



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO AUTOMOTRIZ**

**TEMA: INSONORIZACIÓN DEL HABITÁCULO DE UN VEHÍCULO PEQUEÑO
POR MEDIO DE MATERIALES PLEGADOS.**

AUTORES:

BAUTISTA LECHÓN EMERSON ALEXANDER

CHULDE VIZCAÍNO FRANZ JHOSUÁ

DIRECTOR: ING. VICTOR JAVIER MONTENEGRO SIMANCAS, MSc.

Ibarra, noviembre 2023

CERTIFICADO**ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR**

En mi calidad de director del plan de trabajo de grado, previo a la obtención del título de Ingeniero Automotriz, nombrado por el Honorable Consejo Directivo de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas.

CERTIFICO:

Que una vez analizado el plan de grado cuyo título es "INSONORIZACIÓN DEL HABITÁCULO DE UN VEHÍCULO PEQUEÑO POR MEDIO DE MATERIALES PLEGADOS" presentado por el señor Bautista Lechón Emerson Alexander con número de cedula 100454321-9 y el señor Chulde Vizcaino Franz Jhosuá con numero de cedula 040218690-2, doy fe que dicho trabajo tiene los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a presentación pública y evaluación por parte de los señores integrantes del jurado examinador que se designe.

En la ciudad de Ibarra, a los 13 días del mes de noviembre del 2023

Atentamente.


Ing. Víctor Javier Montenegro MSc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004543219
APELLIDOS Y NOMBRES:	Bautista Lechón Emerson Alexander
DIRECCIÓN:	Calle Quito y Piedrahita – Otavalo
EMAIL:	eabautistal@utn.edu.ec
TELÉFONO MÓVIL:	0997841142
DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	0402186902
APELLIDOS Y NOMBRES:	Chulde Vizcaíno Franz Jhosúa
DIRECCIÓN:	Av. José Tobar y Tobar & Bartolomé de las Casas - Ibarra
EMAIL:	fjchuldev@utn.edu.ec
TELÉFONO MÓVIL:	0963269597
DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	INSONORIZACIÓN DEL HABITÁCULO DE UN VEHÍCULO PEQUEÑO POR MEDIO DE MATERIALES PLEGADOS.
AUTORES:	Bautista Lechón Emerson Alexander Chulde Vizcaíno Franz Jhosúa
FECHA:	13 de noviembre de 2023
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	PREGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERÍA AUTOMOTRIZ
ASESOR/DIRECTOR:	Ing. Víctor Javier Montenegro Simancas MSc.

1. CONSTANCIAS

Los autores manifiestan que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que son los titulares de los derechos patrimoniales, por lo que asumen la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrán en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 13 días del mes de noviembre de 2023.

AUTORES:



Bautista Lechón Emerson Alexander

100454321-9



Chulde Vizcaino Franz Jhosuá

040218690-2

DEDICATORIA

Que este esfuerzo sirva de guía para el camino de quienes buscan conocimiento y comprensión. Dedico esta tesis a mis futuros colegas, con la esperanza de que encuentren respuesta a las dudas que puedan surgir en su propio camino.

Chulde Vizcaíno Franz Jhosúa

Dedico este trabajo a todo aquel que aún busca respuestas en la madrugada, aunque ya no le quede tiempo para enviar su tarea, o que crea que su futuro este perdido. Todos quisimos rendirnos alguna vez, muchos nos dedicaremos a disciplinas muy distintas incluso, pero sin importar el camino que tomemos, lograremos el éxito. Llegará el día en que tendremos de sobra todo lo que hoy nos falta.

Emerson Alexander Bautista Lechón

AGRADECIMIENTO

El trayecto académico recorrido y el presente trabajo de investigación que he realizado son el resultado de innumerables esfuerzos y sacrificios, además del absoluto apoyo de mis padres, Héctor y Ruth, y mis abuelos, Jorge y Ermila. Siempre han estado a mi lado guiándome por el mejor camino con sus consejos y amor incondicional. Que este logro sea un reflejo de la gratitud que siento hacia ustedes.

Además, agradezco a la mejor compañera de vida que Dios me pudo haber dado, a Karla, gracias por ser mi ancla y mi estrella, por los años que compartiste conmigo cada triunfo y me supo levantar de cada tropiezo. Mi gratitud hacia ti es tan profunda como los sentimientos que compartimos.

Chulde Vizcaíno Franz Jhosuá

Innumerables personas hicieron posible que hoy me encuentre donde estoy, agradezco a todos quienes coincidieron en mi vida, desde mis padres Florinda y Rudy, por nunca abandonar el reto de criarme, por siempre levantarme, a mis hermanas Toa y Jessy por ser mis guías siempre que he estado perdido, a mis maestros, y hasta la naturaleza que me rodea y me da vida.

Gracias a Fernando y Apaica, mis hermanos de otra madre, y a quienes me han enseñado más del valor y el sacrificio a lo largo de mi vida laboral. Gracias Tania Drewniok por inculcarme la pasión por mi trabajo. Gracias a *Damm* y *Ü* por sembrar esa duda que genera conocimiento. Gracias a todos por su tiempo.

Ah, y Gracias Franz, por ser buen compañero.

Emerson Alexander Bautista Lechón

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I	18
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	18
1.1. Justificación	18
1.2. Alcance	19
1.3. Antecedentes	19
1.4. Planteamiento del Problema	22
1.5. Objetivos	23
1.5.1. Objetivo General	23
1.5.2. Objetivos Específicos	23
1.6. Introducción a los ruidos en el campo del automóvil	24
1.6.1. Ruido del motor	24
1.6.2. Ruidos en la transmisión y rodadura	25
1.6.3. Ruidos de admisión y escape	26
1.6.4. Ruido aerodinámico	27
1.7. El decibelio como escala de medida	28
1.8. Instrumentos para el análisis de ruido	29
1.8.1. Sonómetros Promediadores	29
1.8.2. Analizadores de intensidad sonora.	30
1.9. Barrera Acústica	31
1.10. Barreras acústicas plegables	31
1.10.1. Origami – Miura Ori	32
1.10.2. Cinemática y geometría del Origami	33
1.11. Modificación insonora en un vehículo	33
CAPITULO II	35
2. MATERIALES Y MÉTODOS	35
2.1. Metodología de la Investigación	35

2.1.1. Método Analítico	35
2.1.2. Método experimental	35
2.1.3. Método Cuantitativo	36
2.1.4 Método Bibliográfico	36
2.2. Materiales	36
2.2.1. Chevrolet Corsa Evolution 1.8	36
2.2.2. Sonómetro Digitech QM 1592	37
2.2.3. Plataformas de peso	38
2.2.4. Láminas para doblado	39
2.2.5. Caja de pruebas acústicas	39
2.2.6. Altavoz Borofone modelo BR11	40
2.3. Procedimiento	40
2.3.1. Toma de datos estándar en el vehículo	41
2.3.2. Toma de datos de ruido en vehículo estándar	44
2.4. Simulación y Cálculos	48
2.4.1. Selección del material a plegar	48
2.4.2. Análisis de tiempos de reverberación RT60 para selección del material	52
2.4.3. Determinación del índice de transmisión del sonido	58
2.4.4. Procedimiento del doblado utilizando teselados de origami	60
2.4.5. Aplicación de insonorización – Piso de habitáculo	64
2.4.6. Aplicación de la insonorización – Puertas	71
2.4.7. Mediciones de peso después de la insonorización	73
CAPÍTULO III	74
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	74
3.1. Comportamiento de ruido en carretera	74
3.2. Área de absorción acústica del plegado	79

3.3. Impacto de la insonorización en el peso del vehículo	80
3.4. Discusión de resultados con estudios anteriores	81
3.5. Limitaciones de estudio	81
CAPÍTULO IV	83
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
4.1. Conclusiones	83
4.2. Recomendaciones	85
CAPÍTULO V	86
5. BIBLIOGRAFÍA	86
CAPÍTULO VI	88
6. ANEXOS	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Fuentes de ruido en el vehículo	24
Figura 1.2. Interacción entre un neumático y la carretera.	26
Figura 1.3. Flujo de aire a través de las válvulas y el cilindro	26
Figura 1.4. Flujo aerodinámico al exterior del vehículo	28
Figura 1.5. Niveles de las fuentes de ruido.	28
Figura 1.6. Modelado de Miura-ori.	32
Figura 1.7. Geometría plana de una celda Miura Ori	33
Figura 1.8 Zonas que requieren de aislamiento acústico.	34
Figura 2.1. Sonómetro Digitech QM1592 y accesorios.	38
Figura 2.2. Caja sonora con fuente de ruido y sonómetro.	39
Figura 2.3. Altavoz Borofone Model B11.	40
Figura 2. 4. Diagrama de flujo general para el estudio.	41
Figura 2.5. Procedimiento para obtener valores de peso.	42
Figura 2.6. Pesaje del vehículo en el elevador.	43
Figura 2.7. Vehículo sobre plataformas.	43
Figura 2.8. Pantalla de datos Intercomp SW500.	44
Figura 2.9. Uso de equipos en parámetros de fábrica.	45
Figura 2.10. Ruido en el habitáculo – Carretera empedrada.	46
Figura 2.11. Ruido en el habitáculo – Carretera adoquinada.	47
Figura 2.12. Ruido en el habitáculo - autopista.	47
Figura 2.13. Manta de fieltro vehicular estándar.	48
Figura 2.14. Método del tubo de impedancia.	49
Figura 2.15. Caja sonora para medir reverberación	50
Figura 2.16. Material colocado para evaluar reverberación.	50

Figura 2.17. Vista lateral del interior en la caja acústica	51
Figura 2.18. Distribución de elementos dentro de la caja.	52
Figura 2.19. Flujograma para evaluar materiales.	53
Figura 2.20. Tendencia de absorción de ruido dentro la caja.	54
Figura 2.21. Reverberación usando lámina de cartulina.	54
Figura 2.22. Reverberación aplicando corcho de 3 mm.	55
Figura 2.23. Reverberación aplicando cartón corrugado C100.	55
Figura 2.24. Reverberación con cartón C120.	56
Figura 2.25. Flujograma para selección de material.	57
Figura 2.26. Prueba RT60 con material plegado.	57
Figura 2.27. Líneas guías para iniciar el Teselado.	62
Figura 2.28. Parte anterior y posterior del Teselado.	62
Figura 2.29. Parte anterior y posterior del Teselado – Etapa final.	63
Figura 2.30. Teselado espina de pez.	63
Figura 2.31. Origami - espina de pez.	64
Figura 2.32. Flujograma para insonorización del piso.	65
Figura 2.33. Habitáculo sin asientos.	65
Figura 2.34. Desarmado varillaje de cambios.	66
Figura 2.35. Piso del vehículo sin alfombra.	67
Figura 2.36. Vista inferior de alfombra estándar.	67
Figura 2.37. Desprendimiento de insonorización estándar.	68
Figura 2.38. Aplicación de láminas plegadas.	69
Figura 2.39. Aplicación de láminas al piso posterior.	69
Figura 2.40. Piso antes y después de la aplicación.	70
Figura 2.41. Flujograma para insonorización en puertas.	71

Figura 2.42. Vista de puertas delantera y posterior.	71
Figura 2.43. Desarmado de paneles de puerta.	72
Figura 2.44. Aplicación de material plegado a las puertas.	72
Figura 2.45. Reinstalación de paneles de puertas.	73
Figura 2.46. Peso posterior a la insonorización.	73
Figura 3.1. Resultados: Variación y tendencia de ruido en carretera empedrada.	74
Figura 3.2. Resultados: Variación y tendencia de ruido en carretera adoquinada.	76
Figura 3.3. Resultado: Variación y tendencia de ruido sobre asfaltado a 60 km/h.	77
Figura 3.4. Resultados: Variación y tendencia de ruido sobre asfaltado a 80 km/h.	77
Figura 3.5. Resultados: Variación y tendencia de ruido sobre asfaltado a 110 km/h.	78
Figura 3.6. Sensación de mejora en la cabina.	78
Figura 3.7. Relación de áreas entre teselado y hoja plana.	79
Tabla 3.8. Peso previo y posterior a la insonorización.	80
Figura 6.1. Línea guía en sentido longitudinal.	88
Figura 6.2. Línea guía en sentido longitudinal, 8 y 64 partes iguales.	88
Figura 6.3. Línea guía para el triángulo invertido.	88
Figura 6.4. Línea guía para el triángulo invertido completo.	89
Figura 6.5. Líneas guías trazado final – antes de plegar.	89
Figura 6.6. Líneas guías para plegar.	89
Figura 6.7. Pliegue pre terminado.	90
Figura 6.8. Pliegue terminado.	90
Figura 6.9. Extracción de insonorización estándar.	90
Figura 6.10. Acabado final insonorización de puertas.	91
Figura 6.11. Aplicación de ruido rosa y comprobación en carretera.	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Niveles de ruido que percibe el ser humano.	30
Tabla 2.1. Ficha técnica del Chevrolet Corsa Evolution.	37
Tabla 2.2. Ficha técnica del sonómetro digital.	38
Tabla 2.3. Peso del vehículo previo aplicación de estudio.	44
Tabla 2.4. Propiedades de los materiales a evaluar.	51
Tabla 2.5. Constantes de longitud, y condiciones climáticas utilizadas.	59
Tabla 2.6. Resultados de la cámara de reverberación.	60
Tabla 3.8. Peso previo y posterior a la insonorización.	80

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Frecuencia del ruido de escape en un motor de cuatro tiempos.....	27
Ecuación 2. Ecuación logarítmica promedio en dB.....	29
Ecuación 3. Ecuación de Sabine A_1	58
Ecuación 4. Ecuación de Sabine A_2	58
Ecuación 5. Velocidad de propagación del sonido	75
Ecuación 6. Área de absorción acústica.....	59
Ecuación 7. Coeficiente de absorción acústica	59
Ecuación 8. Reducción de ruido en porcentaje	¡Error! Marcador no definido.

RESUMEN

Actualmente, se utilizan diversos materiales para reducir el ruido que se percibe al interior de los vehículos, tales como capas de aluminio, espumas, gomas de butilo, tela asfáltica, entre otros, los cuales reaccionan de manera negativa bajo ciertas condiciones como el aumento de temperatura, humedad, desprendimiento de material aislante y malos olores lo que permite el paso a los ruidos externos. Se han encontrado materiales que han dado solución a esta problemática, pero se continúa recayendo en el aumento de peso innecesario.

El presente proyecto detalla los datos obtenidos de insonorizar el habitáculo de un vehículo tipo M en la ciudad de Ibarra, provincia de Imbabura, para reducir los decibeles de ruido que se perciben en el interior del vehículo, mediante la aplicación de materiales plegados.

Para el estudio se aplicaron métodos cuantitativos y analíticos durante la comparación de datos previos y posteriores a la insonorización. También se utilizó el método científico para validar los resultados y comprobar la hipótesis presentada. Se realizó una reducción de la cámara de reverberación detallada por la norma ISO 354:2003 para determinar el material a plegar, y finalmente se presentan los resultados a través de gráficas de comportamiento acústico bajo diferentes condiciones de calzada y rangos de velocidad específicos.

El uso de materiales plegados demostró ser un método efectivo para reducir los niveles de ruido dentro de la cabina del vehículo, logrando una reducción promedio de 2 a 8 dBA en diferentes condiciones de manejo, lo que indica una mejora de 5.77% en la comodidad auditiva de la cabina. Se espera que los resultados obtenidos no solo beneficien a los ocupantes de los vehículos, aumentando su comodidad y reduciendo la fatiga durante los viajes, sino que también contribuyan a la evolución de la ingeniería automotriz en términos de diseño acústico.

ABSTRACT

Currently, various materials are used to reduce the noise perceived inside vehicles, such as aluminum layers, foams, butyl rubber, asphalt, among others, which react negatively under certain conditions such as increased temperature, humidity, detachment of insulating material and bad odors, which allows external noises to pass through. Materials have been found that have provided a solution to this problem, but it continues to lead to unnecessary weight gain.

This project details the data obtained from soundproofing the cabin of a type M vehicle in Ibarra city, Imbabura province, to reduce the decibels of noise perceived inside the vehicle, through the application of folded materials.

For the study, quantitative and analytical methods were applied during the comparison of pre- and post-soundproofing data. The scientific method was also used to validate the results and verify the hypothesis presented. A reduction of the reverberation chamber detailed by the ISO 354:2003 standard was carried out to determine the material to be folded, and finally the results are presented through acoustic behavior graphs under different road conditions and specific speed ranges.

The use of folded materials proved to be an effective method of reducing noise levels within the vehicle cabin, achieving an average reduction of 2 to 8 dBA under different driving conditions, indicating a 5.77% improvement in noise level. cabin hearing comfort. It is expected that the results obtained will not only benefit vehicle occupants, increasing their comfort and reducing fatigue during trips, but will also contribute to the evolution of automotive engineering in terms of acoustic design.

INTRODUCCIÓN

A pesar del avance constante de la tecnología en el automovilismo y el aumento de confort que se ha logrado brindar a los ocupantes de vehículos sedan y turismo, la industria aún lucha contra variables que no domina, como el ruido que se genera por el funcionamiento del vehículo, su avance en carretera o el comportamiento por parte de otros usuarios y peatones. La presente tesis se centra en abordar este desafío, explorando en detalle la insonorización de vehículos, específicamente a través del uso de materiales plegados.

En la ingeniería ya se prueban modificaciones mediante el plegado de materiales, incluso en la industria aeroespacial. El evidenciar resultados de estos métodos aportaría a nuevas formas de insonorizar espacios vehiculares, incluso de carácter arquitectónico. A largo plazo, se reducirá el impacto que la contaminación auditiva tiene sobre la población.

Es de importancia conocer los conceptos básicos en el marco del ruido vehicular y las principales fuentes que intervienen en el confort de los ocupantes, el ruido de rodadura y los rangos de percepción que tiene el ser humano, mismos que son detallados en el desarrollo del marco teórico. Se realizó una investigación sobre las formas que existe para evaluar los niveles de sonido en el ambiente, se describió las herramientas con las que se trabajó durante la experimentación y se detalló los principales inconvenientes que surgieron a lo largo del proceso. El presente documento especifica el procedimiento para la insonorización del habitáculo de un vehículo tipo M mediante la aplicación de materiales plegados, para ello, se efectuó un estudio del plegado de papel para encontrar un patrón adecuado que sea capaz de reducir en mayor proporción los decibeles de ruido en el habitáculo, y a su vez el adaptarse a superficies internas como puertas y piso de la cabina. Para la elección del material plegable se realizan diversas pruebas dentro de una caja de reverberación que permite evaluar la capacidad de absorción acústica de diferentes láminas disponibles en el mercado.

Finalmente, se comparan los datos previos y posteriores a la aplicación del estudio, mismos que determinan la viabilidad y las mejoras obtenidas mediante gráficas de comportamiento, demostrando el porcentaje de decibeles que se reduce al conducir en diferentes condiciones de calzada en la ciudad de Ibarra. Algunos de estos resultados indican un comportamiento diferente al conducir a bajas y altas velocidades, esto debido al ruido que genera el mismo vehículo y por parte de otros automotores.

