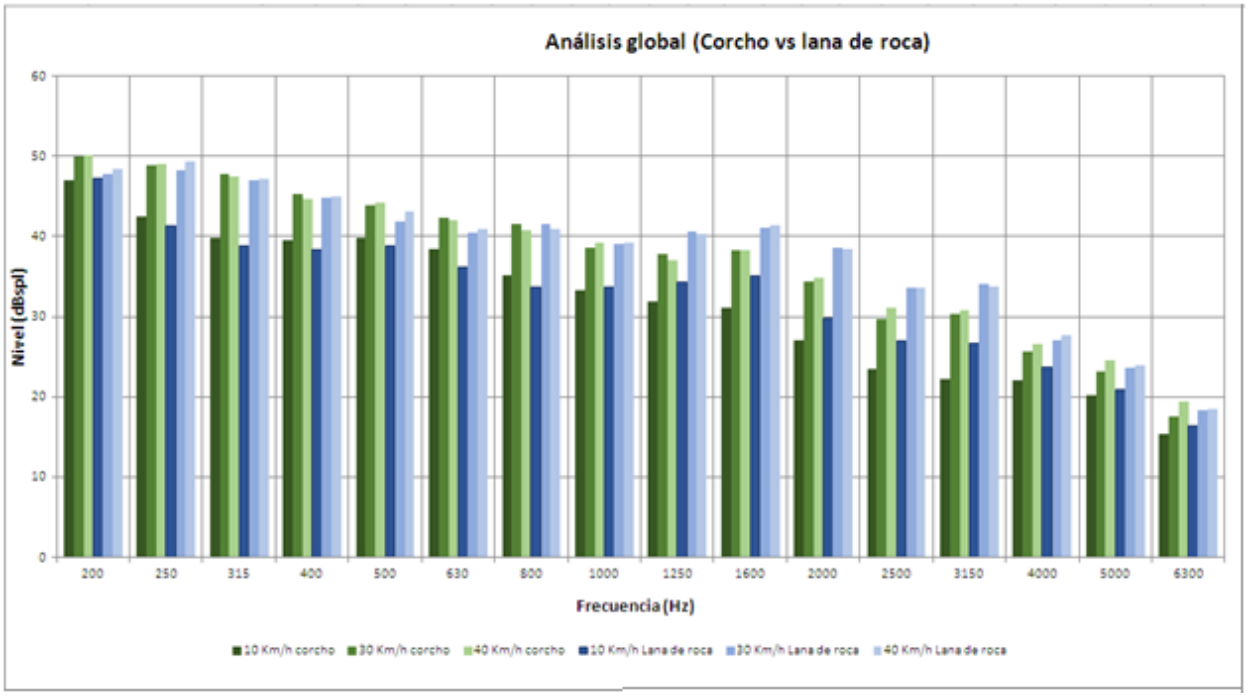


Gráfica 10. Comparación del recubrimiento de corcho vs recubrimiento de lana de roca sin recubrimiento a 40 Km/h.

Comparando los dos recubrimientos en la gráfica 10 a una velocidad de 40 Km/h La lana de roca atenua más que el corcho en las bandas de 200 hasta 630 Hz, en la banda 800 Hz se tiene el mismo nivel de SPL con ambos recubrimientos, en cambio el corcho es más efectivo en las bandas de 1000 a 6300 Hz. El nivel Leq promediado global en todas las bandas ya mencionadas de la lana de roca es de 54.26 dB SPL y el del corcho es de 53.9 dB SPL; lo que implica que al ponderar todas las bandas el corcho es mejor a esta velocidad por la diferencia de 0.36 dB SPL.

5.4.4 Análisis comparativo global

A continuación, se presenta en la gráfica 11 el análisis global de los resultados en bandas de tercio de octava. En la imagen se puede apreciar los resultados de corcho (escala de colores verdes), lana de roca (escala de colores azules), sin recubrimiento (escala de colores rojos) a las tres velocidades empleadas (10, 30 y 40 Km/h).



Gráfica 11. Resultados globales a las tres velocidades (10, 30 y 40 Km/h). Escala de verdes (corcho) escala de azul (lana de roca).

En la gráfica 11 se observa la atenuación de los golpes de gravilla a través de cada uno de los recubrimientos a las velocidades correspondientes. Para verificar esta atenuación se compara la diferencia de nivel (dB SPL) de cada uno de los recubrimientos con y sin barrera en la tabla 21. A

una velocidad de 10 Km/h el recubrimiento de corcho resulta ser mucho más efectivo que el recubrimiento de lana de roca ya que los niveles presentados a esta velocidad son mucho más altos, llegando a un máximo de 10 dB SPL. Por consiguiente, a una velocidad de 30 Km/h la lana de roca resulta ser más eficiente que el corcho de 200 Hz a 630 Hz contrario al corcho el cual es más eficiente de 1000 Hz a 6300 Hz, vale la pena aclarar que en la banda de 800 Hz ambos materiales poseen un rendimiento muy similar alcanzando un nivel de atenuación de 3.58 dB SPL (lana de roca) y 3.63 dB SPL (corcho). A una velocidad de 40 Km/h el comportamiento de ambos materiales no es totalmente homogéneo o lineal, sin embargo, el corcho logra alcanzar un nivel de atenuación de 17.93 dB SPL y la lana de roca 18.77 dB SPL afirmando así la veracidad de las mediciones y la fiabilidad de las barreras.

