



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO FACULTAD DE
INGENIERÍA MAESTRÍA EN CIENCIAS (CONSTRUCCIÓN)**

**DESARROLLO DE UN PANEL CON CAUCHO RECICLADO PARA
MEJORAR LA ABSORCIÓN ACÚSTICA**

TESIS



**QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS (CONSTRUCCIÓN)**

PRESENTA:

MARÍA DE JESÚS OLVERA MARTÍNEZ

DIRIGIDO POR:

DRA. TERESA LÓPEZ LARA

CENTRO UNIVERSITARIO

QUERÉTARO, QRO.

Fecha de aprobación por el consejo universitario (fecha y año) México.



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales
de Información



Desarrollo de un Panel con Caucho Reciclado para
Mejorar la Absorción Acústica

por

María de Jesús Olvera Martínez

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0
Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Clave RI: IGMAC-233428



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ciencias (Construcción)

**Desarrollo de un Panel con Caucho Reciclado para Mejorar la Absorción
Acústica.**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de Maestro en Ciencias
(Construcción)

Presenta:

Arq. María de Jesús Olvera Martínez

Dirigido por:

Dra. Teresa López Lara

Dra. Teresa López Lara

Presidente

Firma

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel

Secretario

Firma

M.I. Rubén Ramírez Jiménez

Vocal

Firma

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Suplente

Firma

Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán

Suplente

Firma

Dr. Manuel Toledano Ayala

Director de la Facultad

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña

Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Fecha de aprobación por el Consejo Universitario (fecha y año) México.

DEDICATORIA

A Dios que me dio la vida y a mi Madre del cielo.

A mi Mamá por todo su amor y paciencia para conmigo.

A mi Padre y hermanos por todo.

El bien se hace sin ruido, el ruido no hace bien.

San Francisco de Sales

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios y a la familia mi mamá y papá, mis hermanos y hermana que tengo la dicha de contar con ellos aún, y que a pesar de los pesares siempre han estado presentes de una u otra forma. Muy en especial agradezco a mi mamá Cristina por ser el pilar fuerte y a la vez la caricia suave de nuestra familia.

Especialmente agradezco el apoyo y la atención por parte de mi sínodo encabezado por la Dra. Tere que guío por buen camino el inicio y término de este proyecto.

Agradezco el apoyo dado por el CONACYT y la beca otorgada durante el periodo de esta investigación y a la Universidad Autónoma de Querétaro mi alma mater.

Agradezco también especialmente a mi único compañero de esta maestría, Tonatiuh que con mutuo apoyo no desistimos hasta alcanzar nuestro objetivo de terminar esta maestría.

¡a todos Gracias!

Contenido

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	2
ABSTRACT	3
1. INTRODUCCIÓN	4
1.1 Planteamiento del problema.	4
2. JUSTIFICACIÓN.....	5
2.1 Problemática ambiental.	5
2.2 Problemática ambiental asociadas a los neumáticos fuera de uso.	6
2.2.1 Degradación de los neumáticos fuera de uso.	7
2.2.2 Volumen en rellenos sanitario.	8
2.2.3 Contaminación visual.	8
2.2.4 Incendios.	8
2.2.5 Alternativas para gestionar los de los neumáticos fuera de uso.	9
2.3 La industria cementera y el manejo de los neumáticos fuera de uso como combustible alternativo.	10
2.3.1 Riesgos de la incineración de neumáticos fuera de uso para generar energía.	13
2.4 Contaminación acústica y ambiental.	14
2.4.1 Efectos del ruido en los procesos biológicos.	15
2.4.2 Niveles de exposición al ruido.....	17
2.4.3 Confort acústico.....	19
3. ANTECEDENTES.....	21
3.1 Fundamentos de la acústica.	21
3.1.1 Ruido y sonido.....	22
3.1.2 Sonidos graves.....	22
3.1.3 Sonidos agudos.	23
3.1.4 Vibración.....	23

3.1.5	Onda acústica.....	23
3.1.6	Amplitud.....	24
3.1.7	Frecuencia (f).....	24
3.1.8	Período (T).	24
3.1.9	Hercio (Hz).....	24
3.2	Transmisión del ruido.....	25
3.3	Ruido de impacto.	25
3.4	Presión acústica.	25
3.5	Reflexión Acústica.	25
3.6	Reverberación del sonido.	26
3.7	Tiempo de Reverberación (Tr).	26
3.8	Coefficiente de absorción.	27
3.9	Absorción acústica.	28
3.10	Aislamiento acústico.	29
3.11	Instrumento de medición del ruido y sus características.....	31
3.11.1	Sonómetro.	31
3.11.2	Decibelio (dB).	32
3.11.3	Ponderación de frecuencias.	32
3.12	Materiales acústicos empleados en la construcción.....	32
3.12.1	Materiales porosos.....	34
3.12.2	Esponjas de poliuretano.....	35
3.12.3	Esponjas de celda abierta o cerrada.	36
3.12.4	Aplicaciones del poliuretano en la construcción.....	37
3.12.5	Coefficiente de absorción de las esponjas de poliuretano.	37
3.12.6	Resonadores Helmholtz absorción por cavidad simple.....	38
3.12.7	Resonadores de Helmholtz de cavidad múltiple o sistemas de paneles perforados.	39
3.12.8	Materiales para argamasa.	41
3.12.9	Absorbentes suspendidos.....	41
3.12.10	Sistemas de paneles rígidos.	41
3.13	Valorización de residuos.	42

3.13.1	Materiales porosos granulares elastómericos provenientes del reciclado.	42
3.13.2	Caucho proveniente de los Neumáticos Fuera de Uso (NFU).	43
3.13.3	Reciclaje de los neumáticos fuera de uso.	45
3.13.4	Aplicaciones del caucho reciclado provenientes de los neumáticos fuera de uso.	47
4.	HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.	49
4.1	Hipótesis.	49
4.2	Objetivo general.	50
4.3	Objetivos específicos.	50
5.	MÉTODOS Y MATERIALES.	50
5.1	Diseño de la mezcla: gránulos de caucho y aglutinante.	51
5.2	Gránulos de caucho.	51
5.3	Aglutinante de acetato de polivinilo.	52
5.4	Caracterización de los componentes del panel acústico.	54
5.4.1	Las migas de caucho y su coeficiente de absorción.	54
5.5	Diseño geométrico del panel acústico.	56
5.5.1	Parámetros preliminares de diseño y construcción.	56
5.5.2	Parámetros fijos para la estructura.	57
5.5.3	Porcentaje y distribución de las perforaciones.	57
5.5.4	Influencia del tamaño de las perforaciones.	58
5.6	Construcción del panel de caucho granular.	60
5.6.1	Cuerpo del panel	60
5.6.2	Perforaciones.	61
5.6.3	Dosificación de la mezcla caucho-resina.	62
5.6.4	Combinación de la mezcla caucho-resina.	63
5.6.5	Vaciado y fraguado de la mezcla caucho-resina.	63
5.6.6	Prototipo final del panel acústico con caucho-resina como material fonoabsorbente.	65
5.7	Construcción del panel de esponja de poliuretano.	67
5.7.1	Propiedades acústicas del panel de esponja de poliuretano.	67
5.7.2	Resistividad al flujo.	68

5.7.3 Porosidad.....	68
5.8 Propiedades del recinto para la toma de muestras.	69
5.9 Ponderación A.....	70
5.10 Acústica arquitectónica y normativa.	71
5.11 Medición y obtención de datos.....	72
6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.	75
7. CONCLUSIONES.	106
8. FUTURAS APLICACIONES.....	108
9. REFERENCIAS.....	109

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Componentes de los neumáticos de turismo y vehículos pesados. Fuente: (ETRA, www.etra-eu.org). 8</i>	8
<i>Tabla 2. Capacidades caloríficas de residuos industriales sólidos. Fuente: (Plan de Manejo de Neumáticos Usados de Desecho Conforme a la NOM-161-SEMARNAT-2011, 2022).....</i>	10
<i>Tabla 3. Consumo de energía en la fabricación del cemento 2011(Petajoules).....</i>	12
<i>Tabla 4. Principales efectos del ruido sobre la audición. Fuente: López-Fachal (2012).....</i>	16
<i>Tabla 5. Comparativa de los límites máximos de exposición permitidos en México y Estados Unidos. Fuente: García Escobar, 2022.....</i>	18
<i>Tabla 6. Propiedades de los niveles de ruido. Fuente: García-Saenz, 2003.....</i>	18
<i>Tabla 7. Coeficientes de absorción de materiales especiales. Fuente: (Recuero López, 1992).....</i>	28
<i>Tabla 8. Coeficientes de absorción de materiales más comunes. Fuente: (INIFED 2014).....</i>	30
<i>Tabla 9. Identificación de las diversas opciones de medición disponibles para los sonómetros. Fuente: López-Fachal, (2012).....</i>	31
<i>Tabla 10. Clasificación de los materiales absorbentes porosos. Fuente: Taborga (2022).....</i>	35
<i>Tabla 11. Tipología y denominación de los diferentes tipos de caucho granular empleados. Fuente: Rodríguez-Montejano (2003).....</i>	51
<i>Tabla 12. Clases de absorción acústica según la UNE-EN ISO 11654:1998.....</i>	55
<i>Tabla 13. Parámetros para el diseño del panel perforado.....</i>	58
<i>Tabla 14. Parámetros de diseño para calcular las frecuencias finales del diseño.....</i>	59
<i>Tabla 15. Parámetros de diseño para calcular las frecuencias finales del diseño, modificando el radio y cantidad de perforaciones del panel.....</i>	59
<i>Tabla 16. Diseño de mezcla caucho-resina.....</i>	62
<i>Tabla 17. Niveles de ruido en función de la actividad. Fuente: OSMAN (2010), La Nación, Digital (2012), Alfie-Cohen & Salinas-Castillo (2017).....</i>	70
<i>Tabla 18. Límites máximos permisibles de ruido de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-081-SEMARNAT-1994.....</i>	72
<i>Tabla 19. Registro de lecturas tomadas para el panel (EP) por la mañana en el día uno.....</i>	77
<i>Tabla 20. Registro de lecturas tomadas para el panel (CG) por la mañana en el día uno.....</i>	78
<i>Tabla 21. Registro de lecturas tomadas para el panel (EP) por la tarde en el día uno.....</i>	80
<i>Tabla 22. Registro de lecturas tomadas para el panel (CG) por la tarde en el día uno.....</i>	81
<i>Tabla 23. Registro de lecturas tomadas para el panel (EP) por la noche en el día uno.....</i>	83
<i>Tabla 24. Registro de lecturas tomadas para el panel (CG) por la noche en el día uno.....</i>	84
<i>Tabla 25. Registro de lecturas tomadas para el panel (EP) por la mañana en el día dos.....</i>	86
<i>Tabla 26. Registro de lecturas tomadas para el panel (CG) por la mañana en el día dos.....</i>	87
<i>Tabla 27. Registro de lecturas tomadas para el panel (EP) por la tarde del día dos.....</i>	89

<i>Tabla 28. Registro de lecturas tomadas para el panel (CG) por la tarde del día dos.</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 29. Registro de lecturas tomadas para el panel (EP) por la noche del día dos.</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 30. Registro de lecturas tomadas para el panel (CG) por la noche del día dos.</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 31. Registro de lecturas tomadas para el panel (EP) por la mañana del día tres.</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 32. Registro de lecturas tomadas para el panel (CG) por la mañana del día tres.</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 33. Registro de lecturas tomadas para el panel (EP) por la tarde del día tres.....</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 34. Registro de lecturas tomadas para el panel (CG) por la tarde del día tres.....</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 35. Registro de lecturas tomadas para el panel (EP) por la noche del día tres.....</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 36. Registro de lecturas tomadas para el panel (CG) por la noche del día tres.....</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 37. Registros de lectura en modo (FAST).</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 38. Registros de lecturas en modo (MAX).....</i>	<i>105</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Adaptado del Instituto de Investigaciones en Materiales-UNAM, eliminación de neumáticos usados en México. (Herrera-Sosa et al., 2015).	6
Figura 2. Problemáticas asociadas a los neumáticos fuera de uso.	7
Figura 3. Aproximadamente 9.000 toneladas de neumáticos arden. Seseña, España 13 de mayo de 2016. Fuente: El Confidencial.	9
Figura 4. Las 3R's base para el manejo de los neumáticos fuera uso.	10
Figura 5. Ubicación de plantas cementeras en el país. Fuente: Plan de Manejo de Neumáticos Usados de Desecho Conforme a la NOM-161-SEMARNAT-2011, 2022.	12
Figura 6. Porcentaje de fuentes generadoras de ruido. Fuente: Alfie-Cohen & Salinas-Castillo, (2017); Ruza, (1988).	15
Figura 7. Impacto sobre la salud y percepción de los niveles de ruido. Fuente: instituto Botanical.	20
Figura 8. Ciclo, periodo y amplitud de una onda. Fuente: López-Fachal (2012).	24
Figura 9. Fenómeno de la reflexión acústica. Fuente: universo del sonido (2023).	26
Figura 10. Esquema de incidencia de una onda acústica sobre un cuerpo de baja densidad.	29
Figura 11. Local emisor y local receptor.	30
Figura 12. Figura esquema de materiales absorbentes según López-Recuero (2001).	33
Figura 13. Materiales empleados como absorbentes acústicos. Fuente: Esquerdo Lloret (2015).	34
Figura 14. Material poroso: (a) poros sin conexión, (b) poros interconectados. Fuente: T. J. Cox and P. D'Antonio (2009).	34
Figura 15. Estructuras internas de una esponja de celda cerrada y otra de celdas abiertas. Fuente; IPUR, 2020.	36
Figura 16. Aplicación de espuma de poliuretano dentro de un muro doble.	37
Figura 17. Coeficiente de absorción del material poroso según su grado de porosidad. Fuente: Taborga (2022).	38
Figura 18. Diseño básico de un resonador Helmholtz de una sola cavidad simple. Fuente: Fernández et al., (2011).	38
Figura 19. Resonador acústico de Hemholtz a base de paneles perforados. Fuente: Fernández et al., (2011) 40	
Figura 20. Composición química de los neumáticos en relación a su peso. Fuente: Rodríguez-Montejano (2003).	44
Figura 21. Composición química de los neumáticos en relación a su peso. Fuente: Rodríguez-Montejano (2003).	44
Figura 22. Proceso mecánico del reciclaje de llantas Fuente: Herrera-Sosa et al. (2015).	45
Figura 23. Partículas de llantas trituradas. Fuente: Herrera-Sosa et al. (2015).	46
Figura 24. Clasificación de los métodos de aprovechamiento de los residuos de caucho con información de	

<i>(Abraham et al., 2010; Adhikari, B. 2000).</i>	47
<i>Figura 25. Tipos de granza monodispersa de 1 a 3 mm y de 3 a 6 mm obtenida en el mercado local.</i>	52
<i>Figura 26. Resina L-33 acetato de polivinilo de solidos medios.</i>	53
<i>Figura 27. Muestra obtenido de la mezcla de migas de caucho y resina polivinílica.</i>	54
<i>Figura 28. Gráfico de clases de absorción acústica según la norma UNE-EN ISO 11654:1998.</i>	55
<i>Figura 29. Diseño geométrico del panel basado en los resonadores de Helmholtz unidades en centímetros.</i> 58	
<i>Figura 30. Diseño y dimensiones del panel acústico de caucho-resina</i>	60
<i>Figura 31. Base del panel acústico con medidas de 61x36x3 cm.</i>	61
<i>Figura 32. Base del panel acústico con los 28 tubos de 2.54 cm de diámetro.</i>	61
<i>Figura 33. Peso del cuerpo del panel.</i>	62
<i>Figura 34. Pesado de los materiales de la mezcla caucho-resina.</i>	63
<i>Figura 35. Combinación de la mezcla caucho granular y resina.</i>	63
<i>Figura 36. Vaciado de la mezcla en la base del panel.</i>	64
<i>Figura 37. Panel de caucho terminado de fraguar.</i>	65
<i>Figura 38. Resultado final de panel acústico hueco relleno con mezcla de caucho-resina puesto verticalmente.</i>	66
<i>Figura 39. Resultado final de panel acústico hueco relleno con mezcla de caucho-resina peso aproximado 3.25 kg.</i>	66
<i>Figura 40. Diseño y dimensiones del panel de esponja de poliuretano.</i>	67
<i>Figura 41. Panel de esponja de poliuretano.</i>	68
<i>Figura 42. Variación del coeficiente de absorción debida a la frecuencia y a la porosidad del material. Fuente: Lopez-Fachal (2012).</i>	69
<i>Figura 43. Decibelímetro o sonómetro.</i>	71
<i>Figura 44. Panel a base de esponja de poliuretano (EP) y panel de caucho granular (CG).</i>	73
<i>Figura 45. Fenómenos de absorción, reflexión y transmisión, producido al chocar una onda sonora contra un muro.</i>	73
<i>Figura 46. Ubicación y colocación del sonómetro para las mediciones.</i>	74
<i>Figura 47. Colocación la fuente de ruido y de ambos paneles.</i>	75
<i>Figura 48. Grafico comparativo de lecturas (FAST) tomadas de ambos paneles por la mañana del día uno.</i> .	79
<i>Figura 49. Grafico comparativo de lecturas (MAX) tomadas de ambos paneles por la mañana del día uno.</i> .	79
<i>Figura 50. Gráfico comparativo de lecturas (FAST) tomadas de ambos paneles por la tarde del día uno.</i>	82
<i>Figura 51. Gráfico comparativo de lecturas (MAX) tomadas de ambos paneles por la tarde del día uno.</i>	82
<i>Figura 52. Gráfico comparativo de lecturas (FAST) tomadas de ambos paneles por la noche del día uno.</i>	85
<i>Figura 53. Gráfico comparativo de lecturas (MAX) tomadas de ambos paneles por la noche del día uno.</i>	85
<i>Figura 54. Gráfico comparativo de lecturas (FAST) tomadas de ambos paneles por la mañana del día dos.</i> ..	88
<i>Figura 55. Gráfico comparativo de lecturas (MAX) tomadas de ambos paneles por la mañana del día dos.</i> ..	88

<i>Figura 56. Gráfico comparativo de lecturas (FAST) tomadas de ambos paneles por la tarde del día dos.</i>	<i>91</i>
<i>Figura 57. Gráfico comparativo de lecturas (MAX) tomadas de ambos paneles por la tarde del día dos.</i>	<i>91</i>
<i>Figura 58. Gráfico comparativo de lecturas (FAST) tomadas de ambos paneles por la noche del día dos.</i>	<i>94</i>
<i>Figura 59. Gráfico comparativo de lecturas (MAX) tomadas de ambos paneles por la noche del día dos.</i>	<i>94</i>
<i>Figura 60. Gráfico comparativo de lecturas (FAST) tomadas de ambos paneles por la mañana del día tres. .</i>	<i>97</i>
<i>Figura 61. Gráfico comparativo de lecturas (MAX) tomadas de ambos paneles por la mañana del día tres. .</i>	<i>97</i>
<i>Figura 62. Gráfico comparativo de lecturas (FAST) tomadas de ambos paneles por la tarde del día tres.</i>	<i>100</i>
<i>Figura 63. Gráfico comparativo de lecturas (MAX) tomadas de ambos paneles por la tarde del día tres.</i>	<i>100</i>
<i>Figura 64. Gráfico comparativo de lecturas (FAST) tomadas de ambos paneles por la noche en el día tres. .</i>	<i>103</i>
<i>Figura 65. Gráfico comparativo de lecturas (MAX) tomadas de ambos paneles por la noche en el día tres. .</i>	<i>103</i>

RESUMEN

Los componentes y materiales prefabricados con cualidades acústicas particulares se han utilizado históricamente en la industria de la construcción para aislar o acondicionar una habitación. En este estudio se comparan las propiedades acústicas de un par de paneles que comparten similitudes. El primer panel se construyó a partir de caucho reciclado obtenido a partir de la trituración de neumáticos de desecho, de dicha molienda se obtiene una materia prima en forma de gránulos de distintos tamaños, para este ensayo se utilizaron granulometrías de entre 1 y 3 mm, dichas partículas fueron dosificadas en una proporción de 70% de caucho granular y 30% de una resina de acetato de polivinilo como aglutinante; el cuerpo del panel se fabricó a base de cartón reciclado, en dicha base se colocaron 28 huecos espaciados uniformemente en toda la superficie, donde se vació y contuvo la mezcla de caucho granular y resina, que fungió como el núcleo o material fonoabsorbente. Un segundo panel acústico se fabricó igualmente con una base de cartón de dimensiones similares, con la salvedad de que utiliza en su núcleo un material fonoabsorbente tradicional, que es una esponja o espuma de poliuretano que tiene propiedades termoacústicas, aislantes y absorbentes muy utilizadas en el sector de la construcción. Los resultados de las pruebas realizados a ambos materiales con el equipo de medición mostraron que el panel de caucho granular reciclado bloqueó 5.77 dB más que el panel de esponja de poliuretano en el modo de lectura (MAX) que es el ruido mayor registrado por el sonómetro.

Palabras Claves: *panel, acústico, reciclaje, caucho granular, absorción.*

ABSTRACT

Prefabricated components and materials with particular acoustical qualities have historically been used in the construction industry to insulate or condition a room. This study compares the acoustic properties of a pair of panels that share similarities. The first panel was constructed from recycled rubber obtained from the shredding of scrap tires, from such grinding a raw material is obtained in the form of granules of different sizes, for this test granulometries between 1 and 3 mm were used, these particles were dosed in a proportion of 70% of granular rubber and 30% of a polyvinyl acetate resin as a binder; The body of the panel was made from recycled cardboard, in which 28 holes were placed evenly spaced over the entire surface, where it was emptied and contained the mixture of granular rubber and resin, which served as the core or sound-absorbing material. A second acoustic panel was also manufactured with a cardboard base of similar dimensions, except that it uses a traditional sound-absorbing material in its core, which is a polyurethane sponge or foam that has thermoacoustic, insulating and absorbing properties widely used in the construction sector. The results of the tests performed on both materials with the measuring equipment showed that the recycled granular rubber panel blocked 5.77 dB more than the polyurethane sponge panel in the reading mode (MAX), which is the highest noise recorded by the sound level meter.

Keywords: *panel, acoustic, recycling, granular rubber, absorption.*

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema.

Cada año se generan en el mundo más de 17 millones de toneladas de neumáticos usados, la mayoría de ellos procedentes del dinámico crecimiento de la fabricación de productos de caucho, especialmente los utilizados en la industria del automóvil (Sienkiewicz, et al., 2012).

La gestión de estos residuos poliméricos ha avanzado recientemente y, como consecuencia, los neumáticos fuera de uso empiezan a considerarse una posible fuente de importantes materias primas.

Igualmente, la investigación sobre nuevos materiales para aislantes y absorbentes acústicos no deja de progresar, pero lo hace aún más en el ámbito de la búsqueda de nuevas aplicaciones de materiales provenientes del desecho para prolongar su vida útil, como en el caso del caucho reciclado proveniente de los neumáticos fuera de uso (Olvera-Martínez et al., 2023).

El objetivo que persigue este trabajo es realizar un prototipo de panel acústico utilizando como principal material absorbente las migas de caucho provenientes principalmente del reciclaje de llantas de automóviles, caracterizando una mezcla de tipo argamasa para el posterior estudio de sus propiedades acústicas.

Actualmente existen gran variedad de materiales que sirven como materiales absorbentes entre ellos los más comunes como son las esponjas de poliuretano, los cuales cuentan con determinadas propiedades que los hacen de los mejores absorbentes acústicos, estas características están determinadas por el coeficiente de absorción. Se propone por medio de técnicas y herramientas, caracterizar las propiedades de un panel elaborado con migas de caucho con un diseño de mezcla específica y posteriormente compararlo con otro fabricado con esponja de poliuretano.

2. JUSTIFICACIÓN

2.1 Problemática ambiental.

La gestión de residuos y la contaminación acústica son dos cuestiones que actualmente se están convirtiendo en un problema cada vez mayor tanto en los países en desarrollo como en los desarrollados (Maderuelo-Sanz et al., 2012).

Las dos primeras naciones que abordaron los riesgos medioambientales asociados a la gestión de residuos, concretamente los neumáticos usados, y promulgaron legislación al respecto fueron Estados Unidos y Japón (Irevna, 2016). Numerosas investigaciones confirman que cuando los neumáticos lleguen al término de su vida útil, se convertirán en su mayoría en residuos, contribuyendo a un problema cada vez mayor de contaminación ambiental. Por ello la investigación relacionada con el reciclaje y la explotación económica han impulsado la innovación y la investigación hasta el punto de que existen numerosas rutas de reciclaje viables, principalmente en los países industrializados (Forrest, 2014).

En 2015 se produjeron alrededor de 26 millones de toneladas de caucho en todo el mundo, según datos del Grupo Internacional de Estudios sobre el Caucho (IRSG, 2014). En ese año, se estimó que la demanda mundial de caucho aumentó un 0,7 % respecto al año anterior y, entre 2016 y 2024, se espera que este consumo aumente una media del 3,1 % anual (Peláez et al., 2017).

De acuerdo con Herrera-Sosa et al. (2015), alrededor de 60% de los neumáticos al término de su vida útil son reciclados en naciones como Alemania, Francia y Austria; en contraste, debido a la falta de sistemas de control, en México, de los 30 millones de neumáticos desechados anualmente, 91% son tirados en ríos, carreteras y espacios abiertos, 5% son renovados mediante un proceso conocido como destalonamiento, 2% son enviados a centros de acopio y 2% son quemados para producir energía., esta disposición de llantas fuera de uso en México se muestra en la Figura 1.

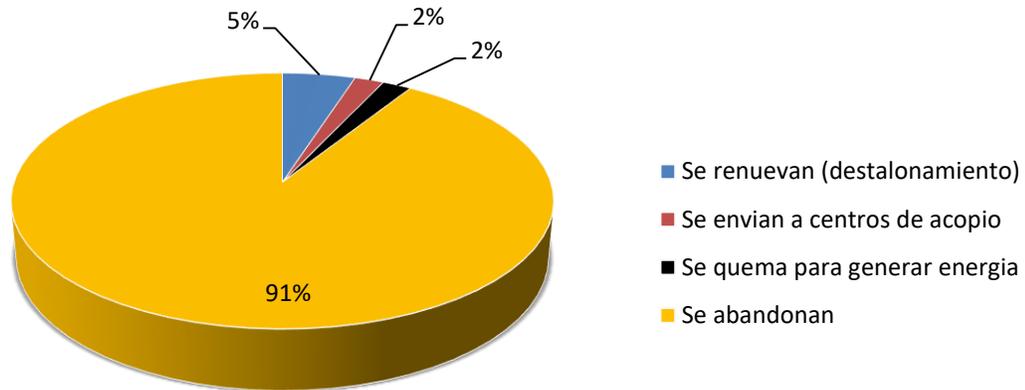


Figura 1. Adaptado del Instituto de Investigaciones en Materiales-UNAM, eliminación de neumáticos usados en México. (Herrera-Sosa et al., 2015).

Por tanto, una de las problemáticas actuales aunada a la gestión y el tratamiento de residuos sólidos es el daño directo que pueden causar al medio ambiente y a la salud humana al contaminar el suelo, el agua y el aire (Peláez et al., 2017).

2.2 Problemática ambiental asociadas a los neumáticos fuera de uso.

Debido a que la industria del automóvil es una de las mayores productoras de neumáticos y ruido ambiental, como todas las actividades industriales, se enfrenta al problema del aumento de la producción de residuos. Los neumáticos fuera de uso son uno de los residuos más graves de esta industria, cuya producción aumenta año tras año.

Hay más de 3 millones de toneladas de neumáticos usados en Europa y más de 5,2 millones en Estados Unidos y China, según un informe elaborado por la Asociación Europea de Reciclaje de Neumáticos ETRA en 2006 (Li et al., 2010).

De acuerdo al Herald de México (2019) se calcula que en México se producen anualmente entre 30 y 40 millones de neumáticos fuera de uso, de los cuales el 10% se reciclan mediante diversos métodos.

Otros informes como el de la Asociación Nacional de Distribuidores de Llantas y Plantas Renovadoras, A.C. (Andellac) coinciden en que el 90% de los neumáticos usados se descubren en calles y lugares como barrancos, ríos y vertederos al borde

de las carreteras, 6% es renovado, 2% se utiliza en generación de energía, 2% se deposita en centros de acopio autorizados dentro del territorio nacional. (Neumarket, 2019).

Por tanto, en nuestro país la Asociación Nacional de Distribuidores de Llantas y Plantas Renovadoras, A.C. (Andallac) y sus agremiados; la asociación Nacional de Importadores de Llantas, A.C. (ANILLAC) y la Cámara Nacional de la Industria Hulera (CNIH) han asumido la responsabilidad de hacer cumplir lo establecido en la NOM-161-SEMARNAT-2011 en lo que respecta al correcto manejo de los neumáticos fuera de uso.

En 2005 se firmó el acuerdo con la SEMARNAT. Su objetivo ha sido fomentar la eliminación responsable de los neumáticos al final de su vida útil. Participan la Cámara Nacional de la Industria Hulera (CNIH), la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), así como empresas como Goodyear, Bridgestone-Firestone, Pirelli JK Tornel, Continental Tire, Cooper y Michelin.

Los neumáticos fuera de uso deben tratarse como residuos según determinadas normas porque no son biodegradables. Debido a su gran capacidad calorífica y a los gases nocivos que emiten al arder, resultan ser peligrosos en caso de incendio. Dentro de las problemáticas de este material se encuentran los descritos en la Figura 2.

Descomposición	Refugio de flora y fauna	Incendios	Volumen	Contaminación visual
<ul style="list-style-type: none"> • Los neumáticos tardan cientos de años en descomponerse. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pueden ser refugios de fauna nociva como roedores y mosquitos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tienen un alto poder calorífico, teniendo el riesgo de incendios. 	<ul style="list-style-type: none"> • El volumen y la cantidad de estos desechos dificulta su manejo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dar una mala impresión visual cuando se desechan incorrectamente

Figura 2. Problemáticas asociadas a los neumáticos fuera de uso.

2.2.1 Degradación de los neumáticos fuera de uso.

Los neumáticos tienen un tiempo de deterioro muy largo, ya que los materiales

utilizados para fabricarlos están hechos para soportar duras condiciones físicas y climáticas. En la Tabla 1 se ofrece información sobre las principales piezas de los neumáticos de turismos y camiones pesados.

Tabla 1. Componentes de los neumáticos de turismo y vehículos pesados. Fuente: (ETRA, www.etra-eu.org).

Componentes	Turismo (%)	Vehículos pesados(%)	Función
Caucho y elastómeros	48.0	45.0	Estructural- deformación
Negro de humo	22.0	22.0	Mejora de propiedades físicas
Acero	15.0	25.0	Formación de esqueleto estructural
Aditivos (óxido de zinc, azufre, etc.)	10.0	8.0	Catalizador, vulcanización
Textiles	5.0	0.0	Formación esqueleto estructural
Peso (kg)	6.5-9.0	55.0-80.0	

2.2.2 Volumen en rellenos sanitario.

No se compactan debido a su disposición y constitución física, ya que la naturaleza no puede digerir los componentes extremadamente tóxicos que contienen.