Esta investigación busca contribuir al avance de la insonorización vehicular y proporcionar información valiosa para diseñadores, ingenieros y fabricantes de automóviles, con el objetivo explícito de mejorar la calidad de vida de los usuarios de vehículos y a su vez reducir el impacto del ruido en las ciudades. Es evidente que hay factores que no se han tomado en cuenta, como el mejorar la vida útil del material utilizado, la impermeabilización o los métodos para optimizar el tiempo en la aplicación de materiales plegados, todos estos son posibles aspectos en los que la industria y futuros ingenieros pueden seguir investigando, este es solo el principio de una larga cadena de mejoras en la acústica vehicular, queda mucho por investigar y automatizar.

CAPÍTULO I

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. Justificación

Actualmente, la industria vehicular se enfoca el desarrollo de nueva tecnología que aumente el confort de los ocupantes de un vehículo, para esto muchas de las marcas de vehículos se han centrado en la cantidad de ruido que ingresa a la cabina de los ocupantes, encontrando diversos materiales y composiciones que en ocasiones resultan en un aumento de peso innecesario.

Para el aislamiento acústico del vehículo se necesita la instalación de elementos que reducen el nivel de ruido que llega hasta el interior. El objetivo principal del aislamiento acústico del automóvil es aislar la cabina de interferencias externas y así hacer que el viaje sea más placentero (Asensio et al., 2021). Sin embargo, esta no es su única aplicación. En otros casos, el aislamiento acústico del vehículo también tiene el objetivo de mejorar el sistema de sonido del vehículo. Fernández Bórquez (2013) afirma que: “Una buena insonorización evita que el sonido se propague hacia la parte externa del vehículo y aumenta el rendimiento del sistema de audio. Es decir, este aislamiento también impide que en el exterior se perciba el sonido del interior del habitáculo” (p. 23). Aun así, no es aconsejable, que el conductor disfrute de un total aislamiento acústico del exterior, pues se ha comprobado que esa situación puede llevar a un relajamiento excesivo durante la conducción.

En el objetivo 12 del plan nacional de desarrollo “CREACION DE OPORTUNIDADES”, se fomenta el desarrollo de modelos sostenibles aplicando medidas de adaptación y mitigación al cambio climático recalando en la política 12.3 implementar mejores prácticas ambientales con responsabilidad social y económica, que fomenten la concientización, producción y consumo sostenible, desde la investigación, innovación y transferencia de tecnología. (Secretaría Nacional de planificación, 2021)

No hay que confundir las diversas técnicas de plegado que existen, para la realización de este proyecto es necesario de la puesta a prueba de varios patrones, como origami o kirigami, entre otros, enfocándonos en el desarrollo de una nueva forma para insonorizar, de la cual hay muy escasa información en las bases de datos, dejando como resultado mejores prestaciones, y amigables con el medio ambiente.

1.2. Alcance

El presente trabajo de grado procura realizar el insonorizado de un vehículo de clasificación M haciendo uso de la técnica del doblado de materiales, logrando una reducción de ruido e identificar la incidencia de este en el peso del vehículo.

Se aprovecha el estudio sobre doblado de materiales y aislamiento acústico para la realización de una maqueta comparativa entre las capas de materiales utilizadas para la insonorización de un habitáculo de manera estándar y la insonorización bajo el plegado de materiales.

La adaptación en el habitáculo obtenida mediante pliegues será sometida a pruebas de niveles de ruido bajo diversas condiciones de carretera, haciendo uso de un sonómetro para la recopilación de datos y una posterior comparativa con un habitáculo de insonorización estándar.

1.3. Antecedentes

La contaminación acústica en el transporte ha sido motivo de análisis y estudios dedicados a los sonidos producidos por el tráfico y las actividades que lo acompañan, afectando la vida humana y animal. La dinámica que se desarrolla a diario en las grandes y pequeñas ciudades acerca de transporte de carga y personas, contribuyen a la producción de ruidos no deseados que influyen de manera negativa la calidad de vida y en algunos casos llegando a afectar la salud. (Jacyna et al, 2021)

Las estimaciones más recientes de la Agencia Europea de Medio Ambiente y la Organización Mundial de la Salud indican que el ruido del tráfico causa 100 000 casos de muerte prematura al año en Europa (Asensio et al., 2021). Debido a esto existen estudios acerca del aislamiento acústico o de ruido, dirigidos a diferentes campos como estudios de grabación, sistemas de calefacción, instalaciones de elevadores, salas de conferencia etc., y el campo automotriz no es la excepción, sin embargo el ruido que es producido por vehículos hacia el ambiente no es el único problema que se enfrenta, ya que el conductor y pasajeros de cada vehículo también se ven afectados, es por esto que es necesario realizar un trabajo de insonorización en del habitáculo del vehículo.

La calidad sonora del espacio interior de un vehículo es un aspecto importante y exige una atención especial a los niveles de ruido y vibración (Singh & Mohanty, 2018). A pesar de que actualmente los vehículos cuentan con soportes especiales que reducen las vibraciones del motor, este no deja de vibrar. Los niveles de presión sonora equivalente (NPS eq), expresados en decibeles [dB], que se obtengan de una fuente fija emisora de ruido, no podrán exceder los valores normados. (López Del Corral Fabiola, 2018)

Existen varios factores que intervienen en la creación de perturbaciones acústicas, tales como pavimentos que están formados por varias capas con diferentes características mecánicas y funcionales. El uso de pavimentos de bajo ruido puede ser una medida eficaz para reducir la contaminación acústica generada por el tráfico rodado como factor externo (Vázquez et al, 2020). La unidad de calefacción, ventilación y aire acondicionado es una fuente importante de ruido para el interior de un vehículo. Reducir estas perturbaciones sonoras mejorará la calidad del sonido del espacio interior del vehículo y mejorará la experiencia de los pasajeros. Sin embargo, las técnicas actuales de control de ruido son costosas y poco amigables para el medio ambiente. (Singh & Mohanty, 2018)

“Los fabricantes de vehículos buscan reemplazos ecológicos para los materiales utilizados en sus productos que brinden resultados iguales o mejores a los usados comercialmente” (Rämmal & Lavrentjev, 2020). Se cuenta con diferentes técnicas de aislamiento acústico fuera de la manera convencional. La aplicación de capas aislantes de ruido, tales como aluminio, goma de butilo y caucho, son usadas en gran medida brindando una reducción de ruido eficiente, pero dejando de lado factores como, el aumento de peso y varios problemas a la hora de su aplicación.

El estudio de la mecánica geométrica y las estructuras de bandas sintonizables de una nueva clase de estructuras kirigami plegadas desarrolladas recientemente a través de experimentos, el diseño plegado logra un cambio de polarización único, es decir, la estructura primero se expande y luego se encoge para ser aún más pequeña que antes del plegado. Este trabajo podría encontrar aplicaciones potenciales en el diseño de metamateriales de kirigami, materiales de transformación de formas y materiales fonónicos con estructuras de bandas sintonizables (Li et al, 2021).

Los metamateriales y las estructuras basadas en origami, que han atraído un interés creciente en los campos de investigación interdisciplinarios, las estructuras basadas en origami se pueden adoptar para el aislamiento de vibraciones mediante el uso de sus estados multiestables y características de rigidez deseables. “Se revisan diferentes patrones de origami para mostrar sus configuraciones y estructuras base” (Ji et al, 2021). Las barreras de sonido convencionales están restringidas por una geometría fija que da como resultado muchas limitaciones.

En esta investigación, el origami, la técnica de plegado de papel, se utiliza como plataforma para diseñar barreras de sonido desplegadas y reconfigurables. El patrón de plegado también genera ondulaciones periódicas en las láminas de origami, que pueden aprovecharse como

cavidades de respaldo para formar absorbentes de sonido resonante con una membrana microperforada.

La barrera de origami propuesta involucra dos mecanismos fundamentales: la reflexión y la absorción del sonido, y el origami ofrece una capacidad de ajuste única para enriquecer ambos mecanismos debido a las evoluciones geométricas inducidas por el plegado. Específicamente, el efecto de reflexión del sonido se puede ajustar de manera efectiva cambiando la zona de sombra acústica y las rutas del sonido difractado mediante el plegado, adicional a esto, el efecto de absorción del sonido también se puede regular alterando la profundidad/forma de las cavidades de respaldo durante el plegado. (Yu et al, 2019)

Mediante el uso de este nuevo modelo estructural, las respuestas complejas que implican la deformación de las facetas, como el corte, las características de vibración, las inestabilidades y similares se pueden reducir con precisión. (Soleimani et al, 2021)

1.4. Planteamiento del Problema

Actualmente, en la ciudad de Ibarra los vehículos no cuentan con un buen nivel de insonorización en la cabina, el cual está habitualmente provisto por los acabados del fabricante, sin embargo, existe la técnica de insonorización mediante capas de aluminio, espumas y diversos polímeros elastómeros, los cuales inciden en el aumento de peso innecesario para el vehículo.

Algunos tipos de polímeros son utilizados en la insonorización de vehículos, como, por ejemplo, goma de butilo, tela asfáltica, entre otros, los cuales reaccionan de manera negativa bajo ciertas condiciones como el aumento de temperatura, generando humedad, desprendimientos del material aislante, malos olores y permitiendo el paso a los ruidos externos. Se han encontrado materiales que han dado solución a esta problemática, pero se continúa recayendo en el aumento de peso innecesario.

El índice de contaminación auditiva ha ido en aumento en los últimos años, por lo que mantener un ambiente con bajo nivel de ruido dentro de la cabina aporta a una mejor experiencia de conducción, menores distracciones para el conductor y reduce las afecciones auditivas a los usuarios.

En el siguiente apartado se muestran los objetivos que guiaron el presente trabajo, los cuales, durante el transcurso de la investigación, fue necesario modificar ciertas palabras respecto al anteproyecto aprobado por el consejo directivo, esto con la intención de mejorar la redacción y comprensión del lector.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Insonorizar el habitáculo de un vehículo tipo M en la ciudad de Ibarra provincia de Imbabura, para reducir los decibeles de ruido que se perciben en el interior del habitáculo, mediante la aplicación de materiales plegados.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Realizar un estudio del plegado de papel para encontrar un patrón adecuado capaz de reducir los decibeles de ruido en el habitáculo durante la conducción.
- Seleccionar el material ideal capaz de soportar el diseño del patrón a utilizar dentro del vehículo.
- Comparar la cantidad de ruido al interior de un vehículo tipo M con insonorización estándar, frente a la insonorización mediante material plegado.
- Construcción de una maqueta didáctica comparativa entre la insonorización estándar y la técnica de insonorización mediante material plegado.

1.6. Introducción a los ruidos en el campo del automóvil

Habitualmente el ruido es un sonido no deseado, por lo general, este trata de ser eliminado o al menos reducido. En la antigüedad el ruido no era un factor tomado en cuenta por los diseñadores de vehículos, o este solo se eliminaba mediante el aumento de peso del automotor, pero hoy en día, la industria y necesidades del consumidor exigen tener un mayor rendimiento utilizando piezas más ligeras, pero a su vez, retando a estas a ser más rígidas y silenciosas.

Para tratar las fuentes de ruido internas primero deben ser cuantificadas todas sus fuentes, la figura 1.1. muestra las principales fuentes de ruido que logran percibirse dentro de la cabina de los ocupantes.

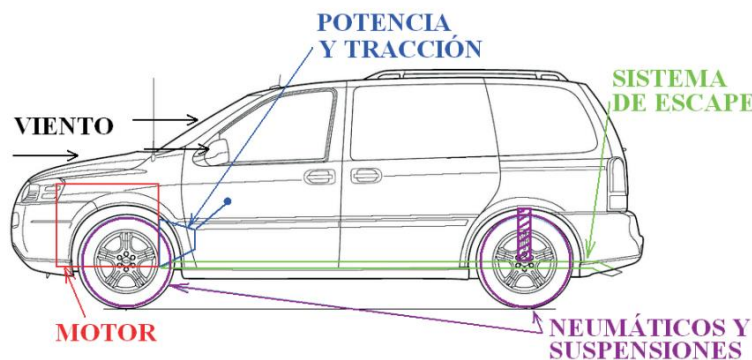


Figura 1.1. Fuentes de ruido en el vehículo

Fuente. (Donayre, 2012).

La industria automotriz actual tiene en su mercado vehículos con motores de alto rendimiento, que alcanzan velocidades más altas, y por ende ruidos más perceptibles. Los vehículos comerciales no sufren por estos motivos, ya que no necesitan de potencias demasiado altas porque no se mueven por terrenos difíciles o pistas de alto rendimiento.

1.6.1. Ruido del motor

El motor está diseñado para transformar la energía química en fuerza motriz mediante un conjunto de piezas perfectamente acopladas, se trata de un trabajo en conjunto. Durante este

proceso, los movimientos relacionados con la dinámica, la inercia y la combustión interna de combustible generan vibraciones, convirtiendo al motor en una fuente de ruido.

En una clasificación de los elementos más ruidosos del motor, los cuales son producidos por elementos metálicos largos que están a altas temperatura o que unen poleas como en el caso del cigüeñal, otros con movimiento constante como válvulas de admisión y escape deben soportar las cargas de fuerza que la combustión generan, sin contar el ruido de explosión, por lo que es mejor aislar estos componentes de posibles vibraciones mediante tuercas antivibración, tornillos fijos o cauchos de materiales sellantes.

1.6.2. Ruidos en la transmisión y rodadura

El ruido que proviene de la transmisión de movimiento o rodadura es inevitable, solo un sistema de transmisión de energía ideal sería capaz de no emitir ningún sonido o vibración. También se debe tener en cuenta la forma en la que aumenta el valor de los decibeles cuando se tienen distintas fuentes de ruido. Un estudio realizado por Sans Vila Carlos (2012), demuestra que “el aumento de ruido que genera la transmisión está directamente relacionado con la velocidad del vehículo, si la velocidad se duplica el ruido aumentará entre 6 y 8 dB. A su vez, si se duplica la potencia, el ruido aumentará entre 2.5 y 4 dB”. (p. 19)

Cuando hablamos del ruido de rodadura, se toman en cuenta distintas variantes. Azizi (2020) menciona a la textura de la carretera y el factor de uniformidad geométrica de la rueda como principales causantes de ruido, al hacer contacto a alta velocidad se suma el peso del vehículo, lo que a su vez genera fuerzas laterales y radiales que se expresan en forma de ruido y vibraciones. Los diseños de rueda no son uniformes, estos permiten el paso de agua e influyen positivamente en el agarre, lo que brinda seguridad al conductor.

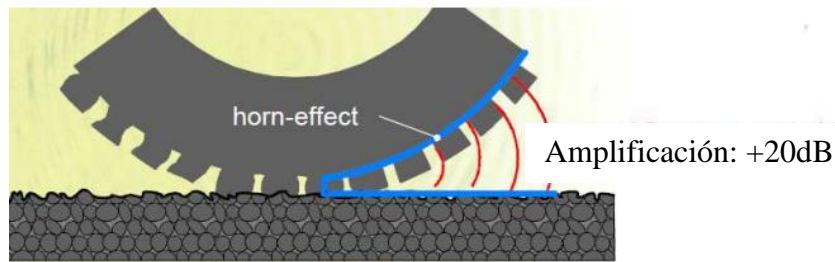


Figura 1.2. Interacción entre un neumático y la carretera.

Fuente. (Sanz Vila, 2012).

El ruido de rodadura no era una problemática con motores grandes en los que prevalecía el sonido de combustión, hoy en día es un conflicto aún mayor con los vehículos eléctricos, en los que ni siquiera el encendido del motor es notorio. Para determinar el ruido de rodadura no solo es necesario analizar el efecto del patrón de la rueda, sino también el tipo de superficie de la carretera.

1.6.3. Ruidos de admisión y escape

Los ruidos de admisión y escape se generan por el flujo turbulento desde lugares como el filtro de aire y las válvulas de admisión y escape, donde las diferencias de presión provocan pulsos en forma de ruido y vibraciones. Este ruido es proporcional a la entrega de potencia del motor, llegando a medir entre 10 y 15 decibeles desde un estado de reposo del motor.

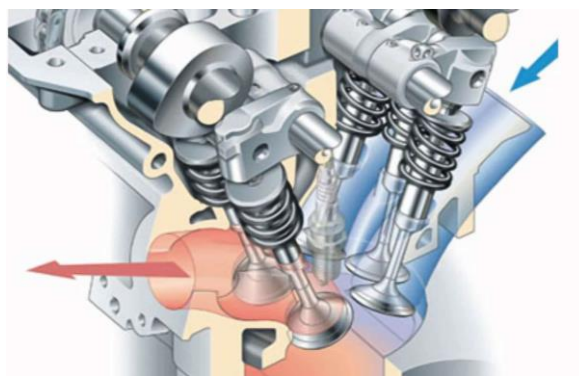


Figura 1.3. Flujo de aire a través de las válvulas y el cilindro

Fuente. Navarrete (2021).

El ruido en el escape está dado por la expulsión repentina de gases resultantes de la combustión, el sonido producido también está ligado a las características y distribución de las válvulas en

cada motor. El estudio de (Sanz Vila, 2012) menciona que “la frecuencia del ruido de escape en un motor de cuatro tiempos puede expresarse en Hz, tomando en cuenta las siguientes componentes:”

$$f = \frac{\text{Velocidad de giro del motor (rpm)}}{30} \times \frac{\text{Número de cilindros}}{2} \quad (1)$$

Características como silenciadores, tubos de escapes más rectos, diseñar los conductos de escape de manera simétrica permiten reducir el nivel de ruido de estos sistemas. Las vibraciones producidas se deben separar del resto de la estructura del vehículo para evitar que el ruido se transmita hacia los ocupantes y a otras partes fijas del chasis o carrocería, por lo que se usan dispositivos elásticos o plásticos para sostener el tubo de escape bajo el vehículo.

1.6.4. Ruido aerodinámico

El aire que bordea el vehículo forma un flujo turbulento a través de los conductos de aireación, radiador, ventilador de refrigeración y ventilación hacia el interior de la cabina, a esto se le suman los accesorios poco aerodinámicos como por ejemplo los retrovisores por su forma posterior. Aunque el modelado logra mejorar la aerodinámica de la estructura externa, la mayor parte de ruido por viento que ingresa a la cabina es detenido por el aislamiento de puertas, ventanas y huecos, mejorando el confort de los ocupantes.

Para explicar el fenómeno, Carlos Sans Vila (2012) en su investigación sobre *Técnicas para el estudio acústico en vehículos* menciona el término Ruido de borde, el cual involucra al diseño de aristas y esquinas. La corriente de viento al exterior del vehículo es separada por todas las formas que se hallan en la carrocería, estos flujos de aire se enrollan en pequeños vórtices como se muestra en la figura 1.4. Cada uno tiene un nivel de flujo turbulento de aire, lo que influye en disminución de aerodinámica y aumento de ruido perceptible al interior de la cabina.

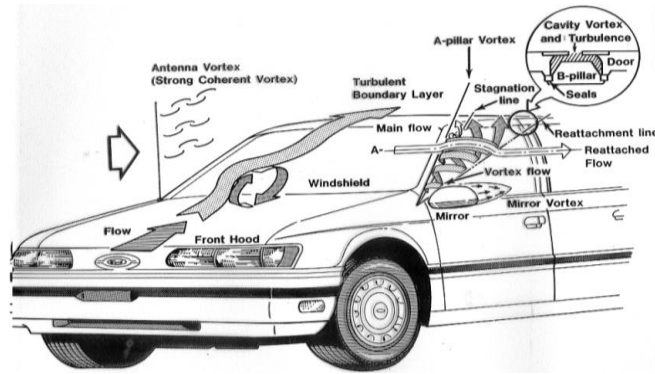


Figura 1.4. Flujo aerodinámico al exterior del vehículo
Fuente. (Sanz Vila, 2012).