10 Km/h	Diferencia en dB spl\Frecuencia (Hz)	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300
	Sin recubrimiento VS corcho	1,1546	1,49	0,126	0,327	2,53	0,86	1,62	3,67	3,63	4,83	7,35	10,1	9,6	10,2	9,26	10,84
	Sin recubrimiento VS lana de roca	0,925	0,27	1,106	1,36	3,57	3,14	3,04	3,24	1,25	0,77	4,58	6,58	5,1	8,68	8,56	9,891
30 Km/h	Diferencia en dB spl\Frecuencia (Hz)	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300
	Sin recubrimiento VS corcho	0,5882	0,99	1,232	0,44	2,25	3,61	3,63	6,35	7,08	5,71	8,81	11,8	9,96	12,9	13,8	15,58
	Sin recubrimiento VS lana de roca	2,7416	1,67	2,004	0,985	4,25	5,42	3,58	5,89	4,2	2,89	4,56	7,89	6,18	11,5	13,4	14,81
40 Km/h	Diferencia en dB spl\Frecuencia (Hz)	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300
	Sin recubrimiento VS corcho	0,139	0,91	1,801	1,17	2,03	6,82	4,69	9,54	12	6,42	8,83	14,3	13,8	15,4	14,8	17,93
	Sin recubrimiento VS lana de roca	1,9416	0,66	2,096	0,956	3,16	7,96	4,57	9,5	8,82	3,22	5,21	11,7	10,9	14,4	15,4	18,77

Tabla 21. Comparación de la diferencia de nivel con los dos recubrimientos a las tres velocidades.

De lo anterior, se puede analizar que al aumentar la velocidad el comportamiento de los materiales varía junto con el número de golpes de la gravilla. Como se puede evidenciar en la sección 5.3 y 5.4 el número de impactos de roca aumenta a medida que aumenta la velocidad, sin embargo, la frecuencia de los golpes permanece sobre la banda de 200 Hz a 6300 Hz. Por otra parte, es imperativo mencionar que el corcho es un material mucho más eficiente a una velocidad de 10 Km/h; por otro lado, al transitar a una velocidad media la lana de roca posee un mejor comportamiento.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- Se Infiere que, al tener reducción en los niveles de presión sonora (dB Spl) al interior de la cabina, el fenómeno de Lombard también se reduce, ya dicho fenómeno es producto de los altos niveles de presión sonora causados por los impactos de la gravilla, por lo tanto, al reducir el ruido al interior de la cabina en cada una de las bandas de octava se infiere que el fenómeno también se reduce.
- Comparando la medición sin recubrimiento vs lana de roca y corcho se obtiene que la disminución de nivel para el corcho fue de 1.24 dB SPL (Leq promediado global) y 0.48 dB SPL para la lana de roca a una velocidad de 10 km/h. La disminución de nivel para el corcho fue de 2.46 dB y de 2.69 dB SPL para la lana de roca a una velocidad de 30 km/h. La disminución de nivel para el corcho fue de 4.08 dB SPL y 3.75 dB SPL para la lana de roca a una velocidad de 40 km/h.

- El fenómeno de Lombard, el cual es producto del choque de gravilla contra los guardabarros del vehículo, ha sido disminuido mediante el uso de recubrimientos de corcho y lana de roca. Dicha atenuación se debe al amortiguamiento del impacto de gravilla, evitando el choque directo entre el guardabarros del vehículo. Esto se evidencia a través de la comparación de los niveles Leq por bandas de 1/3 octava (200 a 6300 Hz) sin recubrimiento y con recubrimiento.

- Se evidencia la disminución de nivel con ambos materiales, pero se debe tener en cuenta que la lana de roca presento mayor de disminución en las bandas de 200 a 630 Hz, en la banda de 800 Hz presentaron el mismo nivel en las mediciones 30 y 40 km/h y el corcho disminuye más el nivel en las bandas de 1000 a 6300 Hz.

- El corcho es menos eficiente que la lana de roca a velocidades medias, esto puede deberse a la significativa diferencia que hay entre el grosor del mismo (0.5 cm) comparado con la Lana de roca (5 cm); siendo este último material una acustifibra, absorbe mucho mejor el impacto de la gravilla a estas velocidades, por otro lado, el corcho al ser un derivado de la madera posee una contextura más rígida. Cabe recordar que a mayor velocidad los golpes

que recibe el guardabarros son más fuertes, pero se hace énfasis en el recubrimiento atenúa más conforme se aumenta la velocidad. Al impactar con un recubrimiento semirrígido como el corcho se presentan golpes de baja amplitud disminuyendo el ruido en todas las bandas de interés, pero teniendo un mejor comportamiento entre las bandas de 1000 a 6300 Hz.

- A medida que aumenta la velocidad aumenta la atenuación del ruido de gravilla en el vehículo, como se puede evidenciar en el análisis espectral. El nivel más alto de atenuación a 10 Km/h es de 10.8 dB SPL, a 30 Km/h es de 15.6 dB SPL y para una velocidad de 40 Km/h fue de 18.8 dB SPL.

- Los cálculos de las desviaciones estándar en las bandas de interés (200 Hz a 6300 Hz), demuestran que las pasadas realizadas tienen pequeñas diferencias de nivel; lo que afirma que la dispersión de los datos no es significativa en ninguna de las mediciones y el comportamiento de dicho fenómeno fue similar en todas las pasadas a la misma velocidad.

- A través de la medición y el análisis del ruido de motor y el escape del vehículo se pudo comprobar que el rango de frecuencias en la que están contenidos es de 200 a 4000 Hz para el motor y de 40 a 6300 Hz para el ruido del escape, este rango de frecuencias es el mismo que genera los impactos de la gravilla chocando contra guardabarros del vehículo. Por consiguiente, el análisis en frecuencia de los resultados de las mediciones no es tomado en cuenta debido a que el ruido del motor y el escape se superpone a el mismo rango de frecuencia de los impactos de gravilla, de la misma forma, aunque se segmento el audio no fue posible conocer la ubicación exacta del golpe y su respectiva frecuencia; por esta razón, es necesario realizar un análisis de amplitud a través del analizador de espectro del software de audio Adobe Audition.