La organización sin ánimo de lucro TNU (Tratamiento Neumáticos Usados S.L.) afirma que los neumáticos pueden tardar más de mil años en descomponerse en la naturaleza, produciendo más basura que otros tipos de residuos, ocupando más espacio en los vertederos y acortando su vida útil (TNU, 2020).

2.2.3 Contaminación visual.

Los neumáticos fuera de uso que se desechan de forma incorrecta producen contaminación visual e interfieren en la belleza natural del entorno ya que muestran una falta de armonía ambiental. Los problemas de recogida y la escasez de lugares de acopio adecuados y autorizados agravan este problema.

2.2.4 Incendios.

Por su naturaleza combustible siempre existe la posibilidad de incendio porque

los neumáticos usados son inflamables.

Joan Grimalt, catedrático de Química Ambiental del Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua del CSIC, advierte de que, dado que el carbón de esta hoguera contiene sustancias altamente cancerígenas, el humo que emite es extremadamente peligroso para la salud humana (Pérez, 2016).



Figura 3. Aproximadamente 9.000 toneladas de neumáticos arden. Seseña, España 13 de mayo de 2016. Fuente: El Confidencial.

Según informes de la Agencia de Protección del Medio Ambiente de EE.UU. (EPA, 1997), la quema de neumáticos también libera sustancias químicas que suponen el mayor riesgo para los seres humanos, como óxido de plomo, tolueno, benceno y furanos, en la Figura 3 se observa el incendio de aproximadamente 9.000 toneladas de neumáticos liberando en consecuencia dichas sustancias al ambiente.

2.2.5 Alternativas para gestionar los de los neumáticos fuera de uso.

Como se muestra en la Figura 4, el principio de las 3R's sirve de base para las posibilidades de gestión de los neumáticos fuera de uso.



Figura 4. Las 3R's base para el manejo de los neumáticos fuera uso.

2.3 La industria cementera y el manejo de los neumáticos fuera de uso como combustible alternativo.

Según ANDELLAC, no existe ninguna ley que regule el tratamiento de los neumáticos fuera de uso en México en general, y no hay planes de instalaciones de recogida para estos residuos. Así mismo la ANDALLEC tras la primera etapa del programa, "Rola la Llanta", donde se recuperó la mayor cantidad de llantas con 26 mil 900 neumáticos, reconoció al municipio de Querétaro por la estrategia implementada para procesar estos materiales y evitar que vayan al relleno sanitario. En este tipo de proyectos participan empresas como Cemex y Cementos Fortaleza, que los utilizan como combustible para el cemento, pero cuentan con filtros y se rigen para el manejo seguro de los residuos neumáticos (Querétaro, 2018). En la Tabla 2 se comparan las capacidades calóricas de este material con las de otros materiales.

Tabla 2. Capacidades caloríficas de residuos industriales sólidos. Fuente: (Plan de Manejo de Neumáticos Usados de Desecho Conforme a la NOM-161-SEMARNAT-2011, 2022)

Tipo de residuos	Presentación	Poder calórico Kcal/kg
Productos de madera	Paneles, fibras, partículas y pedacera	4,500-4,600

Cartón	Ordinario, empaques y envases	3,400-3,500
Papeles	Ordinario, kraft, papel	3,900-4,100
Textiles	Algodón	4,000
	Lana y seda	4,600-4,900
	Fieltro y linóleo	5,000-6,100
Caucho	Hule viejo	3,200
	Llantas	6,00-7,000
Plásticos	PVC	4,500-5,300
	Neopreno	6,000
	ABS	8,300
	Poliestireno	10,000
Madera	6,300	1,200-3,700
Bagazo	6,420	2,00-4,800
Legumbres verdes	6,920	800
Caña de maíz	6,420	3,500
Paja de arroz	6,150	2,900-4,000

Los neumáticos usados son actualmente el combustible alternativo más utilizado en el mundo, siendo la industria cementera quien aprovecha estos residuos mediante co-procesamiento (Plan de Manejo de Neumáticos Usados de Desecho Conforme a la NOM-161-SEMARNAT-2011, 2022).

La Figura 5 muestra la ubicación de las fábricas de cemento del país. Dado que estas instalaciones están muy dispersas por todo el país, se han convertido en el método preferido para enviar el mayor número posible de neumáticos usados y de desecho.



Figura 5. Ubicación de plantas cementeras en el país. Fuente: Plan de Manejo de Neumáticos Usados de Desecho Conforme a la NOM-161-SEMARNAT-2011, 2022.

Con información del plan de manejo de neumáticos usados de desecho (Conforme a la NOM-161-SEMARNAT-2011, 2022) con una proporción del 8,4% en 2013, la industria del cemento en México fue el segundo mayor consumidor de energía del país y como se ilustra en la Tabla 3, esta industria utilizó neumáticos como combustible para el 2,6% de su consumo anual de energía, es decir, 8.358.000 neumáticos usados y desechados por año.

Tabla 3. Consumo de energía en la fabricación del cemento 2011(Petajoules)

Tipo de combustible	Consumo	% del consumo
Carbón	5.52	3.26
Coque de petróleo	75.94	59.83
Petrolíferos	2.9	1.42
Gas seco	9.09	3.06
Electricidad	30.49	23.96
Residuos sólidos	7.63	5.36
Residuos líquidos	0.92	0.51
Llantas	3.35	2.60
Total	135.85	100

2.3.1 Riesgos de la incineración de neumáticos fuera de uso para generar energía.

Actualmente, la opción más popular para deshacerse de las llantas usadas para producir energía es la incineración, tanto en México como en el resto del mundo (Sienkiewicz, et al., 2012).

Al defender leyes para la incineración de neumáticos fuera de uso con fines energéticos en colaboración con las industrias cementeras, la Unión Europea también demuestra su interés por esta actividad (Rodríguez-Montejano, 2003).

En rueda de prensa, Nicolás Olea, catedrático de la Universidad de Granada e investigador de la Organización Mundial de la Salud (OMS), afirmó que la contaminación de la cementera Lafarge de Montcada i Reixac (Barcelona) está "directamente relacionada" con el desarrollo de cáncer en la población local (La Vanguardia, 2014).

Según Ecologistas en Acción (2018), una confederación de más de 300 organizaciones ecologistas repartidas por pueblos y ciudades de España, las cementeras llevan casi 20 años quemando neumáticos usados en la zona. Sostienen que la incineración de neumáticos, lejos de ser un beneficio económico, se ha convertido en un importante problema sanitario, sobre todo en Castilla y León, comunidad autónoma española que encabeza el uso nacional de esta basura.

El estudio del Centro Nacional de Epidemiología del Instituto de Salud Carlos III sobre la mortalidad por cáncer cerca de las cementeras encontró "un mayor riesgo de morir por algunos tipos de cáncer, principalmente tumores de colon (hombres y mujeres) y estómago, vesícula biliar, peritoneo, pleura y vejiga (hombres)" como apoyo a las afirmaciones antes citadas. Dicha investigación fue diseñada con un estudio ecológico para examinar la mortalidad municipal debida a 33 tipos de cáncer, durante el período 1997–2006 (García-Pérez et al., 2013 & García-Pérez et al., 2015).

En cambio, los grupos ecologistas y numerosos estudios señalan que el reciclado de neumáticos fuera de uso en hormigón cementoso, hormigón asfáltico, materiales granulares para estructuras de tierra y otros subproductos a base de migas de

caucho reciclado permite utilizar todos los neumáticos fuera de uso recogidos cada año y elimina la necesidad de incinerarlos, con el objetivo último de evitar la generación de neumáticos fuera de uso y fomentar el uso de materiales reciclados (Las cementeras de Castilla y León queman más neumáticos de los recogidos en la región, 2018).

2.4 Contaminación acústica y ambiental.

Según una investigación de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2011), la contaminación atmosférica es el principal contaminante ambiental, seguida de la contaminación acústica y la contaminación acústica ambiental.

Por otro lado, las principales organizaciones que han producido más datos y creado sus propias técnicas para evaluar los impactos del ruido en la salud humana son la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE), ambas organizaciones internacionales (Ecología y Desarrollo [ECODES], 2005).

Según la OCDE, entre 55 y 60 decibelios de ruido son irritantes, entre 60 y 65 decibelios son notablemente más irritantes, y más de 65 decibelios deben evitarse, ya que podrían tener un impacto psicológico y conductual negativo.

En su informe "Guidelines for Community Noise" de 1999, la OMS recomienda un nivel fijo de 55 dB. (Berglund et al., 1999). En sus "Directrices sobre el ruido comunitario" (Berglund et al., 1999). En la figura 6 se representan las principales causas del ruido en las ciudades, que es motivo de preocupación para la civilización contemporánea.

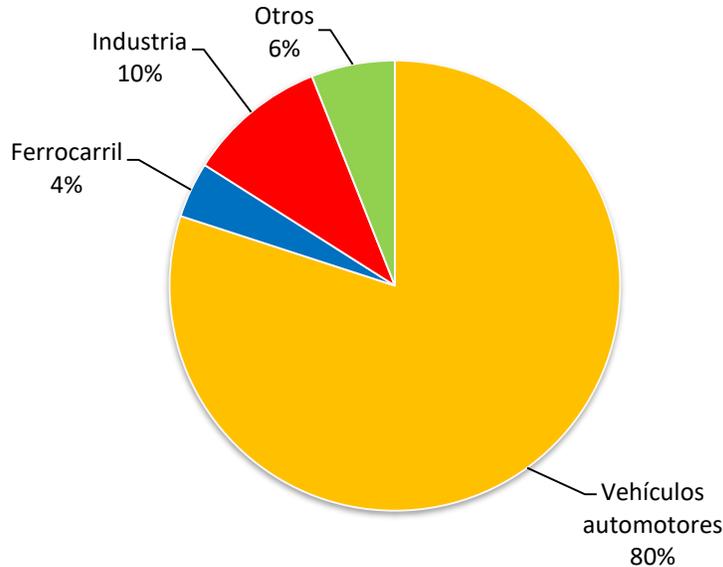


Figura 6. Porcentaje de fuentes generadoras de ruido. Fuente: Alfie-Cohen & Salinas-Castillo, (2017); Ruza, (1988).

Como resultado, la producción de materiales a partir de tipos específicos de basura, como materiales de absorción acústica o laminados anti-impacto, puede ayudar a resolver dos de los problemas medioambientales más acuciantes en la actualidad: el ruido y la contaminación ambiental (Maderuelo-Sanz, 2014).

2.4.1 Efectos del ruido en los procesos biológicos.

Los efectos del ruido en los procesos biológicos, las reacciones psicomotoras y los trastornos del sueño han sido objeto de varias investigaciones de laboratorio desde los años setenta, siendo la hipoacusia una dolencia que puede relacionarse directamente con el ruido. Otra afección médica innegable es la sordera crónica inducida por la exposición al ruido; las investigaciones epidemiológicas y hospitalarias suelen mostrar una conexión entre la psicosis paranoide y esta afección. (A, T., & y E K, M. L. 1977).

Según la Organización Mundial de la Salud, un tercio de la población mundial y el 75% de quienes viven en ciudades industrializadas experimentan algún grado de sordera como consecuencia del ruido (Domínguez Ruiz, 2014), y tanto el ruido como la contaminación acústica aumentan un decibelio anualmente, sobre todo en el entorno producido en las ciudades. Este aumento provoca un cambio gradual en el espectro auditivo de las personas.

Los sectores industrial y laboral se encuentran entre los lugares de trabajo más expuestos, según otras organizaciones, y el ruido es uno de los agentes contaminantes más prevalentes y en continua expansión que provoca alteraciones en la salud humana.

Sorprendentemente, la enfermedad profesional número uno en nuestra nación según la categorización del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), con 15% de los casos registrados, es la hipoacusia “pérdida de la audición” (Escobar García, 2022).

Aproximadamente 360 millones de personas en todo el mundo sufren pérdida de audición o discapacidad auditiva, lo que se traduce en diversos grados de dificultad que van desde lo físico a lo social y psicológico (Deterioro cognitivo, s/f).

Según la Organización Panamericana de la Salud en Latinoamérica, algo más del 17% de los empleados que trabajan ocho horas al día, cinco días a la semana, con una exposición que oscila entre los 10 y los 15 años, experimentan pérdida de audición. La Tabla 4 enumera las principales modificaciones para la audición y la salud que están directamente relacionadas con los niveles de ruido, además de la pérdida de audición.

Tabla 4. Principales efectos del ruido sobre la audición. Fuente: López-Fachal (2012).

Alteraciones en la salud debido a la exposición al ruido	Síntomas
Alteraciones fisiológicas en diferentes órganos, no solamente en el oído	Enfermedades del corazón, presión arterial, arritmias, sistema neurológico, agotamiento, dolores de cabeza e insomnio, entre otras).
Reducción del rendimiento.	Efectos en el desempeño de las tareas.
Fatiga.	Se describe como una elevación momentánea del umbral de audición. Tras un tiempo de reposo, se recupera.
Enmascaramiento.	Se produce cuando el ruido de fondo interfiere en la transmisión del habla. Como consecuencia, aumenta la carga de trabajo y disminuyen la productividad y la concentración.

Hipoacusia	La exposición repetida a ruidos fuertes puede dañar permanentemente el órgano de Corti, que es sensible a frecuencias entre 4000 y 6000 Hz.
Sordera Profesional.	Si la pérdida de audición es lo suficientemente grave como para afectar a las frecuencias de conversación. Se desarrolla tras la exposición repetida a niveles de ruido muy elevados o a niveles inferiores (más de 80 dbA) durante un periodo prolongado resulta irreversible.

La Organización Mundial de la Salud informa de que aproximadamente 7 millones de personas mueren cada año en todo el mundo por enfermedades del corazón, 210.000 de estos casos se deben al ruido excesivo, y aproximadamente 35 millones de personas en Europa están expuestas a niveles de ruido perjudiciales. Por consiguiente, las enfermedades provocadas por la contaminación acústica tienen importantes repercusiones económicas y sociales.

2.4.2 Niveles de exposición al ruido.

Cualquier sonido no deseado que moleste o perjudique a los demás se considera ruido. El ruido ambiental es al que se refiere la Organización Mundial de la Salud (Berglund, 1999) al describir sus fuentes; también se denomina ruido residencial o ruido doméstico.

Como se ha indicado anteriormente, la posibilidad de que las personas expuestas de forma habitual a niveles de ruido excesivos sufran problemas de salud aumenta cada año debido a las condiciones de trabajo tanto humanas como materiales, ya sea en el ámbito social o profesional.

La norma NOM-011-STPS-2001 regula la exposición ocupacional al ruido en México y establece que, para un trabajador expuesto durante 8 horas diarias, el periodo de exposición y el nivel de ruido no pueden exceder los 90 dB(A). La organización NIOSH (EE.UU.), por su parte, sugiere un límite superior de 85 dB(A) y advierte que incluso este nivel supone un riesgo para la salud de los trabajadores. Los Límites Máximos Permisibles de Exposición para México y Estados Unidos se comparan en la Tabla 5, donde se demuestra que el límite establecido por la norma

de la STPS equivale a una cantidad de energía acústica casi cuatro veces superior a la aconsejada por el NIOSH (García Escobar, 2022).

Tabla 5. Comparativa de los límites máximos de exposición permitidos en México y Estados Unidos.

Fuente: García Escobar, 2022.

16 horas	87 dB(A)	85 dB(A)	82 dB(A)
8 horas	90 dB(A)	90 dB(A)	85 dB(A)
4 horas	93 dB(A)	95 dB(A)	88 dB(A)
2 horas	96 dB(A)	100 dB(A)	91 dB(A)
1 horas	99 dB(A)	105 dB(A)	94 dB(A)
30 minutos	102 dB(A)	110 dB(A)	97 dB(A)
15 minutos	105dB(A)	115 dB(A)	100 dB(A)
Tasa de Intercambio:	3 dB(A)	5 dB(A)	3 dB(A)

Debido a la atención, la tensión, el cansancio y otras alteraciones, la exposición a niveles de ruido superiores a 85 dB(A) puede aumentar el riesgo de accidentes laborales (Escobar Garca, 2022). En la Tabla 6 se clasifican los niveles de ruido medidos en decibelios y sus características especiales.

Tabla 6. Propiedades de los niveles de ruido. Fuente: García-Saenz, 2003.

dB(A)	Características especiales
130	A una distancia de unos 10 metros de un avión, este nivel de ruido es increíblemente doloroso y desagradable.
120	Resulta extremadamente peligroso, por lo que es necesario utilizar protección auditiva. El motor de un avión que viaja a 50 metros por segundo es el que produce tal ruido.
110	Son desagradables y peligrosos. Ocurren con frecuencia en conciertos de rock, en discotecas y a 100 metros del aterrizaje de un avión.
90	Es una atmósfera muy ruidosa y peligrosa si la exposición es prolongada. Es el nivel de ruido que puede oírse a unos 10 metros de distancia cuando un gran vehículo circula a una velocidad de 60 km/h.
80	Corresponde a entornos muy ruidosos, como una calle concurrida o

	algunos electrodomésticos como aspiradoras o lavadoras.
70	Son un entorno ruidoso típico de muchos bares, trenes y coches, así como de los centros comerciales.
60	El volumen de voz típico en una conversación informal es comparable al de un entorno con poco ruido.
50	Este es el nivel típico en un espacio de estudio. Aunque sigue interrumpiendo el sueño, simboliza un entorno tranquilo.
40	Son adecuados para mantener el sueño porque son indicativos de un entorno tranquilo.
Menor o igual a 30	Ambiente silenciosos.

2.4.3 Confort acústico.

Hace referencia al estado en el cual una persona se siente relajada y a gusto mientras participa en una actividad concreta porque el nivel de ruido generado por sus actividades es adecuado y es improbable que tenga un impacto negativo en su salud (AcousticLab, 2021).

El nivel sonoro que no molesta, no perturba y no perjudica directamente la salud también se conoce como confort acústico.

El confort acústico también se refiere al nivel sonoro que no molesta, no perturba y no perjudica de algún modo a la salud.

En la figura 7 se muestra el nivel de confort recomendado por la Organización Mundial de la Salud, 55 dB, junto con algunas de las consecuencias negativas para la salud de superar este nivel.

El confort acústico puede definirse desde la perspectiva de un entorno ocupacional como el nivel de ruido que está por debajo de las normas reglamentarias especificadas que pueden ser potencialmente perjudiciales para la salud. Además, los empleados que vayan a estar sometidos a este nivel de ruido

deben encontrarlo confortable (AcousticLab, 2021).

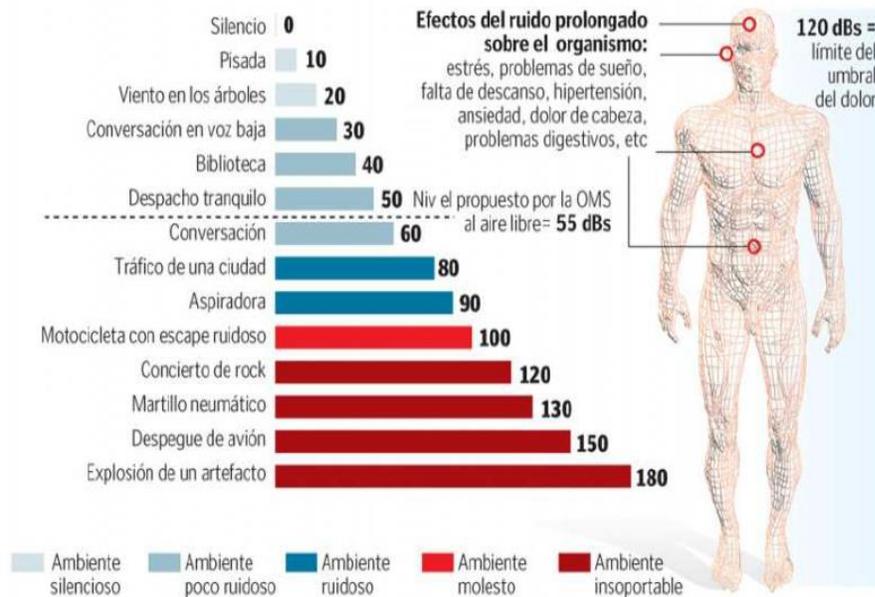


Figura 7. Impacto sobre la salud y percepción de los niveles de ruido. Fuente: instituto Botanical.

En consecuencia, la gestión del ruido es una de las cuestiones más preocupantes a las que se enfrenta la población en general, y puesto que nuestras actividades rutinarias e infraestructura contribuyen en gran medida al ruido, al parecer nuestras actividades nos obligan a vivir inmersos en un contexto en el que los sonidos se vuelven agresivos para el medio ambiente. (Manuel et al. 2011, 2011).

Se han empleado numerosas técnicas de construcción para reducir los niveles de ruido en el entorno construido como respuesta a los dos problemas en expansión de la contaminación acústica y atmosférica tratados en este capítulo. En algunos estudios se incluyeron en sus componentes materiales que, por sus propiedades acústicas, garantizan una disminución de los niveles de ruido, siendo el caucho reciclado uno de esos materiales (ETRMA, 2010). El Instituto de Biomecánica de Valencia afirma que, a pesar de su composición, sus investigaciones demuestran que el uso de la goma triturada en un entorno típico no pone en peligro el medio ambiente ni la salud pública (SERDICAN, 2016; Ibérica, 2016).

En este estudio se caracteriza el comportamiento acústico de un panel fabricado con gránulos de caucho triturado de 1 a 3 mm en combinación de una resina

empleada como aglutinante. El proceso de fabricación se simplificó al prescindir de la sinterización o el prensado a alta temperatura. Para lograr este objetivo, se describe el procedimiento de ensayo, se documenta y compara la capacidad de absorción acústica del panel de caucho con un panel de las mismas características, pero con un material acústico estándar, como lo son las esponjas de poliuretano.

3. ANTECEDENTES.

En los antecedentes históricos se revisan principalmente los trabajos de López-Recuero (1999) Maderuelo-Sanz, Rodríguez-Montejo (2003), Sanchis (2018) y Lopez-Fachal (2012), los cuales describen materiales acústicos y sus principales características, así como los fundamentos de la acústica, se hace un recorrido histórico a lo que ha sido la caracterización acústica de los materiales, centrandó la atención en el caucho proveniente del reciclaje de llantas del mismo modo se revisan trabajos relevantes que se han desarrollado recientemente con respecto a este tipo de materiales y cuyo fin han sido introducirlos en la construcción actual.

Así mismo se realiza una breve descripción de los términos, conceptos y características referidos a este proyecto para mostrar un panorama general del tema que se aborda.

3.1 Fundamentos de la acústica.

La acústica es la ciencia que estudia las propiedades de las vibraciones en un medio susceptible de generar y propagar sonidos audibles o no audibles. Esta ciencia natural se ocupa de los fenómenos y manifestaciones sonoras perceptibles por el oído humano; estudia los fenómenos de vibración considerando su origen, su propagación y sus efectos.

Es una de las ciencias más antiguas de la humanidad, sus orígenes se remontan a la época clásica en el siglo VI a.C. y I d.C., particularmente en Grecia y Roma. Su primer estudio formal fue realizado por Pitágoras (569-475 a. C.), relacionado con la comprensión de los sonidos musicales, trata de entender por qué unos sonidos resultan más agradables y bonitos que otros.

Un siglo después Aristóteles hacia el año 384-322 a. C descubre que el sonido se compones de contracciones y expansiones el aire.

El arquitecto romano Marco Vitrubio Polión (c. 80 a. C.-70 a. C.-15 a. C.) hacia el año 20 a.C. escribiría el primer tratado sobre acústica.

Ya entrada la revolución científica del renacimiento fue cuando se comenzaron a descubrir se comenzaron a descubrir las leyes que rigen el sonido, gracias a los estudios de cuerdas vibrantes de Galileo Galilei (1564-1642) y Marin Mersenne (1588-1648).

Posteriormente vendría Isaac Newton (1642-1727) y más adelante en el siglo XIX los llamados “gigantes de la acústica” eran Helmholtz en Alemania, que consolidó la acústica fisiológica, y Lord Rayleigh en Inglaterra, en su monumental obra: La teoría del sonido. También durante ese siglo, Wheatstone, Ohm y Henry desarrollaron la analogía entre electricidad y acústica.

3.1.1 Ruido y sonido.

El sonido es cualquier variación de presión sobre la presión atmosférica, que el oído puede detectar. Está definido por una onda de energía mecánica que se propaga a través de un medio.

De acuerdo a la Directiva Europea de ruido ambiental, el ruido es definido como: “sonido no deseado o nocivo generado por la actividad humana en el exterior, incluido el ruido emitido por medios de transporte, tráfico de carretera, tráfico ferroviario, tráfico aéreo y por zonas o edificios industriales” (DOCE, 2002).

Por tanto, por definición, el ruido es un "sonido no deseado" que percibe o escucha una persona.

Dado que un sonido puede ser tanto molesto (ruido) como no molesto (sonido), la distinción entre ambos es una cuestión subjetiva.

3.1.2 Sonidos graves.

Los sonidos que se encuentran entre los 20 Hz hasta 20.000 Hz, son los que el oído humano tiene la capacidad de percibir a estas amplitudes se les denomina

“espectro audible”. No obstante, este margen varía según cada persona y se reduce con la edad.

En la naturaleza existen otros sonidos en frecuencias que solo se pueden detectar actualmente por medios tecnológicos y que el ser humano no es capaz de escuchar, sino solamente algunas especies animales que los emiten y perciben.

En las frecuencias audibles para el oído humano están los sonidos graves que son frecuencias, tonos y rangos bajos. Su rango se encuentra entre los 20 a los 500 Hz.

Un ejemplo de estos sonidos sería un cantante masculino adulto en el canto clásico, el contrabajo, tuba, trombón, violonchelo entre otros.

3.1.3 Sonidos agudos.

Los sonidos agudos corresponden a frecuencias y tonos altos. El rango de su frecuencia se comprende entre los 2.000 Hz. hasta los 20.000 Hz.

Un ejemplo de estos sonidos sería el canto de los niños en el canto clásico, los instrumentos como flautas trompeta arpa o guitarra.

3.1.4 Vibración.

Una vibración puede describirse como un movimiento oscilatorio de un cuerpo provocado por la oscilación de las partículas que lo forman, respecto a una posición de equilibrio.

Las vibraciones pueden clasificarse según la parte del cuerpo que afectan:

- Vibraciones globales (afectan todo del cuerpo)
- Vibraciones parciales (afectan a subsistemas del cuerpo, las más conocidas son las vibraciones mano-brazo).

3.1.5 Onda acústica.

Una onda acústica es una onda mecánica de energía que provoca cambios de presión en el medio por el que se propaga. Está determinada por las siguientes características:

3.2 Transmisión del ruido

La coexistencia de estos tres componentes es necesaria para la transmisión del sonido:

- 1.- Emisor o fuente sonora: Que produzca las vibraciones.
- 2.- Medio material de transmisión: Para que prolongue la onda
- 3.- Receptor: Donde el cerebro produzca la sensación auditiva, que nos permite percibirla (López-Fachal, 2012).

3.3 Ruido de impacto.

El ruido de impacto es clasificado como impulsivo y se genera a consecuencia de un golpe provocado por algún objeto, todos los elementos constructivos conectados tales como muros, pilares, paredes etc., se convierten en elementos transmisores de vibraciones o también llamados transmisores de ruido aéreo.

3.4 Presión acústica.

Es la fluctuación alterna de la presión estática provocada por el movimiento en el aire provocado por las ondas sonoras. Como resultado de una onda sonora que viaja por el aire, es el aumento repentino de la presión por encima de la presión atmosférica que se produce en un lugar.

La presión sonora o acústica comienza con una vibración en el aire que dependerá de la fuente emisora, por ejemplo, la conversación entre dos personas hace vibrar el aire muy poco en comparación con el motor de un avión que lo hace vibrar mucho más. Estas vibraciones crean ondas de presión que atraviesan el aire, extendiéndose en todas las direcciones a medida que avanza.

3.5 Reflexión Acústica.

La reflexión acústica es el fenómeno por el cual una onda acústica se refleja con un ángulo igual al de incidencia en una superficie que separa dos medios como se muestra en la figura 9.

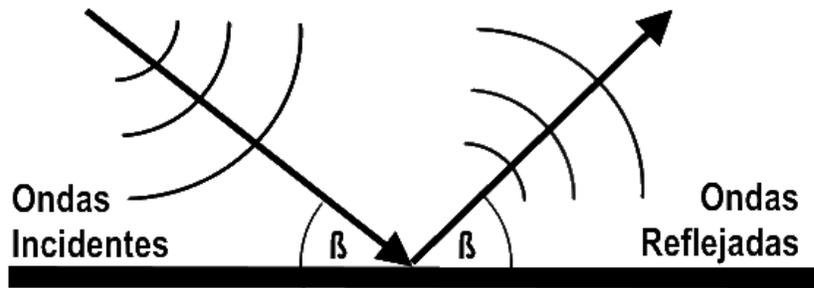


Figura 9. Fenómeno de la reflexión acústica. Fuente: universo del sonido (2023).

Las superficies reflectantes cerca de un receptor afectarán los sonidos recibidos por el receptor; de igual manera la superficie reflectante afecta un sonido emitido por una fuente emisora y las propiedades direccionales de dicha fuente.

3.6 Reverberación del sonido.

Es un fenómeno sonoro que ocurre cuando un sonido es reflejado en una superficie, haciendo que el mismo permanezca ligeramente más tiempo, este efecto de reflexión del ruido continuará incluso aunque haya dejado de emitirse.

Las ondas sonoras se reflejan, lo que hace que el sonido continúe dentro del recinto, por lo cual la onda reflejada llega al oído con una diferencia de menos 0.1 segundos con respecto a la onda directa, dando al oído la impresión de que la onda reflejada tiene una duración mayor que la onda directa.

El término "campo sonoro reverberante" se refiere tanto al fenómeno de la reverberación como al entorno en el que tiene lugar. En este entorno, el nivel de ruido se ve influido por el tamaño de la sala, así como por la capacidad de absorción acústica de los materiales.

El tiempo de reverberación (TR) es la magnitud que permite cuantificar la cantidad de reverberación de la sala.

3.7 Tiempo de Reverberación (Tr).

El tiempo de reverberación, que puede calcularse mediante una fórmula desarrollada por el físico estadounidense Wallace Clement Sabine, es la cantidad de tiempo que transcurre en un espacio concreto entre el momento en que se crea un sonido y el momento en que su intensidad disminuye una millonésima parte de

la que tenía inicialmente. La Ecuación (1) establece el tiempo de reverberación (Sanchis, 2008).

$$\text{Ecuación (1)} \quad TR = 0.161 \frac{V}{A\alpha} \quad (1)$$

Dónde

TR = Tiempo de Reverberación

V = Volumen del local en m³

Aα = Area de absorcion del material en m²

α = Coefiente de Absorción

Siendo 0.161 el valor constante para una temperatura de 20°C.