Se puede realizar una comparación en base a los decibeles producidos por las principales fuentes de ruido del vehículo, aunque estos valores varían dependiendo de las características externas, para esta investigación se toma como referencia la siguiente gráfica de valores.

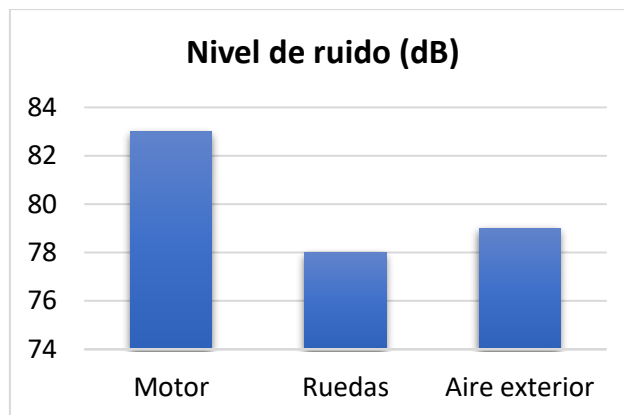


Figura 1.5. Niveles de las fuentes de ruido.

1.7. El decibelio como escala de medida

La percepción humana del volumen se denomina "nivel de sonido" y se expresa en decibeles (dB). Un nivel sonoro de 0 dB corresponde a la percepción del silencio, pero no significa que la energía sonora sea nula, sólo que está fuera de nuestro rango auditivo. Por el contrario, una energía sonora de 1 W/m^2 a 120 dB se percibe como un ruido extremadamente doloroso (y posiblemente dañino para los oídos). Si dos sonidos tienen sólo una diferencia de intensidad de 0,1 dB, la diferencia es apenas perceptible. Además, un sonido que supera a otro en 3 dB se percibe dos veces más fuerte. La exposición prolongada a ruido continuo de 90 dB puede causar daños auditivos con el tiempo, incluso si no hay dolor inmediato (Caon, 2018).

1.8. Instrumentos para el análisis de ruido

Los equipos de análisis de este tipo son necesarios para la medición de niveles de ruido continuo, tales como el ruido del tren de transmisión, el ruido del motor, el contacto de las ruedas con la carretera y el ruido del conjunto de amortiguadores. Para esto existen diferentes pruebas como: potencia acústica, análisis de frecuencia y la identificación de origen, pero para poder efectuar de forma correcta este tipo de pruebas es necesario disponer de ambientes controlados, y que a su vez sean independientes de los efectos meteorológicos.

1.8.1. Sonómetros Promediadores

Es un instrumento básico para la medición de ruido, capaz de evaluar la cantidad de presión e intensidad sonora que percibe el oído humano. “En concreto, el sonómetro mide el nivel de ruido que existe en determinado lugar y en un momento dado, la unidad que trabaja el sonómetro es el decibelio” (Ocadiz Marquez, 2012).

Existen diferentes escalas de medición de sonido, la más utilizada con respecto a la respuesta del oído humano es conocida como dB(A), aunque existen otras ponderaciones como B, para ruido medio, C para ruidos mayores, y D aplicada en evaluación de aeronaves, estas no son habitualmente usadas en estudios de insonorización o acústicos afines.

La variación de resultados de una muestra se promedia en un nivel de sonido de periodo T, y se puede describir así:

$$L_{Aeq,T} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p_A(t)}{p} \right)^2 dt \right) \quad (2)$$

El resultado de la ecuación logarítmica brinda un promedio en dB que varía entre 0 y 120 dB, lo que se puede interpretar como el proceso lógico que realiza un sonómetro convencional para arrojar un valor en su pantalla.

La tabla 2.1 muestra los rangos audibles que percibe una persona con buen estado de salud. Los ruidos superiores a 120 dB pueden ser muy dolorosos o causar daños irreversibles.

Tabla 1.1. Niveles de ruido que percibe el ser humano.

Niveles Sonoros y Respuesta Humana		
Sonidos característicos	Nivel de presión sonora [dB]	Efecto
Zona de lanzamiento de cohetes (sin protección auditiva)	180	Pérdida auditiva irreversible
Operación en pista de jets Sirena antiaérea	140	Dolorosamente fuerte
Trueno	130	
Despegue de jets (60 m) Bocina de auto (1 m)	120	Máximo esfuerzo vocal
Martillo neumático Concierto de Rock	110	Extremadamente fuerte
Camión recolector Petardos	100	Muy fuerte
Camión pesado (15 m) Tránsito urbano	90	Muy molesto Daño auditivo (8 Hrs)
Reloj Despertador (0,5 m) Secador de cabello	80	Molesto
Restaurante ruidoso Tránsito por autopista Oficina de negocios	70	Difícil uso del teléfono
Aire acondicionado Conversación normal	60	Intrusivo
Tránsito de vehículos livianos (30 m)	50	Silencio
Dormitorio Oficina tranquila	40	
Biblioteca Susurro a 5 m	30	Muy silencioso
Estudio de radiodifusión	20	
	10	Apenas audible
	0	Umbral auditivo

Nota. (Bandrán et al., 2007; Quinga Benalcázar, 2010).

1.8.2. Analizadores de intensidad sonora.

Permite medir la potencia acústica, se puede llevar a cabo en condiciones de ruidos de fondo elevados, en este caso no es necesario un recinto especial de prueba. También se puede identificar las fuentes de ruido a partir de un mapeado de la intensidad sonora.

“Su composición de dos micrófonos muy cerca el uno del otro, miden el nivel de ruido y el gradiente de presión que existe entre los dos receptores, la señal se procesa y se emite un resultado con valores de intensidad sonora” (Sanz Vila, 2012).

1.9. Barrera Acústica

Se ha hecho uso de barreras acústicas desde hace miles de años, el acto de situar un objeto entre el oyente y el generador de ruido crea este concepto. “A pesar de que la barrera evite por completo la visión del generador de ruido o que sea de un grosor considerable, el sonido se comporta de formas caóticas formando una curvar alrededor de la barrera, esto quiere decir que el sonido no se propaga en línea recta necesariamente, este fenómeno se lo conoce como difracción” (Bórquez Vera, 2016).

Diferentes factores intervienen en la efectividad de una barrera acústica, como la directividad de la fuente, curvatura, forma, y tratamiento de absorción, ente otros. El objetivo de aplicar una capa de aislamiento acústico es brindar un efecto de protección interceptando la línea de visión entre la fuente y el receptor. Los materiales usados forman una capa porosa y de esta forma evitar acumular polvo, pero principalmente reaccionar como un material cerámico, mismos que son ideales para absorber el sonido e insonorizar espacios cerrados.

1.10. Barreras acústicas plegables

La propagación del sonido no se produce necesariamente por medio de un camino directo. La transmisión de las ondas sonoras puede seguir muchos caminos. Además del camino directo a través de una pared o techo, existen los llamados caminos laterales o indirectos. En general, no es posible establecer cuál de los caminos de transmisión es más importante” (Möser & Luis Barros, 2009, pág. 233). Entonces, se puede introducir el principio de insonorización mediante materiales plegados, empezando por materiales como fibras de papel.

1.10.1. Origami – Miura Ori

Se trata del antiguo arte de doblar papel, conocido como origami, es una palabra que se compone en términos japoneses oru (plegable) y kami(papel). Actualmente ha surgido como un enfoque de amplias posibilidades gracias a la aplicación de las matemáticas en su estudio. Además de ofrecer ciertas propiedades como la re-configurabilidad, escalabilidad, capacidad de plegado rígido, multiestabilidad y auto actuación, son completamente determinadas por la geometría que es independiente de la escala, el origami desencadena una explosión de innovaciones en materiales, estructuras y dispositivos programables. (Meloni et al., 2022; Yu et al., 2018)

La estrategia de insonorizar mediante Origami implica utilizar sus placas rígidas y bisagras flexibles formando una hoja de Miura-ori. Se conoce como Miura-ori al doblado que tiene su nombre por su autor, un astrofísico japonés quien ha desarrollado un sistema de plegado para el transporte de paneles al espacio. Las aplicaciones pueden ser tanto tecnológicas como también al diseño de muebles, cubiertas y modas. (Domínguez, 2009)

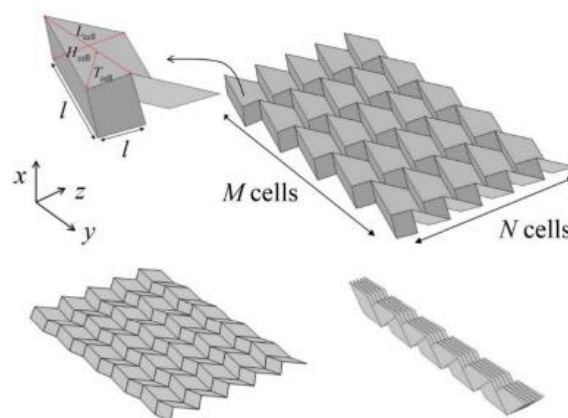


Figura 1.6. Modelado de Miura-ori.

Fuente. (Yu et al., 2019).

Las dimensiones y el perfil de la superficie de la barrera se modifican en el sitio a aislar, alterando así el rendimiento de atenuación y las trayectorias del sonido difractado. Adicional a

esto, sus cavidades forman un respaldo absorbente de sonido como una micro membrana perforada.

1.10.2. Cinemática y geometría del Origami

La geometría de una celda Miura-ori, que consta de cuatro facetas de paralelogramo idénticas conectado por cuatro pliegues intersecando en un vértice central 'O'. La mitad de una celda unitaria se puede denotar con seis vértices puntos 'A', 'B', 'C', 'O', 'D', 'E'. Para simplificar y se supone que todas las longitudes de pliegue son idénticos. (Yu et al., 2018)

El plegado de la celda de Miura-ori es un mecanismo de un grado de libertad que puede ser descrito por el ángulo de plegado, definido como el ángulo entre el pliegue OA y el plano horizontal.

La siguiente gráfica permite visualizar los seis vértices y el ángulo de plegado.

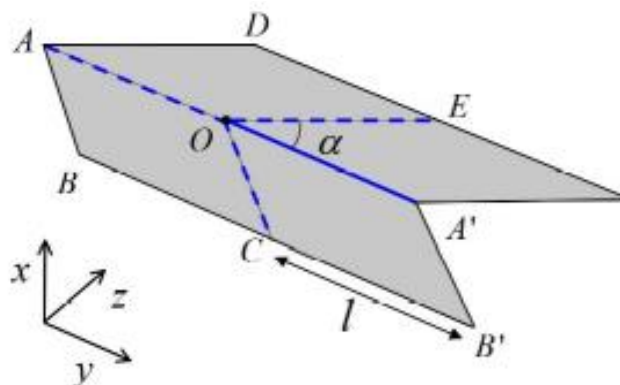


Figura 1.7. Geometría plana de una celda Miura Ori
Nota. (Yu et al., 2019).

1.11. Modificación insonora en un vehículo

La insonorización del habitáculo de un vehículo puede aplicarse a diversas partes, esto dependerá de las características y necesidades de cada modelo y marca. Sin embargo, las partes más comunes donde aplicar la insonorización incluye:

Las puertas, que por lo general son los lugares por donde más ruido entra, el ruido de la calle se reducirá parcialmente. Los cauchos de los bordes de las puertas del vehículo pueden tener un impacto significativo en la insonorización. Algunos de los modelos de vehículos no cuentan con ninguno material de aporte a la insonorización dentro de sus puertas. Techo y piso, pueden reducir el ruido que entra desde el motor, calzada y el exterior, y mejora la calidad acústica del habitáculo. Capó y paneles interiores, pueden reducir las vibraciones y ruidos del motor. (Noico Solutions, 2023). En el presente proyecto se enfocará en las partes antes mencionadas para aplicar una insonorización mediante materiales plegados.

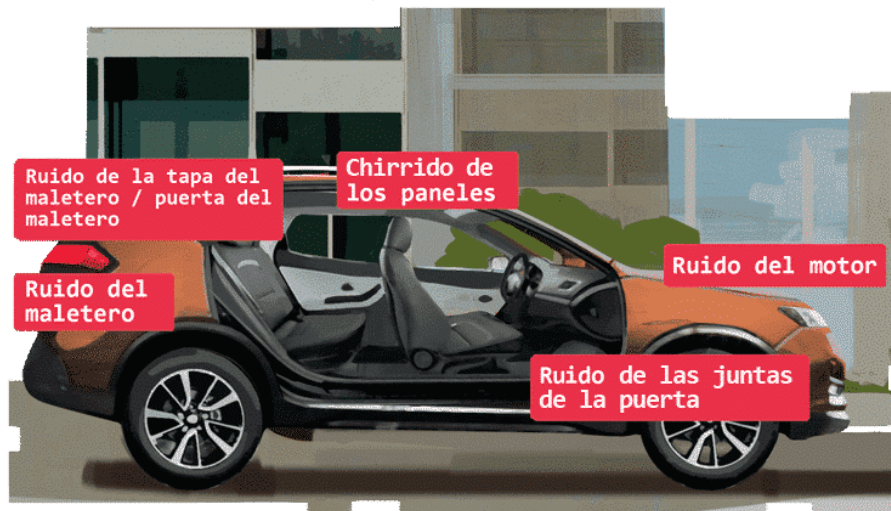


Figura 1.8 Zonas que requieren de aislamiento acústico.
Fuente: (Noico Solutions, 2023).

CAPITULO II

2. Materiales y Métodos

En esta sección se detalla las distintas metodologías aplicadas, detalles sobre los materiales que se utilizaron, las pruebas realizadas antes y después de la modificación insonora, así como el procedimiento para el mismo.

2.1. Metodología de la Investigación

El estudio científico presentado consta de tres elementos clave. El primero, “el objeto” o el propósito de la investigación, se detalló en el primer capítulo del documento y se abordará mediante métodos cuantitativos y analíticos para interpretar los datos. El segundo elemento es “el medio”, que incluye las técnicas y los materiales utilizados en la investigación y se describe en el presente capítulo. Estas técnicas fueron probadas utilizando el método científico para validar los resultados y comprobar la hipótesis presentada. Para ayudar a entender mejor los métodos aplicados, se emplearon algoritmos representados en diagramas de flujo, que establecen una secuencia ordenada y finita de pasos para resolver un problema.

2.1.1. Método Analítico

Es la base para diversas investigaciones que requieren una aplicación, evidentemente el proyecto recopiló una serie de datos en diversas condiciones que debieron ser interpretados, llevando a discusión los parámetros encontrados, generando resultados y conclusiones más precisas. Es necesario validar de manera minuciosa los resultados arrojados para que estos tengan una concordancia con respecto a los objetivos antes planteados.

2.1.2. Método experimental

La utilización de este método fue fundamental debido a la variedad de pruebas que se llevaron a cabo, entre las cuales se incluyen la medición, el cálculo, las pruebas de reducción de ruido de material, el análisis de bases de datos y la determinación de resultados.

2.1.3. Método Cuantitativo

La utilización de este método es relevante, ya que se cuantifican los resultados obtenidos en el vehículo previo a la aplicación de una modificación, estos se comparan a resultados de insonorización de pruebas en diversas condiciones de carretera y rangos de velocidad.

2.1.4 Método Bibliográfico

El presente documento incluye las bases de datos y motores de búsqueda utilizados. También es importante mencionar los criterios de selección de las fuentes, como el año de publicación, el idioma y la relevancia temática. Además, se puede mencionar si se realizaron búsquedas complementarias en bibliotecas físicas o en catálogos de revistas y publicaciones periódicas. Es relevante destacar que la selección y evaluación crítica de las fuentes bibliográficas es fundamental para garantizar la calidad y confiabilidad de la información empleada en la investigación.

2.2. Materiales

En esta sección se hace referencia a los elementos físicos que se han utilizado en el estudio. Entre estos materiales se incluyen micrófonos, medidores de sonido, materiales absorbentes, aislantes y de barrera de sonido, entre otros. Estos materiales fueron seleccionados cuidadosamente para asegurar que sean capaces de cumplir con las exigencias del estudio y brindar resultados precisos y confiables, de esta forma al asegurar una selección adecuada también se logra una correcta interpretación de los resultados obtenidos.

2.2.1. Chevrolet Corsa Evolution 1.8

El vehículo seleccionado para la aplicación de estudio es el Chevrolet Corsa 1.8, modelo 2003. Se encuentra en la categoría M1 y considerando dentro de vehículos livianos según Norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2656 (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2012). A nivel nacional es uno de los vehículos más comerciales, su producción se dio hasta el 2006 con dos

versiones, básica y full equipo, sin embargo, para este trabajo de investigación se usó el modelo básico, ya que incorpora una insonorización estándar en el techo, puertas y piso.

Tabla 2.1. *Ficha técnica del Chevrolet Corsa Evolution.*

Características	Chevrolet Corsa Evolution 2003
Número de puertas	5
Longitud	3.839 mm
Anchura	1.646 mm
Altura	1.440 mm
Tipo de Carrocería	Turismo
Tamaño Neumáticos	185/55 R15
Insonorización	Estándar + Alfombrilla
Revoluciones potencia máxima	6000 rpm
Par máximo	160 Nm
Coefficiente Cx	0,32
Factor de resistencia	0,64
Peso	1.135 kg
Capacidad de Gasolina	44 litros
Número de plaza	5

Fuente. (Ruedas de prensa, 2023).

2.2.2. Sonómetro Digitech QM 1592

Es un equipo que se utiliza para medir niveles de sonido en la unidad de decibeles [dB], dentro de los rangos de frecuencias dBA (para entornos urbanos o industriales) y dBC (para entornos acústicos, musicales o construcción) (Biomed Instruments, 2022). El equipo junto con sus accesorios como se muestra en la figura 2.1 fueron provistos por los talleres de la universidad Técnica del Norte.



Figura 2.1. Sonómetro Digitech QM1592 y accesorios.

Entre sus detalles más importantes se encuentran:

Tabla 2.2. Ficha técnica del sonómetro digital.

Características	Sonómetro Digital QM 1592
Fabricante	Digitech
Rango de medición	30 a 130 dB
Frecuencia	31.5 Hz - 8 kHz
Alimentación	9V DC (batería)
Dimensiones	210 x 55 x 32 mm
Precisión	± 1.5 dB
Pantalla	LCD retroiluminada
Peso	160 g

Fuente. (Biomed Instruments, 2022).

2.2.3. Plataformas de peso

Se utilizó otro recurso en la investigación, un sistema denominado INTERCOMP SW500 E-Z WEIGH SCALE SYSTEM 170125 que se encuentra entre los equipos del taller de la Universidad Técnica del Norte. Dicha balanza consta de cuatro plataformas con una capacidad de carga máxima de 700 kg cada una, y una consola LCD para la visualización de datos con una precisión certificada del 0.1% en relación con la carga aplicada, según se establece en el manual del fabricante (Intercomp Company, 2016). Este recurso se empleó para realizar la medición del peso previo y posterior a la modificación de las capas de aislante sonoro con los que cuenta el vehículo de manera estándar.

2.2.4. Láminas para doblado

La cartulina, lámina de corcho y cartón corrugado, fueron seleccionados por su grosor y resistencia para realizar un estudio de dobleces y capacidad de insonorización. Estos materiales son superiores en diferentes aspectos al papel Kraft (habitualmente usado en ejercicios de dobleces), se caracterizan por tener un acanalado de tamaño medio, lo que los hace adecuado para usos generales, como cajas y embalajes, a esto se suma su disponibilidad en el mercado y diferentes tamaños a disposición.