- A través de las primeras mediciones de campo sobre los impactos de gravilla en los guardabarros del vehículo, se puede evidenciar que a mayor velocidad más golpes son generados y percibidos al interior de la cabina. Los golpes aumentan de intensidad y fuerza conforme aumenta la velocidad. Del análisis espectral se obtiene que las componentes en frecuencia producto de los impactos de gravilla van desde 200 a 6300 Hz

(figura 52, 53 y 54). Esto puede ser posible gracias a que al aumentar la velocidad el neumático está en la capacidad de recoger muchas más piedras en menos tiempo y catapultarlas hacia el vehículo adiós con mucha más fuerza. Cuando se transita a velocidades bajas, es posible que el neumático no acumule una gran cantidad de piedras y la fuerza con la que gira la rueda no es la suficiente como para catapultar absolutamente todas las rocas acumuladas, dejando algunas en el interior del labrado.

6.2 RECOMENDACIONES

- Es necesario hacer un estudio detallado sobre las características estructurales del vehículo escogido, si se desea desarrollar un recubrimiento similar, hay que tener en cuenta las dimensiones de los guardabarros del vehículo y la ubicación de la suspensión del mismo, ya que por lo general esta es visible, el diseño del recubrimiento no debe afectar en nada las especificaciones técnicas del vehículo

- Al hacer pruebas a altas velocidades, es necesario adaptar la forma de conducción al tipo de vía; elegir una pista con la menor cantidad de tránsito vehicular posible, o una pista de pruebas aislada si es posible.

- Es necesario revisar las condiciones de la pista seleccionada, por lo general los caminos cubiertos de gravilla no son del todo uniformes, por lo tanto, las pruebas se tienen que hacer en el mismo lugar con toda precaución. Las mediciones deben ser realizadas el mismo día para que las condiciones climáticas y de la pista sean lo más homogéneas posibles.

- Se deben conocer las características del ruido generado por la gravilla y del motor del vehículo, ya que, de esta forma, se asegura que el análisis de los audios grabados será correcto, si no se hace un análisis del rango de frecuencias del motor para tenerlo bien identificado, puede que este interfiera en el análisis de los impactos de gravilla y no se lleguen a los resultados deseados.

- Se debe tener en cuenta factores externos que influyen en el vehículo dependiendo de la velocidad a la cual se circule, como el ruido de rodadura, de suspensión y el ruido aerodinámico cuando se alcanzan velocidades mucho mayores, ya que estos influyen sobre el resultado final de las grabaciones.

- Al utilizar lanas minerales como la lana de roca, es necesario manipularla con guantes, gafas protectoras, tapabocas y demás para evitar cualquier tipo de contacto con el material debido a que este genera reacciones alérgicas.
- Al realizar la prueba, es necesario asegurarse de que los recubrimientos estén bien instalados ya que si se desprenden durante la prueba puede causar accidentes o afectaciones en el funcionamiento del vehículo.

6.3 TRABAJOS A FUTURO

Como trabajos a futuro se recomienda investigar sobre la influencia de velocidades superiores a 40 y 100 kilómetros por hora sobre el ruido de gravilla teniendo en cuenta factores como el ruido aerodinámico que se presenta a altas velocidades, así mismo realizar la búsqueda de otros materiales que cumplan con las mismas especificaciones de seguridad ya evaluadas en esta investigación y realizar las mediciones respectivas para comparar su eficacia con los resultados de los recubrimientos de lana de roca y corcho. Cabe resaltar la oportunidad de realizar un aislamiento acústico al interior de la carrocería del vehículo para determinar si de esta forma es posible reducir el ruido de la gravilla y que tanta diferencia existe entre el recubrimiento acústico interno y externo.

Esta investigación se trabaja con un vehículo de motor diésel; es relevante realizar las mediciones con los mismos materiales en un vehículo de segmento C con motor de gasolina, con el objetivo de comparar la diferencia que existe entre ambos, analizando que tanto influye el ruido del motor sobre los resultados de las mediciones y las características en frecuencia del ruido de gravilla.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. KEBIG, Johannes. Developing measures against gravel noise in cars. Chalmers university of technology. Applied acoustics. Göteborg, Sweden 2013.
2. SANZ VILA. Carlos. Técnicas para el estudio acústico en vehículos (Noise, Vibration and Harshness). Universidad politécnica de Valencia.2012
3. KIM SAM. Byoung. Keun, Lee. Jeon, Kim. The identification of tyre induced vehicle interior noise. Wonkwang University. Mechanical and automotive engineering. 2006.
4. GAUDENZI. A. PASCUCCI, R. Analysis of a glass-fibre sandwich panel for a car body constructions. DAIMLER-BENZ AG. Research and technology. Munich, Germany.
5. TATSUO Fujikawa, HIROSHI Koike, YASUO Oshino, HIDEKI Tachibana. Definition of road roughness parameters for tire vibration noise control. Japan Automobile Research Institute. Japón. Agosto 2004.
6. JEAN-CLAUDE. Junqua. The influence of acoustics on speech production: A noise-induced stress phenomenon known as the Lombard réflex. Speech Technology Laboratory. Panasonic Technologies, Inc. Santa Barbara, Estados Unidos. Junio 1996.
7. FIBERGLASS. Colombia S.A. Empresa Saint-Gobain. La fibra de vidrio y el mito de la densidad. Confort acústico y térmico. Nota técnica. Mayo 2012.
8. LLINARES. J. A. LLopis. J. Sancho: (1991). *Acústica Arquitectónica y Urbanística.* Valencia España: Limusa.
9. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION. ISO 5128. Acoustics Measurement of noise inside motor vehicles. 1980.
10. Barchiesi, J. V. (2008). *Introducción al Procesamiento Digital de Señales.* Valparaiso: Ediciones Universitarias de Valparaiso.
11. ATECOS. Asistente térmico para la construcción sostenible. Aislantes térmicos.
12. Guisselle Montoya H. Ingeniería de tránsito. Universidad nacional de ingeniería. Facultad de ingeniería civil. Noviembre 2005.
13. LEXUS. Technical Training. Fundaments of noise (Noise, Vibration and Harshness). Sección 1
14. J. LLinares. A. LLopis. J. Sancho: (1991). *Acústica Arquitectónica y Urbanística.* Valencia España: Limusa.
15. Curso. Ingeniería de Telecomunicación. Medidas con el Analizador de Espectros.
16. Lane, Harlan. Tranel, Bernard. The Lombard Sign and the Role of Hearing in Speech. Journal of Speech, Language, and Hearing Research, December 1971