El área de absorción de una superficie se determina multiplicando el coeficiente de absorción del material expresado en Alfa (α) por los metros cuadrados del propio material.

Auditivamente la reverberación es percibida como una prolongación decadente del sonido de la voz después que esta ha cesado de emitir sonido (Aguilar, 2018).

Sabine diseñó la fórmula para calcular el tiempo de reverberación en una sala con una distribución uniforme de material absorbente. La fórmula relaciona el volumen de la habitación (V), el área da la misma (A) y la absorción sonora total (a).

Su estudio determino que, si los materiales de las paredes de un recinto o sala son altamente reflejantes, el tiempo de reverberación es muy alto y su calidad acústica no es buena, por lo que la comunicación en estas habitaciones es difícil.

El tiempo de reverberación es un índice muy útil para evaluar la calidad acústica de un local. Para lograr un buen tiempo de reverberación se deben utilizar materiales absorbentes.

3.8 Coeficiente de absorción.

El porcentaje de energía acústica que absorbe una superficie se conoce como coeficiente de absorción.

3.9 Absorción acústica.

La energía sonora generada en un lugar determinado se puede transformar en otro tipo de energía no acústica, con la ayuda de ciertos tipos de materiales componentes o sistemas constructivos, generalmente la energía que producen los ruidos y sonidos es transformada con la implantación de estos sistemas acústicos en energía calórica en forma de calor de vapor con un valor despreciable, a esto se le conoce como absorción acústica.

Tradicionalmente, los materiales absorbentes porosos más utilizados en la construcción han sido la lana de roca y la fibra de vidrio, que son productos de filamentos naturales obtenidos mediante procesos industriales. En la Tabla 7 se muestran los coeficientes de absorción de materiales absorbentes más comunes de la construcción.

Tabla 7. Coeficientes de absorción de materiales especiales. Fuente: (Recuero López, 1992).

DESCRIPCIÓN	FRECUENCIA EN HERTZ						
	Espesor (cm)	125	250	500	1000	2000	4000
Fibra de vidrio	4	0.200	0.350	0.650	0.800	0.750	0.650
Fibra de vidrio	5	0.380	0.630	0.780	0.870	0.830	0.770
Fibra de vidrio	6			0.850			
Fibra de vidrio	10	0.750	0.960	0.900	0.800	0.840	0.740
Lana mineral a granel	2.5	0.060	0.190	0.390	0.540	0.60	0.750
Lana mineral a granel	10	0.420	0.660	0.730	0.740	0.760	0.800
Lana mineral	15	0.470	0.530	0.600	0.620	0.580	0.560

Aunque estas técnicas se desarrollaron originalmente para controlar la calidad acústica de una sala para reproducir bien la palabra hablada o la música, tienen intervenciones muy interesantes en términos de control de ruido. También se utilizan como complemento de los sistemas de aislamiento, aumentando su eficiencia. Para comprender este fenómeno, se considera el siguiente ejemplo: si se vierte agua en una esponja, debido a la porosidad de la esponja, parte del agua se absorbe y parte pasa a través de ella. Lo mismo sucede con las ondas de sonido frente a la esponja,

algunas son absorbidas y otras pasan, como se muestra en la Figura 10. Cuanto más grande es la esponja, más agua o sonido puede absorber. (C.E. Boschi, S.G. Acosta, A.F. González, 2022).

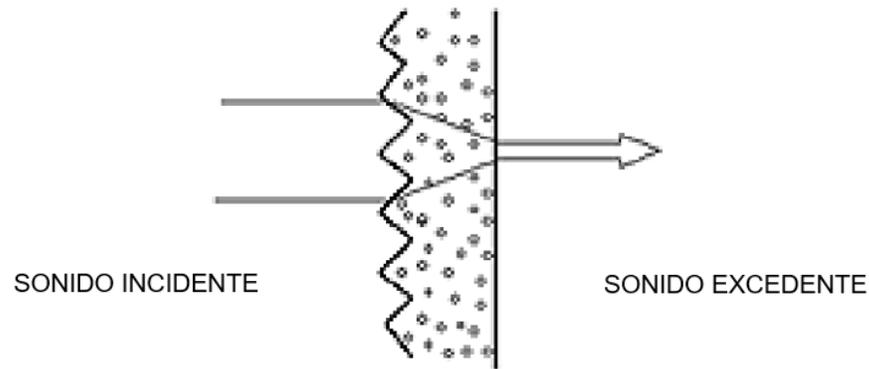


Figura 10. Esquema de incidencia de una onda acústica sobre un cuerpo de baja densidad.

3.10 Aislamiento acústico.

La absorción acústica y el aislamiento acústico no son lo mismo. Mientras que la absorción acústica se refiere a la capacidad de un material para absorber la energía sonora que incide sobre él, el aislamiento acústico se refiere a la capacidad de un material para no transmitir la energía sonora (Morales Garca, A., & Oviedo Castro, I.A., 2021).

El aislamiento acústico se describe como un conjunto de procedimientos utilizados para reducir y evitar la transmisión de ruido, para aislar acústicamente, se pueden utilizar muchos métodos.

Según Claude Rougeron el hormigón, la terracota y el yeso son buenos aislantes acústicos, sin embargo, no se les puede clasificar entre los materiales aislantes. En la Tabla 8 se clasifican los coeficientes de absorción de algunos de los elementos y materiales más utilizados en la construcción.

Tabla 8. Coeficientes de absorción de materiales más comunes. Fuente: (INIFED 2014).

DESCRIPCIÓN	FRECUENCIA DE HERTZ					
	125	250	500	1000	2000	4000
Block de concreto sin pintar	0.360	0.440	0.310	0.290	0.390	0.250
Block de concreto pintado	0.100	0.050	0.060	0.070	0.090	0.080
Tabique expuesto sin vidriar y sin pintar	0.030	0.030	0.030	0.040	0.050	0.070
Pisos de concreto o terrazo	0.010	0.010	0.015	0.020	0.020	0.020
Concreto aparente sin pintar	0.010	0.010	0.020	0.020	0.020	0.020

Dentro del aislamiento podemos distinguir entre aislamiento a ruido aéreo, entre recintos y de fachadas, y aislamiento a ruido de impactos.

Para el aislamiento siempre se debe considerar dos recintos diferentes; es decir, considerar que el sonido que se genera en un recinto (recinto emisor) se transmite y es percibido en otro recinto (recinto receptor).



Figura 11. Local emisor y local receptor.

En la Figura 11 se muestra un material denso en muro divisorio y ligero en laterales que permiten una transmisión lateral, otro muro lateral tangencial en relación con el divisorio donde se recomienda un tratamiento acústico.

Otras de las principales afectaciones entre los usuarios son causadas por las particiones horizontales en los edificios que generan los ruidos de impacto. Los ruidos de impacto son producto del golpeo de un objeto, todos los elementos constructivos conectados como paredes ventanas pisos losas etc., se convierten en elementos transmisores de vibraciones, en consecuencia, estas vibraciones se convierten a su vez en transmisores de ruido aéreo.

3.11 Instrumento de medición del ruido y sus características.

3.11.1 Sonómetro.

Un instrumento para medir los niveles de presión sonora es el sonómetro. El sonómetro mide específicamente el nivel de ruido en un lugar y momento determinados, procedente de diversas fuentes sonoras. El decibelio (dB) es la unidad de medida que emplea el sonómetro.

El sonómetro mide el ruido generado por la realización de una determinada actividad y ofrece mediciones objetivas y repetibles de los niveles de presión sonora al responder al sonido de forma similar a la del oído humano.

El equipo utiliza una escala de ponderación A para filtrar sólo las frecuencias sonoras que el oído puede percibir, o que hacen que la respuesta en frecuencia del sonómetro sea equivalente o igual a la del oído humano, con el fin de medir en qué medida el ruido afecta a la salud auditiva.

La mayoría de los ruidos que se miden tienen niveles temporales variables. Si estas fluctuaciones son rápidas no será posible obtener una lectura específica en el sonómetro, por lo que se determinan unas constantes de tiempo que controlan la reacción del aparato con forma a los cambios de nivel del ruido.

Las constantes de tiempo o promediaciones del sonómetro están estandarizadas internacionalmente, con el fin de evitar diferencias de lecturas sobre señales sonoras idénticas, de acuerdo a la clasificación que se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Identificación de las diversas opciones de medición disponibles para los sonómetros. Fuente: López-Fachal, (2012).

Designación	Características y usos	Símbolo	Concepto medio	Constante de tiempo
Lento (slow)	Promediación sobre 1s. Se utiliza cuando la señal fluctúa mucho.	S	Valor eficaz	1s (segundo)
Rápido (fast)	Sobre 125 ms (milisegundos). Se emplea para señales estacionarias.	F	Valor eficaz	125 ms (milisegundos)
Impulso (Impulse)	Promediación de subida 35 ms. promediación de caída 1s. Con él se cuantifican las señales impulsivas, que son señales transitorias que escucha el oído humano.	I	Valor eficaz	35 ms (milisegundos)

Pico (Peak)	Cuando es necesario girar a constantes de tiempo más rápidas que las mencionadas anteriormente, se utilizan rectificadores de valor de pico con tiempos de subida del orden de 50 microsegundos.	P	Valor eficaz	Menor de 100µs (microsegundos)
--------------------	--	----------	--------------	--

3.11.2 Decibelio (dB).

El "decibelio" (dB) es la unidad de medida fundamental utilizada en acústica para evaluar los niveles de potencia de las fuentes sonoras, las pérdidas por transmisión del sonido a través de paredes y el nivel de intensidad del ruido.

Definido como "decibelio (dB)" no es una unidad de medida absoluta, sino que se relaciona con una magnitud de referencia; como 10 veces el logaritmo decimal del cociente entre una cantidad dada y otra que se toma como referencia:

$$dB = 10 \lg(p/p_0)^2 \pi r^2; dB = 10 \lg(W/W_0); dB = 10 \lg(I/I_0)$$

3.11.3 Ponderación de frecuencias.

Como ya se ha mencionado, el oído humano no es igual de sensible a los ruidos de distintas frecuencias. El sistema de medición del sonido debe tener en cuenta esta variación de la sensibilidad en la gama audible para determinar con precisión el nivel de exposición al ruido experimentado por las personas. Para ello se han creado curvas de ponderación de frecuencias, en realidad "filtros de ponderación de frecuencias".

3.12 Materiales acústicos empleados en la construcción.

Los materiales acústicos empleados en la construcción se pueden clasificar como indica la Figura 12 de acuerdo a sus propiedades físicas y estructurales con que están conformados. Las propiedades de absorber o reflejar son las principales características de una estructura y un material empleados para tratamiento acústicos.

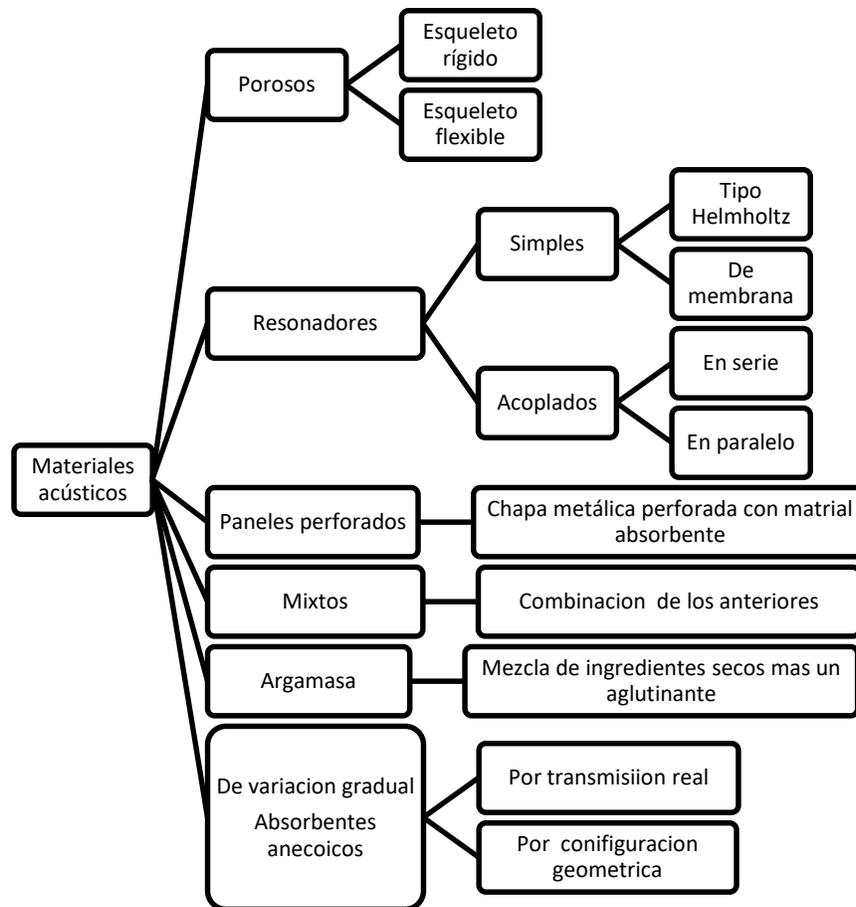


Figura 12. Figura esquema de materiales absorbentes según López-Recuerdo (2001).

Otros autores clasifican los materiales dependiendo de su naturaleza las tipologías usadas son:

Materiales fibrosos: obtenidos a partir de fibras o textiles.

Materiales porosos: generados con triturados o áridos.

Materiales perforados: Constan de bases que se pueden obtener a partir de diferentes materias primas: plástico reciclado, madera triturada, corcho, material vegetal o neumáticos reciclados con la característica de tener perforaciones con diferentes geometrías como se observa en la Figura 13 (Esquerdo Lloret, 2015).



Figura 13. Materiales empleados como absorbentes acústicos. Fuente: Esquerdo Lloret (2015).

3.12.1 Materiales porosos.

Son aquellos que cuentan con cavidades interconectadas en su interior denominadas poros. El sonido se dispersa por estos espacios como si fuera un fluido viscoso, y la pérdida de energía se debe a la fricción del sonido con las paredes.

Hay fricción cuando existe una conexión entre los poros del material, lo que provoca una pérdida de energía. Si no hay conexión, no hay fricción, por lo que no hay pérdida de energía. En la Figura 14 se muestran dos materiales porosos, uno con una estructura conectada y otro con una estructura separada.

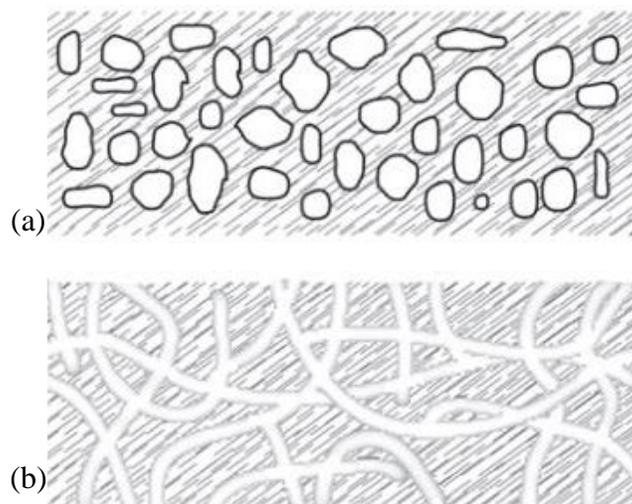


Figura 14. Material poroso: (a) poros sin conexión, (b) poros interconectados. Fuente: T. J. Cox and P. D'Antonio (2009).

El grosor y la distancia de separación con la pared rígida de estos materiales porosos también influyen considerablemente en sus características y en función de sus propiedades, pueden dividirse en dos categorías: poroelásticos y porosos rígidos.

Según la Tabla 10, los materiales absorbentes porosos también pueden clasificarse como fibrosos, celulares o granulares.

Tabla 10. Clasificación de los materiales absorbentes porosos. Fuente: Taborga (2022).

Materiales fibrosos.	Están formados por una red de túneles creados por los espacios entre las fibras que componen el material. Los materiales fibrosos, como las fibras de vidrio y minerales, pueden estar contruidos con fibras naturales o sintéticas.
Materiales celulares	Los materiales fabricados a partir de poliuretano como las esponjas aislantes y termo-acústicas de celdas abiertas y cerrada son materiales celulares.
Los materiales granulares	Consisten en cuerpos macroscópicos. Relativamente rígidos, incluyen algunas variedades de asfalto, hormigón poroso, arcilla granular, arena, grava, lino, ceniza y suelos. Por lo tanto, las características acústicas de los materiales absorbentes granulares tienen un papel importante en la propagación del sonido exterior.

3.12.2 Esponjas de poliuretano.

La espuma de poliuretano, uno de los productos más utilizados hoy en día en el ámbito de la construcción al ser un absorbete poroso. Se fabrica a partir del petróleo, que es también el material básico utilizado para crear la gran mayoría de los polímeros. Sin embargo, esta fuente es finita y no renovable, y en muchos casos, tanto los métodos de síntesis como los materiales generados tienen importantes efectos negativos sobre el medio ambiente (Mazo et al., 2009).

A pesar de tener más de 62 años y de haber sido patentado por la actual empresa Bayer en 1937, el poliuretano sigue siendo uno de los materiales de mayor éxito entre las distintas especialidades sintéticas. Durante el Congreso Mundial del Poliuretano celebrado en Amsterdam en octubre de 1997, se dijo que el uso mundial anual de poliuretano se acercaba a los siete millones de toneladas, con una previsión de crecimiento del 6% en los próximos años. La demanda en Europa y Norteamérica continuará en un alto nivel, en tanto se espera un incremento en

América Latina y el Continente asiático (De Alva Salazar, 1999).

Por estas razones, es viable la inversión en la investigación de materiales reciclados que sean competitivos con los materiales convencionales y que no hayan sido creados a partir de cero.

3.12.3 Esponjas de celda abierta o cerrada.

De acuerdo con IPUR una Asociación de la Industria del Poliuretano Rígido, las esponjas de poliuretano cuentan con propiedades térmicas y acústicas. En este apartado se muestran las características principales de la espuma de celda cerrada y celda abierta que predominan en el mercado.

La espuma o esponja de poliuretano de celda cerrada o abierta son un producto celular. El rendimiento de este material depende de la estructura de la célula y especialmente del contenido de sus celdas, abiertas o cerradas, las cuales tendrán una influencia significativa en sus aplicaciones finales.

Estos dos tipos de espuma pueden parecer similares, pero son productos diferentes y por tanto no deben utilizarse de igual manera debido a sus propiedades y rendimiento completamente diferentes (IPUR, 2020).

Una espuma de celda cerrada contiene más del 90% de celdas cerradas, mientras que la espuma de célula abierta, usualmente está por debajo del 20%, pudiendo presentar proporciones más altas. En la Figura 15 se muestran las estructuras internas de una esponja de celda cerrada y otra de celdas abiertas (IPUR, 2016).

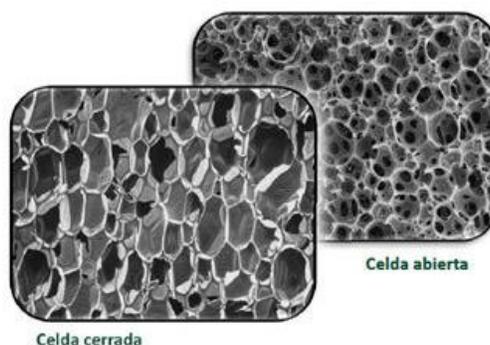


Figura 15. Estructuras internas de una esponja de celda cerrada y otra de celdas abiertas. Fuente; IPUR, 2020.

3.12.4 Aplicaciones del poliuretano en la construcción.

Más de tres cuartas partes del consumo mundial de poliuretano están en forma de espumas. Sea en la industria de la construcción, del vestido o de la fabricación de automóviles y neumáticos, ha sido un material práctico y útil, resistente y durable. En ambos casos, la espuma generalmente está oculta detrás de otros materiales tal como se observa en la Figura 16 por ejemplo las espumas rígidas están dentro de las paredes de mampostería, si se usa como aislamiento térmico en la construcción civil; se encuentran espumas flexibles, dentro de la tapicería de muebles para el hogar. Se utiliza, sobre todo, para rellenar y sellar huecos, montar puertas y ventanas y también, como aislante térmico y acústico.

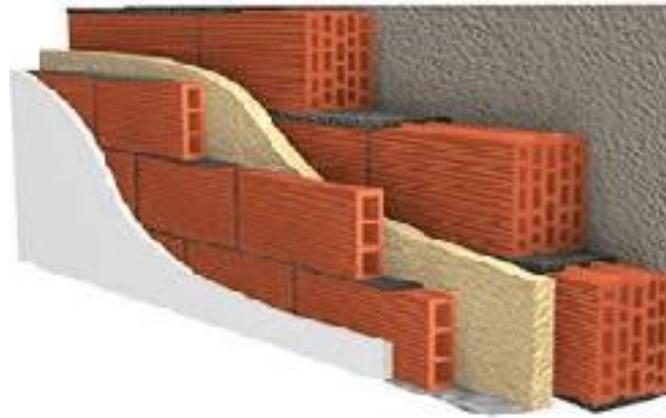


Figura 16. Aplicación de espuma de poliuretano dentro de un muro doble.

3.12.5 Coeficiente de absorción de las esponjas de poliuretano.

El coeficiente de absorción de una esponja de poliuretano está determinado principalmente por su porosidad, densidad y espesor.

La capacidad de este material para absorber el sonido se basa en la resistencia que ofrece al flujo de aire. Para ello, reduce la amplitud de la onda sonora y convierte la energía sonora en calor (Taborga, M., 2022).

La clasificación de estos materiales porosos es de acuerdo con la capacidad de un fluido externo, como el aire, de circular a través de ellos, a esto se le conoce como: Resistividad al flujo de aire, de acuerdo a la UNE EN 29053. En la Figura 17 podemos distinguir los diferentes tipos de poros y su coeficiente de absorción:

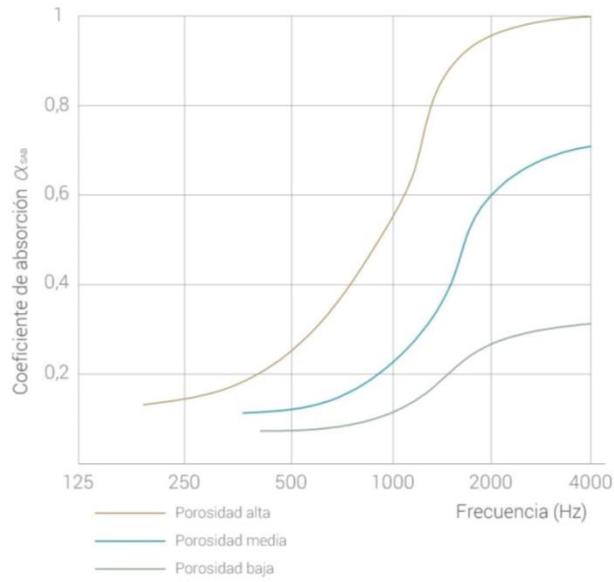


Figura 17. Coeficiente de absorción del material poroso según su grado de porosidad. Fuente: Taborga (2022).

3.12.6 Resonadores Helmholtz absorción por cavidad simple.

Los resonadores de Helmholtz están formados por una cavidad de aire en donde la onda sonora entra por una pequeña abertura en forma de cuello a dicha cavidad. Como se ve en la Figura 18, el aire del interior de la cavidad actúa como un muelle y se desplaza como un bloque de masa sobre el aire del cuello, drenando energía de la onda acústica (Fernández et al., 2011).

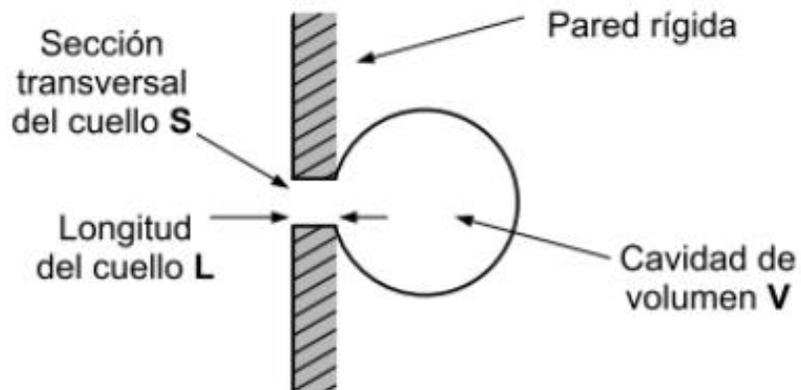


Figura 18. Diseño básico de un resonador Helmholtz de una sola cavidad simple. Fuente: Fernández et al., (2011).

Un sistema resonante con un pico de absorción en la frecuencia de resonancia f_0 se produce por la masa del aire del cuello en combinación con la rigidez del aire de la cavidad. En este caso, la expresión teórica para el cálculo de f_0 es la siguiente:

$$F_0 = \frac{c}{2*\pi} * \sqrt{\frac{S}{L_{EF}*V}} \quad (2)$$

$F_0 = \text{Frecuencia en H}$

$S =$ Sección transversal del cuello (cm²)

Que está dada por la superficie de la perforación está dada por:

$$S = \pi * r^2 \quad (3)$$

$L =$ Longitud efectiva del cuello (cm)

Longitud efectiva (L_{EF}) está dada por:

$$L_{EF} = L + 1.7 * r \quad (4)$$

Siendo r el radio de la perforación o cuello

Siendo $C=340$ m/s el valor de la velocidad del aire para una temperatura de 20°C.

Estos resonadores son elementos que muestran altos coeficientes de absorción a bajas frecuencias en un ancho de banda relativamente reducido, debido principalmente a la vibración de algunas estructuras. Como se observa en la figura 18 estos resonadores utilizan cavidades resonantes para convertir la energía acústica en energía mecánica.

3.12.7 Resonadores de Helmholtz de cavidad múltiple o sistemas de paneles perforados.

Es un sistema de paneles que presentan un alto rendimiento acústico sus propiedades acústicas están en función del tamaño forma y número de sus perforaciones, la distancia que hay entre centros de perforaciones, el espesor del panel y el espesor de la cavidad formada entre el panel y una pared donde esté colocado (Carbajo et al., 2022). A esta estructura se le puede adicionar un material

o elemento absorbente poroso dentro de las cavidades del panel, en este caso la colocación del elemento absorbente determinará la curva de absorción última del sistema.

La configuración de este tipo de resonador acústico está formado por un panel no poroso y rígido de espesor D , las perforaciones pueden ser circulares o de tipo rectangular (Fernández et al., 2011). Está dispuesto de manera que entre el panel y la pared rígida haya una cámara de aire de ancho d . La Figura 19 muestra la composición del resonador colocado sobre una pared rígida.

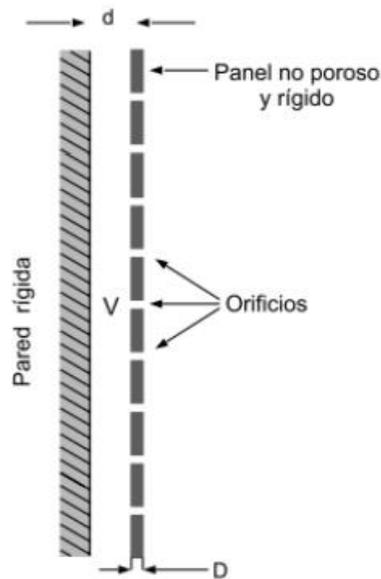


Figura 19. Resonador acústico de Helmholtz a base de paneles perforados. Fuente: Fernández et al., (2011)

Las ecuaciones utilizadas para esta unidad son las mismas que la (2), excepto que, en lugar de considerar la longitud del tubo, se cambia por el espesor del panel D . Entonces el volumen de aire encerrado es:

$$V = S_p * d \quad (5)$$

Donde S_p es la superficie del panel y d la distancia entre la pared y el panel. Se considerando ahora la relación entre la superficie del panel y la superficie de sus perforaciones:

$$p = S * S_p \quad (6)$$

Entonces la ecuación (2) cambia de esta forma:

$$F_0 = \frac{c}{2*\pi} * \sqrt{\frac{p}{D*d}} \quad (7)$$

Debido a la sintonización de estos sistemas, varias frecuencias de resonancia pueden estar muy próximas entre sí ampliando la banda de absorción. Según el grado de perforación, el absorbedor se comporta como una membrana o un absorbedor poroso. Los resonadores de Helmholtz se utilizan con mayor frecuencia en techos o paredes artificiales de metal perforado, madera o paneles de yeso. Es efectivo en frecuencias bajas de hasta 125Hz (Fernández González, 2016).

3.12.8 Materiales para argamasa.

Son morteros compuestos por una mezcla de agregados secos unidos por otros húmedos como las resinas y aglutinantes. Estos materiales acústicos se aplican en superficies continuas con un espesor determinado. Sus características acústicas están determinadas por los huecos que se generan entre las partículas de los agregados que le dan un cierto grado de porosidad, así como por su grosor.

3.12.9 Absorbentes suspendidos.

Se trata de paneles planos colocados verticalmente en filas continuas y suspendidos del techo como unidades individuales. En el mercado se encuentran disponibles diversas láminas, tableros, cajas huecas, conos, etc., que ofrecen diferentes coeficientes de absorción. Su absorción se calcula a partir de la absorción individual de cada unidad.

3.12.10 Sistemas de paneles rígidos.

Se colocan como techos flotantes o suspendidos mediante perfiles y elementos metálicos, y están compuestos por yeso fonoabsorbente a manera de paneles acústicos de instalación simple. Dichos materiales tienen como principales propiedades las cualidades que se describen a continuación:

- a) Cuanto más grueso es el panel, más sonido absorbe
- b) Presentan un coeficiente de absorción menor a bajas frecuencias.

c) El intersticio de aire entre el material y la pared rígida favorece el aumento de la absorción acústica del material.

3.13 Valorización de residuos.

En el transcurso de los últimos años, diversos investigadores de todo el mundo han desarrollado materiales derivados del reciclaje de residuos para su reutilización en la construcción como materiales con propiedades acústicas. (Ersoy y Küçük, 2009; Del Rey et al., 2011; Oldham et al., 2011).

Existe actualmente un gran número de materiales tradicionales de lanas minerales y espumas de poliuretano hasta las últimas tendencias, como diferentes tipos de láminas y fieltros, monocapa o sándwich, introducidos en configuraciones multicapa para obtener esta mejora llegando hasta la valorización de diferentes tipos de residuos (Lee y Changwhan, 2003; Schiavi et al., 2007a).

Al revalorizar los desechos, la industria de la construcción es una de las más importantes en absorber grandes cantidades de desechos propios de la construcción y otras industrias, por ejemplo, esta industria actualmente incorpora desechos en ladrillos, morteros y concretos, creando materiales más sostenibles. Estos nuevos productos no son más que compuestos, creados mediante la combinación de dos o más elementos con el objetivo de crear un material que supera a sus componentes individuales (Stumpf et al., 2013).