2.2.5. Caja de pruebas acústicas

Con el propósito de evaluar y comparar materiales fono absorbentes ideales para el presente estudio, se construyó una caja de madera con tapa removible, el interior simula el método de la sala de reverberación descrito por la norma ISO 354:2003. La caja permite realizar pruebas acústicas colocando una sección de material a plegar en el centro de esta, separando en partes iguales su volumen interno.

El objetivo principal de este elemento acústico es determinar el coeficiente de absorción que desarrolla una lámina plegada, esto mediante el tiempo de reverberación producido en uno de los extremos de la caja donde se encuentra situado un sonómetro digital. Una de las paredes está hecha de vidrio, permitiendo la lectura y toma de datos en la pantalla del sonómetro.



Figura 2.2. Caja sonora con fuente de ruido y sonómetro.

La caja de madera fue construida por los miembros del equipo de investigación, y sus dimensiones y especificaciones fueron cuidadosamente seleccionadas para garantizar su idoneidad para nuestras pruebas. Este enfoque nos permitió tener un control total sobre la configuración experimental y minimizar las posibles fuentes de error o variabilidad. Además, el uso de una configuración de prueba estandarizada nos permite comparar las propiedades acústicas de diferentes materiales de manera consistente y confiable.

2.2.6. Altavoz Borofone modelo BR11

Es un dispositivo de audio inalámbrico que cuenta con mando Bluetooth V5.0, con resistencia de 2.4Ω , potencia de 3 W, tamaños: 200 x 60 x 70 mm, un peso de 426g, voltaje de carga CC 5V y batería de 1200 mAh.



Figura 2.3. *Altavoz Borofone Model B11.*

2.3. Procedimiento

En el presente capítulo se detallan los valores iniciales recopilados en el vehículo previo a la aplicación de estudio, peso, estado de insonorización de fábrica, y ruido que se percibe en el interior del vehículo en condiciones de carretera. Se detallan los procedimientos para selección de materiales y sustento matemático del mismo.

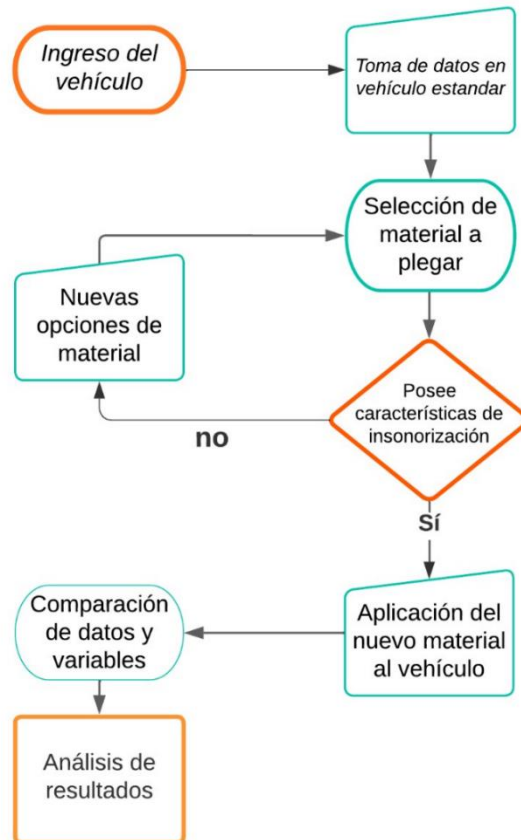


Figura 2. 4. Diagrama de flujo general para el estudio.

Como se resumen en el diagrama de flujo de la figura 2.4, se reemplaza la capa de insonorización que viene de fábrica en el vehículo, y en el análisis de resultados se determina el impacto del nuevo material de insonorizado aplicado en puertas, y piso del automotor. Se lleva a discusión los resultados obtenidos al repetir las pruebas aplicadas con respecto a las características iniciales, determinando conclusiones porcentuales.

2.3.1. Toma de datos estándar en el vehículo

Se llevó a cabo una verificación inicial para garantizar que el vehículo esté en condiciones mecánicas adecuadas que no interfieran con la obtención de datos. Esto incluye:

- El tanque de combustible esté lleno por completo (11 galones).
- Las cuatro ruedas infladas (28 psi).
- Que no haya pesos adicionales en el interior del vehículo.
- Que el vehículo este lavado, limpio.
- Que el material de insonorizado no esté mojado

Adicional a esto, se verificó que no existan fuentes de ruido parásitas como cinturones de seguridad flojos, o piezas que tengan juego y generen vibraciones. Con el fin de realizar una correcta toma de datos respecto al peso se realiza el procedimiento acorde al diagrama de flujo de la figura 2.2.

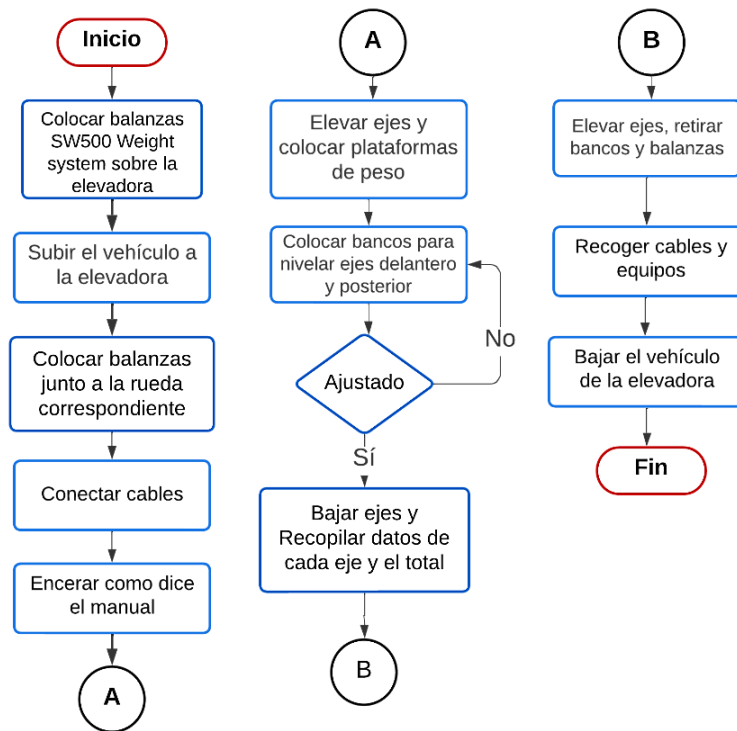


Figura 2.5. Procedimiento para obtener valores de peso.

Con el fin de determinar la variación de peso del vehículo al cambiar su capa de insonorización de fábrica por materiales plegados, se realizó el procedimiento para pesar el modelo seleccionado llevándolo a los talleres de Ingeniería automotriz de la Universidad Técnica del Norte.

Se procedió a subir el vehículo al elevador hidráulico tal y como se muestra en la figura 2.6 situando las plataformas del *Intercomp sw500 e-z weigh scale system* tal y como indica el manual, asignando una plataforma para cada rueda. Las plataformas están numeradas por siglas en inglés: F (Front) para las ruedas delanteras y R (Rear) para ruedas posteriores.



Figura 2.6. *Pesaje del vehículo en el elevador.*

Ya que el cableado para cada balanza está definido por colores no se recae en errores por mala conexión, por lo que posterior a esto, se procedió a encerrar el equipo de medición como lo indica el manual. Finalmente, se realizaron dos mediciones a diferentes ángulos (con las balanzas delanteras a nivel del elevador y con todas las balanzas sobre el elevador), esto con el objeto de analizar la variación del peso con respecto a cada eje, obteniendo el mismo resultado en el peso total del vehículo.



Figura 2.7. *Vehículo sobre plataformas.*

El manual de usuario del Intercomp SW500 menciona que este equipo presenta un factor de precisión de ± 1 lb (0.1% de exactitud de la carga aplicada), por lo que no fue necesario la toma de diferentes datos y cálculos de promedio.



Figura 2.8. Pantalla de datos Intercomp SW500.

Cabe recalcar que el presente estudio no pone énfasis en la distribución del peso enfocado a cada eje, esto debido a que el peso del material de insonorización está distribuido de manera uniforme dentro del habitáculo, lo que no lo hace incidente en uno o en ambos pares de ejes del vehículo, pero sí directamente en el peso total.

La figura 2.8 muestra los valores del equipo de medición, el peso para cada eje del vehículo y su peso total previo a la aplicación de estudio, estos valores son de relevancia para la discusión de resultados y conclusiones por lo que se enmarcan en la tabla

Tabla 2.3. Peso del vehículo previo aplicación de estudio.

Rueda	Peso en [kg]
LF	343,82
RF	313,89
LR	180,98
RR	224,53
Peso total	1063,22
Distribución de peso	61,9 %
	38,1 %

2.3.2. Toma de datos de ruido en vehículo estándar

Con el fin de comprobar la eficiencia del insonorizado estándar que lleva el vehículo Corsa Evolution 1.8, este fue expuesto al ruido aerodinámico y del sistema de propulsión, mismos que se generan al llevarlo sobre condiciones de empedrado, ruido urbano, adoquinado y autopista.

Para este proceso se tomaron en consideración cumplir con los siguientes parámetros mientras se realizan las pruebas de ruta:

- Sonómetro Digitech QM1592 en el interior del habitáculo, figura 2.9.
- Recopilación de datos en intervalos de 20 segundos para cada tramo.
- Realizar las pruebas con las ventanas cerradas.
- Ninguna otra fuente de sonido en el interior del vehículo (ruidos parásitos).
- Tres repeticiones en cada ruta para promediar valores.



Figura 2.9. *Uso de equipos en parámetros de fábrica.*

Para las pruebas de ruta, se condujo a rangos de velocidad y tipos de carretera determinadas. El período de grabación durante cada ciclo de conducción de prueba se escogió 20 segundos. El nivel de ruido equivalente se registró mediante tres grabaciones y sus correspondientes valores promedio, de esta manera se logró evidenciar el comportamiento del ruido que llega hacia los ocupantes del vehículo como se muestra en las gráficas del presente capítulo.

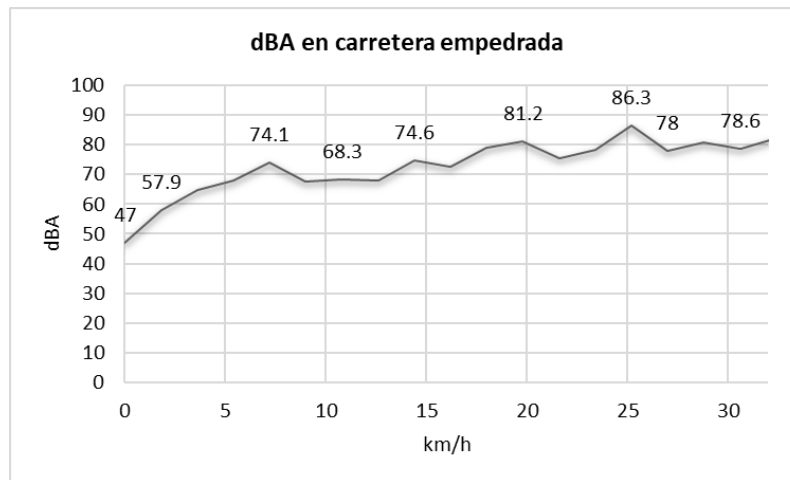


Figura 2.10. Ruido en el habitáculo – Carretera empedrada.

Para el estudio se define como zona rural a las carreteras con empedrados por donde los vehículos deben transitar diariamente, el nivel de ruido que se percibe al interior del habitáculo dependerá de los desniveles y estado de la calzada por la que se transite. En esta prueba se escogió el camino empedrado de la vía antigua a Urcuquí, junto al anillo vial de la ciudad de Ibarra obteniendo la curva de variación de ruido con respecto a la velocidad (de 0 a 30 km/h) mostrado en la figura 2.10.

Las condiciones de carretera más comunes en zonas urbanas de la ciudad de Ibarra son adoquinados, razón por la cual esta prueba se realizó sobre la Avenida Camilo Ponce Enríquez situada junto al parque Ciudad Blanca. Los rangos de velocidad a la que se condujo fueron 10 hasta 40 km/h. La curva de ruido se presenta en la figura 2.11.

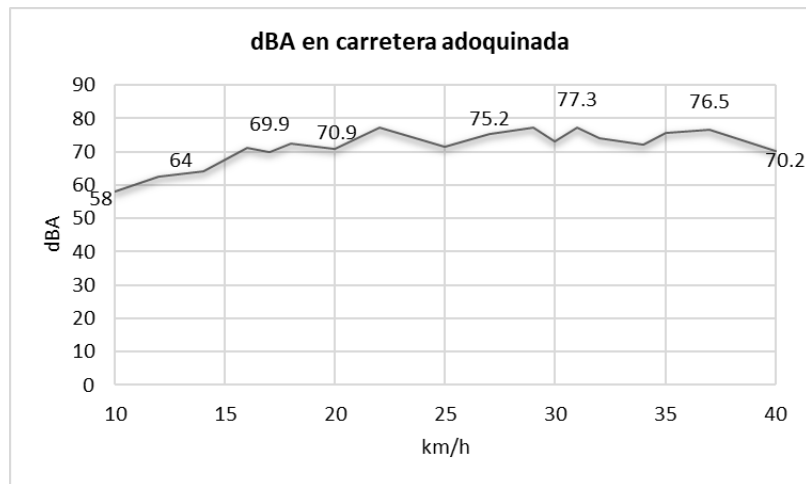


Figura 2.11. Ruido en el habitáculo – Carretera adoquinada.

A diferencia de los rangos de velocidad usados en las pruebas de empedrado y adoquinado, para el caso de análisis de ruido en autopista se tomaron en cuenta tres velocidades constantes como parámetros de conducción, 60, 80 y 110 km/h mostrados en la figura 2.12.

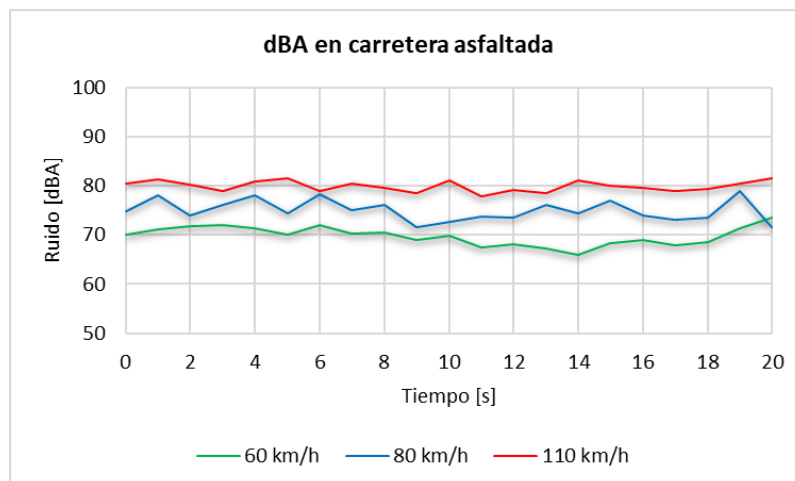


Figura 2.12. Ruido en el habitáculo - autopista.

Ya que a altas velocidades el ruido de rodadura y aerodinámico prevalecen sobre el ruido del motor, este último no resulta incidente en los valores dentro de un rango amplio de velocidades, a esto se suman a las condiciones geográficas y de tráfico de la ciudad blanca, las cuales no permiten una correcta toma de datos con un aumento gradual a altas velocidades, razón por la cual se tomaron datos en base a un rango de tiempo a velocidad constante.

2.4. Simulación y Cálculos

2.4.1. Selección del material a plegar

El Chevrolet Corsa Evolution está equipado con una manta de fieltro debajo de la alfombra del habitáculo, figura 2.13. Esta actúa como “espuma de amortiguación” o “espuma de aislamiento acústico”. Las espumas de fieltro cuentan con propiedades de absorción de sonido y ayuda a reducir las vibraciones percibidas por los ocupantes del automotor. También puede proporcionar cierto nivel de aislamiento térmico y protección contra la humedad.



Figura 2.13. Manta de fieltro vehicular estándar.

Existen diferentes materiales para realizar Miura-ori o geometrías plegadas que pueden tener las propiedades adecuadas para la insonorización vehicular. En el presente apartado se fundamentan los valores de coeficiente de absorción del sonido de diferentes materiales y el método experimental que se aplicó durante esta selección.

- ***Método del tubo de impedancia***

El artículo *Estudio acústico de un nuevo material ecológico* realizado por H. Rämmal (2020) menciona que: El método más utilizado para determinar el coeficiente de absorción de los materiales es el método del tubo de impedancia según la norma ISO 10534-2, donde la muestra de material se coloca en el extremo rígidamente cerrado del tubo.

Se aplica ruido de excitación del controlador electrodinámico desde el otro extremo del tubo y se miden las señales acústicas de dos micrófonos, de esta forma es posible calcular el coeficiente de absorción del material probado.

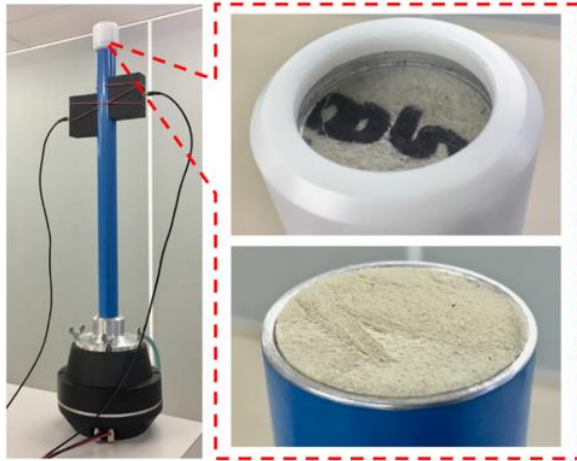


Figura 2.14. Método del tubo de impedancia.
Fuente. (Rämmal, 2020).

A pesar de la precisión del equipo mostrado en la figura 2.14, varios estudios han demostrado que el tubo de impedancia no suele brindar resultados acertados cuando se trata de aplicaciones vehiculares de ruido y vibración, por lo que se hace necesaria la adaptación de una cámara de pruebas donde se pueda evaluar la capacidad de absorción para el ruido que tienen diferentes materiales.

- **Método de reverberación**

Se procedió a la construcción de una caja acústica que simula el método alternativo de *la sala de reverberación*, figura 2.15, según la Norma ISO 10140-2 para la determinación del coeficiente de absorción de distintos materiales, y determinar cuál es el más idóneo para el presente estudio.



Figura 2.15. Caja sonora para medir reverberación

Aunque se encuentra por debajo del volumen mínimo con respecto a las especificaciones de la normativa ISO 354:2003, se logra medir un tiempo de reverberación promedio dentro de las paredes de la caja, el procedimiento es dividir a la mitad el espacio mediante el material a probar y colocar una fuente de ruido en uno de los bordes de la caja, figura 2.14.

A su vez se coloca un sonómetro al extremo contrario, este es el encargado de la recopilación de la cantidad de ruido que atraviesa la pared del material sometido a estudio. A partir de la diferencia de los tiempos de reverberación obtenidos, se calcula un área de absorción acústica equivalente de la muestra de ensayo utilizando la *ecuación de Sabine*.