17. Ernesto Juliá Sanchis. Modelización, simulación y caracterización acústica de materiales para su uso en acústica arquitectónica. Universidad politécnica de Valencia. 2008.
18. Pierce, A.D. "Acoustics: An introduction to its physical principles and applications". A.S.A. New York. 1991.
19. Niveles de Ruido Ingeniería de la USAC. Guatemala, Oct 2000.
20. National Instruments. (2015). Characteristics of different smoothing windows. Recuperado el 16 de marzo de 2015, de http://zone.ni.com/: http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/370051V-01/cvi/libref/analysisconcepts/characteristics_of_different_smoothing_windows/
21. Zolzer, U. (2011). DAFX: Digital Audio Effects (2nd ed.). Berlín, Alemania: WIley.

8. GLOSARIO

Absorción acústica: La energía acústica transformada en calor (por rozamiento) al pasar o coincidir sobre un material.

Acústica: Es la rama de la física que estudia el sonido en cuanto a: generación, propagación, confinamiento y muchos más aspectos. así como los recursos para mejorar las condiciones auditivas de un espacio o ambiente.

Aislamiento acústico: de manera general describe la separación del sonido transmitido a través del aire entre un espacio y otro, logrado por medio de un recubrimiento situada en medio del emisor y el receptor.

Amplitud: en física este concepto está asociado al valor más alto que registra una Onda en variable, midiéndose desde el punto medio o de equilibrio.

Análisis de espectro: Medición cuyo objeto es determinar el espectro de un sonido para así determinar del comportamiento de la fuente a analizar.

Ancho de Banda: es el rango de frecuencia presente en una señal sonora determinada.

Recubrimiento Acústica: Es una estructura exterior diseñada en este caso para reducir el ruido producto del choque de gravilla contra los guardabarros.

Caracterización de fuente de Ruido: Proceso que se realiza para conocer las características tonales, temporales y de fase que pueden presentar algunos sonidos específicos. Es necesario hacer una caracterización de la fuente sonora para determinar si es posible controlarla con aislamiento de perdida por impacto.

Decibel A: Unidad de nivel sonoro utilizado generalmente para mediciones de ruido que generan riesgo auditivo. Se abrevia dBA.

Enmascaramiento: Fenómeno psicoacústico por el cual un tono no es percibido; porque otro de mayor nivel, cercano en frecuencia lo hace inaudible.

Frecuencia: denota el número de veces que se repite el ciclo en un segundo; La unidad de frecuencia es el Hertz (Hz) que corresponde a 1 ciclo por segundo.

Fuente de Ruido: Hace referencia al ruido generado por el impacto de la gravilla contra los guardabarros del vehículo.

Impacto: Es un choque de una masa en movimiento con una segunda masa que puede estar en descanso o movimiento (Gravilla vs. guardabarros).

Interfaz de Audio: Dispositivo electrónico capaz de capturar señales sonoras y hacer conversiones análogo- digital de las mismas para almacenarlas en un sistema computacional.

Material aislante acústico: Un material diseñado especialmente para tener una elevada pérdida de transmisión (TL).

Pistófono: Instrumento que genera un tono de nivel calibrado (en general 1 kHz y 94 dB SPL o 114 dB SPL) que se utiliza para realizar la calibración de sonómetros u otros instrumentos de medición acústica.

Ruido (dB): Cualquier señal que no se desea la cual se interpone en la transmisión, percepción o interpretación de una señal que desea ser transmitida.

2. Cualquier sonido de espectro continuo o muy complejo.

3. Cualquier sonido molesto.

Ruido de Fondo: Ruido emitido por las fuentes sonoras cercanas y lejanas; excepto aquella fuente que se está analizando.

Sonómetro: Un instrumento que se utiliza para medir niveles de presión Sonora (dB), con ponderaciones de frecuencia, ponderaciones exponenciales y promedios de tiempo.

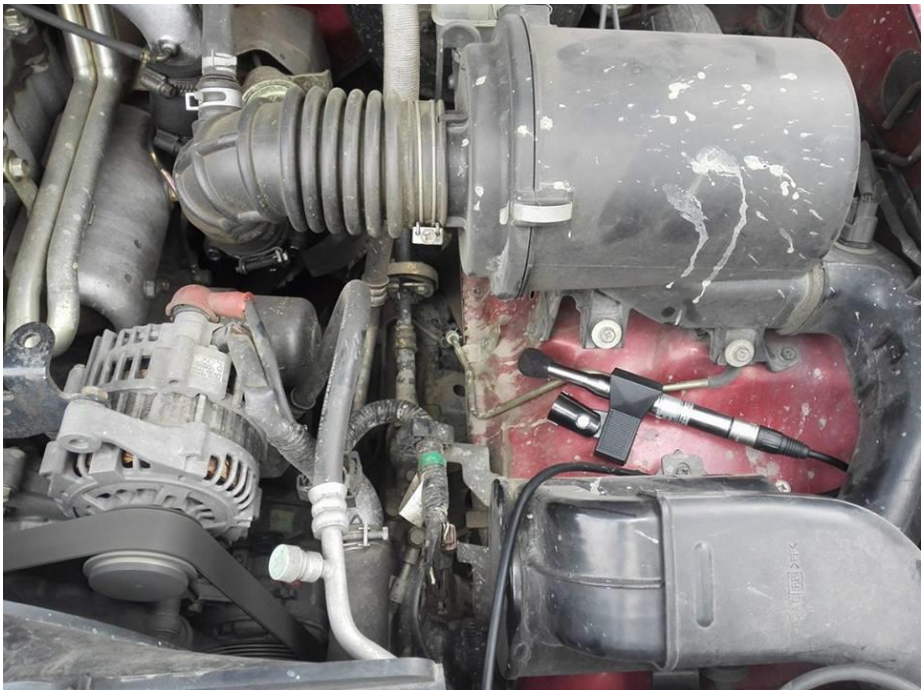
Valor Pico: Máximo valor de una señal en un intervalo de tiempo (s). En el caso de señales periódicas, el intervalo tomado es el periodo.