3.13.1 Materiales porosos granulares elastómericos provenientes del reciclado.

Las investigaciones sobre materiales porosos granulares elastómericos afirman que pueden ser empleados como alternativa a numerosos materiales absorbentes de naturaleza fibrosa o espumosa, en diversas aplicaciones para interior como para exterior.

Las propiedades que presentan estos materiales granulares son de gran importancia en muchas áreas de la acústica y control de ruido (Maderuelo-Sanz R et al., 2014). De dichos materiales se han generado estudios considerables sobre sus propiedades físicas y mecánicas al ser combinados con cemento (Neithalath et

al., 2004). Otros estudios han experimentado para transformar residuos elastoméricos en materiales de aislamiento acústico y térmico que pueden competir con productos comerciales (Benkreira et al., 2011).

Otros materiales provenientes del reciclado más estudiados son las migas de caucho (Pfretzschner y Rodríguez, 1999; Horoshenkov y Swift, 2001).

Los materiales granulares elastomericos provenientes del reciclado según los estudios citados presentan un buen comportamiento acústico como absorbentes y, además, unas buenas propiedades mecánicas y un bajo coste de fabricación, aspectos necesarios su reutilización en la construcción.

3.13.2 Caucho proveniente de los Neumáticos Fuera de Uso (NFU).

En todo el mundo, la cantidad de productos poliméricos usados aumenta cada año: la mayoría de ellos proviene de los neumáticos de automóviles usados. Aproximadamente entre el 65 y el 70 % del caucho producido en el mundo es utilizado para la fabricación de neumáticos cada año.

Esto da lugar a que se generen aproximadamente 17 millones de toneladas de neumáticos fuera de uso (NFU) de acuerdo a los informes de las mayores asociaciones de neumáticos y productos de caucho (Sienkiewicz et al., 2012; ETRMA, 2011; RMA, 2009).

Otros estudios afirman que el total de caucho de una llanta corresponde entre el 50 y el 70 % aproximado de su peso como se muestra en las figuras 20 y 21, esto da un aproximado de entre 7 y 9 millones de toneladas de caucho provenientes de NFU disponible cada año a nivel mundial (Rodríguez-Montejano, 2003).

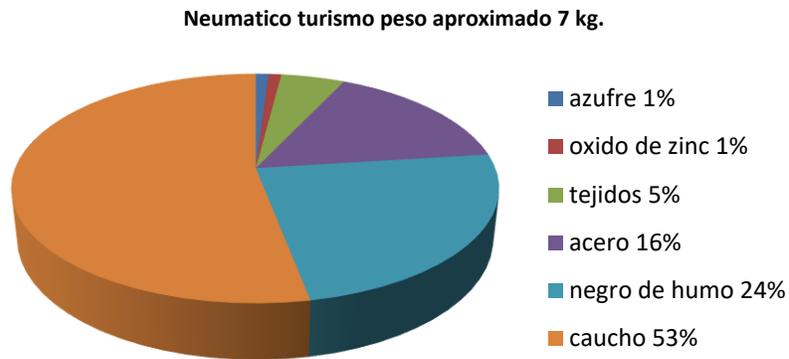


Figura 20. Composición química de los neumáticos en relación a su peso. Fuente: Rodríguez-Montejano (2003).



Figura 21. Composición química de los neumáticos en relación a su peso. Fuente: Rodríguez-Montejano (2003).

Es importante conocer la composición química de los neumáticos ya que de estos dependen sus posibilidades de reutilización. En el caso de poder aprovechar los componentes del neumático especialmente el reciclado.

Un neumático no solo se compone de caucho, sino también de acero y tejidos textiles, que le dan al neumático su forma definitiva y sus propiedades utilitarias (Pehlken y Muller, 2009; Sienkiewicz et al., 2012).

La presencia de estos dos componentes representa un problema complejo al momento de reciclar los NFU, ya que deben separarse del caucho durante el reciclaje del neumático y esto quiere la aplicación de procesos tecnológicamente muy complejos para obtener un producto nuevo derivado de las llantas de automóvil.

3.13.3 Reciclaje de los neumáticos fuera de uso.

El reciclaje de los neumáticos implica dar un nuevo uso al material o los materiales de que se compone, con el objetivo de ayudar a reducir el consumo de recursos. Esto se logra mediante procesos físico-químicos o mecánicos, en este proceso se somete al producto considerado desecho, a un tratamiento completo o parcial para obtener una materia prima diferente o un nuevo producto, devolviéndolo a al ciclo de vida útil. Las tecnologías de reciclaje se emplean, según Herrera-Sosa et al. (2015), ante la posibilidad de agotamiento de los recursos naturales en un sentido macroeconómico y para disponer eficientemente de los residuos. En la Figura 22 se describe el proceso mecánico del reciclaje de llantas.

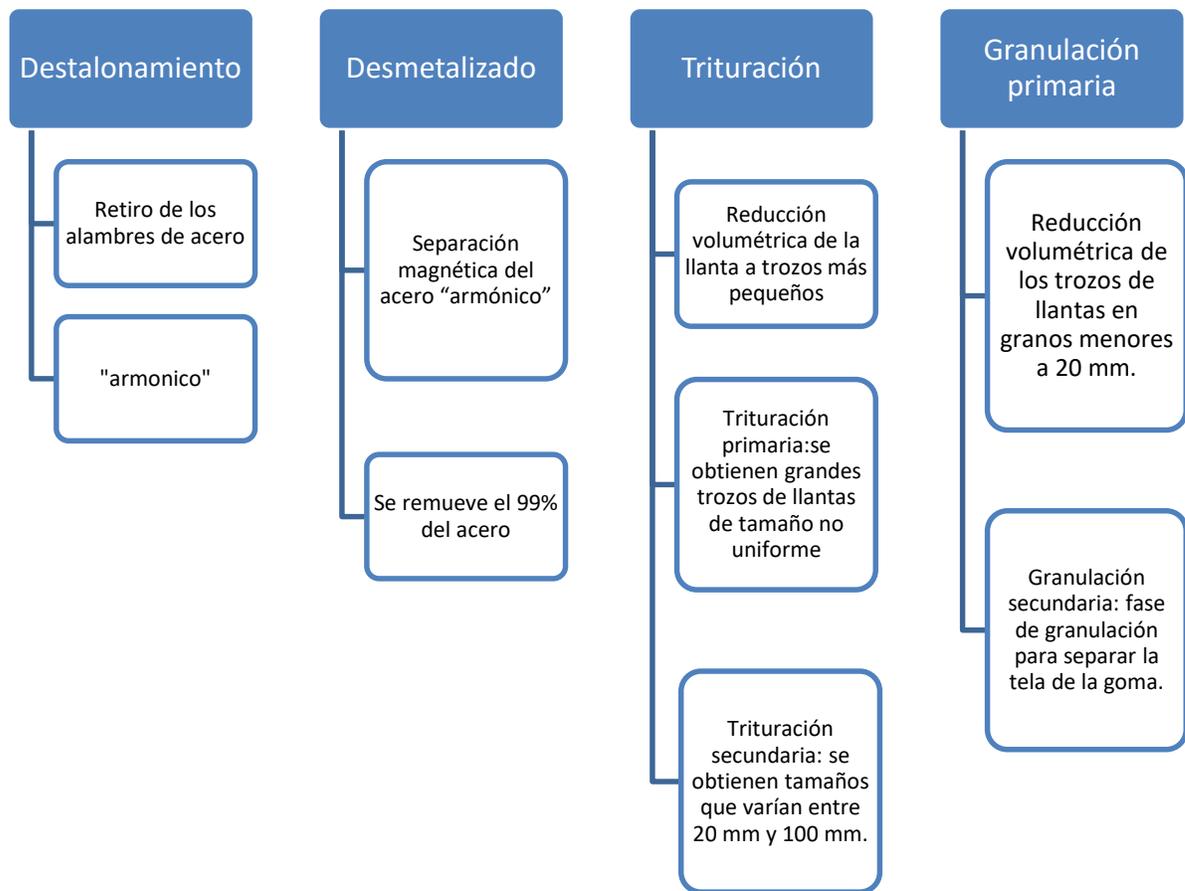


Figura 22. Proceso mecánico del reciclaje de llantas Fuente: Herrera-Sosa et al. (2015).

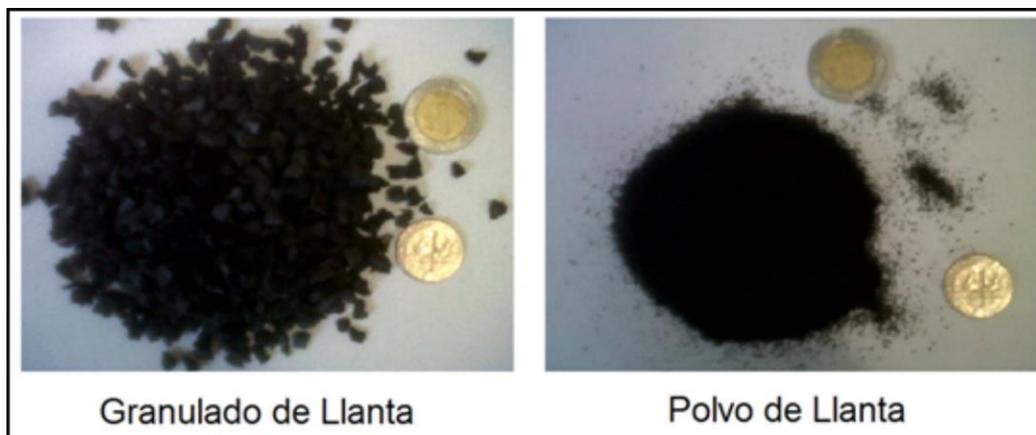


Figura 23. Partículas de llantas trituradas. Fuente: Herrera-Sosa et al. (2015).

Del proceso de reciclaje de llantas finalmente se obtienen cuatro componentes: granulado de llanta, polvo de llanta, fibras textiles y alambres de acero “armónico” como se muestra en la Figura 23.

En el proceso de granulado se genera una fracción de polvo y de elastómeros que son aspirados por medios de sistemas de aspirado.

Hoy en día existen varias formas de tratar y reciclar los neumáticos al final de su vida útil estas se clasifican en procesos mecánicos, criomecánicos, termomecánicos (molienda, mezclado de alta velocidad), químico-mecánicos (desvulcanización, proceso criogénico de Trelleborg - TCR por sus siglas en inglés -,hinchamiento en benceno), químicos (con reactivos orgánicos, e inorgánicos), térmicos (en digestores, en autoclaves, en medios alcalinos, en medios neutros, con acción de vapor de alta presión), biotecnológicos, procesos con microondas y con ultrasonido entre otras (Yang, Kaliaguine & Roy, 1993; Li et al., 2010; Adhikari, et al., 2000).

Algunos de estos métodos mencionados para el reciclaje y aprovechamiento de los neumáticos se muestran en la Figura 24, en todos estos, el caucho de desecho primero debe triturarse en miga para permitir que los productos químicos y los agentes de expansión reaccionen adecuadamente con él.

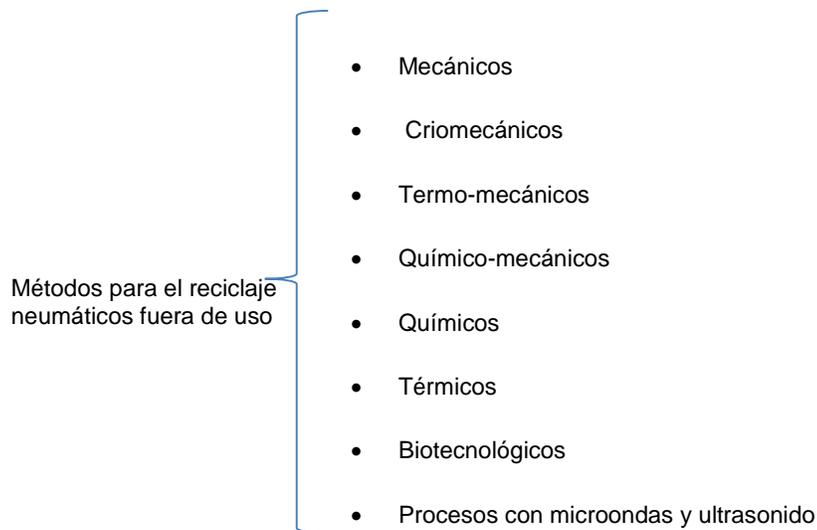


Figura 24. Clasificación de los métodos de aprovechamiento de los residuos de caucho con información de (Abraham et al., 2010; Adhikari, B. 2000).

3.13.4 Aplicaciones del caucho reciclado provenientes de los neumáticos fuera de uso.

Estudios recientes han demostrado que los granulados de poliméricos procedentes del reciclado de neumáticos fuera de uso y que se citan a continuación pueden ser transformados en materiales con propiedades acústicas y aplicaciones para el control del ruido ambiental.

Según algunos autores, los materiales compuestos que utilizan partículas de caucho reciclado pueden emplearse en aplicaciones que requieren absorción acústica. (Pelaez-Arroyove et al., 2017).

Pfretzschner & Rodríguez (1999) y Rodríguez Montejano (2004) verifican que la granza de caucho puede llegar a ser un buen absorbente de ruido, dentro del espectro de absorción de banda ancha, siendo una excelente alternativa a los materiales utilizados en las actuales pantallas acústicas empleadas para la protección contra el ruido de tráfico, contribuyendo, al mismo tiempo al reciclado de este tipo de producto.

Swift et al. (1999) descubrieron en su trabajo sobre la "absorción acústica en gránulos de caucho reciclado" que este material puede absorber con éxito el ruido si se puede elegir el tamaño de los agregados y la concentración de aglutinante, y si su espesor puede ajustarse al rango de frecuencias de interés.

Han et al. (2007) estudian la aplicación de mezclas de caucho triturado como material para barreras acústicas y sus comparaciones con barreras de hormigón se analizan, finalmente concluyen que al examinar todos los problemas relacionados con las barreras contra el ruido del tráfico las mezclas de caucho triturado representan una nueva oportunidad en la aplicación de reducción del ruido del tráfico.

Paje y colaboradores demuestran que el comportamiento acústico de asfaltos fabricados con mezclas bituminosas, en los que se incorpora el polvo de neumático como árido fino, logran reducir los niveles de ruido hasta en 2 dBA (Paje et al., 2010).

Otro trabajo realizado por Jiménez-Espadafor et al. (2011) sugiere que, los residuos de la fibra textil empleada en los neumáticos mezclados, en las mismas proporciones, con determinados adhesivos en caliente, se pueden emplear para fabricar planchas acústicas, utilizadas en techos suspendidos, con coeficientes de absorción acústica elevados.

Segura-Alcaraz et al. (2014) en su investigación para evaluar la absorción acústica de paneles multicapa diseñados para su uso como barreras acústicas en campos, encontraron que los paneles multicapa con granulometrías de 2,2-4 mm presentan una mayor absorción acústica en el rango de frecuencias estudiado. (400-3500 Hz), para crear estos paneles se empleó la sinterización de piezas sólidas moldeadas como técnica de fabricación.

Según Ashori et al. (2015), la utilización y la proporción de caucho reciclado en los paneles compuestos mejora en general las cualidades físicas como la absorción acústica.

Xu et al. (2018) utilizaron gránulos de caucho de neumáticos reciclado, viruta de

tablero de fibras de alta densidad y pellets de HDPE (polietileno de alta densidad) para crear un material acústico. A continuación, la combinación se prensó en moldes de paneles compuestos a 185 °C durante 20 min bajo una presión de 1 MPa. Según su trabajo, estos materiales pueden utilizarse de forma innovadora para crear materiales acústicos gracias a sus excelentes características de impedancia.

Siguiendo la línea de que el caucho triturado puede ser utilizado como aislante acústico, el trabajo de Rushforth y colaboradores muestra que, determinadas láminas elásticas, presentan un excelente comportamiento acústico manteniendo una relación óptima entre los granos de caucho y la fibra.

Algunas otras aplicaciones de reutilización o reciclado de los componentes de los NFU en la fabricación de nuevos neumáticos, incorporando hasta un 10% de caucho reciclado sin que altere sus presentaciones y calidad, la desvulcanización (Kojima et al., 2005; Jana et al., 2006; Feng e Isayev, 2006), la fabricación de mezclas bituminosas para pavimentos de carreteras, mediante el empleo del Ground Tyre Rubber (GTR) como parte del material ligante o capa selladora del asfalto, caucho asfáltico, o como árido, hormigón de asfalto modificado con caucho (Chui-Te, 2008; Guo et al., 2014) o en la industria cementera (Xiang y Baoshan, 2013).

Como se observa en esta revisión la valorización de los principales compuestos del neumático, caucho granulado o polvo, acero o compuestos textiles, estos últimos casi nula, se ha introducido en los últimos años desde el uso de neumáticos enteros en arrecifes, el uso de fragmentos de neumáticos como relleno en campos con césped artificial o la incorporación de neumáticos a materiales bituminosos.

4. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.

4.1 Hipótesis.

La absorción acústica, implementado un panel que usa una mezcla de gránulos de caucho reciclado y una resina como material aglutinante como material absorbente diseñado con 28 perforaciones equidistantes de 2.54 cm de radio, puede

mejorar su absorción en un 15 % en comparación a un panel tradicional de esponja de poliuretano.

4.2 Objetivo general.

Medir la cantidad de ruido absorbido en decibeles (dB) de un panel construido a partir de gránulos de caucho reciclado como prima y compararlo con un panel tradicional a base de esponja de poliuretano.

4.3 Objetivos específicos.

Estudio y análisis del diseño volumétrico del panel basado en los resonadores perforados.

Diseño de mezcla para la elaboración del material fonoabsorbente del panel acústico.

Medir con un sonómetro, los niveles de ruido absorbido de cada panel acústico.

Analizar los datos recolectados para el análisis de resultados.

5. MÉTODOS Y MATERIALES.

Partiendo del análisis de las propiedades de los gránulos de caucho, obtenido del reciclado de neumáticos fuera de uso, en combinación de un aglutinante y según varios estudios documentados, en este capítulo se realiza un estudio experimental y analítico con el propósito de obtener un panel que combine en su diseño propiedades tales que pueda competir con un panel de espuma de poliuretano.

Para ello, se lleva a cabo un detallado análisis de las características de las migas de caucho que es el principal material objeto de este estudio en contraste con las propiedades acústicas de la esponja de poliuretano. De la misma forma se analiza el diseño geométrico del panel basado en los resonadores de Hemholtz.

5.1 Diseño de la mezcla: gránulos de caucho y aglutinante.

La selección de la mezcla óptima del conjunto de materiales utilizados en esta investigación se describe a continuación:

- Gránulos de caucho reciclado con granulometría de 1 a 3mm.
- Resina poli vinílica

5.2 Gránulos de caucho.

Rodríguez-Montejano (2003) afirma que, experimentando con diversas granulometrías, pudieron demostrar que una de las características que afecta en mayor medida a las cualidades absorbentes de un medio granular es el tamaño y la distribución del grano. En la Tabla 11 se muestran algunos de los tipos de granulometrías que se obtienen del reciclado de llantas y con las cuales se puede experimentar.

Tabla 11. Tipología y denominación de los diferentes tipos de caucho granular empleados. Fuente: Rodríguez-Montejano (2003).

Denominación	Tipo	Granulometría
P1	Polidispersa	0-7 mm
P2	Polidispersa	0-3 mm
M1	Monodispersa	1,4 mm
M2	Monodispersa	≈ 2 mm
M3	Monodispersa	≈ 3 mm
M4	Monodispersa	≈ 4 mm
M5	Monodispersa	≈ 6 mm



Figura 25. Tipos de granza monodispersa de 1 a 3 mm y de 3 a 6 mm obtenida en el mercado local.

La denominación y el tamaño de las partículas de caucho pueden variar según el fabricante. Para este estudio en particular se optó por las muestras polidispersas con una granulometría de 1 a 3 milímetros, estas son previamente graduadas por el proveedor para su venta, en la Figura 25 se muestran dos tipos de tamaños de 1 a 3 mm y de 3 a 6 mm.

5.3 Aglutinante de acetato de polivinilo.

El acetato de polivinilo fue descubierto en Alemania en 1912 por Fritz Klatte. Según el fabricante Maxime Star®, esta resina es un acetato de polivinilo de sólidos medios, que se utiliza en la industria de la construcción para crear pastas texturizantes que se pueden pigmentar con cemento, marmolina, carbonato cálcico, cal y blanco España, así como pinturas vinílicas y sellador vinílico. La Figura 26 muestra la resina conocida como L-33.



Figura 26. Resina L-33 acetato de polivinilo de solidos medios.

La calidad y resistencia del aglutinante son de suma importancia, ya que es esencial para que el material compuesto tenga una consistencia adecuada y pueda manipularse sin sufrir daños. El aglutinante utilizado, se adquirió en un mercado local.

Al principio, se creó una muestra utilizando resina vinílica como aglutinante, a partir de la cual se produjo un material de buena consistencia sin que el resultado final fuera excesivamente quebradizo. La suficiente adherencia de esta primera muestra quedó demostrada por el hecho de que no se desprendió mucho incluso después de dejarse caer desde una altura media de un metro. La primera muestra del material fabricado con la mezcla de migas de caucho y resina de polivinilo se representa en la Figura 27 con sus dimensiones de diez centímetros de diámetro y dos centímetros de grosor.



Figura 27. Muestra obtenido de la mezcla de migas de caucho y resina polivinílica.

Esta muestra inicial, que tiene aproximadamente un 30% de resina y un 70% de caucho, se fabricó sin defectos ni desprendimientos significativos. Por tanto, esta proporción es práctica. Estos datos llevaron a la conclusión de que la capacidad de resistencia del adhesivo era suficiente y tuvo un impacto positivo en el resultado final de la muestra.

5.4 Caracterización de los componentes del panel acústico.

5.4.1 Las migas de caucho y su coeficiente de absorción.

La norma UNE-EN ISO 11654:1998, que clasifica los productos en materiales fonoabsorbentes conforme a valores únicos del coeficiente de absorción acústica que figuran en la Tabla 12, es una de las normas relativas a los materiales fonoabsorbentes y su clasificación, donde las clases A, B, C, D y E se utilizan para clasificar estos materiales, siendo la clase A la que obtiene mejores resultados (López-Fachal, 2012).

El coeficiente de absorción, denotado por el símbolo α , cuyo valor oscila entre 0 y 1, como se muestra en la Figura 28, se utiliza para medir la eficacia de un material.

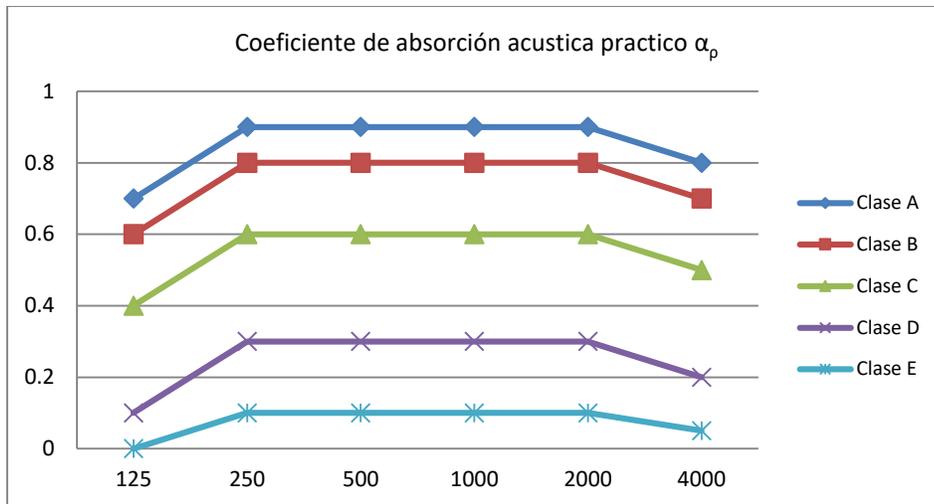


Figura 28. Gráfico de clases de absorción acústica según la norma UNE-EN ISO 11654:1998.

Tabla 12. Clases de absorción acústica según la UNE-EN ISO 11654:1998.

Clase de absorción acústica	Coefficiente de absorción acústica práctico α_p
A	0,90; 0,95; 1,00
B	0,80; 0,85
C	0,60; 0,65; 0,70; 0,75
D	0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55
E	0,25; 0,20; 0,15
Sin clasificar	0,1; 0,05; 0,00

El método para determinar la absorción acústica de un material se realiza utilizando un tubo de impedancia acústica, y se basa en la norma ISO 10534-2 para el cálculo del coeficiente de absorción acústica y la impedancia acústica en tubos de impedancia.

Rodríguez-Montejano (2003) clasificó los coeficientes de absorción acústica de las migas de caucho entre E y A, como se indica en la Tabla 12, afirma que el tamaño del agregado (caucho granular) y la cantidad de aglutinante son determinantes para que el material granular absorba mejor el sonido, así como la elección del grosor para la banda de frecuencia deseada.

5.5 Diseño geométrico del panel acústico.

El diseño del panel hueco está basado en la teoría adquirida de los resonadores de Helmholtz.

Se parte de los parámetros físicos en la construcción, que en conjunto determinan la frecuencia de resonancia del sistema usando la siguiente fórmula.

$$F_o = \frac{C}{2\pi} * \sqrt{\frac{P}{d\ell'}}$$

Fo = Frecuencia de resonancia del panel

C = Velocidad del sonido

P = % de perforación de la placa

d = Separación de placas

ℓ' = Largo corregido

a su vez:

$$P = \frac{S}{D^2}$$

S = Superficie de perforación individual

D = Separación de perforaciones

$$\ell' = \ell + 1.6 * r$$

ℓ' = Largo de la perforación

r = Radio de la perforación

5.5.1 Parámetros preliminares de diseño y construcción.

Se utiliza para el cuerpo del panel cartón de embalaje como material de construcción, este material también proveniente del reciclado ya que es de fácil modificación (corte, lijado, pegado etc.)

La modulación de los huecos está determinada a partir de tubos igualmente de cartón con diámetros de dos pulgadas que harán las veces de perforaciones el uso de este material facilita el desarrollo modificación y construcción al estar en una etapa de prototipo, y por ultimo su bajo costo en comparación con otros materiales lo hacen la mejor alternativa para el desarrollo de un primer modelo.

El tamaño del panel es de 61 cm x 36 cm y 3 cm de espesor, considerando los siguientes factores:

- Estas dimensiones se ajustan a medidas modulares estándar utilizadas frecuentemente en la fabricación de paneles acústicos utilizados en la construcción.
- Reducir los costos de fabricación para un primer prototipo.
- Los tamaños de los huecos además de una función acústica están diseñados para reducir el peso del panel.
- El tamaño de los huecos igualmente responde a una medida estándar en el mercado.

5.5.2 Parámetros fijos para la estructura.

Radio de perforación es igual a 2.54 cm, de los cuales se determinará su influencia en el panel acústico de acuerdo a los cálculos de los resonadores acústicos.

Distancia entre perforación es igual a 8.25 cm, se determina esta distancia para cubrir de forma homogénea el área de la cara frontal del panel.

Numero de perforaciones igual a 28 perforaciones de acuerdo a la distancia predeterminada de 8.25 cm se distribuyen a lo largo y ancho de la cara frontal fija de forma lineal y homogénea.

5.5.3 Porcentaje y distribución de las perforaciones.

Como resultado de los parámetros anteriores se obtuvo un diseño geométrico con 28 perforaciones equidistantes de 2 pulgadas de diámetro (lo que es igual a 2.54 cm de radio) como se muestra en la Figura 29 con un porcentaje de

perforaciones correspondiente a 29.78 %.

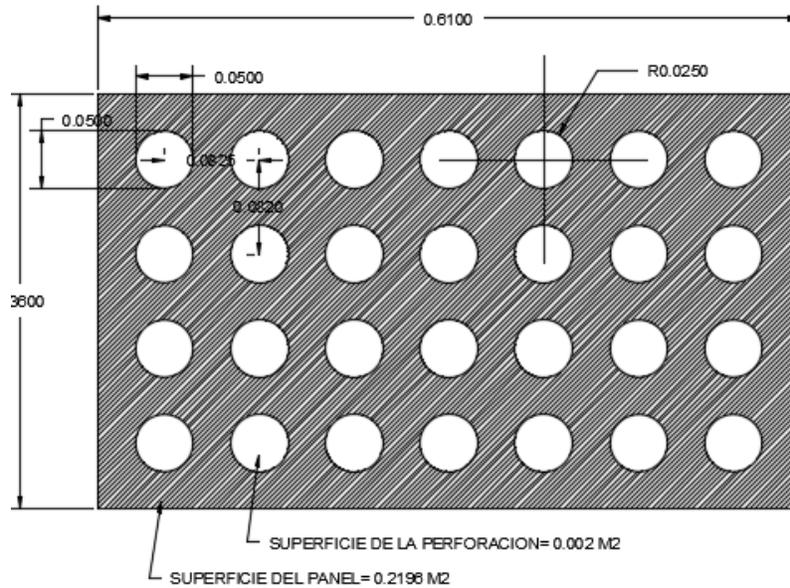


Figura 29. Diseño geométrico del panel basado en los resonadores de Helmholtz unidades en centímetros.

Tabla 13. Parámetros para el diseño del panel perforado

Parámetros del panel acústico de 61 x 36 cm por 3cm de espesor.	
$r = 2.25$	Radio de las perforaciones en centímetros
$D = 8.25$	Distancia entre perforaciones en centímetros
$d = 30$	Distancia entre el panel y la pared en centímetros
$S = \pi \cdot r^2$	Superficie de perforación individual en centímetros
$P = S/D^2$	Porcentaje de perforación total en centímetros
$\ell = 3.5$	Espesor del panel en centímetros
$\ell' = 3.5 + (1.6 \cdot r)$	Espesor del panel en centímetros aplicando una corrección

Los parámetros del diseño inicial se muestran en la Tabla 13 de acuerdo a estos se determina de acuerdo a las fórmulas citadas la frecuencia de resonancia que ofrecerá el panel perforado.

5.5.4 Influencia del tamaño de las perforaciones.

Las diferentes posiciones de resonancia que ofrecerá el panel perforado están determinadas por el tamaño y posición del panel con respecto de la pared o muro

donde sea colocado, así como por el número y diámetro de las perforaciones. En la Tabla 14 se muestra como cambiaría la frecuencia de resonancia si modificamos el espacio entre la pared y el panel que es conocida como cavidad de aire o plenum.

Tabla 14. Parámetros de diseño para calcular las frecuencias finales del diseño

Parámetros que en conjunto determinan las frecuencias finales del diseño						
PANEL	Profundidad entre el panel y la pared en cm	Frecuencia	Hz	No. de perforaciones	% de perforación	Radio de perforación en cm.
DISEÑO 1	5	F1	121.43	28	29.78	2.54
DISEÑO 2	10	F2	60.72	28	29.78	2.54

En la Tabla 15 se muestra como cambiaría la frecuencia de resonancia, si además de modificar el espacio entre la pared y el panel, se modifican el número y tamaño de perforaciones.