Figura 2.16. Material colocado para evaluar reverberación.

- **Descripción de las muestras**

Se escogieron a materiales tales como, papel corcho de 4mm de espesor, cartulina y cartón corrugado de calibres C-100 y C-120.

Tabla 2.4. *Propiedades de los materiales a evaluar.*

Nombre del material	Densidad [g/m ²]	Rigidez	Opacidad [%]	Superficie	Espesor[mm]
Cartulina	200	Alta	80 - 100	Liso	0.5
Cartón C-100	100	Alta	100	Corrugado	2.5
Cartón C-120	120	Alta	100	Corrugado	3.5
Lámina de corcho	140	Baja	100	Prensado	4

Las dimensiones de las muestras fueron adaptadas al interior de la caja siendo de 20 x 20 mm, y sus bordes fueron aislados con cinta adhesiva de malla para evitar fugas de ruido, con esto se logra dividir el espacio en dos partes iguales mediante una superficie plana continua, finalmente la prueba se realizó tan pronto como se completó la instalación de la muestra.

- **Descripción del entorno de prueba**

Acorde a las dimensiones de la caja se muestran en la figura 2.17, el espacio está diseñado para dar cabida a un parlante como fuente de ruido en uno de los extremos y al sonómetro Digitech QM1592 al extremo contrario.

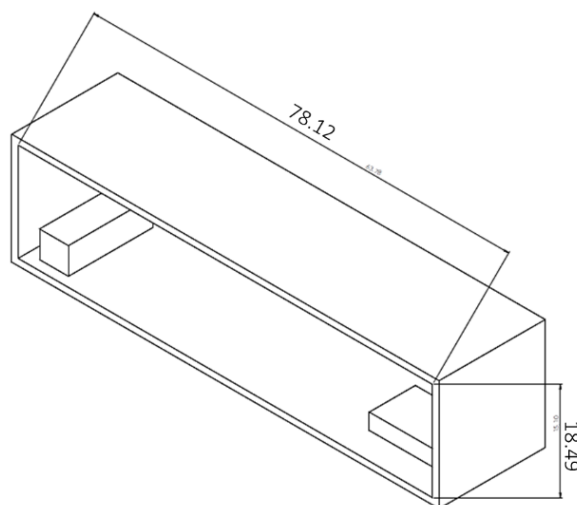


Figura 2.17. *Vista lateral del interior en la caja acústica*

La estructura del entorno del ensayo está distribuida de forma tal que las paredes interiores están hechas de fibra de madera comprimida, a excepción de la pared frontal, la cual está compuesta por un 80% de vidrio y 20% de madera comprimida, el cual permite visualizar la escala de decibeles en el sonómetro. Los bordes superiores de la tapa fueron recubiertos con cinta adhesiva de malla reduciendo así al mínimo cualquier disipación de ruido hacia el exterior de la caja y a su vez evita el ingreso de ruido externo que pueda alterar los resultados.

2.4.2. Análisis de tiempos de reverberación RT60 para selección del material

El método de la sala de reverberación descrito se refiere a la norma ISO 354:2003 se basa en la diferencia entre el nivel medio de presión sonora en el espacio fuente (L1) y el detectado en la sala de recepción (L2). La fuente acústica (el sonido que debe emitir la fuente de sonido es ruido rosa) ha sido ubicado al otro extremo del sonómetro en distintas circunstancias, sin material aislante de por medio y también con tres diferentes tipos de materiales. De este modo se mide un tiempo de reverberación promedio dentro de la caja acústica, figura 2.18.

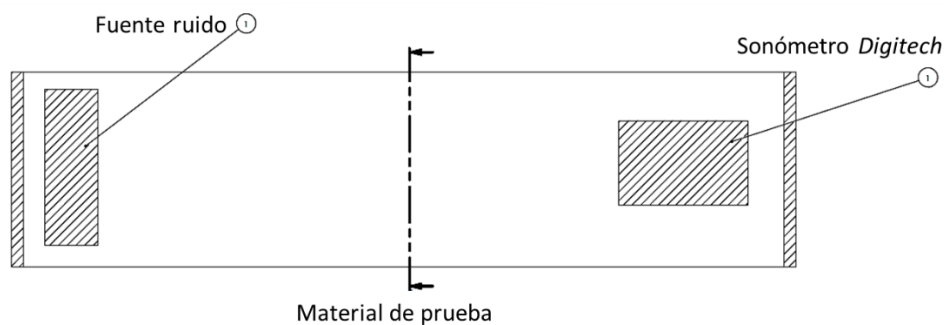


Figura 2.18. *Distribución de elementos dentro de la caja.*

Cabe recalcar que en la prueba RT60 se mide la capacidad de un material para absorber 60 decibeles de ruido en un tiempo determinado, un menor tiempo de reducción de ruido implica un mejor factor de absorción en el material.

Ya que el cero absoluto de ruido solo se logra en espacios controlados, para este estudio, se toma como referencia al 36 dB como el valor mínimo y 96 dB como el valor máximo, cumpliendo así con el parámetro de reducción en cada material.

Se han realizado cinco mediciones para cada combinación fuente-sonómetro, dando un total de cinco mediciones en la caja vacía y un total de 20 mediciones en la caja con muestras. El procedimiento es el siguiente:

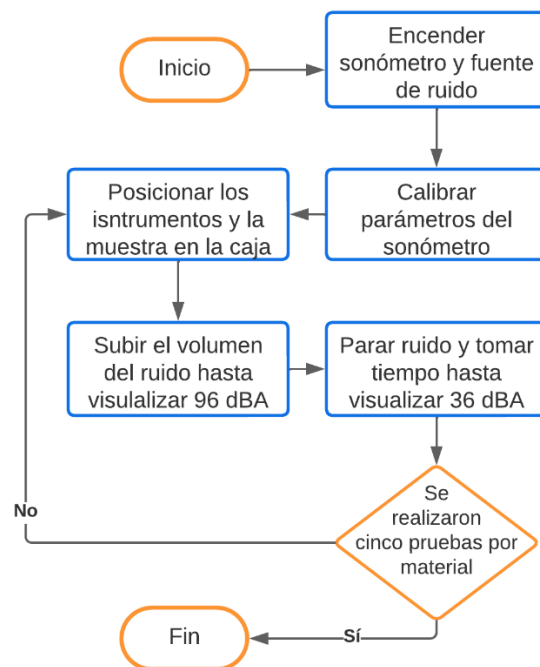


Figura 2.19. *Flujograma para evaluar materiales.*

Los tiempos de reverberación obtenidos nos brindan gráficas de tendencia a la reducción de ruido, de espacio vacío y con material de insonorización de por medio con diferentes materiales.

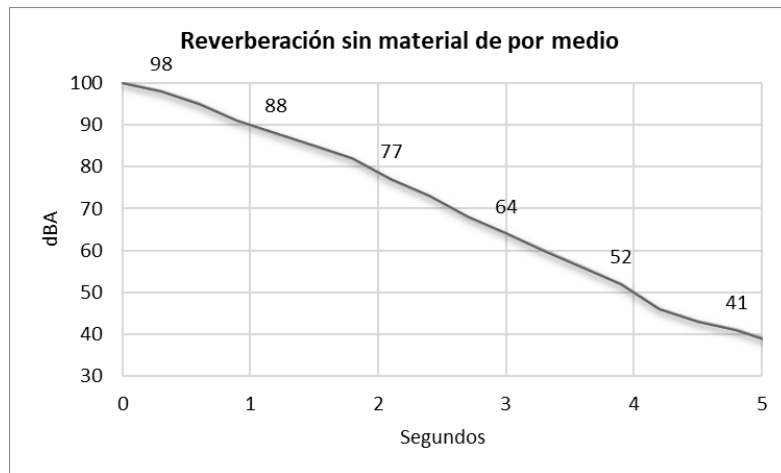


Figura 2.20. Tendencia de absorción de ruido dentro la caja.

La figura 2.20 muestra la tendencia de reducción de ruido dentro de la caja al no tener ningún material que separe a la fuente de ruido y al micrófono del sonómetro. El tiempo de reverberación para reducir de 96 a 36 dB alcanza los 5.34 segundos, valor promedio obtenido de cinco diferentes pruebas.

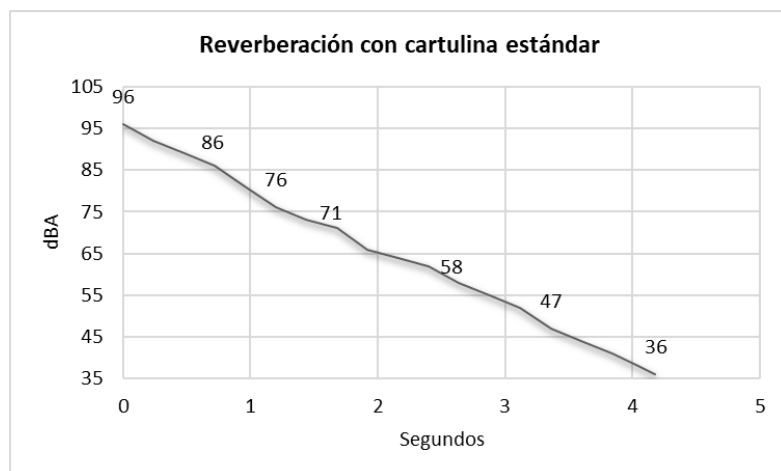


Figura 2.21. Reverberación usando lámina de cartulina.

La diferencia entre las curvas de las gráficas usando una lámina de material insonoro de por medio en la caja es evidente, reduciendo el valor promedio de absorción de ruido hasta 4.18 segundos si se aplica cartulina en el centro de la caja. Se consideró que, a pesar de su bajo peso el material no sería apto para estar durante mucho tiempo bajo la alfombra del piso del

habitáculo, pero sus cualidades para aislar el ruido se pueden usar para puertas donde el espacio es reducido y se necesitan dobleces más pequeños y a su vez menos comprimidos.



Figura 2.22. Reverberación aplicando corcho de 3mm.

La capacidad de absorber sonido de la lámina de corcho es indudable, como lo muestra la figura 2.22. Sus 3 mm de diferentes capas de corcho prensado y sus miles de porosidades le dan esta ventaja, pero su estructura no le permite realizar dobleces y evita totalmente la capacidad de memoria para desarrollar pliegues de origami o teselado, siendo una muestra de material para insonorización, pero deficiente para la aplicación de plegados en el interior del habitáculo.

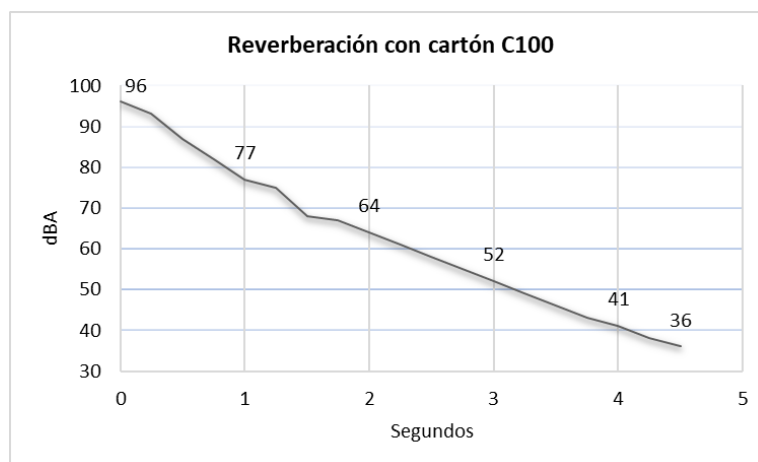


Figura 2.23. Reverberación aplicando cartón corrugado C100.

Mientras que el cartón C100 presenta un promedio de atenuación del ruido de 4.4 segundos como se muestra en la figura 2.23, su consecuente calibre C120 tiene un mejor resultado atenuando los 60 dB en un promedio de 3.93 segundos (figura 2.24), esto debido a su mayor grosor y valor de masa por centímetro cuadrado.

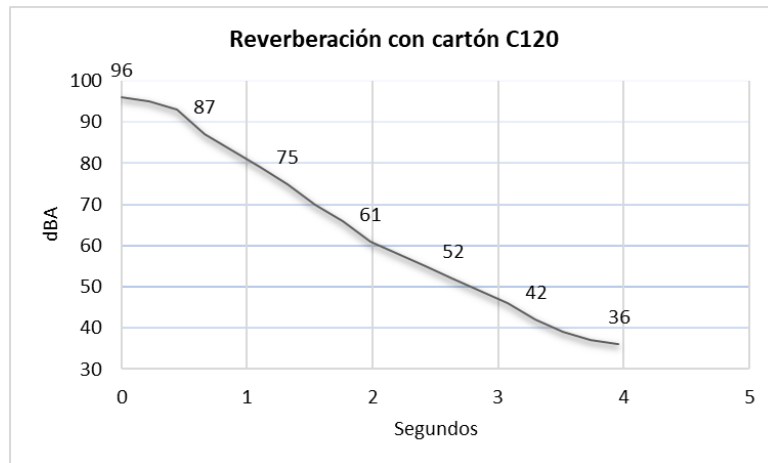


Figura 2.24. Reverberación con cartón C120.

Adicional a los valores de insonorización obtenidos de los cuatro materiales, se realizaron pruebas con dobleces para los mismos con el objetivo de observar cuál mantenía una mejor memoria al doblar, resultando en el más idóneo para la insonorización el cartón C120. La selección se realizó en base al siguiente diagrama de flujo:

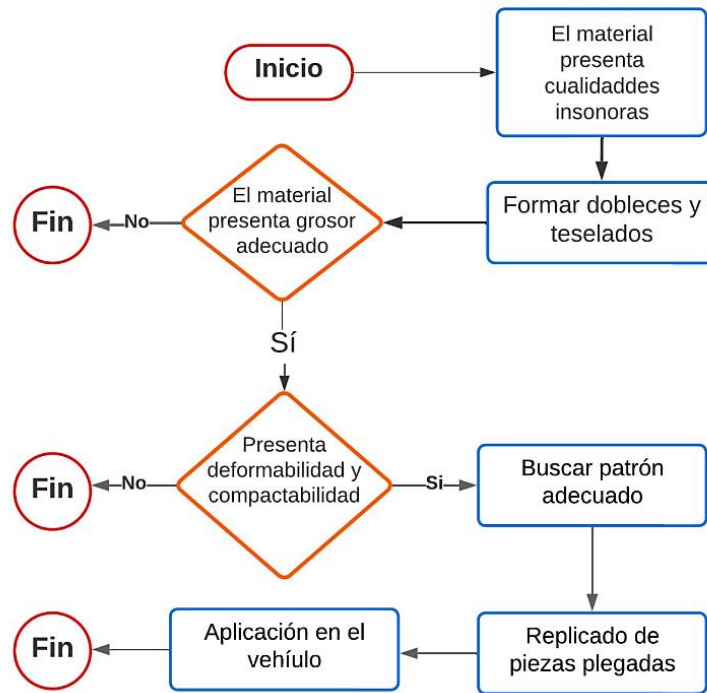


Figura 2.25. *Flujograma para selección de material.*

Finalmente, se realizaron dos pruebas adicionales utilizando los patrones de dobles y materiales escogidos; cartón C120 teselado y cartulina común con doblado espina de pez, esto con el objetivo de comparar la incidencia de una lámina plegada con relación a una lámina sin plegar, obteniendo tiempos de reverberación más cortos, 2.24 segundos para el cartón C120 y 2.47 para la cartulina normal.

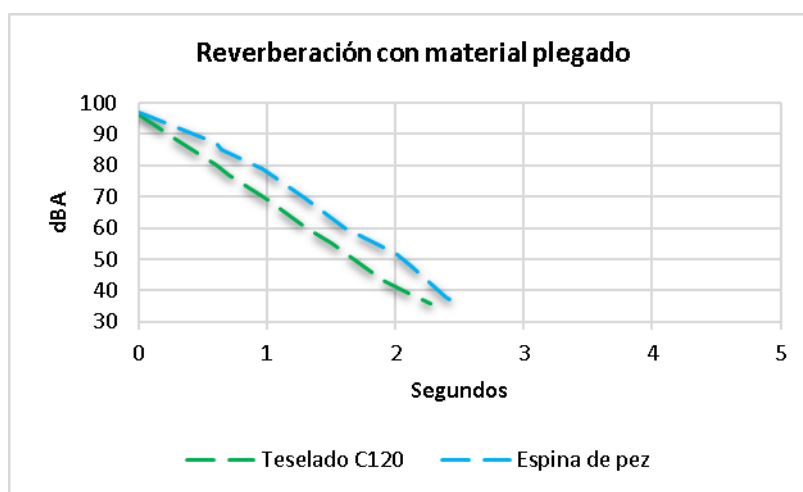


Figura 2.26. *Prueba RT60 con material plegado.*

2.4.3. Determinación del índice de transmisión del sonido

La presente sección de capítulo sustenta de forma matemática la correcta selección del material a usar en la insonorización del habitáculo, esto mediante la aplicación del procedimiento de la Norma ISO 354:2003 para determinación de factor de absorción de ruido de un material.

A partir de la diferencia de los tiempos de reverberación obtenidos en la sección anterior, se calcula un área de absorción acústica A equivalente de la muestra de ensayo utilizando la *ecuación de Sabine* dividiendo la caja acústica en dos cámaras con las mismas dimensiones, la cámara vacía A_1 y para la cámara al otro lado de la muestra A_2 .

$$A_1 = \frac{55.3 V}{cT_1} - 4 Vm_1 \quad (3)$$

$$A_2 = \frac{55.3 V}{cT_2} - 4 Vm_2 \quad (4)$$

Donde:

V representa el volumen de la caja acústica vacía.

c es la velocidad de propagación del sonido en metros por segundo.

T es el tiempo de reverberación en la caja acústica vacía.

m es el coeficiente de atenuación sonora en metros recíprocos calculado de acuerdo con la norma ISO 9613-1 empleando las condiciones climáticas de la caja acústica durante la medición.

Nota: Para temperaturas de 15°C a 30°C, se calcula c con la fórmula:

$$c = \left(331 + \frac{0.6t}{^\circ\text{C}} \right) \quad (5)$$

Donde t es la temperatura del aire en °C durante la realización de la prueba.

El área de absorción equivalente de la muestra, A_T de la caja se calcula usando la fórmula:

$$A_T = A_2 - A_1 = 55.3V\left(\frac{1}{c_2T_2} - \frac{1}{c_1T_1}\right) - 4V(m_2 - m_1) \quad (6)$$

A partir de entonces, el coeficiente de absorción de sonido de la muestra a_s se obtiene dividiendo el área de absorción de sonido equivalente por el área de absorción S del espécimen de prueba colocado dentro de la caja:

$$a_s = \frac{A_T}{S} \quad (7)$$

Donde:

S : Área de la muestra en m^2

La tabla 2.5 muestra los valores ambientales utilizados para el cálculo que permite determinar el coeficiente de absorción de sonido de cada muestra.

Tabla 2.5. *Constantes de longitud, y condiciones climáticas utilizadas.*

Condiciones	Sala de reverberación
Temperatura	18°C
Volumen	0.027 m ³
Velocidad sonido C1=C2	341,8 m/s
Atenuación sonora m1=m2	
Área de la muestra	0.034 m ²

Se generó una hoja de cálculo Excel para facilitar las ecuaciones matemáticas, esto también nos permite presentar una tabla de datos con los resultantes del coeficiente a_s de cada material puesto a prueba, como se detalla en la tabla 2.6

Tabla 2.6. Resultados de la cámara de reverberación.