ANEXO A



Vehículo de segmento tipo c

ANEXO B



Posicionamiento del micrófono de medición para caracterización del motor.

ANEXO C

Tablas de medición ruido de fondo motos apagado vs motor encendido

Ruido de Fondo Sin Motor	
Banda 1/3 (Hz)	LAeq (dB)
12,5	35,9
16	33,5
20	36,4
25	45,7
31,5	48,4
40	43,9
50	41
63	31,6
80	29,4
100	28,6
125	18,4
160	12,9
200	11,6
250	12,3
315	11,5
400	9,7
500	11,5
630	12,1
800	8,6
1000	12,8
1250	11,8
1600	11,5
2000	8,2
2500	9
3150	8,6
4000	8,3
5000	11,3
6300	12,5
8000	12,9
10000	11,7
12500	9,4
16000	12,6
20000	4,4

Ruido de Fondo Con Motor	
Banda 1/3 (Hz)	LAeq (dB)
12,5	60,9
16	48,6
20	57,9
25	77
31,5	57,9
40	56
50	75,2
63	55,6
80	50,3
100	53,8
125	56,7
160	47
200	49
250	41,1
315	40
400	36,6
500	39,5
630	36,5
800	34,7
1000	33,9
1250	31,5
1600	29,3
2000	24,8
2500	23,1
3150	22,3
4000	21,5
5000	19,3
6300	15,1
8000	13,9
10000	10
12500	9,4
16000	5,9
20000	2,4

Ruido de Fondo Motor apagado

LAeq [dB]	LCpico [dB]	LAFmáx [dB]	LAFmín [dB]
25,2	66,4	39,5	20,0

Ruido de Fondo con el Motor encendido:

LAeq [dB]	LCpico [dB]	LAFmáx [dB]	LAFmín [dB]
49,7	87,2	52,0	48,9

ANEXO D

Tablas de medición sin recubrimiento vs recubrimiento de corcho vs recubrimiento de lana de roca a 10 km/h

10 km/h Sin Barrera	
Banda 1/3 (Hz)	LCeq (dB)
12,5	61
16	47,5
20	57,2
25	76,6
31,5	57,1
40	56,8
50	76,3
63	56,3
80	56,4
100	55
125	52,6
160	48,4
200	47,2
250	41,4
315	40,6
400	41,4
500	43,4
630	41,2
800	38,2
1000	38,4
1250	36
1600	36,7
2000	34,5
2500	34,4
3150	32,3
4000	32,1
5000	29
6300	26,6
8000	26,2
10000	22,8
12500	19,2
16000	13,9
20000	9,1

10 km/h Corcho	
Banda 1/3 (Hz)	LCeq (dB)
12,5	58,2
16	49,7
20	61,5
25	81,3
31,5	61
40	55,9
50	74,8
63	54,6
80	48,7
100	52,2
125	56,1
160	47,6
200	46,7
250	41
315	38,7
400	38,7
500	40,5
630	38,9
800	34,3
1000	32,7
1250	31,5
1600	30,7
2000	26,9
2500	23,2
3150	21,8
4000	21,7
5000	20
6300	15,2
8000	12,4
10000	9
12500	5,6
16000	2,1
20000	-0,8

10 km/h Lana de Roca	
Banda 1/3 (Hz)	LCeq (dB)
12,5	62,9
16	51,6
20	64,1
25	83,7
31,5	63,3
40	57,4
50	76,2
63	55,9
80	48
100	49,5
125	55,7
160	50,5
200	47,5
250	41,6
315	38,1
400	38
500	38,5
630	36
800	33,5
1000	33,5
1250	34
1600	34,9
2000	29,3
2500	26,5
3150	25,3
4000	22
5000	19,4
6300	15,3
8000	11,6
10000	8
12500	5,3
16000	1,6
20000	-1

ANEXO E

Tablas de medición sin recubrimiento vs recubrimiento de corcho vs recubrimiento de lana de roca a 30 km/h

30 km/h Sin Barrera	
Banda 1/3 (Hz)	LCeq (dB)
12,5	54,4
16	47,2
20	52,9
25	51,9
31,5	52,1
40	65,1
50	53,5
63	48,3
80	63,6
100	51,5
125	61,3
160	57,5
200	50,9
250	50,4
315	48,6
400	44,8
500	45,3
630	44,7
800	44,8
1000	41,2
1250	42,4
1600	42,7
2000	41,2
2500	40,6
3150	40,5
4000	40,9
5000	38,8
6300	34,1
8000	31,2
10000	27,8
12500	25,7
16000	18,5
20000	12,3

30 km/h Corcho	
Banda 1/3 (Hz)	LCeq (dB)
12,5	55,3
16	47,1
20	55
25	48,2
31,5	61,5
40	81,6
50	62,8
63	48,5
80	60,7
100	50,7
125	60,6
160	55,4
200	49,8
250	48,7
315	47,5
400	45
500	44,1
630	41,1
800	40,6
1000	38,3
1250	37
1600	38,4
2000	34
2500	29,4
3150	29,8
4000	24,9
5000	22,6
6300	17,2
8000	14,6
10000	11
12500	8
16000	2,8
20000	-0,9