Tabla 15. Parámetros de diseño para calcular las frecuencias finales del diseño, modificando el radio y cantidad de perforaciones del panel.

Parámetros que en conjunto determinan las frecuencias finales del diseño						
PANEL	Profundidad entre el panel y la pared en cm	Frecuencia	Hz	No. de perforaciones	% de perforación	Radio de perforación en cm.
DISEÑO 1	5	F1	341.45	15	54.47	5.08
DISEÑO 2	10	F2	170.73	15	54.47	5.08

En la práctica estas modificaciones son con el fin de sintonizar aproximadamente las frecuencias superior e inferior que tendrá un panel perforado y poder fabricarlo con los parámetros adecuados para la frecuencia de interés.

5.6 Construcción del panel de caucho granular.

Una vez determinados los parámetros específicos para este panel se procede a la construcción del mismo como se muestra en la Figura 30 y cuyos elementos se describen a continuación.

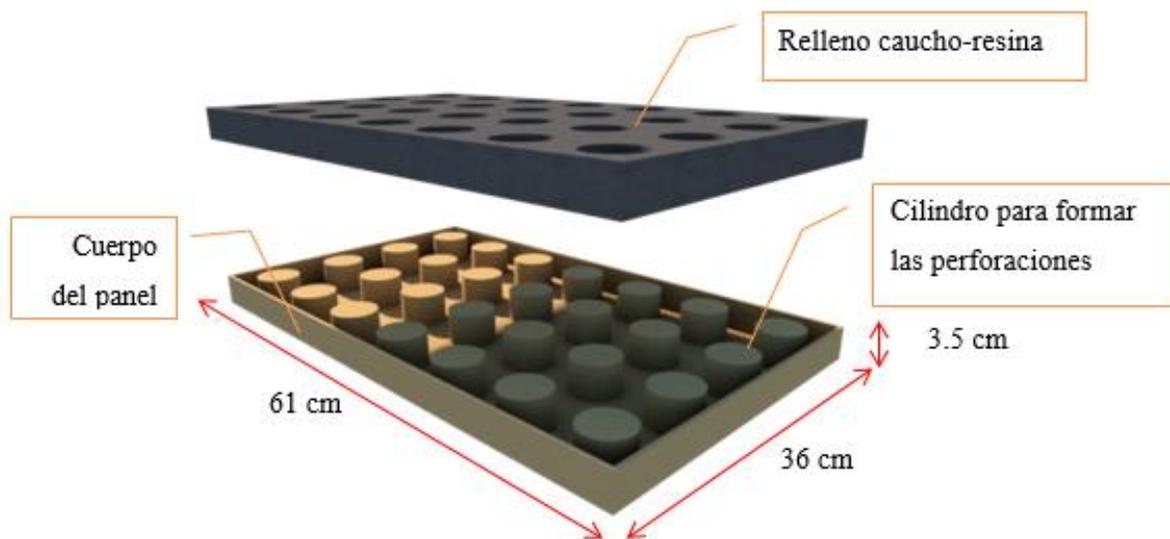


Figura 30. Diseño y dimensiones del panel acústico de caucho-resina

5.6.1 Cuerpo del panel

Se forma con el cartón de embalaje o cartón ondulado de canal simple que se configura a partir de dos elementos:

La flauta o medium: una o varias láminas de papel ondulado que se colocan en la parte central

Los liners: planchas de cartón que se ubican entre las capas de flautas.

En la Figura 31 se muestran las placas de cartón que conforman la base del panel acústico con medidas de 61x36x3 cm.



Figura 31. Base del panel acústico con medidas de 61x36x3 cm.

5.6.2 Perforaciones.

Una vez ensamblada la base de panel se procede a colocar los tubos de cartón que harán las veces de perforaciones en la superficie del mismo, que corresponde a las 28 perforaciones distribuidas de manera uniforme como se muestra en la Figura 32 correspondientes a los parámetros previos de diseño.

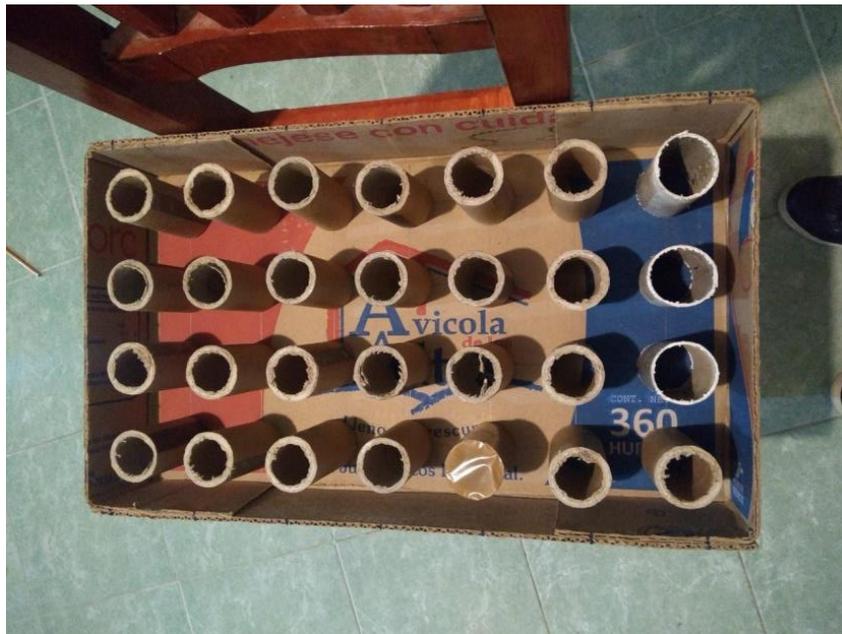


Figura 32. Base del panel acústico con los 28 tubos de 2.54 cm de diámetro.

El peso del cuerpo del panel es de 0.885 Kg. como se muestra en la Figura 33.



Figura 33. Peso del cuerpo del panel.

5.6.3 Dosificación de la mezcla caucho-resina.

El diseño de mezcla previamente diseñado se procede a pesar y cuantificar como se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16. Diseño de mezcla caucho-resina

MATERIAL	TAMAÑO	PORCENTAJE	PESO
Migas de caucho (Polímeros provenientes del reciclado de llantas)	1 a 3 mm	70	2.355 KG
Resina vinílica (Acetato de polivinilo)	---	30	0.735 KG

En la Figura 34 se observa el pesado de las migas de caucho y la resina que corresponden al volumen calculado para rellenar el panel acústico descontando el volumen de las perforaciones.



Figura 34. Pesado de los materiales de la mezcla caucho-resina.

5.6.4 Combinación de la mezcla caucho-resina.

Una vez cuantificadas las cantidades adecuadas de los materiales en cuestión se procede a su combinación. Se obtiene una mezcla heterogénea de los elementos caucho-resina como se muestra en la Figura 35. esta mezcla no muestra mayor complicación que la de revolver de manera uniforme sus componentes asegurando que la resina bañe todo el caucho granular.



Figura 35. Combinación de la mezcla caucho granular y resina.

En el proceso de combinación de esta mezcla se observó al igual que la prueba anterior buena manejabilidad, consistencia y fácil tipo de uso.

5.6.5 Vaciado y fraguado de la mezcla caucho-resina.

Después de realizar estas combinaciones se prosigue a vaciar la mezcla en la base del panel como se observa en la Figura 36. Según Mingarro (2006), una mezcla con buena trabajabilidad, una adherencia óptima, una retracción mínima,

resistencia mecánica apropiada, y una estabilidad adecuada es capaz de resistir las condiciones del medio en donde se vayan a encontrar, así como el tiempo de fraguado.



Figura 36. Vaciado de la mezcla en la base del panel.

El fraguado de la mezcla del caucho-resina se completó en aproximadamente dos días bajo techo en condiciones normales como se muestra en la Figura 37.



Figura 37. Panel de caucho terminado de fraguar.

5.6.6 Prototipo final del panel acústico con caucho-resina como material fonoabsorbente.

Como resultado final se obtuvo un panel acústico diseñado con 28 huecos distribuidos uniformemente en la parte frontal, el volumen restante se rellenó con la mezcla de caucho-resina que cubre su interior, de este modo se garantiza que la absorción acústica se vea reforzada y producida por las diminutas cavidades que se forman entre las partículas del árido, proporcionando el nivel de porosidad necesario para la absorción en este tipo de material granular. (López-Recuero, 1999; Julia-Sanchis, 2008). Se observó que la proporción de la mezcla caucho-resina adquirió una adherencia adecuada después del fraguado sin mayores desprendimientos como se muestra en la Figura 38.

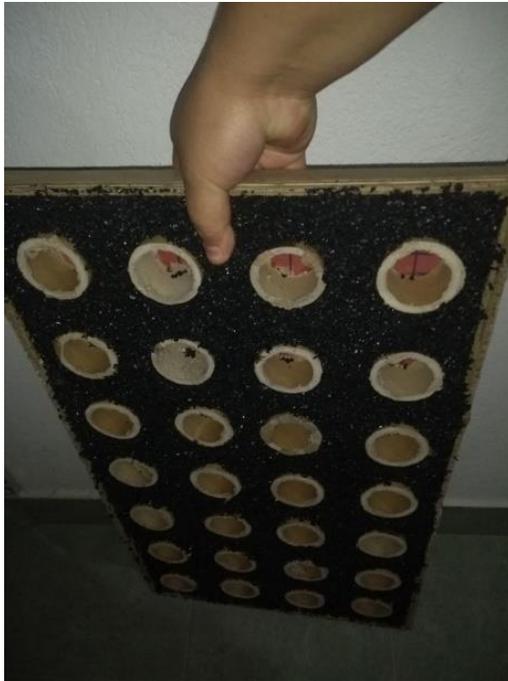


Figura 38. Resultado final de panel acústico hueco relleno con mezcla de caucho-resina puesto verticalmente.

El diseño geométrico de este panel está basado en los paneles perforados de múltiple cavidad de Helmholtz y como vimos en capítulos anteriores este diseño puede ser configurable de acuerdo a la frecuencia de interés, en este caso el diseño de este panel permite absorciones de bajas frecuencias con la distribución de los 28 espacios huecos que hacen las veces de perforaciones como se observa en la Figura 39.



Figura 39. Resultado final de panel acústico hueco relleno con mezcla de caucho-resina peso aproximado

3.25 kg.

Los 28 huecos pretenden dar ligereza al producto final, al rellenar sólo el 75% del volumen final del panel, en lugar de toda la superficie, con la combinación de caucho granular y resina, lo que se traduce en un peso de unos 3,25 kg.

5.7 Construcción del panel de esponja de poliuretano.

Este panel consta de dos piezas:

Cuerpo del panel: que es una base fabricada con cartón de embalaje o cartón ondulado de canal simple con medidas de 61x36x3 cm.

El relleno o núcleo con esponja de poliuretano como se muestra en la Figura 40.

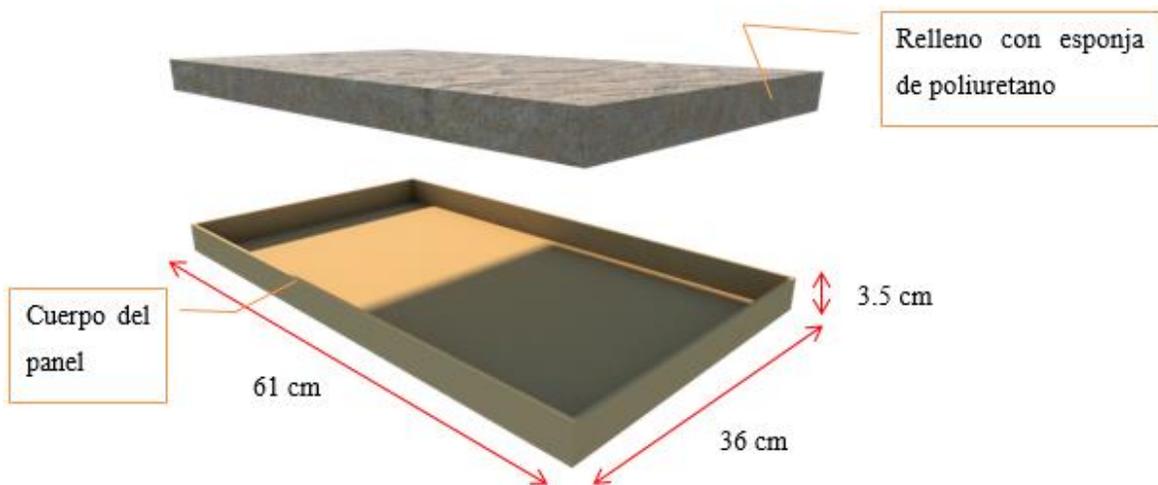


Figura 40. Diseño y dimensiones del panel de esponja de poliuretano.

5.7.1 Propiedades acústicas del panel de esponja de poliuretano.

La espuma flexible utilizada en esta primera investigación tiene una porosidad media de célula abierta, es permeable al aire y reversible a la deformación. El panel prototipo de espuma de poliuretano se muestra en la Figura 41; sus capacidades de absorción acústica se contrastarán con las del caucho granular como absorbentes acústicos. Por tanto, en este capítulo se muestran las características y principio de funcionamiento de la esponja de poliuretano.



Figura 41. Panel de esponja de poliuretano.

Hay dos factores esenciales, conocidos como características microscópicas, la resistividad al flujo y la porosidad, dichos parámetros rigen el comportamiento acústico de un absorbedor poroso.

5.7.2 Resistividad al flujo.

La resistividad al flujo es una medida de la facilidad con que el aire puede ingresar en un material poroso y la resistencia que ese flujo de aire encuentra a través de su estructura. (Castillo, J., & Costa, y. A. 2012). Para calcular este parámetro existen algunas formulaciones empíricas y semi-empíricas que pueden ser utilizadas para estimar la resistividad al flujo.

5.7.3 Porosidad.

Los mejores absorbentes tienen una alta porosidad próxima al 1 (Castillo, J., & Costa, A. 2012). Por otra parte, los poros cerrados no se tienen en cuenta para calcular la porosidad porque resultan prácticamente inaccesibles a las ondas sonoras. En las espumas suelen encontrarse los poros cerrados, incluso los diseñados para ser de celdillas abiertas (Trevor & Dantonio, 2004).

Si bien prácticamente todos los materiales presentan diversos grados de porosidad, es importante conocer estos niveles. La Figura 42 ilustra cómo afecta la porosidad a las diferencias de absorción.

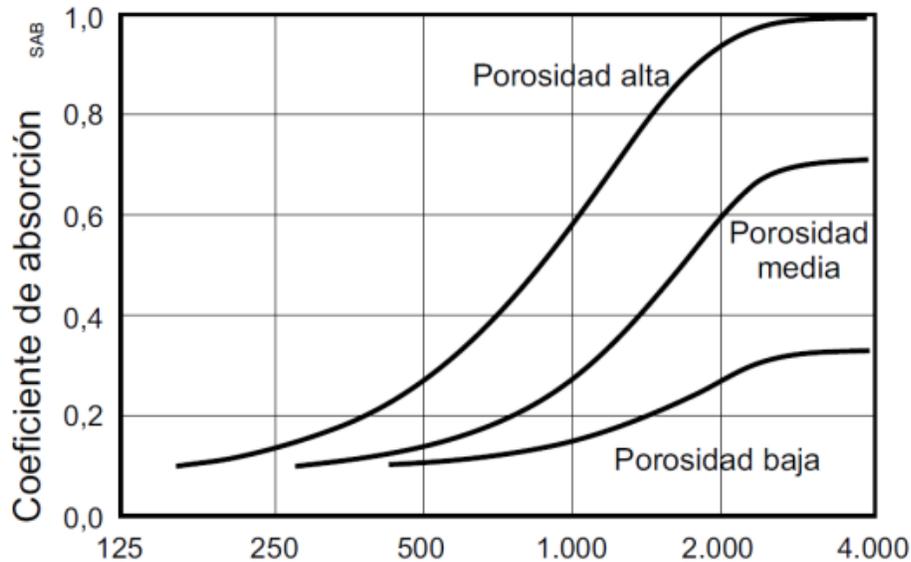


Figura 42. Variación del coeficiente de absorción debida a la frecuencia y a la porosidad del material. Fuente: Lopez-Fachal (2012).

El grado de absorción acústica aumenta con la porosidad del material, en consecuencia, el frente de onda incidente penetra más profundamente en el interior del material.

5.8 Propiedades del recinto para la toma de muestras.

Los parámetros de la habitación son una sala cuadrada de 5,0 x 5,0 x 2,7 metros de altura; Los niveles de ruido en esta clase de locales se muestran en la Tabla 17, que varían entre 30 dB y 50 dB, clasificados como niveles de ruido bajos. Las pruebas se realizaron en una sala con características que no obstaculizaban la recogida de muestras.

Sobre la base de la escala de filtros ponderada A, la Tabla 17 también describe los niveles de ruido producidos por diferentes actividades. Debido a la complicada naturaleza del ruido, en la que los ruidos son variados y transitorios en función del tiempo y el lugar, así como al aspecto subjetivo de quién decide cuándo un ruido es más o menos perjudicial, esta tabla sirve de referencia para los niveles de ruido aproximados (Alfie-Cohen & Salinas-Castillo, 2017).

Tabla 17. Niveles de ruido en función de la actividad. Fuente: OSMAN (2010), La Nación, Digital (2012), Alfie-Cohen & Salinas-Castillo (2017).

ACTIVIDAD	Ruido en decibeles con ponderación A dB(A)	Percepción del ambiente
Pisadas al caminar	10	Ambiente silencioso
Cámaras de laboratorio	10	
Viento de los arboles	20	
Estudio de grabación	20	
Conversación en voz baja	30	Ambiente poco ruidoso
Dormitorio	30	
Biblioteca	40	
Oficina	50	
Despacho tranquilo	50	
Nivel propuesto por la OMS al aire libre, 55 dB(A)		
Conversación	60	

5.9 Ponderación A.

Las propiedades de las curvas de ponderación "A" y "C", que son las dos curvas de ponderación normalizadas internacionalmente que se utilizan actualmente, son descritas en la norma IEC 60651.

La capacidad subjetiva del oído humano para percibir sonidos, independientemente del nivel acústico ambiental, se ajusta mejor a esta ponderación que a otras (Morales-Alanis, 2012). Por ello, la ponderación A es la más utilizada en la investigación y medición acústicas, en la Figura 43 se muestra el sonómetro utilizado para el experimento. Dispone de una función A/C que le permite seleccionar la ponderación adecuada, en este caso la ponderación A.



Especificaciones
Sonómetro
HER-403
Rango: 30-130 dB
Ponderación de operación: A
Clase: II
Rango de frecuencia 31,5 Hz a 8,5 kHz

Figura 43. Decibelímetro o sonómetro.

5.10 Acústica arquitectónica y normativa.

La acústica arquitectónica, rama de las ciencias físicas que estudia la producción, transmisión y absorción del sonido en lugares cerrados y abiertos en los cuales las personas desarrollan sus actividades, se considera todavía un campo de estudio relativamente nuevo (Saad-Eljure, 1996).

En México existen reglamentos como la Norma Oficial Mexicana NOM-081-SEMARNAT-1994 (Olvera-Martínez, 2023), esta establece los límites permisibles de ruido para fuentes fijas y la técnica de medición para conocer el nivel emitido al ambiente. Adicionalmente, la Norma Oficial Mexicana NOM-080-ECOL-1994 especifica el método de prueba y las limitaciones superiores para las emisiones sonoras provenientes del escape de vehículos automotores, motocicletas y triciclos motorizados en operación.

Estas limitaciones para los niveles de ruido aceptables también las establece la Norma Oficial Mexicana NOM-081-SEMARNAT-1994 en relación con los periodos de tiempo durante los cuales se realiza una actividad. A medida que se acercan las horas de descanso, como se ilustra en la Tabla 18, el ruido debería disminuir, esto condujo al establecimiento de tres horarios distintos para la toma de muestras: mañana, tarde y noche, dado que el objetivo principal de los componentes utilizados en los sistemas de aislamiento y acondicionamiento

acústicos es reducir estos niveles de ruido, se trata de mantener unos niveles lo más próximos posible a los niveles de confort acústico aconsejados por la normativa.

Tabla 18. Límites máximos permisibles de ruido de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-081-SEMARNAT-1994.

ZONA	HORARIO	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE dB (A)
Residencial1 (exteriores)	6:00 a 22:00	55
	22:00 a 6:00	50
Industriales y comerciales	6:00 a 22:00	68
	22:00 a 6:00	65
Escuelas (áreas exteriores de juego)	Durante el juego	55

Estas normativas fueron creadas por las agencias federales de protección del medio ambiente como sugerencias técnicas y/o requisitos legislativos, y los gobiernos estatales y locales son los encargados de hacerlas cumplir (Alfie-Cohen & Salinas-Castillo, 2017).

5.11 Medición y obtención de datos.

En la figura 44 se muestran las versiones finales de ambos paneles con diseños comparables, que se someterán a pruebas para determinar la capacidad de absorción acústica de cada material. El fabricado con material tradicional que nombraremos Panel EP (Panel de Esponja de Poliuretano) y el fabricado a base de gránulos de cacho reciclado que llamaremos Panel CG (Panel de Caucho Granular).



Figura 44. Panel a base de esponja de poliuretano (EP) y panel de caucho granular (CG).

La Figura 45 ilustra tres acontecimientos que se producen cuando una onda sonora encuentra un obstáculo que separa dos medios y está en un medio de transmisión como es el aire, se producen tres fenómenos: absorción, reflexión y transmisión (Sastrón, 2017).

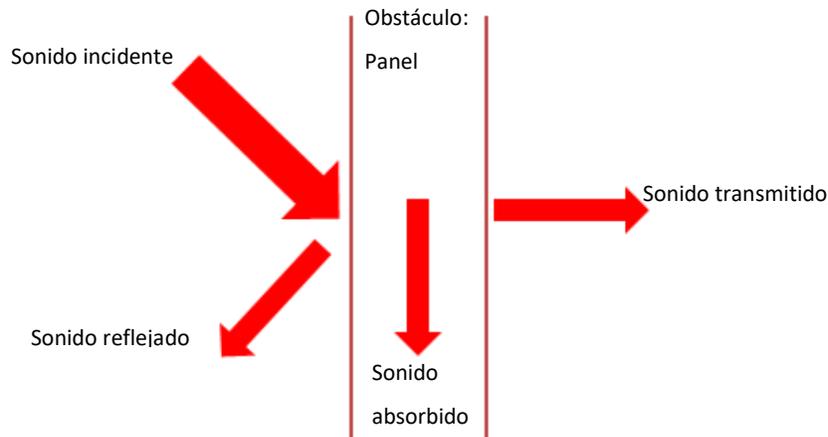


Figura 45. Fenómenos de absorción, reflexión y transmisión, producido al chocar una onda sonora contra un muro.

Cada panel se colocó en una caja directamente, como se indica en la Figura 46, para medir el sonido transmitido por ambos paneles, donde se colocó una fuente de ruido para accionar el sonido incidente, de tal forma que al reproducir la pista seleccionada se producirán los tres fenómenos antes descritos y con el sonómetro a una distancia de 0,60 metros se registrará cada lectura.

La pista producida consistió en la grabación del ruido que se produce cuando un globo se revienta el cual genera un impacto de entre 70 a 93 dB.

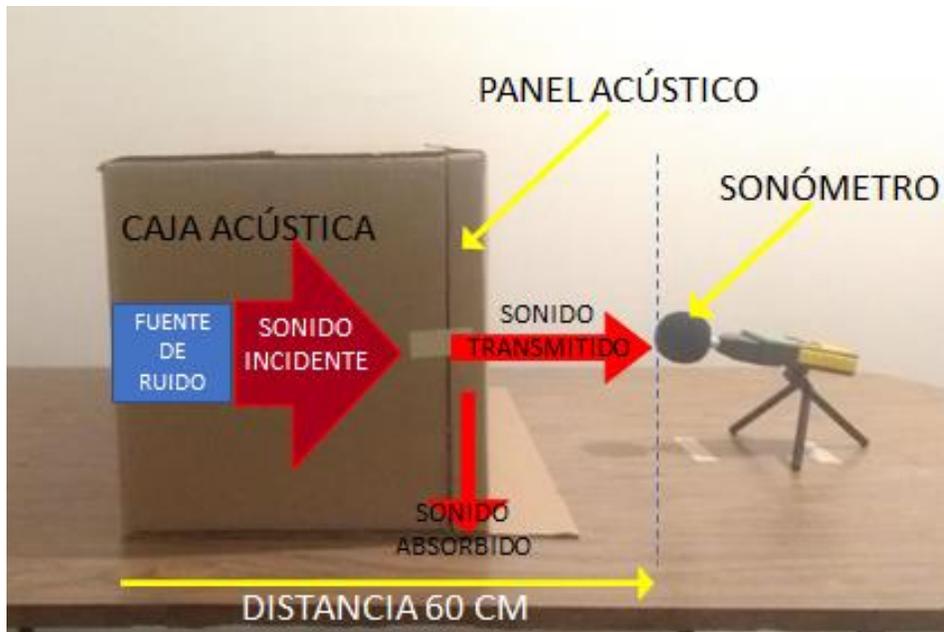


Figura 46. Ubicación y colocación del sonómetro para las mediciones.

Este método de medición resultó ser un sustituto práctico para evaluar la eficacia de los paneles colocados. De acuerdo con ALLPE (2019) se basa en un conjunto de experimentos estadísticamente significativos que consisten en controlar los niveles de ruido con una ventana abierta y cerrada durante periodos de gran actividad en el exterior, normalmente en torno a la hora pico de tráfico. Los datos recogidos permiten determinar con gran precisión el nivel real de aislamiento de la ventana, así como evaluar su capacidad de insonorización. Esta técnica también se utiliza en la práctica, ya que en ocasiones las ventanas no ofrecen el aislamiento acústico que se indica en la ficha técnica del fabricante, aunque el aislamiento acústico teórico que proporciona una ventana se mida y confirme en el laboratorio.

Por lo tanto la caracterización acústica comprendió el hecho de que ambos paneles fabricados para este experimento serán la barrera entre el sonido incidente producido dentro de la caja hacia el exterior como se muestra en la Figura 47.



Figura 47. Colocación la fuente de ruido y de ambos paneles.

Las lecturas registradas por el sonómetro fueron un total de 450 muestras en tres distintos horarios y tres diferentes días. Las muestras colectadas fueron: en formato de valor máximo (MAX), que es el primer y mayor sonido transmitido detectado por el sonómetro, y el segundo formato de registro en modo de lectura rápida (FAST) que es una función de promediación automática que realiza el equipo de medición a cada 0,5 segundos también conocido como ponderación a cada dos segundos.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

Durante tres días se tomaron muestras, con el equipo de medición en el lugar y las condiciones antes descritas, en tres periodos distintos, en este capítulo se presentan y analizan los resultados.

El ruido investigado consistió en un choque producido por una fuente sonora con un nivel de ruido comprendido entre 70 y 93 dB durante 7 segundos a una distancia de 0,60 metros del sonómetro. El sonómetro se configuró en ponderación (A), que, como ya se ha indicado, es la más adecuada para medir el ruido en general. Esta

configuración hace que el sonómetro reaccione a sonidos con una gama de frecuencias de 30-130 dB de la misma forma que lo hace el oído humano.

En el día uno se registraron un total de 150 muestras, por la mañana se anotaron las primeras 50 muestras como se indica en las Tablas 19 y 20, en la tarde se tomaron las segundas 50 muestras como se muestra en las Tablas 21 y 22; por la noche se registraron las terceras 50 muestras que se ilustran en las tablas 23 y 24. Para la toma de dichas muestras se configuro el equipo de medición en formato de valor máximo (MAX) para la primera mitad; para la segunda mitad en lectura de promediación rápida (FAST). Posteriormente se ilustran las comparativas de dichos resultados en las gráficas 48, 49, 50, 51,52 y 53.

Tabla 19. Registro de lecturas tomadas para el panel (EP) por la mañana en el día uno.

PANEL DE ESPUMA DE POLIURETANO (EP)		
RECOLECCIÓN DE MUESTRAS HORARIO: DIURNO		
No. MUESTRAS	TIPO DE LECTURA (FAST)	TIPO DE LECTURA (MAX)
1	50.80	84.40
2	45.60	82.20
3	53.50	91.90
4	49.40	91.10
5	46.00	81.90
6	45.50	90.90
7	52.20	91.40
8	71.90	93.50
9	44.40	92.10
10	45.10	92.90
11	46.80	91.40
12	45.50	92.90
13	45.60	92.50
14	47.30	91.70
15	48.10	83.70
16	48.50	91.70
17	46.00	92.20
18	45.00	91.20
19	44.80	86.40
20	45.20	83.10
21	45.20	91.20
22	47.30	92.00
23	46.40	92.70
24	47.10	92.80
25	47.10	91.20

Tabla 20. Registro de lecturas tomadas para el panel (CG) por la mañana en el día uno.

PANEL DE GRÁNULOS DE CAUCHO (GC)		
RECOLECCIÓN DE MUESTRAS HORARIO: DIURNO		
No. MUESTRAS	TIPO DE LECTURA (FAST)	TIPO DE LECTURA (MAX)
1	47.80	80.70
2	49.40	81.10
3	45.80	82.00
4	48.60	81.00
5	45.20	79.50
6	50.70	83.40
7	43.90	80.40
8	44.90	84.30
9	46.70	81.40
10	51.00	80.10
11	45.50	81.80
12	46.80	81.10
13	43.90	82.70
14	46.00	81.00
15	46.30	82.70
16	46.00	79.80
17	45.60	80.80
18	46.60	80.70
19	45.10	81.80
20	47.10	80.20
21	44.40	80.10
22	47.00	79.50
23	44.00	84.40
24	45.50	80.80
25	49.30	87.10

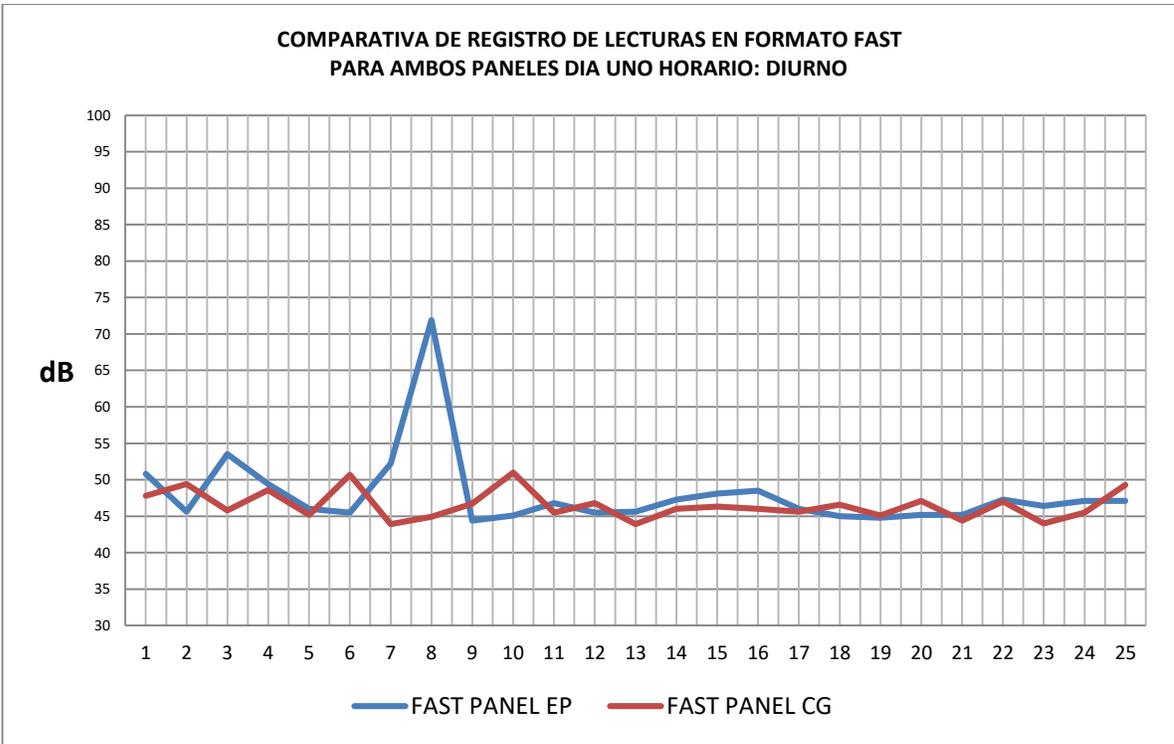


Figura 48. Grafico comparativo de lecturas (FAST) tomadas de ambos paneles por la mañana del día uno.