Resultados de la cámara de reverberación para cada material						
Cámara vacía	Cartulina estándar	Corcho	Cartón C100	Cartón C120	Cartón C120 (Teselado)	Cartulina Espina de pez
4,93	4,25	3,61	4,23	3,58	2,15	2.47
5,3	4,4	3,7	4,56	3,94	2,60	2.60
4,84	4,1	3,18	4,22	3,5	2,38	2.31
4,45	4,05	3,57	4,71	4,1	2,49	2.43
4,35	4,1	3,66	4,09	3,9	2,18	2.54
Tiempo promedio de reverberación en segundos						
4,774	4,18	3,544	4,362	3,804	2,276	2.43
Área de absorción equivalente de la muestra A_T [m²]						
0,00	0,0126	0,0309	0,008	0,023	0.024	0.017
Coefficiente de absorción de sonido de la muestra α_s						
0,00	0,36	0,89	0,24	0,65	0.71	0.49

2.4.4. Procedimiento del dobléz utilizando teselados de origami

En esta sección se describe a detalle el procedimiento paso a paso para realizar el dobléz utilizando la técnica de origami y teselado.

- **Preparación del material**

Cortar el material en forma cuadrangular de dimensiones específicas (75x75cm), que se adapten a la zona de insonorización del habitáculo del vehículo. Marcar líneas de referencia en el material para guiar los plegados.

- ***Instrucciones de plegado cartón C120***

El procedimiento inicial consiste en realizar un pliegue longitudinal en el material, asegurando una alineación precisa de los bordes y obteniendo un pliegue bien definido. Este pliegue divide la superficie del papel en dos partes iguales.

Luego de desdoblar el material, se procede a doblar los bordes hacia la línea central marcada previamente, abriendo pliegues en ambos lados. Este proceso se repite dos veces más, creando un total de ocho partes iguales.

Luego se realiza el mismo proceso de plegado perpendicular a las líneas guía originales. Esto implica doblar el papel en forma transversal, creando pliegues adicionales en cada una de las secciones divididas. Este proceso se repite en cada una de las partes, generando subdivisiones más pequeñas. Al final se obtiene una superficie del papel que se divide en un total de 64 pequeños cuadrados.

A continuación, se procedió a doblar las esquinas inferiores del papel hacia el centro. Este paso implica tomar cada una de las esquinas inferiores y doblarlas hacia el punto central del papel, asegurándose de que los bordes se alineen correctamente. Completar este proceso en ambas esquinas inferiores da como resultado la forma de un triángulo invertido.

A continuación, se repite el mismo procedimiento en el lado opuesto del material y de manera perpendicular. Se toman las esquinas superiores y se doblan hacia el centro, formando triángulos invertidos en esa sección del papel. Este proceso se repite en cada una de las esquinas superiores hasta cubrir toda la superficie del material, creando un patrón simétrico en el papel.

Finalmente, se continuó plegando y plisando el material hasta alcanzar el diseño deseado.

- *Instrucciones para el pliegue final.*

Asegurarse de seguir las instrucciones de plegado con precisión manteniendo los pliegues alineados y los ángulos correctos para obtener la forma deseada.

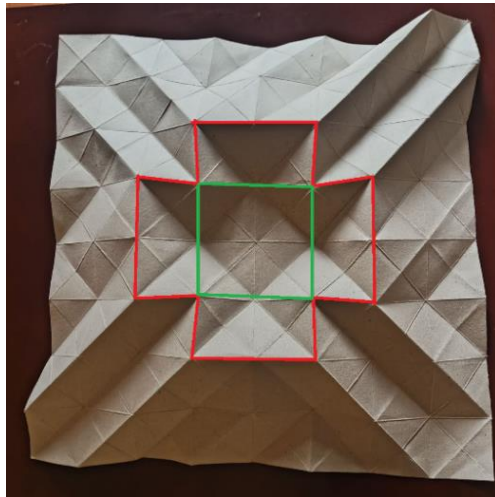


Figura 2.27. Líneas guías para iniciar el Tselado.

Es importante tener en cuenta que la complejidad del Tselado puede variar en función de la claridad de las líneas guía antes mencionadas.



Figura 2.28. Parte anterior y posterior del Tselado.

Al replicar y reproducir múltiples piezas, es importante tener en cuenta que el proceso se vuelve más fácil a medida que se repite el patrón. Es fundamental realizar este procedimiento sobre una mesa de trabajo limpia y ordenada, lo que facilitará la precisión y eficiencia en cada etapa, además de los factores cognitivos, como mantenerse concentrado durante todo el proceso y

prestar atención a la ubicación de los espacios y vértices en el papel. Estos detalles juegan un papel crucial en el logro de resultados consistentes y de alta calidad en la replicación de piezas de vehículos.



Figura 2.29. Parte anterior y posterior del Teselado – Etapa final.

- ***Instrucciones de plegado cartulina negra.***

La teselación con el patrón espina de pez consistente en celdas unidad idénticas de pliegues convexos de montaña y pliegues cóncavos de valle con cuatro crestas coordinadas. En lugar de ser estructuras sometidas a esfuerzo y torsión, esta estructura de origami es capaz de realizar movimientos de plegado y desplegado, lo cual aumenta su capacidad de adaptabilidad a superficies irregulares.

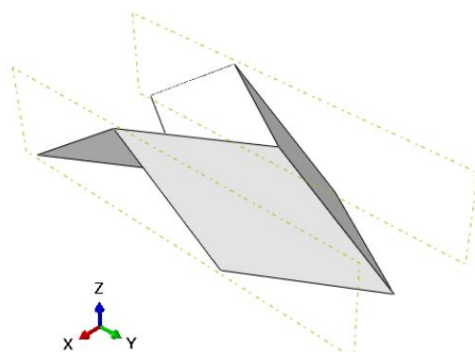


Figura 2.30. Teselado espina de pez.
Fuente: (Muñoz Javier, 2021).

Tal como menciona Javier Caravaca Muñoz (2019), los vértices están formados por la intersección de cuatro pliegues, donde los cuatro vértices adyacentes unen paralelogramos compatibles. Estos paralelogramos son dispuestos con forma de simetría inversa.



Figura 2.31. *Origami - espina de pez.*

- ***Ensamblaje de las estructuras plegadas***

Una vez que todas las secciones del material se han plegado según el diseño, ensamblar las diferentes partes para formar la estructura final de insonorización utilizando las líneas guías para obtener las siguientes formas:

2.4.5. Aplicación de insonorización – Piso de habitáculo

Para la aplicación de la insonorización se hace necesaria la planificación mediante un diagrama de flujo, como se muestra en la figura 2.32 misma que detalla el procedimiento que se llevó a cabo durante un periodo de tres días.

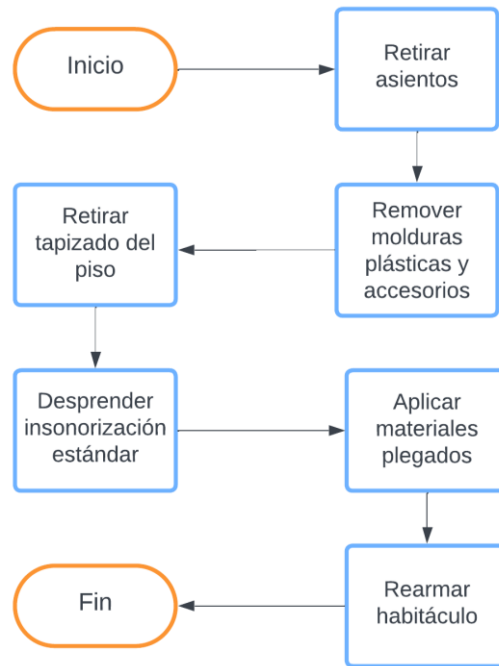


Figura 2.32. *Flujograma para insonorización del piso.*

Se procedió a insonorizar primero el piso del vehículo, la cual presentaba relieves y zonas consideradas críticas para el avance del proyecto, para esto, se localizó los puntos de sujeción, lo que permitió retirar los asientos delanteros y posterior de vehículo, las cuales sin mucha dificultad se realiza haciendo uso de llaves Torx. Se desataron los cinturones de seguridad logrando tener todo el espacio interno vacío para dimensionar el espacio a insonorizar como se muestra en la figura 2.33.



Figura 2.33. *Habitáculo sin asientos.*

Se retira el plástico de la consola de cambios el cual divide el espacio de los asientos delanteros del vehículo, este también brinda protección a elementos como el varillaje de la palanca de cambios, freno de mano y los sockets de accesorios eléctricos como el encendedor y sus luces, el procedimiento se realiza removiendo cuatro tornillos de los costados y desajustando que regula el freno de mano.

Una vez retirada la protección se retiran las bases del varillaje de cambios, el cual conecta la palanca de cambios en el interior del vehículo con la transmisión, están sujetas al piso del vehículo y se encuentra sobrepuesto sobre la alfombra y se debe retirar para evitar cortar la alfombra al momento de extraerla.



Figura 2.34. *Desarmado varillaje de cambios.*

Se desarman los burletes o empaques que bordean las puertas, los cuales evitan el ingreso de polvo y agua hacia el habitáculo, también aseguran algunos de los plásticos que recubren parantes laterales y umbrales de puerta, también se retiran las molduras protectoras del marco inferior de puerta que comprimen a la alfombra contra el piso del vehículo, el procedimiento se realiza con una palanca de dos puntas que evita romper los seguros plásticos, se destaca que las molduras de marco no tienen sujeción mediante tornillos o tuercas metálicas.

Habiendo retirado los plásticos de los laterales se retiraron los seguros restantes que sujetan solo la alfombra contra el piso y finalmente se retiró toda la alfombra del habitáculo, esta no está pegada y contiene debajo las esponjas de insonorización estándar.



Figura 2.35. *Piso del vehículo sin alfombra.*

El resultado es el piso del habitáculo descubierto como se muestra en la figura 2.35, solo el piso frontal evidencia un material absorbente adicional que retiene vapores y humedades provenientes desde el motor, el resto del espacio deja a la vista los paneles de metal que conforman la estructura inferior del habitáculo.



Figura 2.36. *Vista inferior de alfombra estándar.*

Para el siguiente paso del proceso se requiere que el espacio del piso disponible esté limpio, al ser la primera vez que se retira toda la alfombra existe mucho polvo, residuos plásticos y granos

de arena aferrados en cavidades lejos del alcance de las aspiradoras que se usan para limpiar el vehículo. Se cepilla y aspira la parte superior de la alfombra y la capa de fieltro aislante anti-ruido son retiradas haciendo uso de espátulas. La figura 2.37 evidencia el butilo usado para adherir el fieltro a la alfombra, además de que el mismo no cubre toda el área de l piso, tan solo espacios planos como el piso delantero y anterior, los puntos críticos como perfiles y bordes de elementos de sujeción no son cubiertos por este material.



Figura 2.37. *Desprendimiento de insonorización estándar.*

Nota: Las esponjas de fieltro están hechas de materiales fibrosos como la lana, poliéster, polipropileno entrelazados y comprimidos formando una estructura porosa que proporciona propiedades de absorción acústica.

Posteriormente, las láminas de teselado fueron distribuidas en el piso tratando de cubrir la mayor extensión posible, se inicia por la base donde va sujeto el varillaje de la palanca de cambios, para ello se midió y se realizaron agujeros para que los tornillos de sujeción atravesen las láminas de plegado.



Figura 2.38. *Aplicación de láminas plegadas.*

Los pliegos para el piso anterior y posterior se acoplaron haciendo uso de los dobleces centrales de cada pieza lo que permitió una sujeción adecuada sin hacer uso de pegamentos o sujeciones adicionales. Se adicionó varios pliegos en áreas donde no se contaba con fieltro como debajo del asiento trasero y paredes delanteras que recubren los paneles metálicos del tanque de combustible.



Figura 2.39. *Aplicación de láminas al piso posterior.*

El resultado fue un recubrimiento del 90% del piso del habitáculo mediante cartón corrugado plegado, algunas de las zonas como perfiles necesitaron de recortar las piezas de teselado para ser adheridas por partes y así cubrir la mayor área posible.

Finalmente, se colocó la alfombra original sobre el piso ahora insonorizado, se acopló el varillaje de la palanca de cambios, se aseguraron los sockets del encendedor y luces, se acopló la consola de protección en la palanca de cambios, se colocaron tornillos y seguros plásticos de la alfombra, las molduras laterales del marco y empaques de puerta se colocaron de forma tal que el piso del vehículo no se vea afectado por la capa de insonorización interna aplicada.



Figura 2.40. *Piso antes y después de la aplicación.*

La figura 2.40 muestra la diferencia entre la superficie del habitáculo estándar previa a la aplicación del proyecto y el ahora piso con una insonorización de material plegado. El resto de accesorios como asientos, cinturones de seguridad y regulación de freno de mano se instalaron sin mayor inconveniente y sin reflejar cambios en la distribución de la cabina.

2.4.6. Aplicación de la insonorización – Puertas

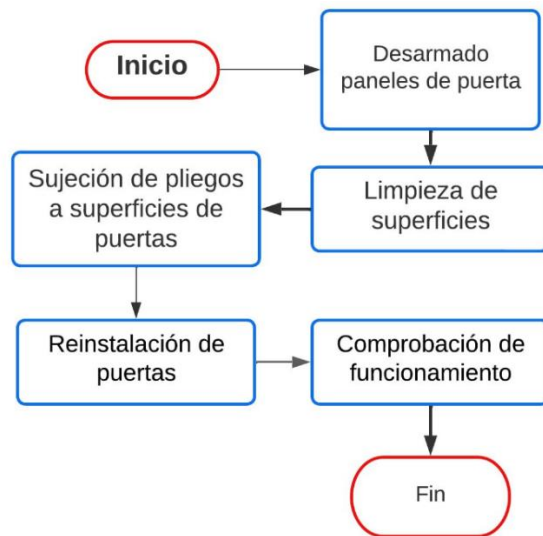


Figura 2.41. Flujograma para insonorización en puertas.

Para las puertas se hizo uso del plegado *espina de pez* en cartulina, esto permite optimizar el espacio dentro de la estructura de cada una de las puertas, se utiliza el mismo doblado a dos diferentes tamaños, un doblado más detallado para las puertas delanteras y uno más amplio para las puertas traseras.



Figura 2.42. Vista de puertas delantera y posterior.

Para este procedimiento se siguieron los pasos detallados en el diagrama de flujo de la figura 2.41, el primer paso, el desarmado no resultó complejo ya que los forros de las puertas solo están sujetos mediante tornillos con cabeza de estrella y un pasador de alambre en cada elevación manual.

Ya teniendo los forros de puerta o paneles de puerta se procedió a limpiar las superficies del lado plástico, así como también de la estructura metálica, esta no cuenta con una insonorización como en el caso del piso, si no que solo cuenta con un plástico que hace el papel de aislante entre la estructura metálica de la puerta y el panel de plástico que da al habitáculo.



Figura 2.43. *Desarmado de paneles de puerta.*

Cada uno de los paneles plásticos que se extrajeron fueron recubiertos en su interior mediante la adhesión del material plegado, la cartulina se sujetó con cinta doble faz en la mayoría de las zonas críticas como perfiles, esquinas, espacios para parlantes y manijas. Los bordes de cada pieza se encajaron en base al doblado realizado obteniendo los plásticos de puerta con material de insonorización presentados en la figura 2.44.



Figura 2.44. *Aplicación de material plegado a las puertas.*

Finalmente, los paneles son rearmados en sus respectivas estructuras, se aseguran los rascaaguas, manijas, tornillos y pasadores, se comprueba que no exista un descuadre al cerrar las puertas por el material agregado, que los seguros y elevallunas funcionen y se da por terminado el proceso de insonorización del vehículo.



Figura 2.45. Reinstalación de paneles de puertas.

2.4.7. Mediciones de peso después de la insonorización

Posterior a la insonorización del habitáculo, se verifico la incidencia de peso que las piezas de origami tienen sobre el vehículo, para esto, el Corsa Evolution se sometió al mismo proceso de pesaje que se le realizo previo a la aplicación de material plegado. Se hizo uso del equipo INTERCOMP SW500 E-Z WEIGH ESCALE SYSTEM de los talleres de la universidad técnica del norte, obteniendo como resultado los valores mostrados en la figura 2.46.

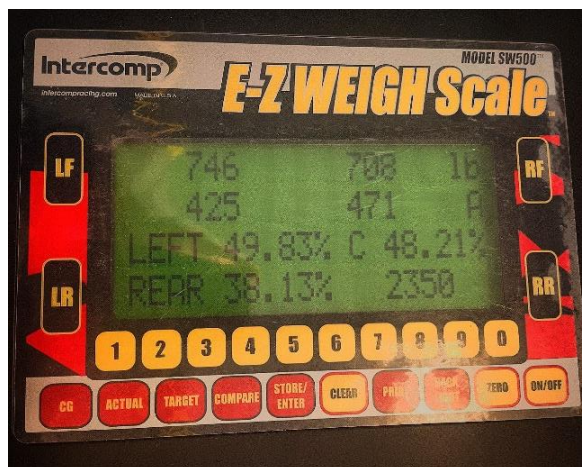


Figura 2.46. Peso posterior a la insonorización.

CAPÍTULO III

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Comportamiento de ruido en carretera

Para la presentación de resultados se realizaron pruebas de ruta utilizando el sonómetro Digitech QM1592, tal y como se realizó para evaluar el estado de insonorización en el vehículo previo a la aplicación del presente proyecto, así como el pesaje del vehículo.

El Corsa Evolution 1.8 se condujo en la vía antigua empedrada hacia el cantón Urcuquí, el cual está ubicado junto a los rieles del lado occidente de la ciudad de Ibarra. La figura 3.1 diferencia los valores de ruido en escala dBA promedio obtenidos en cinco pruebas realizadas, antes y después de la aplicación del presente proyecto. El rango de velocidad utilizado fue de 0 a 30 km/h.

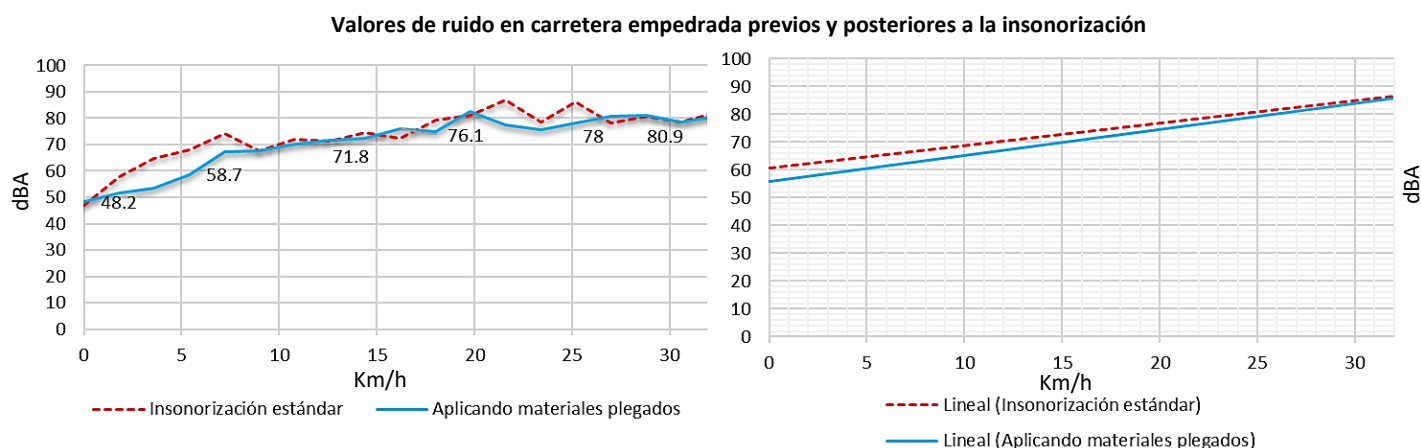


Figura 3.1. Resultados: Variación y tendencia de ruido en carretera empedrada.