30 km/h Lana de Roca	
Banda 1/3 (Hz)	LCeq (dB)
12,5	58,9
16	52,2
20	60,5
25	52,7
31,5	61,5
40	81,8
50	63,3
63	49,1
80	63,8
100	51,9
125	62,4
160	55,7
200	47,5
250	47,9
315	46,9
400	45
500	41,9
630	40,4
800	41,7
1000	39,1
1250	40,6
1600	40,5
2000	38,9
2500	33,7
3150	34,1
4000	26,8
5000	23,6
6300	18,2
8000	15,2
10000	10,7
12500	7,3
16000	2,1
20000	-1,1

ANEXO F

Tablas de medición sin recubrimiento vs recubrimiento de corcho vs recubrimiento de lana de roca a 40 km/h

40 km/h Sin Barrera	
Banda 1/3 (Hz)	LCeq (dB)
12,5	54,1
16	46,7
20	53,6
25	49,2
31,5	57,6
40	76
50	57,7
63	48,1
80	65,1
100	51,9
125	61,3
160	56,4
200	50,6
250	50,2
315	49,7
400	46,3
500	48
630	52,2
800	47,8
1000	52
1250	53,3
1600	47,7
2000	46,4
2500	47,9
3150	47,3
4000	43,4
5000	40,2
6300	38,2
8000	35,7
10000	33,4
12500	27,8
16000	22,7
20000	17

40 km/h Corcho	
Banda 1/3 (Hz)	LCeq (dB)
12,5	55
16	47,2
20	54,6
25	53,3
31,5	61,9
40	81,8
50	63,1
63	49,4
80	60,8
100	51,1
125	61,7
160	56,1
200	50,2
250	49
315	47,4
400	44,5
500	43,5
630	41,7
800	40,2
1000	38,4
1250	36,5
1600	37,9
2000	34,1
2500	30
3150	29,7
4000	25,1
5000	22,7
6300	17,2
8000	14,5
10000	10,7
12500	7,6
16000	2,6
20000	-0,8

40 km/h Lana de Roca	
Banda 1/3 (Hz)	LCeq (dB)
12,5	58,3
16	52,4
20	60,9
25	52,1
31,5	60,8
40	81,1
50	62,3
63	48,7
80	58,4
100	51,5
125	62,5
160	56,8
200	47,9
250	49,6
315	47,2
400	45
500	42,7
630	41,1
800	40,3
1000	39,3
1250	40,4
1600	41,3
2000	38,5
2500	33,8
3150	33,6
4000	27,4
5000	23,7
6300	18,3
8000	15,7
10000	10,8
12500	7,5
16000	2,2
20000	-0,3

ANEXO G

Repeticiones de medición sin recubrimiento a 10, 30 y 40 km/h.

10 km/h Sin Barrera			
Banda 1/3 (Hz)	LCeq (dB)	LCeq (dB)	LCeq (dB)
12,5	61	55,2	53,4
16	47,5	46,9	46
20	57,2	58,9	58,3
25	76,6	78,5	77,8
31,5	57,1	58,7	57,7
40	56,8	56,8	56,9
50	76,3	76,2	76,5
63	56,3	56,2	56,5
80	56,4	57,5	57,8
100	55	52,6	50,5
125	52,6	55,2	55,6
160	48,4	47,9	48,1
200	47,2	48,2	49
250	41,4	40,8	40,9
315	40,6	39,7	39,3
400	41,4	38,8	38,5
500	43,4	41,7	41,7
630	41,2	38,3	37,8
800	38,2	35,9	35,8
1000	38,4	35,8	36,3
1250	36	34,9	35,8
1600	36,7	35,6	35,3
2000	34,5	35,5	32,9
2500	34,4	33,2	32,7
3150	32,3	29	33
4000	32,1	26,9	34,8
5000	29	22,7	32,3
6300	26,6	16,7	28,8
8000	26,2	12,5	27,7
10000	22,8	8,4	22,2
12500	19,2	5,5	18
16000	13,9	1,6	11,6
20000	9,1	-0,5	5,7

30 km/h Sin Barrera			
Banda 1/3 (Hz)	LCeq (dB)	LCeq (dB)	LCeq (dB)
12,5	55,3	54,4	53,7
16	46,9	47,2	45,9
20	53	52,9	53,3
25	52,2	51,9	51,8
31,5	52,7	52,1	52,7
40	68,7	65,1	66,7
50	54,3	53,5	54,1
63	48	48,3	48,6
80	63,3	63,6	63,8
100	51,4	51,5	51,6
125	61,4	61,3	61,3
160	57,6	57,5	56,5
200	50,5	50,9	50,1
250	49,4	50,4	49,9
315	49,1	48,6	49,3
400	46,5	44,8	45,8
500	47	45,3	45,9
630	46,8	44,7	46
800	45,7	44,8	44,8
1000	47,1	41,2	44,6
1250	44,8	42,4	46,5
1600	45,1	42,7	43,8
2000	43,3	41,2	44,5
2500	42,6	40,6	41
3150	39,7	40,5	40,5
4000	38,4	40,9	33,8
5000	35,1	38,8	36,2
6300	32	34,1	33
8000	28,2	31,2	30,7
10000	21,9	27,8	25,4
12500	17,3	25,7	20
16000	8,5	18,5	15,6
20000	2,4	12,3	10,2