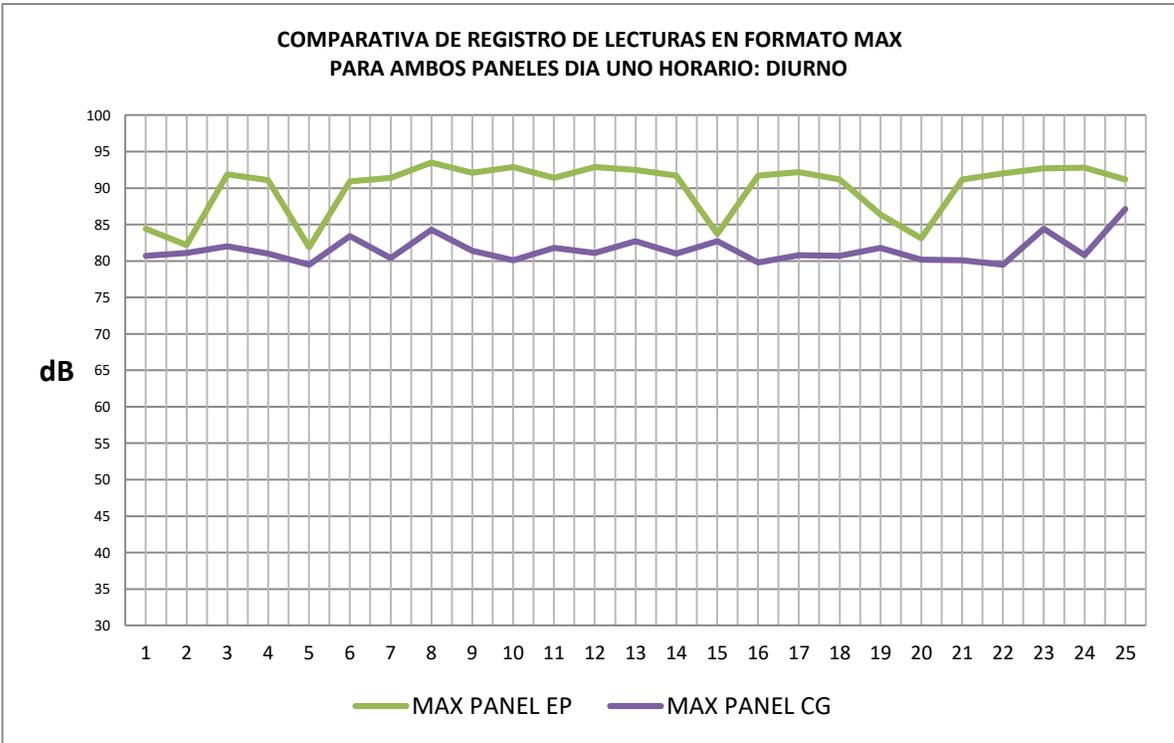


Figura 49. Grafico comparativo de lecturas (MAX) tomadas de ambos paneles por la mañana del día uno.

Tabla 21. Registro de lecturas tomadas para el panel (EP) por la tarde en el día uno.

PANEL DE ESPUMA DE POLIURETANO (EP)		
RECOLECCIÓN DE MUESTRAS		
HORARIO: VESPERTINO		
No. MUESTRAS	TIPO DE LECTURA (FAST)	TIPO DE LECTURA (MAX)
1	46.40	91.40
2	46.80	81.80
3	47.00	82.30
4	45.30	81.40
5	48.00	81.40
6	45.10	91.20
7	44.50	93.70
8	49.40	82.90
9	45.10	82.80
10	44.60	92.50
11	44.10	93.20
12	45.00	81.60
13	47.70	92.90
14	51.00	83.00
15	47.00	81.00
16	47.00	91.10
17	45.50	92.00
18	45.60	92.60
19	46.90	82.20
20	46.90	82.20
21	46.00	81.20
22	44.80	91.80
23	47.00	81.40
24	44.80	82.00
25	44.70	85.50

Tabla 22. Registro de lecturas tomadas para el panel (CG) por la tarde en el día uno.

PANEL DE CAUCHO GRANULAR (CG)		
RECOLECCIÓN DE MUESTRAS		
HORARIO: VESPERTINO		
No. MUESTRAS	TIPO DE LECTURA (FAST)	TIPO DE LECTURA (MAX)
1	48.90	83.10
2	47.90	82.50
3	47.30	82.60
4	47.30	81.60
5	44.00	84.30
6	45.40	81.50
7	44.60	80.20
8	47.10	80.80
9	46.00	80.40
10	52.10	80.10
11	46.00	81.10
12	43.90	80.30
13	48.70	79.90
14	44.40	81.50
15	45.80	80.70
16	47.80	79.80
17	47.30	81.40
18	46.60	80.40
19	44.70	83.20
20	49.10	80.90
21	46.00	80.00
22	46.40	80.90
23	47.40	81.40
24	49.80	80.70
25	49.40	81.00

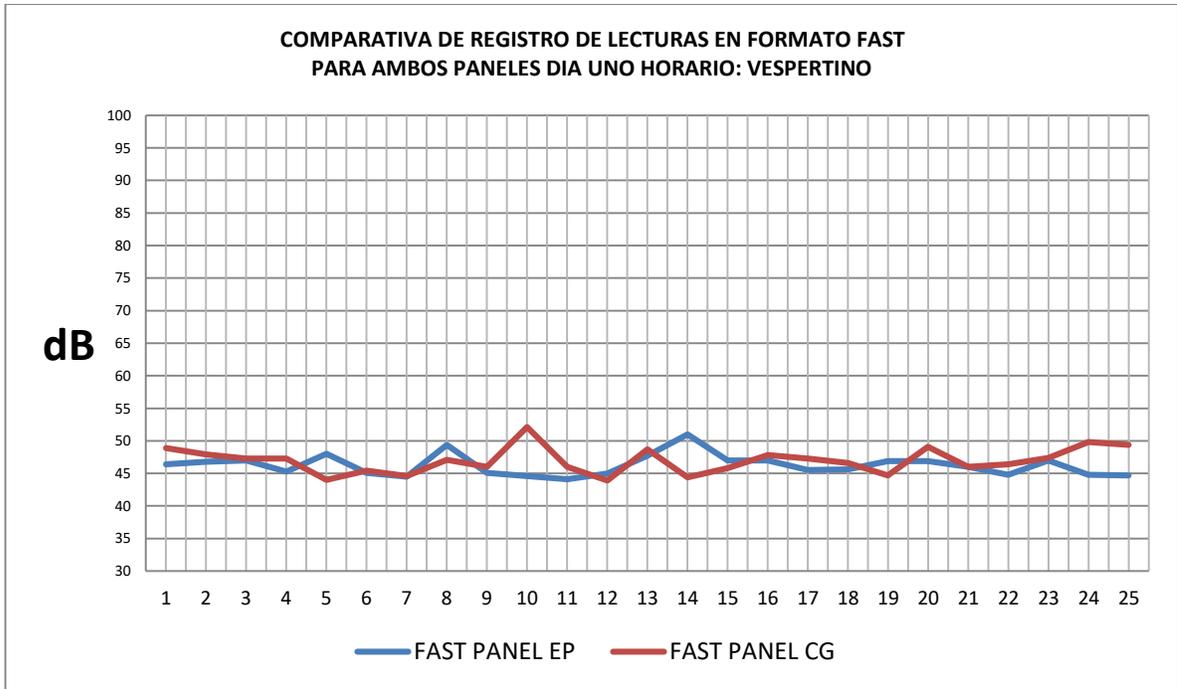


Figura 50. Gráfico comparativo de lecturas (FAST) tomadas de ambos paneles por la tarde del día uno.

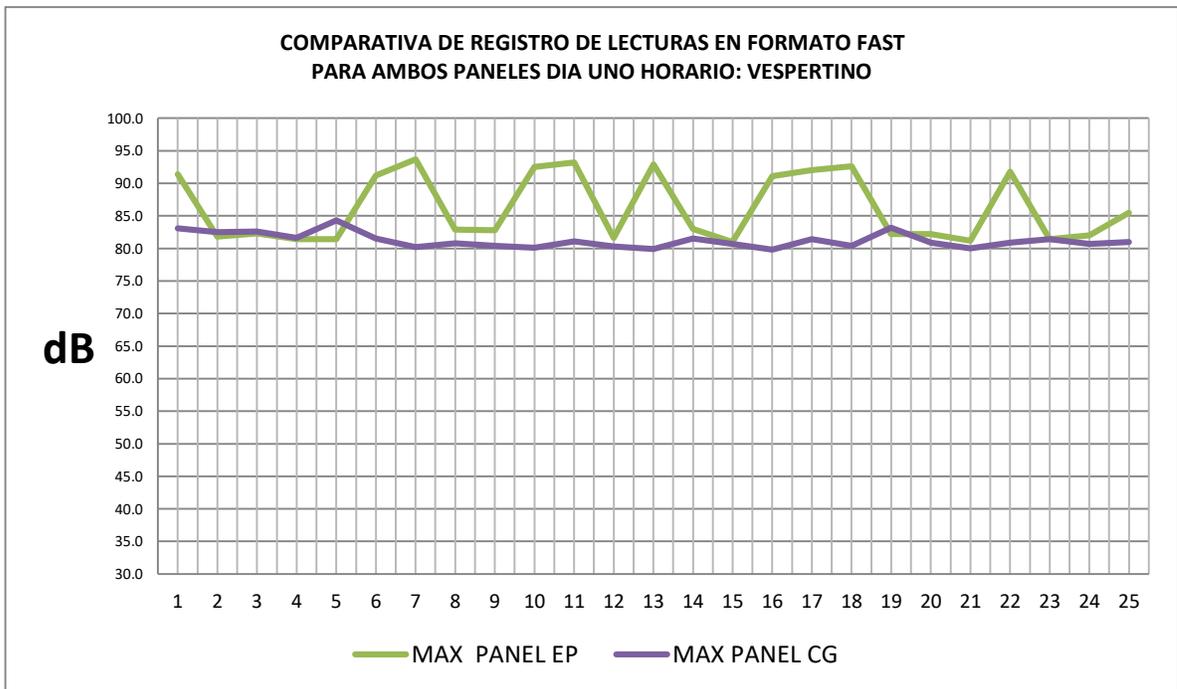


Figura 51. Gráfico comparativo de lecturas (MAX) tomadas de ambos paneles por la tarde del día uno.

Tabla 23. Registro de lecturas tomadas para el panel (EP) por la noche en el día uno.

PANEL DE ESPUMA DE POLIURETANO (EP)		
RECOLECCIÓN DE MUESTRAS		
HORARIO: NOCTURNO		
NO. MUESTRA	TIPO DE LECTURA (FAST)	TIPO DE LECTURA (MAX)
1	44.50	80.80
2	45.40	81.40
3	44.60	81.70
4	45.40	79.30
5	52.10	79.10
6	48.30	82.10
7	44.30	83.40
8	45.90	82.00
9	45.10	81.00
10	47.00	79.80
11	44.30	79.30
12	44.10	79.80
13	52.70	79.00
14	45.60	82.90
15	53.80	80.90
16	47.80	81.20
17	43.70	80.70
18	44.20	81.80
19	43.40	80.90
20	43.80	83.60
21	42.20	83.70
22	43.10	82.40
23	45.30	80.40
24	44.60	81.30
25	43.50	79.80

Tabla 24. Registro de lecturas tomadas para el panel (CG) por la noche en el día uno.

PANEL DE CAUCHO GRANULAR (CG)		
RECOLECCIÓN DE MUESTRAS		
HORARIO: NOCTURNO		
NO. MUESTRA	TIPO DE LECTURA (FAST)	TIPO DE LECTURA (MAX)
1	45.30	82.10
2	44.40	78.70
3	43.80	79.10
4	45.40	79.60
5	47.20	80.70
6	46.00	79.70
7	46.10	78.80
8	48.10	80.60
9	43.80	79.80
10	45.70	79.10
11	45.60	81.00
12	44.60	79.40
13	43.70	78.60
14	43.30	79.10
15	44.20	80.00
16	45.80	78.90
17	46.30	79.00
18	46.80	78.80
19	44.20	79.70
20	44.10	79.00
21	42.80	79.60
22	45.80	78.20
23	44.20	78.90
24	44.90	80.90
25	50.40	78.80

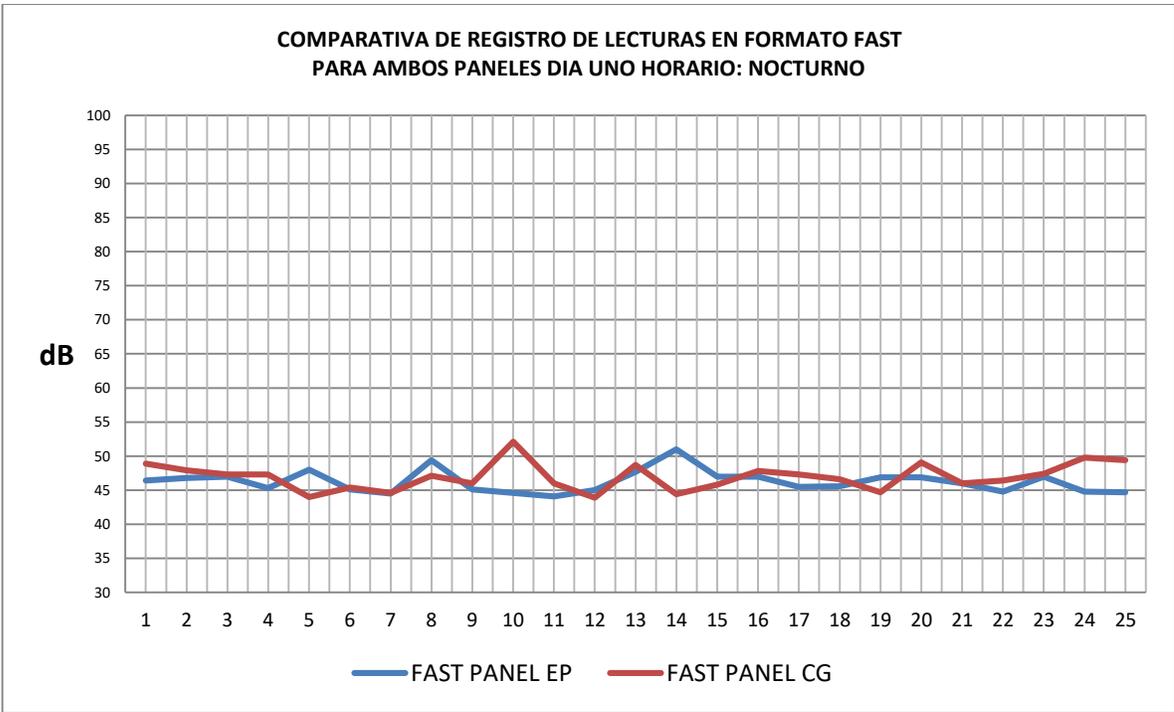


Figura 52. Gráfico comparativo de lecturas (FAST) tomadas de ambos paneles por la noche del día uno.

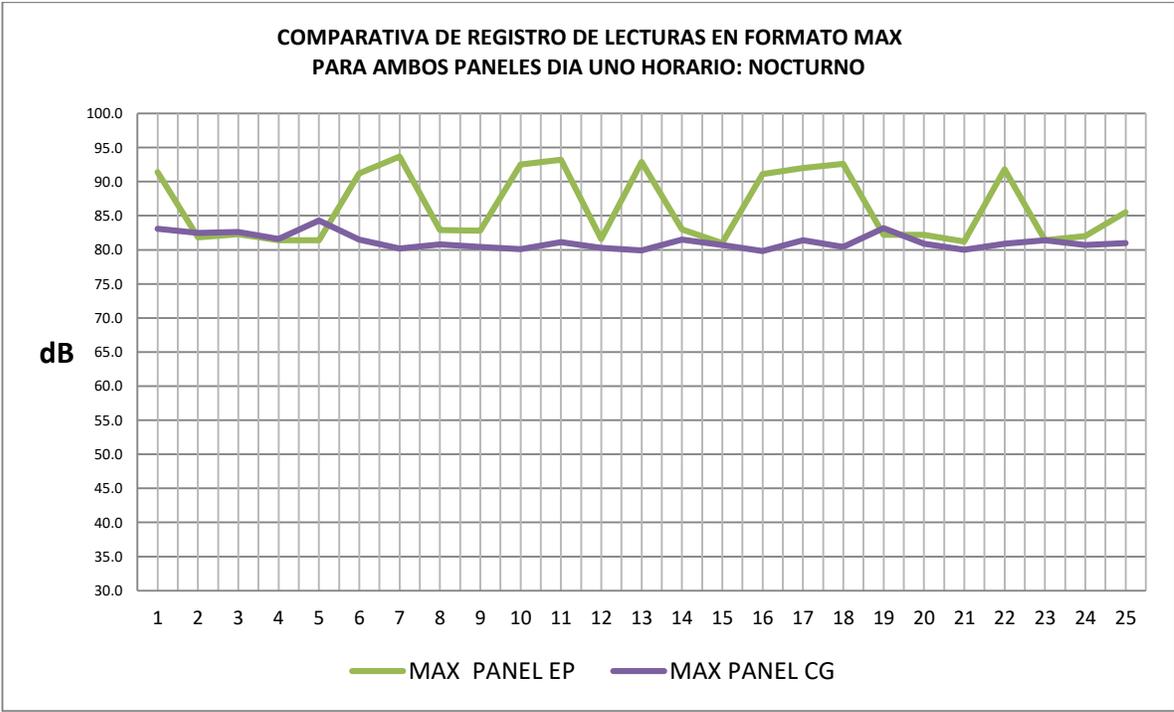


Figura 53. Gráfico comparativo de lecturas (MAX) tomadas de ambos paneles por la noche del día uno.

El segundo día de la misma manera se tomaron 150 muestras en total en el mismo orden antes descrito; las primeras 50 se tomaron por la mañana, las segundas 50 por la tarde y las terceras 50 por la noche, divididas en dos partes 25 para el panel de esponja de poliuretano (EP) y 25 para el panel de caucho granular (CG). Para la toma de estas muestras, el aparato de medición se configuró como se indica en las tablas 25, 26, 27, 28, 29 y 30 (MAX) para la primera mitad y lectura rápida (FAST) para la segunda. Posteriormente en los gráficos 54, 55, 56, 57, 58 y 59 se observa los resultados comparativos de la eficiencia de cada panel.

Tabla 25. Registro de lecturas tomadas para el panel (EP) por la mañana en el día dos.

PANEL DE ESPUMA DE POLIURETANO (EP)		
RECOLECCIÓN DE MUESTRAS HORARIO: DIURNO		
NO. MUESTRA	TIPO DE LECTURA (FAST)	TIPO DE LECTURA (MAX)
1	47.00	91.40
2	47.50	83.40
3	51.70	82.90
4	46.00	92.20
5	43.70	82.80
6	45.50	84.40
7	53.80	81.30
8	48.80	81.50
9	47.80	92.00
10	45.50	81.20
11	52.40	80.00
12	47.90	81.20
13	44.30	92.30
14	45.30	91.10
15	44.50	81.10
16	47.10	91.80
17	45.00	83.60
18	45.00	92.40
19	44.10	82.60
20	44.40	82.90
21	43.80	92.00
22	44.00	92.90

23	46.30	92.00
24	47.60	91.80
25	43.90	80.30

Tabla 26. Registro de lecturas tomadas para el panel (CG) por la mañana en el día dos.

PANEL DE CAUCHO GRANULAR (CG)		
RECOLECCIÓN DE MUESTRAS		
HORARIO: DIURNO		
NO. MUESTRA	TIPO DE LECTURA (FAST)	TIPO DE LECTURA (MAX)
1	43.80	79.80
2	42.60	80.50
3	44.50	82.30
4	44.80	81.20
5	49.50	82.70
6	43.80	80.10
7	44.00	80.20
8	50.20	81.80
9	45.70	82.20
10	45.10	82.50
11	43.60	82.40
12	42.80	81.30
13	43.90	81.10
14	44.30	81.80
15	47.80	83.30
16	44.10	80.00
17	44.40	80.30
18	45.00	79.70
19	47.60	83.40
20	43.30	81.80
21	43.50	80.40
22	50.20	80.30
23	45.60	80.40
24	48.00	81.60
25	43.90	82.90

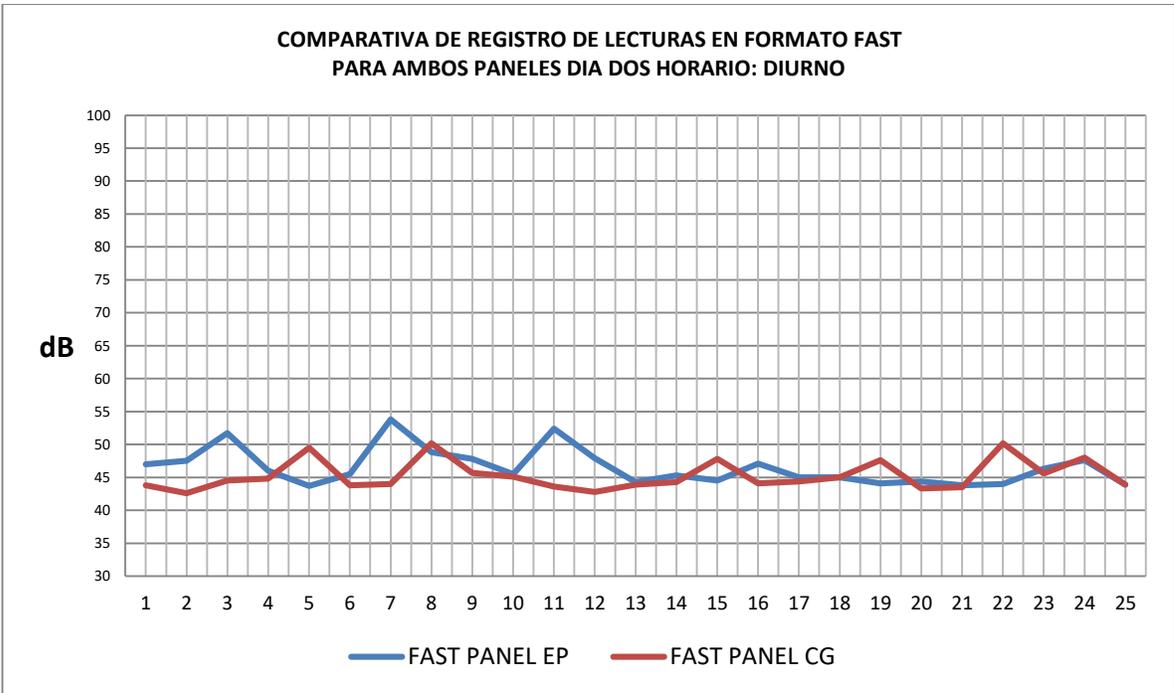


Figura 54. Gráfico comparativo de lecturas (FAST) tomadas de ambos paneles por la mañana del día dos.

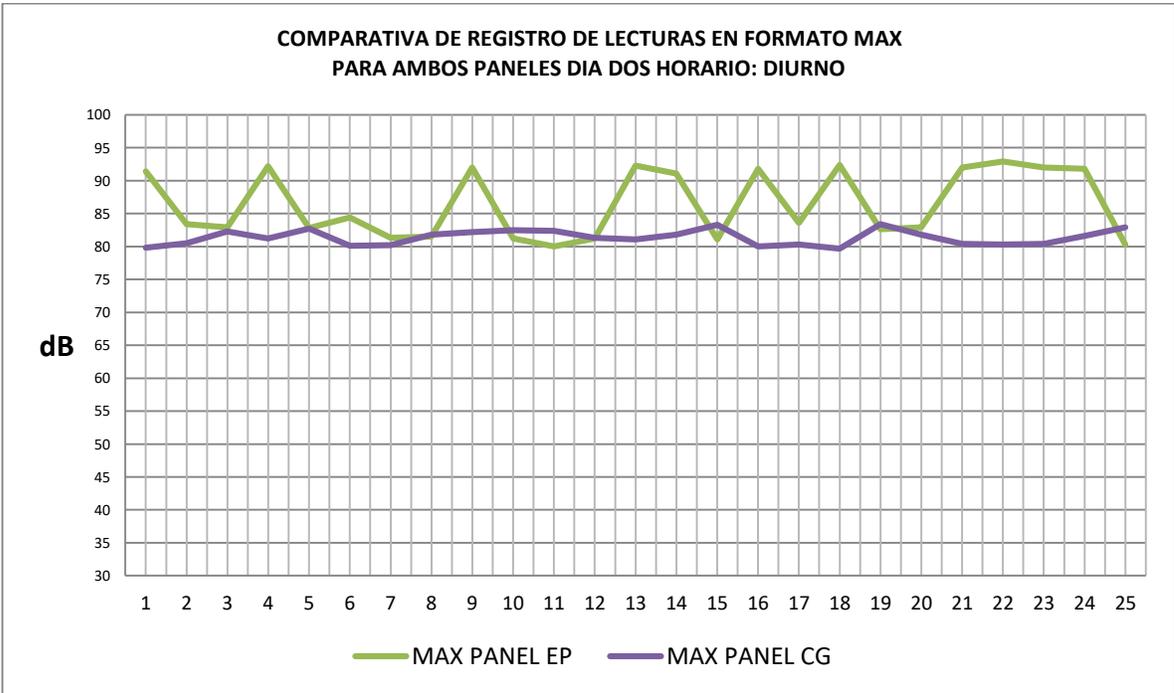


Figura 55. Gráfico comparativo de lecturas (MAX) tomadas de ambos paneles por la mañana del día dos.

Tabla 27. Registro de lecturas tomadas para el panel (EP) por la tarde del día dos.

PANEL DE ESPUMA DE POLIURETANO (EP)		
RECOLECCIÓN DE MUESTRAS HORARIO VESPERTINO		
NO. MUESTRA	TIPO DE LECTURA (FAST)	TIPO DE LECTURA (MAX)
1	51.40	92.30
2	46.50	83.40
3	50.90	84.50
4	45.90	92.50
5	47.50	91.90
6	47.20	82.60
7	45.30	92.90
8	47.80	81.40
9	45.40	82.60
10	46.00	85.00
11	47.90	92.60
12	49.00	92.90
13	47.10	91.30
14	43.60	91.40
15	52.40	91.80
16	46.30	91.60
17	45.20	84.80
18	46.90	83.60
19	49.80	91.50
20	45.90	92.00
21	44.40	91.60
22	49.70	81.40
23	44.90	91.10
24	47.80	91.70
25	45.60	91.30

Tabla 28. Registro de lecturas tomadas para el panel (CG) por la tarde del día dos.

PANEL DE CAUCHO GRANULAR (CG)		
RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE VESPERTINO		
NO. MUESTRA	TIPO DE LECTURA (FAST)	TIPO DE LECTURA (MAX)
1	44.70	92.50
2	47.40	83.60
3	47.20	93.30
4	45.10	81.40
5	45.60	83.70
6	44.70	82.00
7	43.70	83.20
8	44.70	84.20
9	43.70	91.20
10	44.90	81.40
11	45.70	91.50
12	45.00	80.00
13	46.40	81.50
14	45.70	84.50
15	42.70	84.50
16	44.90	91.70
17	45.50	80.30
18	45.20	81.10
19	45.20	83.10
20	46.60	83.70
21	46.20	84.10
22	47.00	92.00
23	49.20	81.20
24	45.10	80.90
25	46.80	80.00

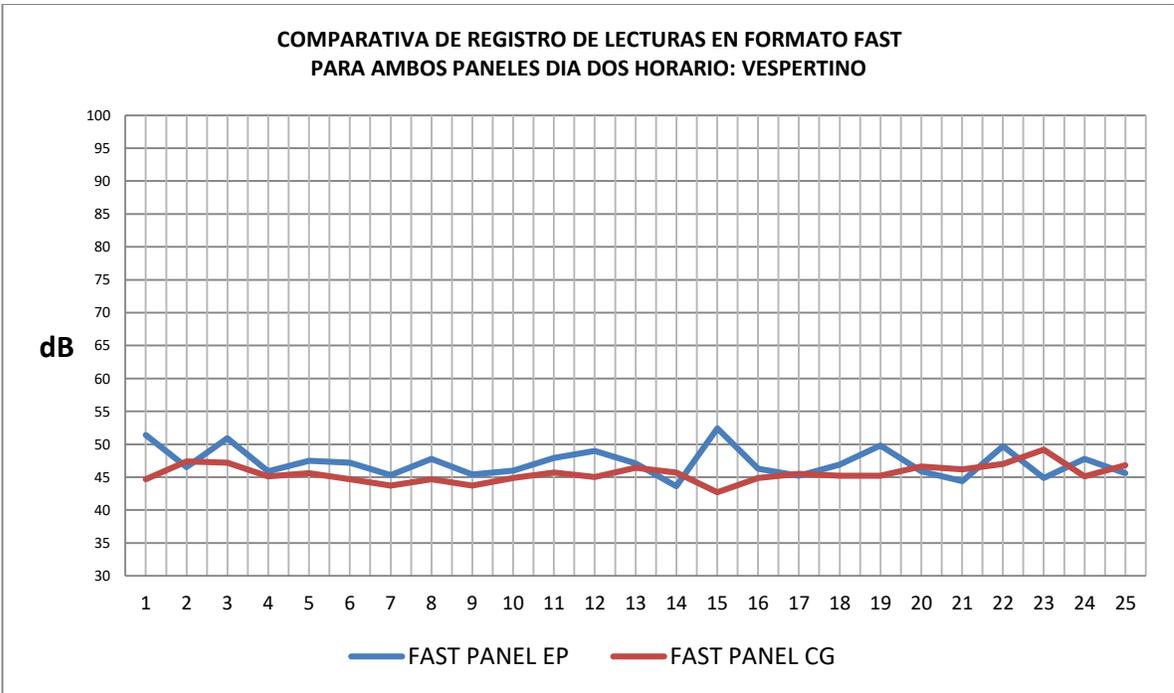


Figura 56. Gráfico comparativo de lecturas (FAST) tomadas de ambos paneles por la tarde del día dos.