Las curvas representadas demuestran el porcentaje de efectividad que ha tenido la modificación en la insonorización aplicada en el Chevrolet Corsa Evolution 1.8, por lo tanto, los materiales de insonorización plegados lograron una reducción del ruido del 3.85% en comparación con el insonorizado estándar en condiciones de empedrados.

El porcentaje de insonorización favorable o negativo se determinó mediante el cálculo de la media, proceso estadístico que obtiene el promedio de los valores de una gráfica. En este caso, el promedio de los valores de ruido en carretera empedrada antes de la insonorización fue de 73.73 dBA, y después de insonorizar fue de 70.89 dBA, a continuación, se usó la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Reducción de ruido} = \left(\frac{\text{Promedio antes de insonorizar} - \text{Promedio despues de insonorizar}}{\text{Promedio antes de insonorizar}} \right) \times 100\% \quad (8)$$

$$\% \text{ Reducción de ruido} = \left(\frac{73.73 - 70.89}{73.73} \right) \times 100\%$$

$$\% \text{ Reducción de ruido} = \left(\frac{2.84}{73.73} \right) \times 100\%$$

$$\% \text{ Reducción de ruido} = 3.85 \%$$

Este proceso se repite para cada una de las pruebas realizadas y también nos brinda un valor general de insonorización. Se ha determinado que la aplicación de materiales plegados en el piso y puertas del habitáculo insonoriza entre 2 y 8 dBA para cualquiera de las condiciones analizadas (empedrados, adoquinados y asfaltados), esto significa un 5.77 % de mayor efectividad con relación a las esponjas de fieltro de nuestro vehículo tipo M con insonorización estándar.

Los resultados se graficaron en diferentes situaciones adicionales haciendo uso de tabulaciones en Excel, la figura 3.2 muestra las diferencias resultantes de las pruebas de ruta sobre una carretera adoquinada, mismas que se realizaron sobre la Avenida Camilo Ponce Enríquez que bordea el parque Ciudad Blanca. El rango de velocidad a la que se condujo fue de 10 hasta 40 km/h.

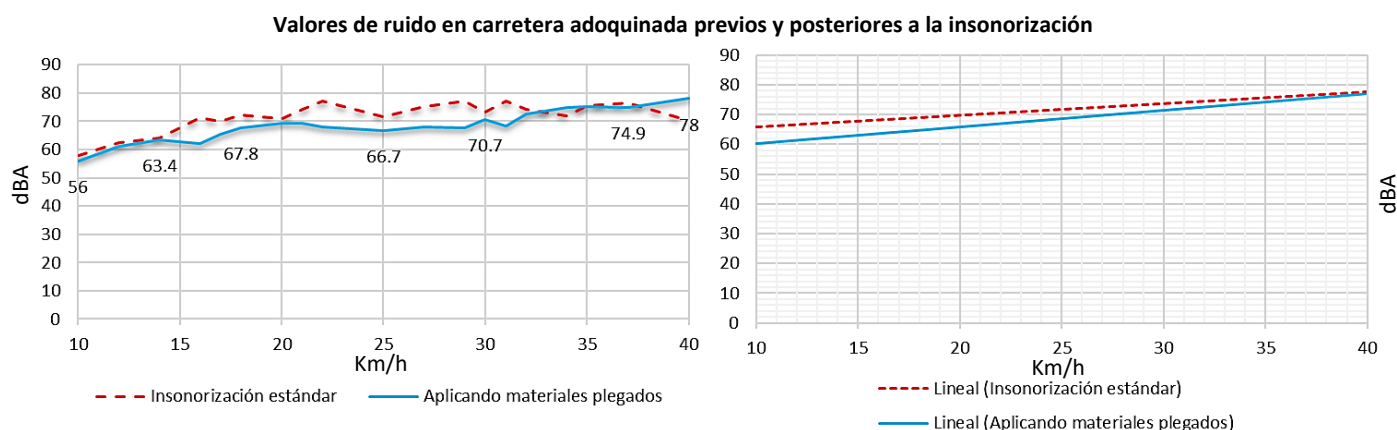


Figura 3.2. Resultados: Variación y tendencia de ruido en carretera adoquinada.

Al igual que en las pruebas iniciales de ruido percibido en el habitáculo previo a la insonorización, las gráficas muestran una tendencia coherente de valores, a mayor contacto con desniveles, ruido de otros peatones y conductores, mayor será el ruido que se llega a sentir en el interior del vehículo, esto se evidencia en gráficas de mayor oscilación como empedrados y adoquinados de las figuras 3.1 y 3.2. Las líneas de tendencia evidencian una reducción de 4.66% de ruido que se percibe en el interior de vehículo en condiciones de adoquinado.

La superficie de rodadura resulta una variable que no puedes controlar o repetir a precisión para diferentes pruebas, por esta razón, dividir los resultados en rangos de velocidad facilita la interpretación de datos, no así con las pruebas en autopista (carretera asfaltada), ya que el ruido de rodadura prevalece sobre el ruido del motor al llegar a altas velocidades. Haciendo alusión a esta propiedad, se realizaron las pruebas sobre asfalto a velocidad constante en rangos de tiempo iguales a 20 segundos, luego se determinaron promedios de los valores obtenidos en el sonómetro.

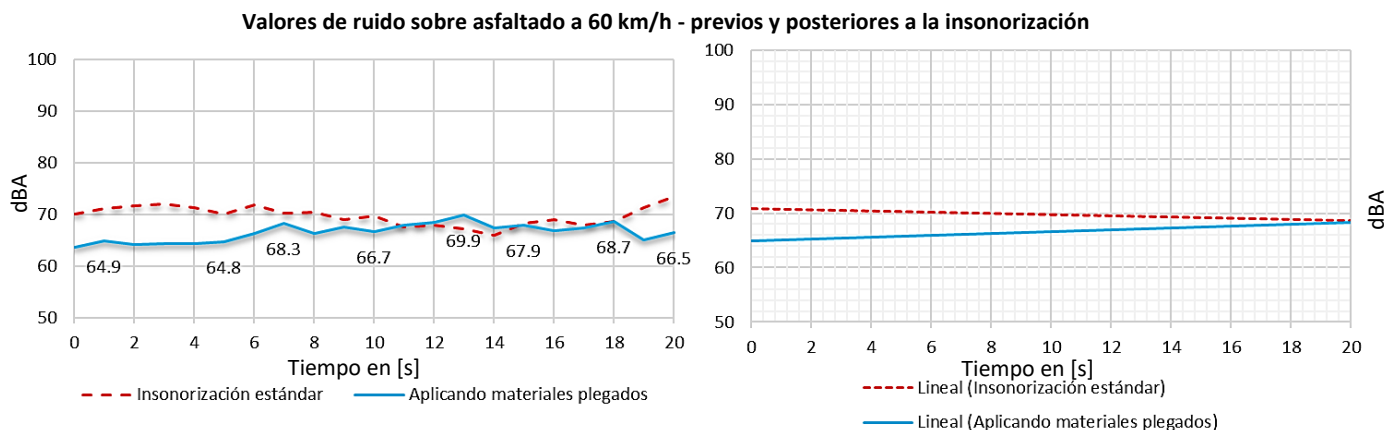


Figura 3.3. Resultado: Variación y tendencia de ruido sobre asfaltado a 60 km/h.

Cuando se trata de carretera asfaltada se denota un comportamiento más estable de las curvas de ruido, mucho se debe a que las fuentes aerodinámicas resultan más estables y relativamente constantes a partir de 60 km/h, a esto se suma un comportamiento similar con el ruido provocado por el contacto de las ruedas y el piso. La figura 3.3 muestra un 4.14% a favor en la absorción de ruido de los materiales plegados en carretera asfaltada.

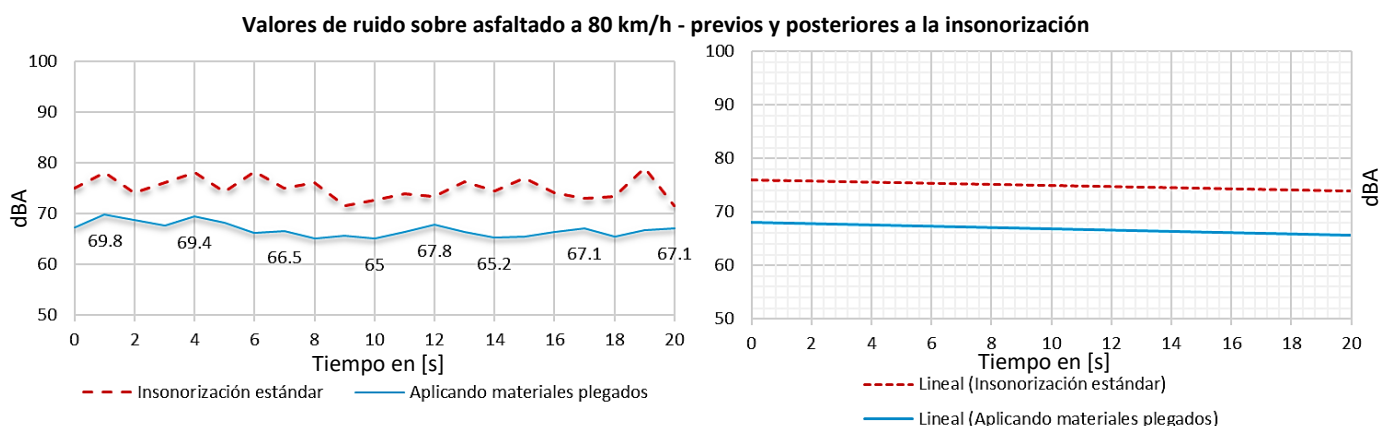


Figura 3.4. Resultados: Variación y tendencia de ruido sobre asfaltado a 80 km/h.

Las oscilaciones de ruido en el habitáculo se vuelven más estables en carreteras asfaltadas, donde las condiciones de ruido de otros vehículos resultan menos incidentes, incluso las pendientes de tendencia resultan más evidentes conllevando a una proporcionalidad.

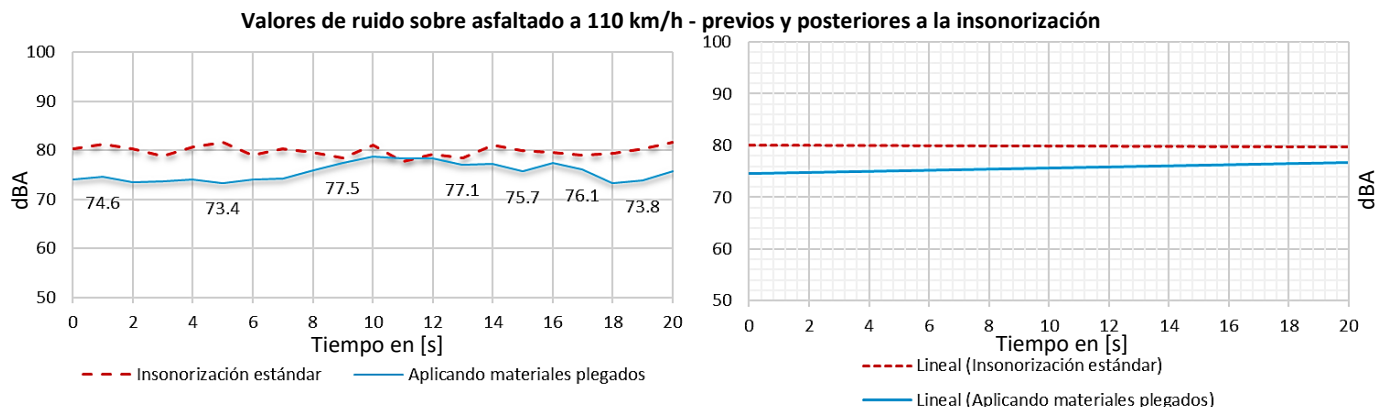


Figura 3.5. Resultados: Variación y tendencia de ruido sobre asfaltado a 110 km/h.

A mayor velocidad, mayor será la sensación de reducción de ruido del habitáculo con materiales plegados en relación con el nivel de ruido que se sentía con el sistema estándar, esta afirmación se puede constatar en la gráfica de sensación de ruido percibido por el ocupante.

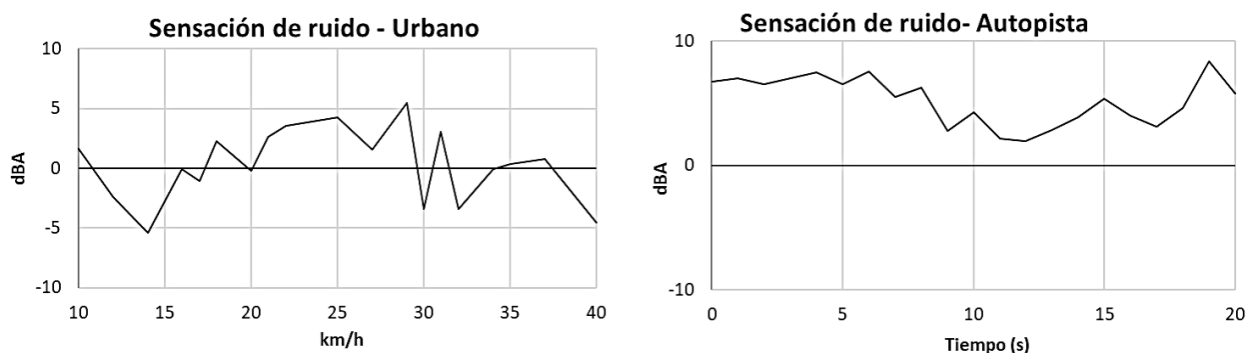


Figura 3.6. Sensación de mejora en la cabina.

En la figura 3.6 se representan las pequeñas variaciones de ruido que ingresan al habitáculo respecto a su estado previo a la aplicación del proyecto. En este caso, los valores positivos o negativos en el eje Y representan una mejora o disminución en el confort acústico de los ocupantes. Los picos negativos de la sensación en áreas urbanas están dados por imperfecciones en la calzada que generan más ruidos en la suspensión del vehículo, así también, a bajas velocidades los ruidos de otros automotores se filtran con mayor incidencia, como camiones con bocinas fuertes, motocicletas o el ruido de buses al pasar muy cerca del vehículo insonorizado.

La mejora que se ha producido con la capa de materiales plegados se evidencia al conducir sobre carreteras asfaltadas, donde el ruido de rodadura y aerodinámica son constantes siendo la principal molestia para el ocupante. Los picos producidos también corresponden a ruidos producidos por otros vehículos, pero estos ya no prevalecen como en el caso de la conducción en zonas urbanas y, por el contrario, se disipan al mezclarse con los ruidos aerodinámicos.

3.2. Área de absorción acústica del plegado

Parte de la reducción significativa de ruido permisible es gracias al patrón de teselado y origamis escogidos para la presente insonorización. En base a la tabla 7 de los resultados de la cámara de reverberación se puede afirmar que, la cantidad de ruido absorbido por un material está directamente relacionado con su área de absorción acústica.

El novedoso plegado demostró tener una mayor capacidad de absorción acústica en comparación con una hoja plana convencional. El análisis también reveló que, mediante el diseño de pliegues en cartón corrugado C120, se logró transformar una superficie de absorción acústica inicial de 0.58m^2 , en una superficie efectiva de 0.14m^2 una vez que el material fue plegado.

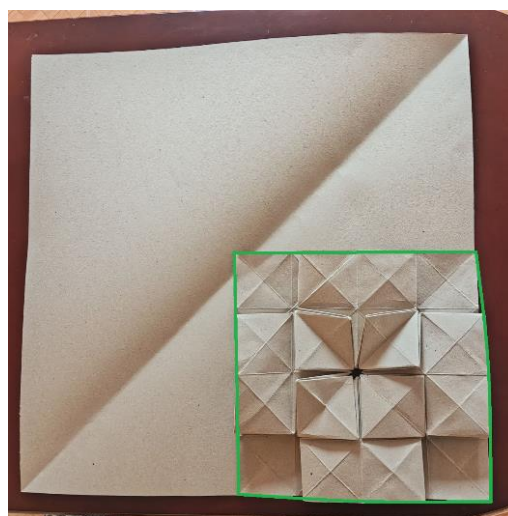


Figura 3.7. *Relación de áreas entre teselado y hoja plana.*

De esta manera el tamaño de cada una de las piezas de doblez está dada por una relación de reducción 4:1, como se muestra en la figura 3.7.

3.3. Impacto de la insonorización en el peso del vehículo

A continuación, se presenta una comparación entre los valores reflejados por el sistema de pesaje INTERCOMP SW500 E-Z WEIGH ESCALE SYSTEM antes y después de la insonorización.

Tabla 3.8. *Peso previo y posterior a la insonorización.*

Rueda	Peso previo a insonorización [kg]	Peso posterior a insonorización [kg]
LF	343.82	338.38
RF	313.89	321.14
LR	180.98	192.78
RR	224.53	213.64
Peso total	1063.22	1065.94
Distribución de peso actual		
Izquierda		49.83%
Derecha		48.21%
Aumento de peso [kg]	2.72	0.26%

Tras la aplicación de materiales de insonorización, el vehículo experimentó un mínimo aumento de peso, alcanzando tan solo 2,72 kg. Esto corresponde a un 0,26% del peso inicial del vehículo. El aumento de peso se puede atribuir a la naturaleza ligera y eficiente de los materiales de insonorización utilizados en el proyecto. A pesar de la adición de estos materiales, el peso total del vehículo no se vio afectado en gran medida, lo que lo convierte en una solución ideal para mantener rendimiento y eficiencia de combustible óptimos.

Al realizar una estimación de consumo de combustible del Corsa Evolution 1.8, tomando en cuenta parámetros de diseño se obtiene un valor inicial de 5.66 L/100 km. Finalmente, si se adiciona el peso de 2.72 kg del material aplicado, se genera un aumento de 0.01 L. Aunque

esta variación supone un aumento del consumo, se considera insignificante y se mantiene en un rango que no afecta el gasto de combustible. Los valores usados para este análisis se adjuntan en el anexo

El impacto en el peso refuerza aún más la idoneidad y eficacia del enfoque de insonorización elegido para lograr reducir los niveles de ruido, sin comprometer el rendimiento del vehículo.

3.4. Discusión de resultados con estudios anteriores

El valor considerado "bueno" para el coeficiente de insonorización de un vehículo puede variar según los estándares y las especificaciones de cada fabricante o regulación. Sin embargo, en general, para un vehículo actual, se considera que un coeficiente de insonorización efectivo alrededor de 0.5 o más es razonablemente bueno.