40 km/h Sin Barrera			
Banda 1/3 (Hz)	LCeq (dB)	LCeq (dB)	LCeq (dB)
12,5	55	54,1	54,1
16	46,8	46,7	48,2
20	53,4	53,6	53,9
25	49,5	49,2	49,2
31,5	57,5	57,6	58,9
40	75,6	76	77,5
50	57,3	57,7	58,8
63	47,7	48,1	48,4
80	65,3	65,1	65,2
100	51,7	51,9	41,8
125	61,4	61,3	61,4
160	56,6	56,4	56,2
200	49,9	50,6	50,4
250	49,6	50,2	50
315	49,4	49,7	48,4
400	45	46,3	46,2
500	45,1	48	44,7
630	45,5	52,2	44,5
800	44,6	47,8	42,1
1000	47,6	52	40
1250	42,6	53,3	39,8
1600	42,9	47,7	39,4
2000	43,2	46,4	37,3
2500	45,7	47,9	35,8
3150	44,5	47,3	37,9
4000	43,3	43,4	36,1
5000	41,2	40,2	33,8
6300	38,6	38,2	33,6
8000	34,5	35,7	31,8
10000	31,8	33,4	29,3
12500	28,2	27,8	28
16000	21,5	22,7	21,2
20000	15,7	17	16,7

ANEXO H

Repeticiones de medición con recubrimiento de corcho a 10, 30 y 40 km/h.

10 km/h Corcho			
Banda 1/3 (Hz)	LCeq (dB)	LCeq (dB)	LCeq (dB)
12,5	61	57,7	58,2
16	49,5	51	49,7
20	62	62,2	61,5
25	81,7	81,8	81,3
31,5	61,5	61,5	61
40	56,4	56,2	55,9
50	75,4	75,1	74,8
63	55,3	55	54,6
80	51,3	48	48,7
100	49,4	52	52,2
125	55,7	57,1	56,1
160	47	49,4	47,6
200	47,1	47,3	46,7
250	41,7	44,2	41
315	38,8	41,3	38,7
400	38,6	40,7	38,7
500	39	39,8	40,5
630	38,3	38,3	38,9
800	34,3	36,5	34,3
1000	32,6	34,4	32,7
1250	31,3	32,9	31,5
1600	30,5	31,9	30,7
2000	26,9	27,4	26,9
2500	23	24	23,2
3150	21,9	22,7	21,8
4000	22,2	22,5	21,7
5000	20	20,7	20
6300	14,8	16,1	15,2
8000	11,7	13,4	12,4
10000	8	10,1	9
12500	5,4	6,9	5,6
16000	1,4	2,9	2,1
20000	-0,9	-0,1	-0,8

30 km/h Corcho			
Banda 1/3 (Hz)	LCeq (dB)	LCeq (dB)	LCeq (dB)
12,5	55,4	57,2	55,3
16	47,2	49,3	47,1
20	53,6	54,3	55
25	48,8	50,4	48,2
31,5	60,7	61,7	61,5
40	80,4	81,2	81,6
50	61,9	62,6	62,8
63	48,2	50,4	48,5
80	61,7	60,8	60,7
100	50,6	50,9	50,7
125	60,6	61,4	60,6
160	56,7	56,5	55,4
200	49,4	50,5	49,8
250	48,1	49,8	48,7
315	47,6	48,2	47,5
400	45,1	45,8	45
500	43,4	44,1	44,1
630	42,9	42,7	41,1
800	41	42,6	40,6
1000	38,4	39	38,3
1250	37,1	39	37
1600	37,2	39	38,4
2000	34,1	35	34
2500	29,5	30,2	29,4
3150	30,2	30,8	29,8
4000	25,9	26,1	24,9
5000	23,1	23,7	22,6
6300	17,5	17,9	17,2
8000	15,1	15	14,6
10000	10,8	11,4	11
12500	7,4	8,4	8
16000	2,8	3,1	2,8
20000	-0,7	-0,4	-0,9

40 km/h Corcho			
Banda 1/3 (Hz)	LCeq (dB)	LCeq (dB)	LCeq (dB)
12,5	55,3	55,3	55
16	50,6	48,6	47,2
20	54,7	54,5	54,6
25	52,7	50	53,3
31,5	61,8	61,7	61,9
40	81,7	81,9	81,8
50	63	63,1	63,1
63	48,4	48,9	49,4
80	60,7	60,1	60,8
100	50,7	50,6	51,1
125	60,7	61,4	61,7
160	55,8	56,2	56,1
200	49,4	50,8	50,2
250	48,9	49,2	49
315	47,5	47,3	47,4
400	44,8	44,8	44,5
500	44,8	44,1	43,5
630	42,6	41,7	41,7
800	41,7	40,2	40,2
1000	40,4	38,6	38,4
1250	37,7	36,8	36,5
1600	38,2	38,5	37,9
2000	36,1	34	34,1
2500	32,7	29,8	30
3150	32,8	29	29,7
4000	28,6	25,1	25,1
5000	27	22,4	22,7
6300	21,9	17,2	17,2
8000	19	14,3	14,5
10000	15	10,8	10,7
12500	10,8	7,8	7,6
16000	5,1	2,7	2,6
20000	0,1	-0,8	-0,8

ANEXO I

Repeticiones de medición con recubrimiento de corcho a 10, 30 y 40 km/h.