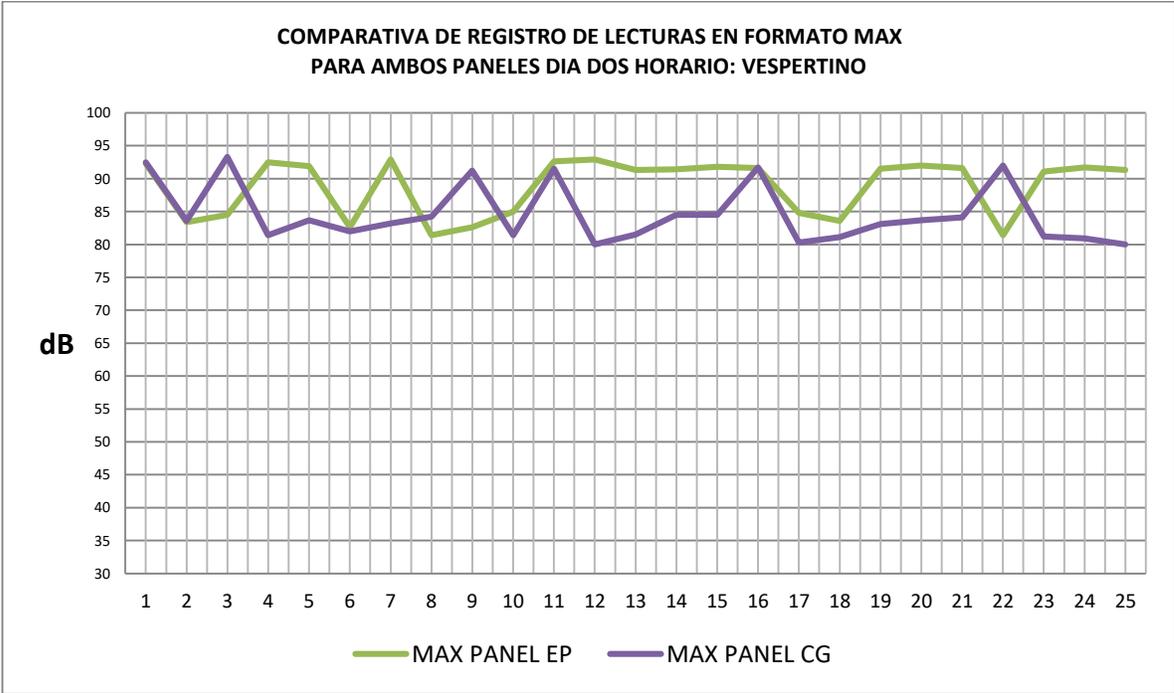


Figura 57. Gráfico comparativo de lecturas (MAX) tomadas de ambos paneles por la tarde del día dos.

Tabla 29. Registro de lecturas tomadas para el panel (EP) por la noche del día dos.

PANEL DE ESPUMA DE POLIURETANO (EP)		
RECOLECCIÓN DE MUESTRAS HORARIO: NOCTURNO		
NO. MUESTRA	TIPO DE LECTURA (FAST)	TIPO DE LECTURA (MAX)
1	44.20	82.70
2	43.70	81.40
3	43.90	92.60
4	45.00	92.20
5	43.30	93.80
6	42.40	91.30
7	43.80	93.80
8	43.90	91.70
9	48.50	83.40
10	43.60	92.40
11	45.30	92.20
12	45.20	92.40
13	43.80	92.60
14	43.30	91.60
15	44.80	92.70
16	44.80	91.40
17	43.00	93.40
18	43.90	92.70
19	45.30	91.50
20	42.80	91.90
21	44.60	92.50
22	44.30	91.60
23	45.20	92.80
24	44.70	81.70
25	44.60	92.70

Tabla 30. Registro de lecturas tomadas para el panel (CG) por la noche del día dos.

PANEL DE CAUCHO GRANULAR (CG)		
RECOLECCIÓN DE MUESTRAS		
HORARIO: NOCTURNO		
NO. MUESTRA	TIPO DE LECTURA (FAST)	TIPO DE LECTURA (MAX)
1	45.30	84.30
2	45.20	84.10
3	48.80	82.50
4	43.70	81.90
5	43.30	86.00
6	43.80	81.20
7	47.50	84.10
8	44.70	82.70
9	44.40	91.20
10	45.60	81.80
11	45.40	91.10
12	45.90	81.60
13	45.60	91.90
14	44.40	83.90
15	44.60	81.10
16	45.30	85.00
17	44.60	81.20
18	44.30	81.50
19	44.90	91.90
20	45.60	85.50
21	45.00	82.00
22	49.70	83.00
23	45.70	91.70
24	44.60	84.20
25	45.50	91.90

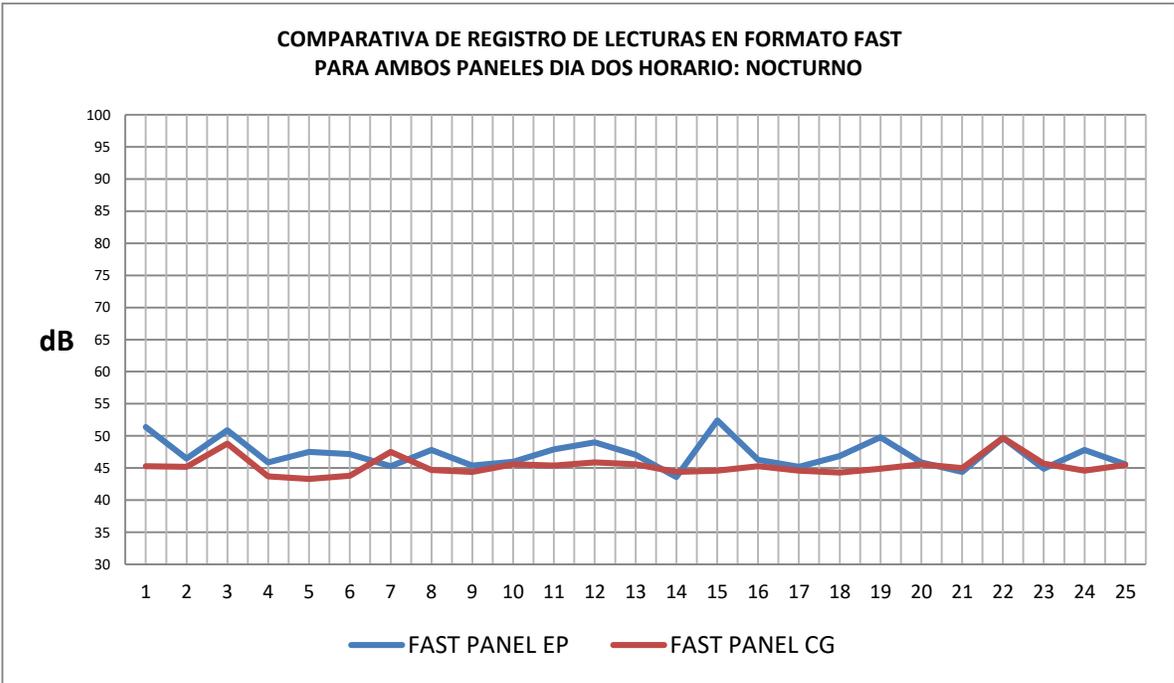


Figura 58. Gráfico comparativo de lecturas (FAST) tomadas de ambos paneles por la noche del día dos.

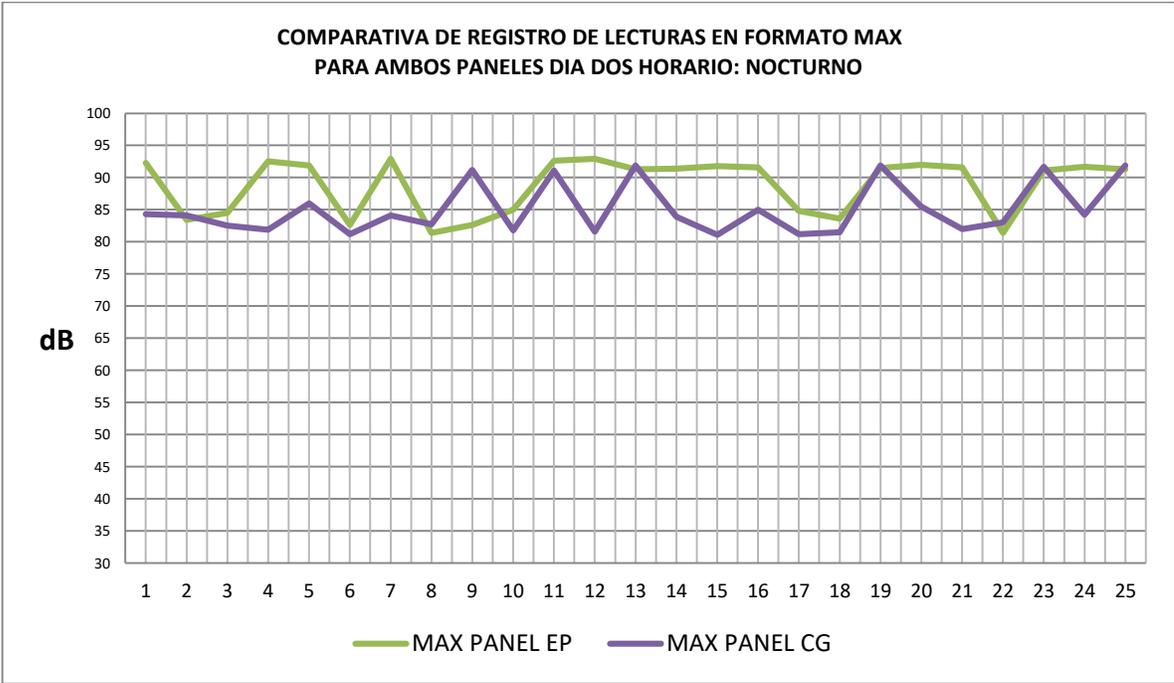


Figura 59. Gráfico comparativo de lecturas (MAX) tomadas de ambos paneles por la noche del día dos.

En el día tres se tomaron igualmente un total de 150 muestras, por la mañana, por la tarde y por la noche como se indica en las Tablas 31, 32, 33, 34, 35 y 36 con las configuraciones antes descritas en los días primeros. En las gráficas 60, 61, 62, 63, 64 y 65 se ilustran las comparativas de las tomas de muestras para cada panel.

Tabla 31. Registro de lecturas tomadas para el panel (EP) por la mañana del día tres.

PANEL DE ESPUMA DE POLIURETANO (EP)		
RECOLECCIÓN DE MUESTRAS HORARIO: DIURNO		
NO. MUESTRA	TIPO DE LECTURA (FAST)	TIPO DE LECTURA (MAX)
1	45.50	91.60
2	50.00	91.60
3	48.60	92.30
4	45.40	81.90
5	46.90	91.20
6	49.70	91.50
7	48.80	91.10
8	46.30	92.40
9	47.90	80.40
10	48.10	92.10
11	46.30	80.40
12	46.90	92.20
13	44.20	91.10
14	44.30	93.40
15	46.40	92.20
16	45.00	91.60
17	45.90	83.20
18	45.80	92.40
19	44.10	92.80
20	47.50	91.80
21	44.80	91.50
22	46.70	91.20
23	43.90	91.40
24	45.90	91.60
25	46.70	91.60

Tabla 32. Registro de lecturas tomadas para el panel (CG) por la mañana del día tres.

PANEL DE CAUCHO GRANULAR (CG)		
RECOLECCIÓN DE MUESTRAS		
HORARIO: DIURNO		
NO. MUESTRA	TIPO DE LECTURA (FAST)	TIPO DE LECTURA (MAX)
1	49.90	79.90
2	48.00	78.60
3	46.90	80.30
4	45.80	82.60
5	45.50	82.50
6	47.10	81.00
7	45.50	78.80
8	45.30	79.70
9	47.90	78.90
10	47.50	79.60
11	46.10	79.80
12	46.80	80.70
13	46.50	80.10
14	46.00	80.10
15	45.70	79.40
16	43.20	82.60
17	44.40	81.10
18	50.10	79.30
19	45.10	79.80
20	45.90	79.00
21	46.60	81.40
22	43.80	80.40
23	45.90	80.50
24	45.00	80.30
25	44.50	80.20

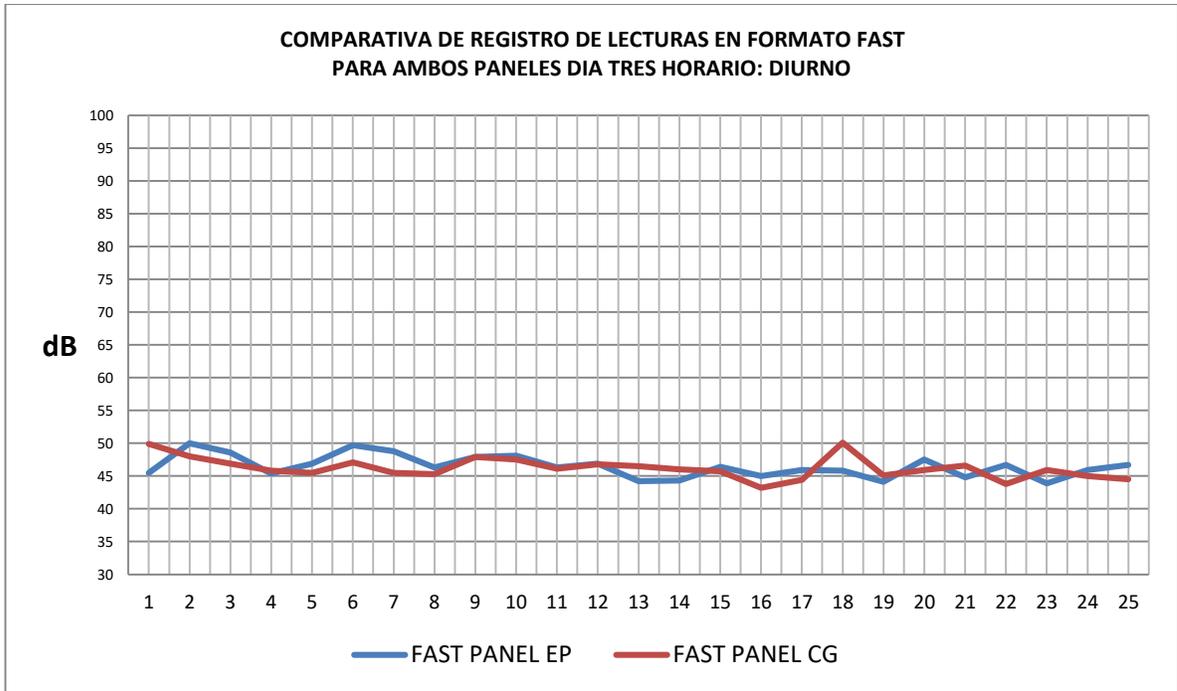


Figura 60. Gráfico comparativo de lecturas (FAST) tomadas de ambos paneles por la mañana del día tres.

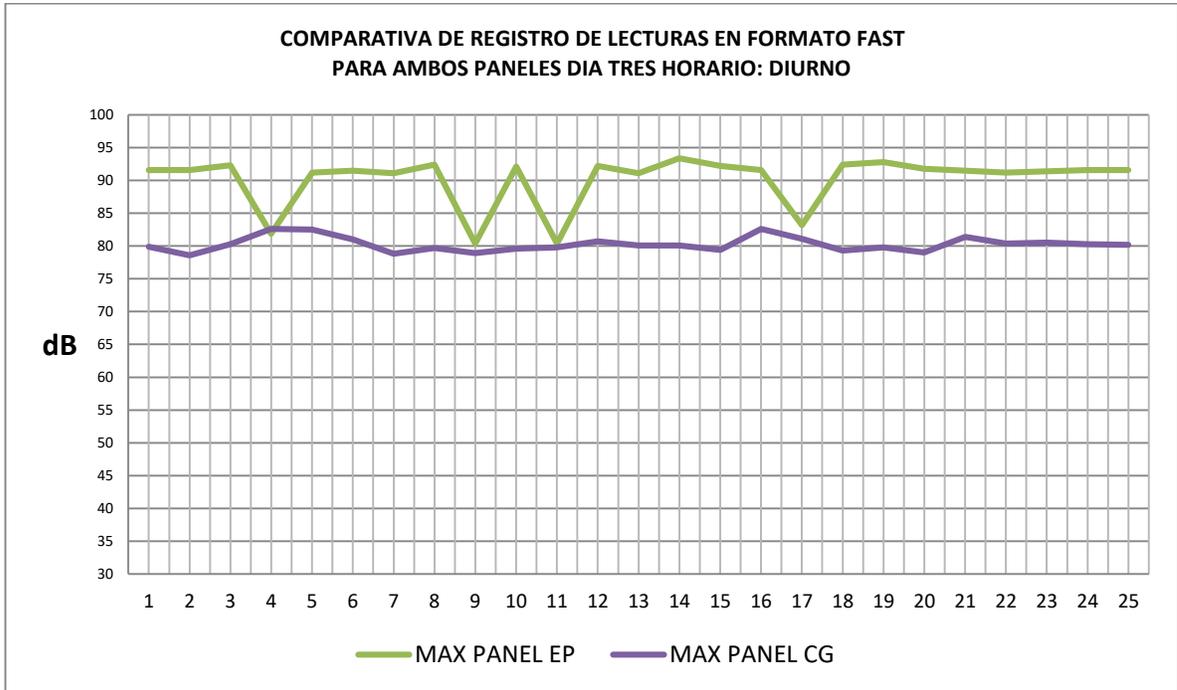


Figura 61. Gráfico comparativo de lecturas (MAX) tomadas de ambos paneles por la mañana del día tres.

Tabla 33. Registro de lecturas tomadas para el panel (EP) por la tarde del día tres.

PANEL DE ESPUMA DE POLIURETANO (EP)		
RECOLECCIÓN DE MUESTRAS HORARIO: VESPERTINO		
NO. MUESTRA	TIPO DE LECTURA (FAST)	TIPO DE LECTURA (MAX)
1	48.60	82.00
2	48.90	91.90
3	48.80	91.90
4	47.20	92.30
5	44.60	92.60
6	46.30	86.30
7	46.20	93.70
8	47.70	82.70
9	48.90	92.80
10	46.90	92.30
11	49.90	93.60
12	43.70	91.30
13	44.20	81.70
14	45.70	92.60
15	46.10	91.60
16	48.60	91.70
17	45.40	93.60
18	44.70	91.20
19	48.00	92.10
20	45.40	92.30
21	46.70	92.90
22	45.70	83.30
23	46.80	91.20
24	44.80	85.30
25	44.70	92.00

Tabla 34. Registro de lecturas tomadas para el panel (CG) por la tarde del día tres.

PANEL DE CAUCHO GRANULAR (CG)		
RECOLECCIÓN DE MUESTRAS		
HORARIO: VESPERTINO		
NO. MUESTRA	TIPO DE LECTURA (FAST)	TIPO DE LECTURA (MAX)
1	47.00	81.50
2	45.20	81.80
3	46.40	81.70
4	46.10	82.60
5	48.10	91.10
6	47.40	91.70
7	45.20	92.20
8	47.60	80.60
9	42.20	91.50
10	47.80	91.80
11	46.80	81.70
12	45.40	81.70
13	46.80	92.30
14	45.20	80.90
15	45.10	84.80
16	51.70	81.20
17	47.80	91.40
18	46.40	84.80
19	48.10	90.00
20	47.40	81.10
21	48.60	81.60
22	46.40	79.70
23	46.10	92.30
24	45.40	81.30
25	48.10	83.50

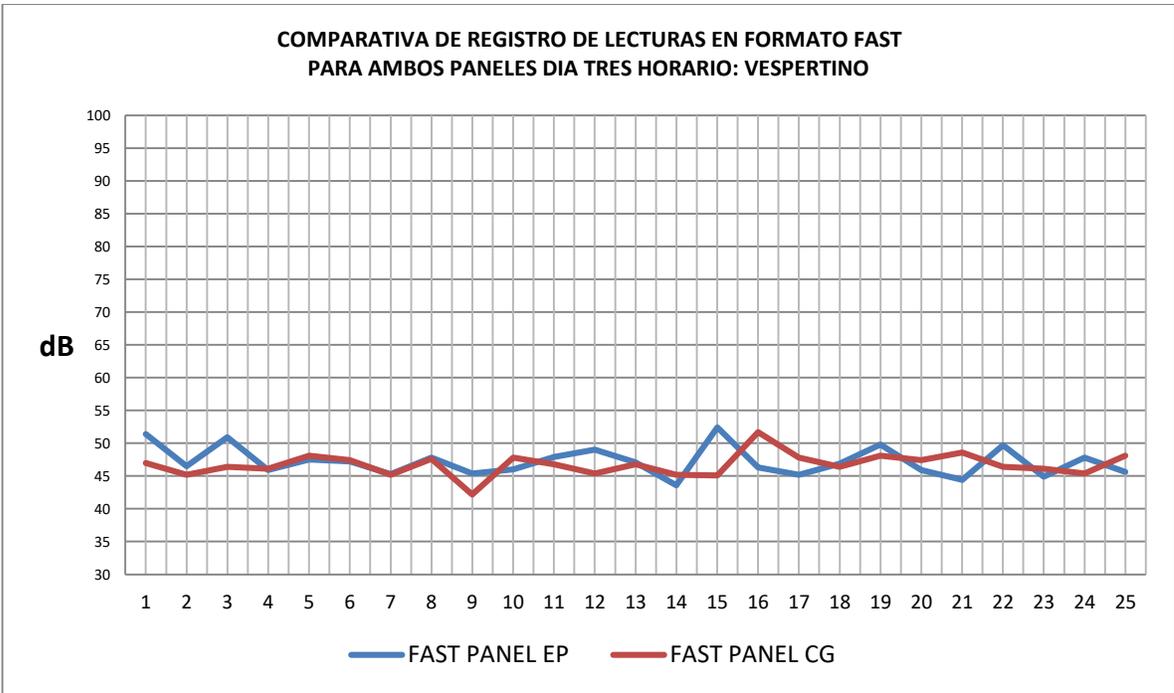


Figura 62. Gráfico comparativo de lecturas (FAST) tomadas de ambos paneles por la tarde del día tres.

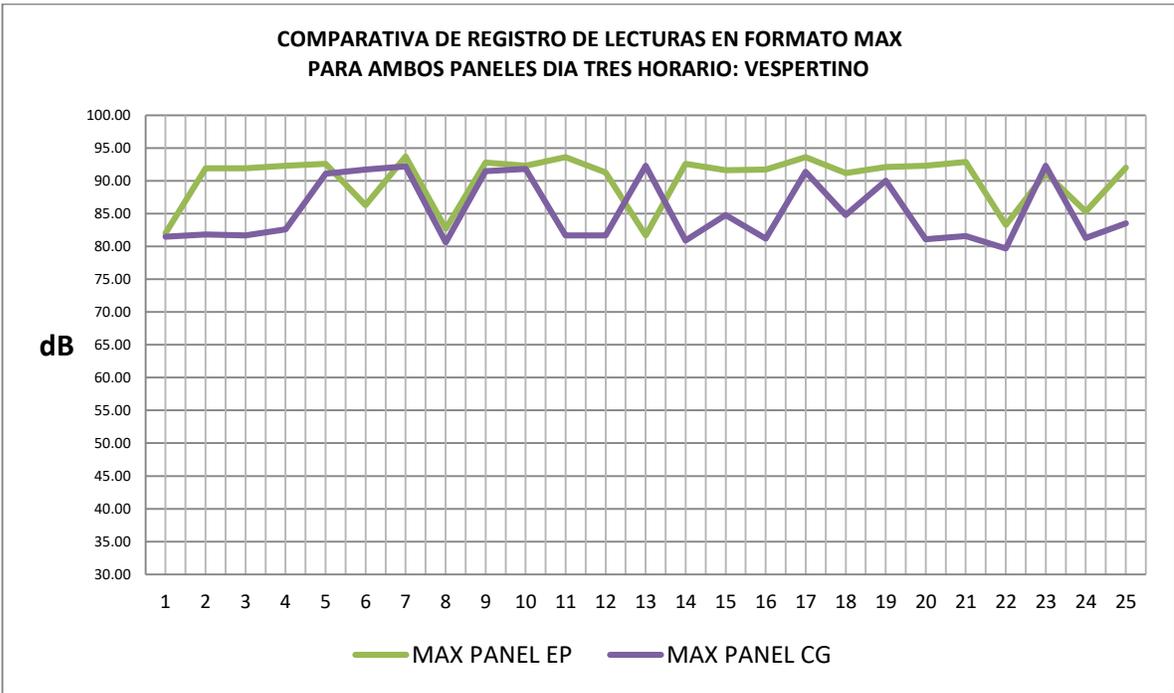


Figura 63. Gráfico comparativo de lecturas (MAX) tomadas de ambos paneles por la tarde del día tres.

Tabla 35. Registro de lecturas tomadas para el panel (EP) por la noche del día tres.

PANEL DE ESPUMA DE POLIURETANO (EP)		
RECOLECCIÓN DE MUESTRAS HORARIO: NOCTURNO		
NO. MUESTRA	TIPO DE LECTURA (FAST)	TIPO DE LECTURA (MAX)
1	45.5	92.2
2	47.50	92.90
3	46.60	91.40
4	46.10	92.10
5	48.10	91.20
6	45.90	91.20
7	46.00	91.10
8	47.00	92.20
9	45.00	92.10
10	46.20	92.40
11	47.40	93.00
12	46.90	92.70
13	48.30	91.30
14	46.90	82.50
15	48.80	91.40
16	47.00	92.40
17	50.70	91.90
18	46.80	93.30
19	48.00	83.00
20	47.40	91.40
21	48.50	93.10
22	49.30	91.10
23	48.90	91.80
24	47.00	91.80
25	47.60	91.40

Tabla 36. Registro de lecturas tomadas para el panel (CG) por la noche del día tres.

PANEL DE CAUCHO GRANULAR (CG)		
RECOLECCIÓN DE MUESTRAS		
HORARIO: NOCTURNO		
NO. MUESTRA	TIPO DE LECTURA (FAST)	TIPO DE LECTURA (MAX)
1	49.4	80.2
2	46.80	80.80
3	46.50	82.00
4	47.40	81.20
5	45.50	83.60
6	47.30	82.90
7	47.70	82.80
8	45.30	80.70
9	45.60	80.20
10	45.70	83.20
11	46.50	82.00
12	45.10	80.90
13	47.30	92.00
14	45.40	80.60
15	45.80	80.70
16	50.70	81.50
17	48.80	91.80
18	45.70	84.60
19	47.20	92.00
20	51.70	83.70
21	45.10	84.10
22	46.00	91.10
23	45.40	92.50
24	45.10	81.00
25	45.60	82.50

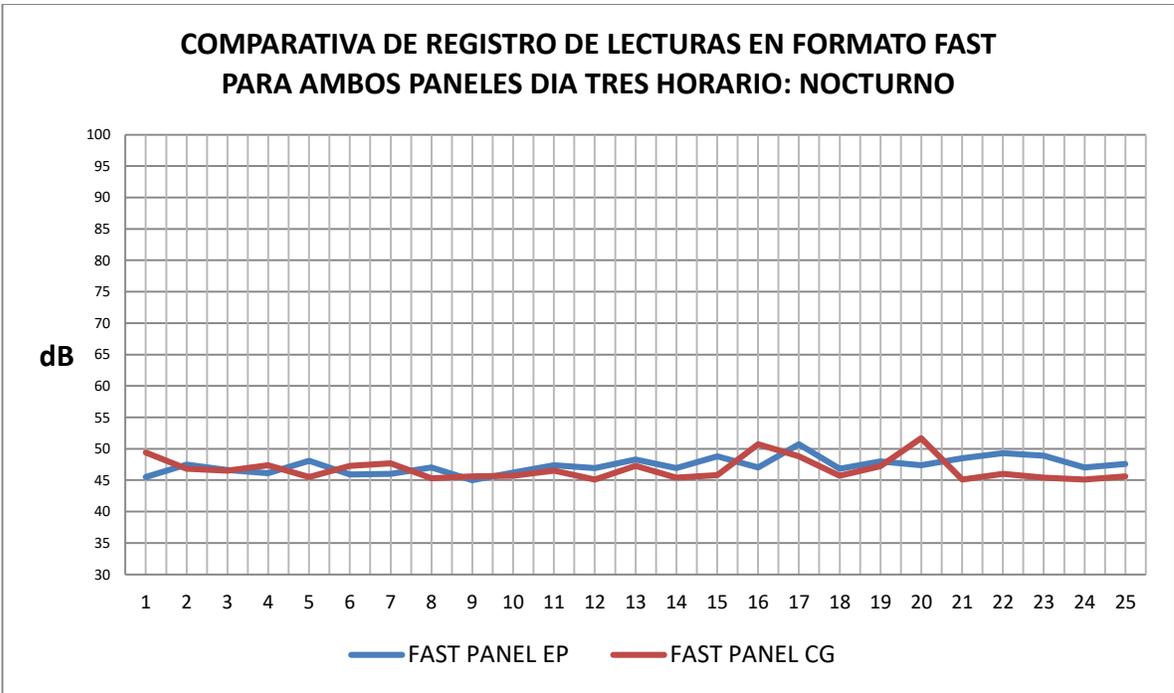


Figura 64. Gráfico comparativo de lecturas (FAST) tomadas de ambos paneles por la noche en el día tres.