Existen pocas investigaciones acerca de nuevos materiales de insonorización aplicados al área automotriz, Rämmal & Lavrentjev, (2020) presenta un nuevo material fonoabsorbente, respetuoso con el medio ambiente y diseñado para aplicaciones de aislamiento y absorción de ruido de vehículos, así también, Chioccarello, (2016) realiza un informe de pruebas para nuevos materiales fibrosos con una sala de reverberación, en ambos casos, sus valores de insonorización se encuentran entre 2 y 12 dBA de disminución de ruido, inclusive, su índice de transmisión de sonido determinadas experimentalmente es de 4% y 6% respectivamente, valores muy cercanos a los obtenidos en la aplicación de insonorización con materiales plegados de este estudio. Sin embargo, cada estudio se ha enfocado en distintas aplicaciones vehiculares, tales como, insonorización para cascos de motocicleta, confort de los ocupantes e insonorización de habitáculos.

3.5. Limitaciones de estudio

Al tratarse de una metodología nueva de insonorización, se presentaron condiciones que ralentizaron la aplicación de estudio, inicialmente, los parámetros para la aplicación de cámara

de reverberación detallados en la normativa ISO 354:2003, están por encima de las estructuras disponibles a nivel local, lo que permite pequeñas variaciones en los resultados.

Por otro lado, para el replicado de piezas de teselado y origami, es necesaria la manualidad humana al no contar con una automatización para este tipo de procesos, toma tiempo y afecta a la uniformidad de material a aplicar.

Finalmente, el cartón corrugado C120 no cuenta con una mayor protección para condiciones húmedas, una filtración de líquidos al interior del habitáculo o fuga de fluidos del radiador de aire acondicionado podría poner en riesgo la integridad de los plegados que se encuentran bajo la alfombra del habitáculo.

CAPÍTULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- El presente estudio logró con éxito el objetivo de insonorizar el interior de un vehículo tipo M en la ciudad de Ibarra, provincia de Imbabura, mediante la aplicación de materiales plegados, los cuales demostraron ser un método efectivo para reducir los niveles de ruido dentro de la cabina del vehículo. Así también, por medio de diferentes pruebas y análisis, se observó una reducción significativa del ruido, con una disminución promedio de 2 a 8 dBA en diferentes condiciones de manejo, lo que indica una mejora de 5. 87% de comodidad auditiva de la cabina.
- Se realizó un proceso de selección de material muy cuidadoso al aplicar la prueba RT60 mediante la caja acústica, los resultados de los ensayos demostraron que el cartón corrugado C120 y cartulina común tiene un coeficiente de absorción de sonido de 0.65 y 0.36 respectivamente, razón por la cual ambos materiales se utilizaron en la insonorización de piso y puertas del habitáculo.
- Se determinó mediante la prueba RT60 que al usar un patrón de doblado el cartón corrugado aumenta su coeficiente de absorción de sonido en un 36%, y en el caso de cartulina plegada un 45%, valores con respecto al uso de una lámina plana de material. El factor de insonorización dependerá del doblado a utilizar y el área de absorción acústica que se esté multiplicando mediante el doblado. Se evaluaron varios patrones en función de su practicidad y capacidad de adaptarse a la superficie dentro del vehículo. Los pliegues proporcionan una mayor área de contacto al ruido permitiendo una mayor interacción con las ondas sonoras, lo que conduce a una mejor atenuación del ruido no deseado. Este patrón de plegado óptimo no solo

contribuye al objetivo principal de insonorizar el vehículo, sino que también abre nuevas posibilidades para futuras investigaciones y aplicaciones. Los resultados de este estudio muestran el potencial de las técnicas de plegado para abordar el problema de la contaminación acústica, ya sea en vehículos u otras aplicaciones industriales de arquitectura.

- Al comparar la cantidad de ruido que ingresa al habitáculo, previo y posterior a la insonorización con materiales plegados se determinó que, esta técnica tiene diferentes respuestas con respecto al tipo de calzada sobre la que se conduce, aportando así una reducción de ruido equivalente al 3.85% durante conducción sobre empedrados, 4.66% en adoquinados, y 6.73% sobre asfaltos, valores favorables que evidencian la efectividad del patrón al reducir los decibeles de ruido dentro de la cabina.
- Se construyó una caja de reverberación reducida para la correcta selección del material a plegar, misma herramienta que se presenta como una maqueta en la cual se evidencian dos tipos de plegados y materiales: Teselado con cartón corrugado C120, y origami espina de pez sobre cartulina estándar, ambos utilizados en el piso y puertas del vehículo Corsa Evolution respectivamente.

4.2. Recomendaciones

- Una mejora en la insonorización se lograría al aplicar un aditivo o barniz impermeabilizante a los paneles de materiales plegados, esto significaría un aumento en las propiedades del material como durabilidad, fragilidad, o protección contra la humedad. De igual forma, la adición de un sellante o adhesivo aseguraría la estabilidad estructural de los teselados u origami sobre las superficies.
- Se recomienda realizar una investigación más amplia en los distintos tipos y técnicas de dobleces que se podrían aplicar dentro del área automotriz, esto incluiría dimensionamientos y procesos definidos que faciliten la producción de los paneles, brindando así diferentes alternativas funcionales para futuras aplicaciones. Existen diversas técnicas para la construcción de paneles, como la deformabilidad controlada mediante aplicación de calor o planchas con modelos predeterminados que facilitan el plegado mediante compactación.
- Es recomendable realizar las pruebas RT60 en un ambiente controlado acorde a las condiciones de la cámara de reverberación descrito en la norma ISO 354:2003, actualmente a nivel nacional no se cuenta con este tipo de espacio controlado destinado a estudios de ingeniería. Una cámara de reverberación aportaría a estudios no solo destinados al ámbito automotriz, sino que también brindaría resultados más acertados en estudios de nuevos materiales acústicos y sus efectos auditivos en el ser humano.

CAPÍTULO V

5. BIBLIOGRAFÍA

1. Azizi, Y. (2020). *Mecanismos de generación de ruido de neumáticos/carretera*. Akron.
2. ADDIN Mendeley Bibliography CSL_BIBLIOGRAPHY Bandrán, R., Halloy, N., Sanchez, M. A., Sappia, L. D., Sueldo, J., Rocha, L. A., Herrera, M., Rotger, V. I., & Olivera, J. M. (2007). *Contaminación Acústica en salas de neonatología*. <https://thekomedical.com/wp-content/uploads/2016/12/Contaminacion-acustica-en-neonatologia.pdf>
3. Bandrán, R., Halloy, N., Sanchez, M. A., Sappia, L. D., Sueldo, J., Rocha, L. A., Herrera, M., Rotger, V. I., & Olivera, J. M. (2007). *Contaminación Acústica en salas de neonatología*.
4. Biomed Instruments. (2022). *Biomed Instruments*. Retrieved from <https://www.biomed.com.ec/products/sonometro-digital-medidor-de-sonido-decibeles>
5. Bórquez Vera, C. (2016). *Estudio experimental del aislamiento acústico de tres tabiques multicapas y comparación con predicciones teóricas*. <https://www.slideshare.net/claudioborquezvera/claudio-brquez-informe-avance-1>
6. Caon, M. (2018). Waves, Light Waves, Sound Waves and Ultrasound (The Physics of). In *Examination Questions and Answers in Basic Anatomy and Physiology* (pp. 493–510). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75599-1_16
7. Caravaca Muñoz J. (2019). *“Estudio paramétrico de la respuesta mecánica de estructuras basadas en origami*.
8. Chioccarello, S. (2016). *UNI EN ISO 354:2003: acoustic absorption measurement in reverberation room*. 1–9.
9. Domínguez, O. (2009). *Arquitectura, arte y diseño en papel*. <https://sites.google.com/site/arquitecturadepapel/Home>
10. Donayre, J. (2012). *Estudio CFD de la resonancia en la cámara de combustión de Motores Diesel HDI* [Universidad Politécnica de València]. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/18292/tesisUPV3950.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
11. Fernández Bórquez, R. A. (2013). *Acústica para un Diseño Absorbente*. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
12. Hernández, R. (2019, Noviembre 09). Scribd. Retrieved from <https://es.scribd.com/document/434096986/SISTEMA-MIURA-ORI#>
13. Meloni, M., Zhang, Q., Pak, J., Bilore, M. N., Ma, R., Ballegaard, E., Lee, D. S. H., & Cai, J.

14. (2022). Designing origami tessellations composed of quadrilateral meshes and degree-4 vertices for engineering applications. *Automation in Construction*, 142, 104482. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2022.104482>
15. Miraya, F. (2003, Octubre 28). *Facultad de ciencias exactas, ingeniería y agrimensura*. Retrieved from <https://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/>
16. Möser, M., & Luis Barros, J. (2009). *Ingeniería Acústica: Teoría y Aplicaciones*. Berlin: Universidad Tecnica de Berlin.
17. Noico Solutions. (2023). *Principales zonas de aislamiento acústico del automóvil - Noico*. https://noico.info/es/articulos_es/principales-zonas-de-aislamiento-acustico-del-automovil/
18. Ocadiz Marquez, L. G. (2012). *DESARROLLO DE UN ANALIZADOR DE SEÑALES AUDIBLES MEDIANTE LABVIEW 7.0*. 1–50. <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/10752/6.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
19. PHYWE. (2008). *Física Acústica Generación y propagación del sonido*. www.phywe.de
Quinga Benalcázar, R. E. (2010). *LA PRESENCIA DE SONIDOS INARTICULADOS Y SU INFLUENCIA COMO AGENTES ATROFIANTES DEL APRENDIZAJE PEDAGÓGICO EN EL PRIMER AÑO DE EDUCACIÓN BÁSICA PARALELO B DE LA ESCUELA JUAN BENIGNO VELA DE LA CIUDAD DE AMBATO AÑO LECTIVO 2008-2009*. http://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/4132/1/tpv54_2010.pdf
20. Rämmal, H., & Lavrentjev, J. (2020). Acoustic study of novel eco-friendly material for vehicle NVH applications. *Materials Today: Proceedings*, 28(xxxx), 2331–2337. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.632>
21. Ruedas de prensa, S. L. (2023). *Opel Corsa 5p Cosmo 1.8 16v (2003-2005) | Precio y equipamiento - km77.com*. <https://www.km77.com/coches/opel/corsa/2004/5-puertas/cosmo/corsa-5p-cosmo-18-16v/datos/equipamiento>
22. Sanz Vila, C. (2012). Técnicas para el estudio acústico en vehículos (Noise , Vibration and Harshness). *Universidad Politecnica Superior de Gandia, Valencia*, 68.
23. Secretaria Nacional de planificación. (2021). *Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025* (p. 9).
24. Yu, X., Fang, H., Cui, F., Cheng, L., & Lu, Z. (2019). Origami-inspired foldable sound barrier designs. *Journal of Sound and Vibration*, 442, 514–526. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.11.025>

CAPÍTULO VI

6. ANEXOS

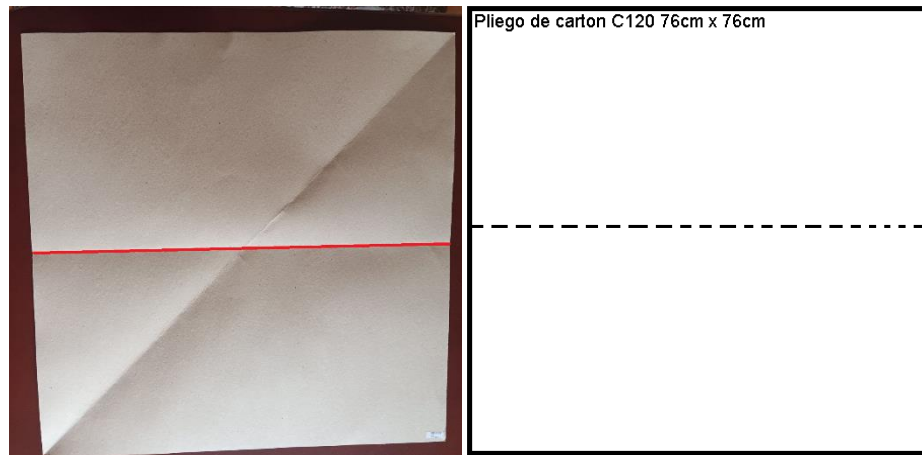


Figura 6.1. Línea guía en sentido longitudinal.

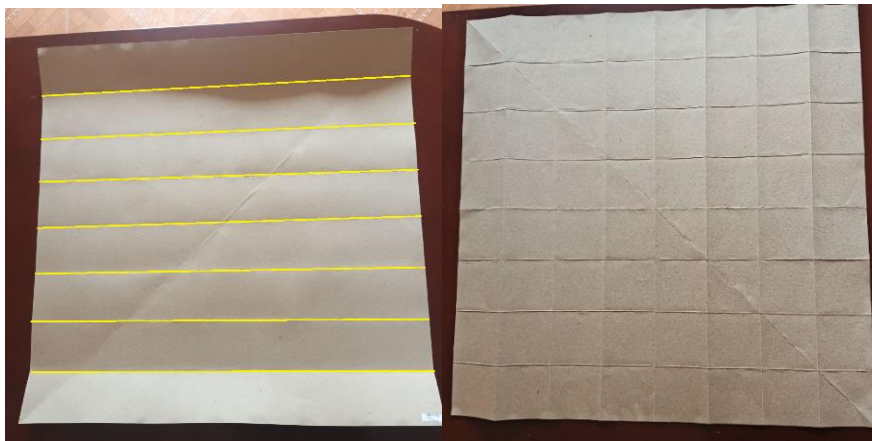


Figura 6.2. Línea guía en sentido longitudinal, 8 y 64 partes iguales.

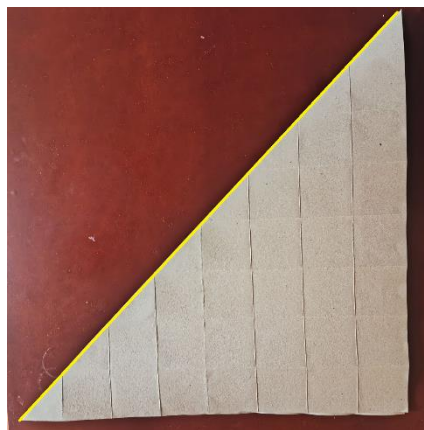


Figura 6.3. Línea guía para el triángulo invertido.



Figura 6.4. Línea guía para el triángulo invertido completo.

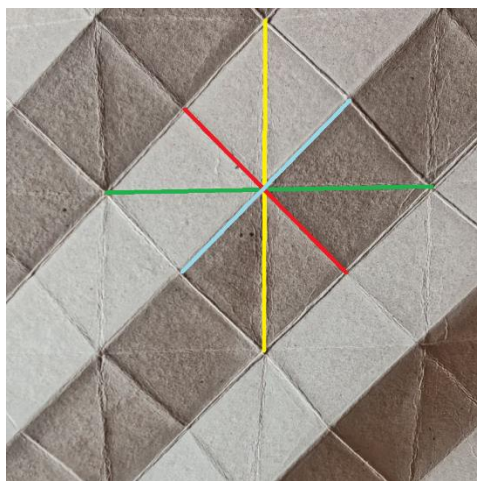


Figura 6.5. Líneas guías trazado final – antes de plegar.

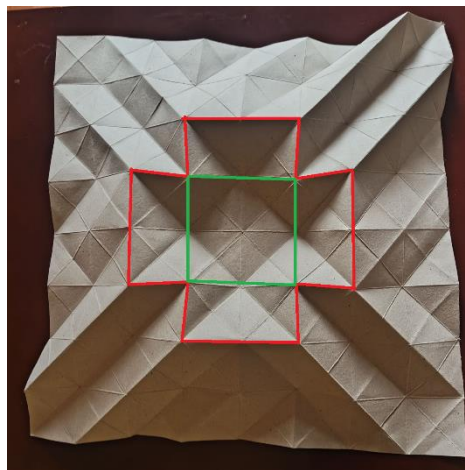


Figura 6.6. Líneas guías para plegar.

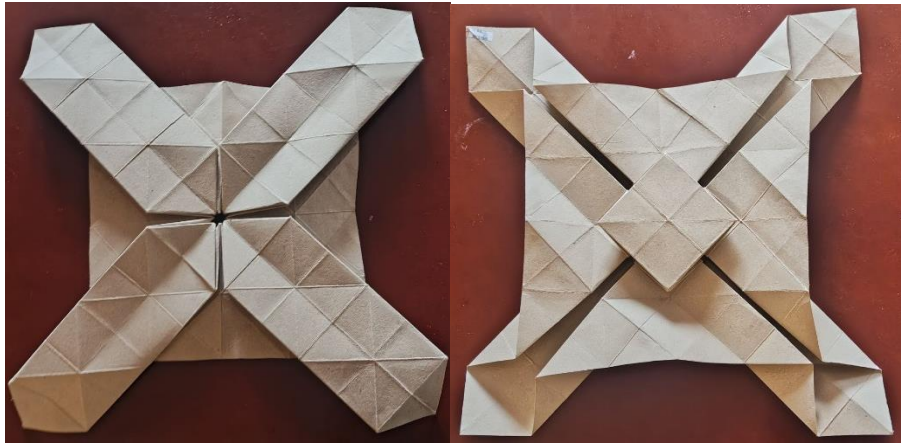


Figura 6.7. *Pliegue pre terminado.*



Figura 6.8. *Pliegue terminado.*



Figura 6.9. *Extracción de insonorización estándar.*

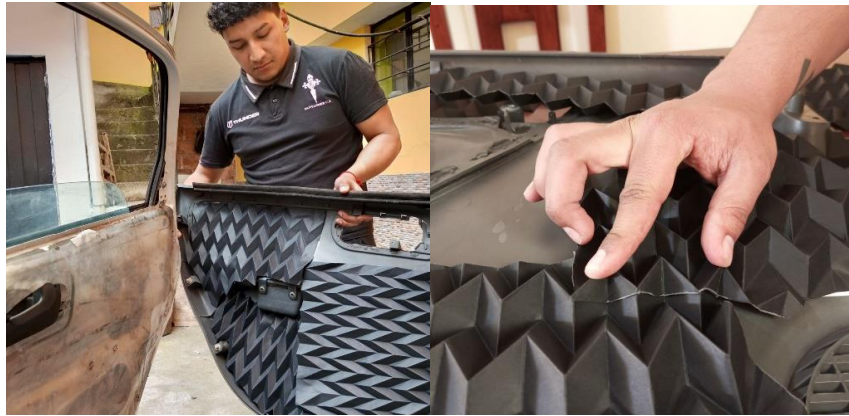


Figura 6.10. Acabado final insonorización de puertas.



Figura 6.11. Aplicación de ruido rosa y comprobación en carretera.

Datos Corsa Evolution 1.8			Unidades
Altura	h:	1,440	m
Ancho	a:	1,640	m
Area		2,01	m ²
Coefficiente de Fricción	Kf:	0,83	
Coef. Aerodinamico	Cx:	0,32	
Masa del vehiculo	m:	1065,94	kg
Masa de Pasajeros	1	75+2.73	kg
Masa Total		1143,67	kg
Gravedad	g:	9,81	Kg/m ²
Factor de rosamiento	frr:	0,015	
Poder Calorifico	Hv:	31,2	MJ
Poder Calorifico	Hv:	8,6666736	kwh
Densidad aire	ρ aire:	1,223	Kg/m ³
Eficiencia transmisión	η trans	0,92	
Eficiencia motor a 80 km/h	η 70	0,22	
Pendiente de 15°	sen(15)	0,25	
Velocidad Km/h	80	22,2222222	m/s

Figura 6.12. Ficha técnica del vehículo corsa Evolution 1.8.