10 km/h Lana de Roca			
Banda 1/3 (Hz)	LCeq (dB)	LCeq (dB)	LCeq (dB)
12,5	62,9	62,7	63,8
16	51,6	51,8	52,6
20	64,1	64,7	61,4
25	83,7	84,4	83,6
31,5	63,3	64	63,2
40	57,4	57,2	57,1
50	76,2	75,9	75,7
63	55,9	55,6	55,4
80	48	46,8	48,2
100	49,5	52,2	53,9
125	55,7	55,8	55,6
160	50,5	49,7	50,1
200	47,5	47,1	47,2
250	41,6	41,4	40,9
315	38,1	38,9	39,3
400	38	38,8	38,4
500	38,5	38,6	39,2
630	36	36,2	36,5
800	33,5	33,7	34
1000	33,5	33,6	34,1
1250	34	34,3	34,7
1600	34,9	35,2	35,3
2000	29,3	29,9	30,3
2500	26,5	27	27,2
3150	25,3	28,6	25,1
4000	22	25,4	22,8
5000	19,4	22,7	20
6300	15,3	17,6	15,8
8000	11,6	16,7	11,7
10000	8	12,3	7,7
12500	5,3	7,8	5
16000	1,6	3,1	1
20000	-1	-0,5	-5

30 km/h Lana de Roca			
Banda 1/3 (Hz)	LCeq (dB)	LCeq (dB)	LCeq (dB)
12,5	59,4	58,9	58,9
16	52,7	52,2	52,2
20	60,8	60,5	60,7
25	52,5	52,7	52,7
31,5	61,8	61,5	61,3
40	82,1	81,8	81,7
50	63,6	63,3	63,2
63	49,3	49,1	49
80	62,9	63,8	63,6
100	51,7	51,9	51,7
125	62	62,4	62,8
160	55,5	55,7	55,9
200	47,9	47,5	47,9
250	48	47,9	48,8
315	46,8	46,9	47,3
400	44,6	45	44,7
500	41,1	41,9	42,5
630	40,6	40,4	40,5
800	41,7	41,7	41,2
1000	39,1	39,1	38,9
1250	41,1	40,6	40,3
1600	41,5	40,5	41,2
2000	38,7	38,9	38,3
2500	33,7	33,7	33,4
3150	34,2	34,1	33,9
4000	27,4	26,8	27,1
5000	23,7	23,6	23,5
6300	18,1	18,2	18,6
8000	15,2	15,2	15,6
10000	10,6	10,7	11,3
12500	7,5	7,3	7,4
16000	2,4	2,1	2,1
20000	-0,9	-1,1	-0,9

40 km/h Lana de Roca			
Banda 1/3 (Hz)	LCeq (dB)	LCeq (dB)	LCeq (dB)
12,5	59,6	58,5	58,3
16	55,3	52,5	52,4
20	60,5	60,8	60,9
25	52,9	52,4	52,1
31,5	61,4	61,1	60,8
40	81,6	81,2	81,1
50	63	62,4	62,3
63	48,8	49	48,7
80	60,3	60,1	58,4
100	51,2	51,9	51,5
125	62,4	63	62,5
160	55,7	56,4	56,8
200	48	49,1	47,9
250	49,4	48,8	49,6
315	47,3	46,8	47,2
400	45,3	44,4	45
500	43,2	43,2	42,7
630	41	40,5	41,1
800	41,3	41	40,3
1000	39,2	39,3	39,3
1250	40	40,3	40,4
1600	41,7	41,2	41,3
2000	38,3	38,6	38,5
2500	33,5	33,5	33,8
3150	34,1	33,7	33,6
4000	27,6	27,8	27,4
5000	23,7	24,5	23,7
6300	18,4	18,9	18,3
8000	15,3	16,2	15,7
10000	11,2	11,6	10,8
12500	7,6	8,2	7,5
16000	2,6	2,7	2,2
20000	-0,9	0,8	-0,3

ANEXO J

Tabla de ponderados de mediciones.

Ruido de Fondo Sin Motor:	LAeq: 25,2dB SPL
Ruido de Fondo con el Motor encendido:	LAeq: 49,7 dB SPL
Sin recubrimiento 10 km/h:	**LAeq: 51.6 dB**
Sin recubrimiento 10 km/h:	**LAeq: 50.9 dB**
Sin recubrimiento 10 km/h:	**LAeq: 51.3 dB**
Sin recubrimiento 30 km/h:	**LAeq: 56.3 dB**
Sin recubrimiento 30 km/h:	**LAeq: 55.2dB**
Sin recubrimiento 30 km/h:	**LAeq: 56 dB**
Sin recubrimiento 40 km/h:	**LAeq: 57.1 dB**
Sin recubrimiento 40 km/h:	**LAeq: 60.4 dB**
Sin recubrimiento 40 km/h:	**LAeq: 54.4 dB**
Con recubrimiento de Corcho 10 km/h:	**LAeq: 49.9 dB**
Con recubrimiento de Corcho 10 km/h:	**LAeq: 50.4 dB**
Con recubrimiento de Corcho 10 km/h:	**LAeq: 49.8 dB**
Con recubrimiento de Corcho 30 km/h:	**LAeq: 53.4 dB**
Con recubrimiento de Corcho 30 km/h:	**LAeq: 54.1 dB**
Con recubrimiento de Corcho 30 km/h:	**LAeq: 53.6 dB**
Con recubrimiento de Corcho 40 km/h:	**LAeq: 54.1 dB**
Con recubrimiento de Corcho 40 km/h:	**LAeq: 53.9 dB**
Con recubrimiento de Corcho 40 km/h:	**LAeq: 53.8 dB**
Con recubrimiento de Lana de Roca 10 km/h:	**LAeq: 50.8 dB**
Con recubrimiento de Lana de Roca 10 km/h:	**LAeq: 50.9 dB**
Con recubrimiento de Lana de Roca 10 km/h:	**LAeq: 50.7 dB**
Con recubrimiento de Lana de Roca 30 km/h:	**LAeq: 54.4 dB**
Con recubrimiento de Lana de Roca 30 km/h:	**LAeq: 54.4 dB**
Con recubrimiento de Lana de Roca 30 km/h:	**LAeq: 54.4 dB**
Con recubrimiento de Lana de Roca 40 km/h:	**LAeq: 54.3 dB**
Con recubrimiento de Lana de Roca 40 km/h:	**LAeq: 54.2 dB**
Con recubrimiento de Lana de Roca 40 km/h:	**LAeq: 54.2 dB**