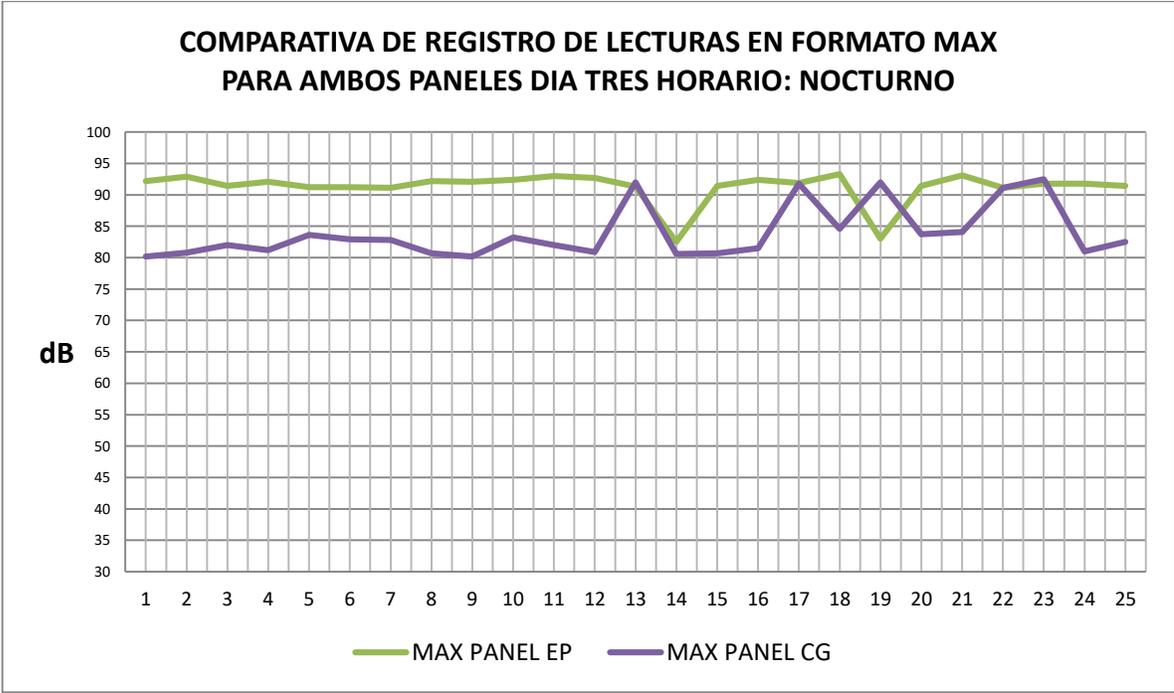


Figura 65. Gráfico comparativo de lecturas (MAX) tomadas de ambos paneles por la noche en el día tres.

La resistencia que ofrece un material al flujo de aire, que reduce la amplitud de la onda sonora, es la base de la capacidad de un material para absorber el sonido. Es posible que los materiales porosos absorban parcialmente las ondas sonoras y posteriormente dispersen esta energía en forma de cantidades mínimas de calor.

La esponja de poliuretano se encuentra clasificada entre los materiales con mayores propiedades de absorción situándose entre B y A debido a sus características porosas. De acuerdo con la literatura citada anteriormente, los gránulos de caucho, se clasifican entre E y A; sin embargo, esta clasificación depende y está determinada por el tamaño del agregado, el aglutinante y el grosor del panel o capa de material.

En este caso concreto el rendimiento acústico del panel de caucho granular (CG) estuvo determinado por el granulo del caucho con tamaños de 1 a 3 mm y una resina como ligante en una proporción de 70 y 30% respectivamente con un espesor de panel de 3,5 mm. Los gráficos anteriores (Figuras 49,50,51,52,53 y 54) muestran los resultados de esta combinación de diseño y dimensiones. En los cuales queda de manifiesto que se obtuvo un material de tipo mortero con resultados comparativamente similares a los de la esponja de poliuretano y en algunos casos marginalmente superiores que en otros.

Durante un periodo de tres días se obtuvieron un total de 450 muestras registradas, de las cuales la mitad fueron tomadas en modo de lectura (FAST) y la otra mitad en modo de lectura (MAX) de estos resultados se calcularon las promediaciones como se muestran en la Tabla 37.

El panel de esponja de poliuretano (EP) presentó un promedio general de 46.36 dB contra un promedio de 46.07 dB para el panel de gránulos de caucho (CG) como se muestra en la Tabla 37 con respecto al modo de lectura (FAST), teniendo como resultado una diferencia de 0.29 dB.

Tabla 37. Registros de lectura en modo (FAST).

Valores centrales para el Panel (EP)	
Media	46,36 dB
Mediana	46,00 dB
Moda	47,00 dB
Valores centrales para el Panel (CG)	
Media	46,07 dB
Mediana	45,70 dB
Moda	45,60 dB

Para la segunda parte del conjunto de datos tomados en formato (MAX) se obtuvieron los valores centrales como se muestra en la Tabla 38 obteniendo un promedio general de 88,32 dB para el panel de esponja de poliuretano (EP) y 82,55 dB para el panel de caucho granular. La diferencia obtenida entre estas promediaciones dio como resultado 5.77 dB.

Tabla 38. Registros de lecturas en modo (MAX).

Valores centrales para el Panel (EP)	
Media	88,32 dB
Mediana	91,40 dB
Moda	91,40 dB
Valores centrales para el Panel (CG)	
Media	82,55 dB
Mediana	81,40 dB
Moda	80,70 dB

Por tanto, se puede resumir que el panel de caucho granular obtuvo un rendimiento relativamente superior al bloquear aproximadamente una diferencia de 5.77 dB en modo de lectura (MAX) más que el panel construido con esponja de poliuretano, lo que muestra una absorción moderadamente superior, según el análisis de las medidas de tendencia central, para el modo de lectura (MAX), en cambio la diferencia de los resultados obtenidos en el modo de lectura (FAST) fue muy similar para ambos paneles.

7. CONCLUSIONES.

Las principales aportaciones de este trabajo son: conocer la dosificación de los materiales de caucho granular y resina para obtener una mezcla que pueda ser manipulada y que cuente con buenas propiedades de adherencia; en segundo lugar, la caracterización y evaluación de la granulometría de las migas de caucho en conjunto con el aglutinante con la mezcla de caucho-resina como absorbentes acústicos, ya que su morfología conjuga las propiedades de los resonadores de múltiple cavidad con las propiedades de un material granular proveniente del reciclado.

En vista de los resultados experimentales obtenidos, se puede concluir que este material granular mezclado con un aglutinante (acetato de polivinilo) confirman ser una alternativa viable en sustitución de los materiales habituales empleados en aplicaciones que requieren absorción acústica principalmente en el área de la construcción.

Se puede concluir de estos resultados que el panel de caucho granular, en las pruebas realizadas con el sonómetro en el modo de lectura (FAST), arrojó resultados similares e incluso menores con respecto al panel de esponja de poliuretano. Así se observa que, aunque es un material más rígido que la esponja, no se convirtió en un elemento reflectante, manteniendo las características de poca o nula reflexión que tienen los materiales blandos y porosos como las espumas, evitando que un sonido se convierta en irritante o peligroso.

Con respecto a los datos obtenidos en la prueba en modo (MAX) se puede concluir que el panel de caucho tuvo una transmisión de sonido menor que la del panel de esponja de poliuretano, de acuerdo a los registros de lectura con el panel de caucho granular se logró bloquear 5.77 dB más que con el panel de esponja de poliuretano, representado un 7.5% más de bloqueo de ruido en cuanto a los datos correspondientes a la media o promedio para de cada panel.

El producto final se aligeró con sólo rellenar el 75% de la superficie con el material absorbente gracias a los 28 orificios o perforaciones espaciados uniformemente que cubrían la superficie del panel. Sin embargo, sigue siendo un panel con un peso

considerablemente superior a los comunes en el mercado. Por lo cual las aplicaciones en las que el peso sea un factor importante, el compuesto elaborado con esta mezcla puede resultar inadecuado.

Por otra parte, la incorporación de energías y elementos no contaminantes o provenientes del reciclado pueden dar un valor agregado a este tipo de materiales. En el caso de la construcción y a pesar de su peso considerable este material puede ser empleado como material oculto tras paredes.

Para su utilización en el exterior este panel en cuanto a las posibilidades de forma y figura la mezcla de caucho-resina ofrece múltiples posibilidades pudiendo fabricar placas de distintos tamaños y formas limitadas solo al peso del material.

Es claro que quedan abiertos más factores interesantes de investigación orientados a dar solución a los posibles inconvenientes en la integración de este material como un elemento acústico viable dentro de la industria de la construcción principalmente, tales como sus propiedades térmicas y aislantes. Sin embargo, como se ha documentado, la mezcla y utilización de este material proveniente del reciclado confirma ser una alternativa a otros materiales tradicionales en elementos de control del ruido.

Finalmente, en estudios previos antes citados se han determinado las propiedades acústicas del caucho granular, como son la resistividad al flujo del aire y la porosidad características fundamentales para caracterizar un material acústico. De lo anterior queda igualmente abierta la posibilidad de estudiar estas mismas propiedades físicas del material que se obtuvo en este estudio, que fue un material producto de la mezcla del caucho granular y la resina.

8. FUTURAS APLICACIONES.

Las futuras aplicaciones para este material como ya se ha visto son múltiples y en constante crecimiento al ser materias primas que no parten de cero para su obtención.

En relación a la caracterización acústica se puede continuar el estudio y medición de parámetros acústicos implementando variaciones al material estudiado como:

Diseño geométrico: respecto a esto se puede continuar explorando su rendimiento acústico modificando parámetros como el tamaño, grosor y número de perforaciones.

Diseño de la mezcla: En cuanto al material de relleno que es la mezcla de caucho granular y el aglutinante, se puede explorar la posibilidad de trabajar con otras granulometrías incluso otros aglutinantes.

En aplicaciones como un sistema constructivo de control de ruido pueden plantearse múltiples vías de desarrollo, mejorando la calidad y las propiedades del producto final para que sea un elemento viable en la industria de la construcción.

9. REFERENCIAS.

- Abraham, E., Cherian, B., Elbi, P., Pothen L. y Thomas, S. (2011) "Recent Advances in the Recycling of Rubber Waste," en A. Fainleib y O. Grigoryeva, Recent Developments in Polymer Recycling. Kerala, India. Transworld Research Network. pp. 47-100, 2011.
- AcousticLab. (2021, abril 29). El confort acústico. AcousticLab. <https://www.acousticlab.com/el-confort-acustico/>
- Adhikari, B. (2000). Reclamation and recycling of waste rubber. *Progress in Polymer Science*, 25(7), 909–948. doi:10.1016/s0079-6700(00)00020-4
- Adhikari, B., De, D., & Maiti, S. (2000). Reclamation and Recycling of Waste Rubber. *Progress in Polymer Science*, 25 (7), pp. 909-948. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/s0079-6700\(00\)00020-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0079-6700(00)00020-4)
- Alfie-Cohen, M. & Salinas-Castillo, O., 2017. Ruido en la ciudad. Contaminación auditiva y ciudad caminable. *Estudios demográficos y urbanos*, 32(1), 65-96.
- ALLPE. (2019, abril 4). ¿cómo realizar una medición económica del aislamiento acústico de una ventana? ALLPE - Empresa de Medio Ambiente - Acústica - Topografía - Ingeniería; ALLPE. <https://www.allpe.com/acustica/ingenieria-acustica/mediciones-acusticas/medicion-del-aislamiento-acustico-de-una-ventana/>
- Ashori, A., Ghofrani, M., Rezvani, M. H., & Khojasteh Khosro, S., 2015. Utilization of waste tire rubber in hybrid plywood composite panel. *Polymers for Advanced Technologies*, 26(8), 1034–1040. doi:10.1002/pat.
- Asociación de la Industria del Poliuretano Rígido de España [IPUR] 2016. Prestaciones acústicas del poliuretano proyectado de celda cerrada. Disponible en: <https://aislaconpoliuretano.com/prestaciones-acusticas-poliuretano-proyectado-celda-cerrada/>

- Asociación de la Industria del Poliuretano Rígido de España [IPUR] 2020. Poliuretano proyectado: diferencias entre celda abierta y cerrada. Disponible en: <https://aislaconpoliuretano.com/poliuretano-proyectado-diferencias-entre-celda-abierta-y-celda-cerrada/>
- Benkreira, H., Khan, A., & Horoshenkov, K. V. (2011). Sustainable acoustic and thermal insulation materials from elastomeric waste residues. *Chemical Engineering Science*, 66(18), 4157–4171. doi:10.1016/j.ces.2011.05.047
- Berglund, B., Lindvall, T., Schwela, D.H. y Organización Mundial de la Salud [OMS] 1999. *“Guidelines for Community Noise”*.
- Boschi, C. E., Acosta, S.G., González, A.F. (2005). Determinación del coeficiente de aislación acústica de un muro construido con bloques de cemento rellenos con arena. Studenta. <https://es.studenta.com/content/117055776/determinaci-an-del-coeficiente-de-aislaci-an-ac-astica-de-un-muro-1>
- Carbajo, J., Cardenas, W., Torres, J., Ramis, J., & Molina, D. (2012). Una alternativa para el estudio acústico de paneles perforados. *Mar-Acustica.Es*. Recuperado el 19 de agosto de 2022, de <http://ftp.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/101.pdf>
- Carbajo, J., Cardenas, W., Torres, J., Ramis, J., & Molina, D. (octubre, 2012). Una alternativa para el estudio acústico de paneles perforados. VIII Congreso Ibero-americano de acústica, *Sea-Acustica.Es*. Évora, Portugal. <http://ftp.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/101.pdf>
- Castillo, J., & Costa, y. A. (2012). Características físicas de materiales absorbentes sonoros porosos. *Edu.ar*. Recuperado el 1 de agosto de 2023, de <https://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/fundamentosdeacusticayelectroacustica/pub/file/FAyE0412E1-Castillo-Costa.pdf>
- De Alva Salazar, H. S. (1999). Efecto de amilosa, amilopectina y sus derivados oxidados sobre la biodegradabilidad y propiedades en espumas de poliuretano [Centro de Investigación en Química Aplicada].

<https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/203/1/Hugo%20Eduardo%20De%20Alva%20Salazar%2C%20Doctorado.pdf>

Del Rey, R., Alba, J., Ramis, J., & Sanchís, V. J. (2011). New absorbent acoustic materials from plastic bottle remnants. *Materiales De Construcción*, 61(304), 547–558. <https://doi.org/10.3989/mc.2011.59610>

Deterioro cognitivo. (s/f). Gaesmedica.com. Recuperado el 23 de agosto de 2023, de <https://www.gaesmedica.com/es-es/fragilidad-presbiacusia/consecuencias-no-auditivas-asociadas-presbiacusia-trastornos-equilibrio/deterioro-cognitivo>

Domínguez Ruiz, Ana Lidia M. (2014). Vivir con ruido en la Ciudad de México. El proceso de adaptación a los entornos acústicamente hostiles. *Estudios demográficos y urbanos*, 29(1), 89-112. Recuperado en 23 de agosto de 2023, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-72102014000100089&lng=es&tlng=es.

Ecología y Desarrollo [ECODES] 2005. Niveles de exposición al ruido -. Ecodes.org. Disponible en: <https://archivo.ecodes.org/web/noticias/niveles-de-exposicion-al-ruido> [consultado el 19 de agosto de 2022]

Ecologistas en Acción. (2018, Septiembre 25). Las cementeras de Castilla y León queman más neumáticos de los recogidos en la región. Ecologistas en Acción. Disponible en <https://www.ecologistasenaccion.org/106192/las-cementeras-de-castilla-y-leon-queman-mas-neumaticos-de-los-recogidos-en-la-region/>

EPA de EE.UU. Manual de factores de exposición (1997, Informe final). Agencia de Protección Ambiental de EE. UU., Washington, DC, EPA/600/P-95/002F ac, 1997. disponible en: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NCEA&dirEntryId=12464, [consultado el 25 de marzo de 2021].

Ersoy, S., & Küçük, H. (2009). Investigation of industrial tea-leaf-fibre waste material

for its sound absorption properties. *Applied Acoustics*, 70(1), 215–220.
doi:10.1016/j.apacoust.2007.12.005

Escobar García, S. (2022, marzo 3). NOM-011-STPS-2001: Guía Rápida a la Exposición Laboral al Ruido. Grupo Microanálisis. <https://grupo-microanalisis.com/nom-011-stps-2001-exposicion-laboral-al-ruido/>

Esquerdo Lloret, T. V. (2015). Desarrollo de modelos de comportamiento acústico y caracterización experimental de materiales elaborados con aligerantes para la construcción. aplicación a sistemas de control de ruido. Universitat Politècnica de València.

European Tyre & Rubber Manufacturers' Association [ETRMA] 2010. “End of life tyres. A valuable resource with growing potential”. Disponible en: Signus.Es. https://www.signus.es/wp-content/uploads/2017/06/Etrma_elt_management_brochure_final_2010.pdf [consultado el 10 de agosto de 2022]. Bruselas.

European Tyre & Rubber Manufacturers' Association [ETRMA]. (Bélgica), 2011. La Informe Anual 2010/2011, Informe descargado de <<http://www.etrma.org/default.asp>> (mayo de 2011).

European Tyre & Rubber Manufacturers' Association [ETRMA]. 2014. Statics Booklet. Bruselas.

Fenómenos. (s/f). Universodelsonido.cl. Recuperado el 19 de julio de 2023, de <https://www.universodelsonido.cl/el-sonido/fenomenos/>

Fernández González, E. (2016). Estudio de la reverberación en las aulas y zonas comunes de la etsav. Uva.es. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/19982/TFG-A-046.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Fernández, D., Sánchez, I. F., & Gilberto, L. G. (2011). Análisis, diseño y aplicación de resonadores acústicos. Edu.ar. <https://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/fundamentosdeacusticay>

electroacustica/pub/file/FAyE0211E1-Fernandez-Sanchez-Gilberto.pdf

Fernández, D., Sánchez, I. F., & Gilberto, L. G. (2011). Análisis, diseño y aplicación de resonadores acústicos. Edu.ar. <https://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/fundamentosdeacusticayelectroacustica/pub/file/FAyE0211E1-Fernandez-Sanchez-Gilberto.pdf>

Forrest, M., 2014. "Recycling and Re-use of Waste Rubber". Shrewsbury, Reino Unido. *Smithers Rapra Technology*, pp. 135-233. ISBN: 978-184735-682-6.

García-Pérez, J., Fernández-Navarro, P., Castelló, A., López-Cima, M. F., Ramis, R., Boldo, E., & López-Abente, G. (2013). Cancer mortality in towns in the vicinity of incinerators and installations for the recovery or disposal of hazardous waste. *Environment International*, 51, 31–44. doi:10.1016/j.envint.2012.10.003

García-Pérez, J., López-Abente, G., Castelló, A., González-Sánchez, M., & Fernández-Navarro, P. (2015). Cancer mortality in towns in the vicinity of installations for the production of cement, lime, plaster, and magnesium oxide. *Chemosphere*, 128, 103–110. doi:10.1016/j.chemosphere.2015.01.020

Han, Z., Chunsheng, L., Kombe, T., & Thong-On, N. (2007). Crumb rubber blends in noise absorption study. *Materials and Structures*, 41(2), 383–390. doi:10.1617/s11527-007-9252-y

Heraldo de México, (2019, junio 15). Contaminan el país 32 millones de llantas. El Heraldo de México. <https://heraldodemexico.com.mx/nacional/2019/6/15/contaminan-el-pais-32-millones-de-llantas-98620.html>

Herrera-Sosa, E.S., Martínez-Barrera, G., Barrera-Díaz, C. & Cruz-Zaragoza, E., 2015. Materiales reciclados de llantas automotrices y la radiación gamma en el mejoramiento del concreto. Martínez-Barrera, G., Hernández-Zaragoza, J.B., López-Lara, T., & Menchaca-Campos, C. (Eds.). *Materiales sustentables y reciclados en la construcción*. Barcelona, España:

OmniaScience. pp. 73-93. Doi: <http://dx.doi.org/10.3926/oms.245>

Hong, Z., Bo, L., Guangsu, H., & Jia, H. (2007). A novel composite sound absorber with recycled rubber particles. *Journal of Sound and Vibration*, 304(1-2), 400–406. doi:10.1016/j.jsv.2007.02.024

Horoshenkov KV, Swift MJ. The acoustic properties of granular materials with pore size distribution close to log-normal. *J Acoust Soc Am*. 2001 Nov;110(5 Pt 1):2371-8. doi: 10.1121/1.1408312. PMID: 11757927).

Horoshenkov y Swift (2000) muestran que la aplicación de un porcentaje determinado de resina presenta un efecto considerable en las propiedades acústicas de materiales absorbentes fabricados con granza de caucho.

Ibérica, M. (2016, octubre 11). El césped artificial de Mondo cumple con el reglamento europeo para sustancias químicas - Mondo Ibérica - News. Mondo Ibérica - News. <https://news.mondoiberica.com.es/el-cesped-artificial-de-mondo-cumple-con-el-reglamento-europeo-para-sustancias-quimicas/>

Inicia segunda etapa del programa Rola las Llantas con participación de vulcanizadores. (2018, febrero 13). Municipio de Querétaro. <https://municipiodequeretaro.gob.mx/inicia-segunda-etapa-del-programa-rola-las-llantas-con-participacion-de-vulcanizadores/>

Instituto de Biomécanica de Valencia [IBV]. (s.f.). *Study of the Incidence of Recycled Rubber from Tyres in Environment and Human Health*. En: ISSS – International Association for Sports Surface Sciences: http://www.iss-sportsurfacescience.org/downloads/documents/muw7lmt0wh_ibv.pdf [consultado el 12 de agosto de 2022].

International Rubber Study Group [IRSG] 2014. “Latest World Rubber Industry Outlook now available from IRSG”. Disponible en: <http://www.rubberstudy.com/news-article.aspx?id=5081&b=earlier-news.aspx>, [consulta 28 de noviembre de 2020].

- Irevna., 2016. Tire Recycling Industry: A Global View. Disponible en: <https://docplayer.net/20869018-Tire-recycling-industry-a-global-view.html> [consultado el 9 de agosto de 2022].
- Jimenez-Espadafor, F. J., Becerra Villanueva, J. A., García, M. T., Trujillo, E. C., & Blanco, A. M. (2011). Optimal design of acoustic material from tire fluff. *Materials & Design*, 32(6), 3608–3616. doi:10.1016/j.matdes.2011.02.024
- Julia-Sanchis, E., 2008. Modelización, simulación y caracterización acústica de materiales para su uso en acústica arquitectónica: PhD thesis, *Universidad Politécnica de Valencia*, 36 pp.
- La Nación (2012). “*Prueban que el ruido alto afecta la memoria*”, 11 de julio. Disponible en: <http://www.lanacion.com.ar/1489554-prueban-que-el-ruido-altoafecta-la-memoria> [consultado 17 de agosto de 2022].
- La Vanguardia. (2014, octubre 17). Un experto de la OMS relaciona las emisiones de la cementera de Montcada con el cáncer. La Vanguardia. Disponible en: <https://www.lavanguardia.com/local/barcelona/20141017/54418012372/un-experto-de-la-oms-relaciona-las-emisiones-de-la-cementera-de-montcada-con-el-cancer.html>
- Lee, Y.; Changwhan, J. (2003). Sound absorption properties of recycled polyester. Fibrous assembly absorbers. *Autex Res. J.* 3:78-84.
- Li, B., Zhou, H., & Huang, G. (2006). A novel impedance matching material derived from polymer micro-particles. *Journal of Materials Science*, 42(1), 199–206. doi:10.1007/s10853-006-1052-1
- Li, X., Xu, H., Gao, Y., & Tao, Y. (2010). Comparison of end-of-life tire treatment technologies: A Chinese case study. *Waste Management*, 30(11), 2235–2246. doi:10.1016/j.wasman.2010.06.006)
- Li, X., Xu, H., Gao, Y., & Tao, Y. (2010). Comparison of end-of-life tire treatment technologies: A Chinese case study. *Waste Management*, 30(11), 2235–2246. doi:10.1016/j.wasman.2010.06.006)

- López-Fachal, P., 2012. Comparación de los criterios de calidad acústica con los estándares de confort admitidos por las sociedades de clasificación en mediciones de ruidos a bordo de buques. Exposición laboral, confort acústico y control del ruido. PhD thesis, *Universidade da Coruña*. pp. 72-80.
- López-Recuero, M., 1999. "Acústica arquitectónica aplicada". *Ediciones Paraninfo*. (pp. 87-122). ISBN: 9788428325714.
- Maa, D.-Y., 1998. Potential of microperforated panel absorber. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 104(5), 2861–2866. doi:10.1121/1.423870.
- Mabasa. (2020, 14 de diciembre). "Panel acústico fonoabsorbente en módulos", Techos y Prefabricados Mabasa. Disponible en: <https://mabasa.com.mx/barreras-acusticas-construccion/> [consulta 1 de abril de 2022].
- Maderuelo-Sanz, R., 2014. Investigaciones sobre la aplicabilidad en edificación de materiales acústicos procedentes de la valorización de residuos: PhD thesis, *Universidad de Extremadura departamento de física aplicada*, 17-18 pp.
- Maderuelo-Sanz, R., Nadal-Gisbert, A. V., Crespo-Amorós, J. E., & Parres-García, F., 2012. A novel sound absorber with recycled fibers coming from end of life tires (ELTs). *Applied Acoustics*, 73(4), 402–408. ISSN 0003-682X. doi: 10.1016/j.apacoust.2011.12.001.
- Manuel, J., Romo Orozco, J. M., Gómez Sánchez, A. (2011). La percepción social del ruido como contaminante. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/275353120>
- Mazo, P., Rios, L. A., & Estenoz, D. (2009). Síntesis y caracterización de espumas flexibles de poliuretano obtenidas a partir de aceite de castor maleinizado. *Polímeros*, 19(2), 149–154. <https://doi.org/10.1590/s0104-14282009000200013>
- Morales García, A., Oviedo Castro, I.A. (2021). Elaboración de paneles para

divisiones interiores a base de residuos de cartón y viruta de madera para edificios. Universidad laica Vicente Rocafuerte de Guayaquil.

Morales-Alanis, J., 2012. “Acústica en espacios y en los volúmenes arquitectónicos”. *Trillas*. (pp. 11–29). ISBN 978-607-17-1275-2.

Neithalath, N.; Weiss, J.; Olek, J. (2004). Acoustic performance and damping behaviour of cellulose-cement composites. *Cem. Concr. Compos.* 26:359-70.

Neumarket. (2019, marzo 28). ¿A dónde van a parar las llantas recicladas? Neu.market. Disponible: <https://www.neumarket.com.mx/blog/a-donde-van-a-parar-las-llantas-recicladas>

Norma Oficial Mexicana NOM-080-ECOL-1994, que establece los límites máximos permisibles de emisión provenientes del escape de vehículos automotores, motocicletas y triciclos motorizados en circulación, México, 2004.

Norma Oficial Mexicana NOM-081-SEMARNAT-1994, que establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de las fuentes fijas, México, 1994.

Observatorio de Salud y Medio Ambiente de Andalucía, [OSMAN] 2010. *Ruido y salud. Guías profesionales*, Andalucía.

Oldham, D. J., Egan, C. A., & Cookson, R. D. (2011). Sustainable acoustic absorbers from the biomass. *Applied Acoustics*, 72(6), 350–363. doi:10.1016/j.apacoust.2010.12.009

Olvera-Martínez, M. de J., Lopez-Lara, T., Hernández-Zaragoza, J. B., & Horta-Rangel, J. M. (2023). Desarrollo de un Panel con Caucho Reciclado para Mejorar la Absorción Acústica. *Ciencia Nicolaita*, 87. <https://doi.org/10.35830/cn.vi87.631>

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, [OCDE] 2012. “Pedestrian safety, urban space and health”, reporte de investigación, París.

Paje, S. E., Bueno, M., Terán, F., Miró, R., Pérez-Jiménez, F., & Martínez, A. H. (2010). Acoustic field evaluation of asphalt mixtures with crumb rubber.

- Applied Acoustics, 71(6), 578–582. doi:10.1016/j.apacoust.2009.12.003
- Pehlken, A., Müller, D.H., 2009. Using information of the separation process of recycling scrap tires for process modeling. *Resources, Conservation and Recycling* 54, 140–148.
- Peláez-Arroyave, G. J., Velásquez-Restrepo, S. M., & Giraldo Vásquez, D. H., 2017. Aplicaciones de caucho reciclado: Una revisión de la literatura. *Ciencia E Ingeniería Neogranadina*, 27(2), 27-50. <https://doi.org/10.18359/rcin.2143>.
- Pérez, R. (2016, mayo 13). Química del fuego: por qué un incendio de neumáticos es tan peligroso. *El Confidencial*. https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2016-05-13/quimica-fuego-incendio-sesena_1199904/
- Pfretzschner, J., & Rodriguez, R., 1999. Acoustic properties of rubber crumbs. *Polymer Testing*. 18(2), 81–92. doi:10.1016/s0142-9418(98)00009-9.
- Plan de Manejo de Neumáticos Usados de Desecho Conforme a la NOM-161-SEMARNAT-2011. (2022). <https://www.reciclallantas.org.mx/wp-content/uploads/2016/02/Plan-de-Manejo-de-Neumaticos-Usados-de-Desecho-2022.pdf>
- RMA – Asociación de Fabricantes de Caucho (EE. UU.), 2009. Mercados de llantas de desecho en el Informe Bienal 9 de Estados Unidos, Informe descargado de <http://www.rma.org/scrap_tires/> (mayo de 2011).
- Rodríguez-Montejano, R. M., 2003. Propiedades acústicas del caucho granular: PhD thesis, *Universidad Politecnica de Madrid*, 95-134 pp.
- Rushforth, I. M., Horoshenkov, K. V., Mirafab, M., & Swift, M. J. (2005). Impact sound insulation and viscoelastic properties of underlay manufactured from recycled carpet waste. *Applied Acoustics*, 66(6), 731–749. doi:10.1016/j.apacoust.2004.10.005
- Ruza, F., 1988. "El ruido del tráfico: evaluación y corrección de su impacto", Simposio sobre Impacto Ambiental de Carreteras, España, PIARC.

- Saad-Eljure, E., 1996. Acústica Arquitectónica. Repositorio Institucional de la UNAM. Disponible en <http://132.248.9.195/ppt1997/0242675/0242675.pdf> [consultado el 9 agosto de 2022]
- Salinas-Castillo, O., 2015. Mucho ruido y Pocas soluciones: *Los corredores peatonales en el Centro Histórico de la Ciudad de México y su impacto en la contaminación auditiva y políticas de ciudad caminable*. MSc thesis, *Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco*. pp. 30-38.
- Sastrón, J. (2017, 11 de diciembre) “Coeficiente de absorción acústica ¿existe con valores superiores a 1?”, Producciones el sótano, disponible en: <https://www.produccioneselotano.com/coeficiente-de-absorcion-acustica/> [consulta 5 de marzo de 2022].
- Schiavi, A.; Belli, A.P.; Corallo, M.; Russo, F. (2007b). Acoustical performance characterization of resilient materials used under floating floors in dwellings. *Acta Acust. United Acust.* 93:477-85.
- Schiavi, A.; Belli, A.P.; Russo, F. (2005). Estimation of acoustical performance of floating floors from dynamic stiffness of resilient layers. *Build. Acoust.* 12: 99-113.
- Schiavi, A.; Belli, A.P.; Russo, F.; Corallo, M. (2007a). Acoustical and mechanical characterization of an innovative expanded sintered elasticized polystyrene (EPS-E) used as underlayer in floating floors. En *Proceedings of 19th International Congress on Acoustics, 2007*. Madrid. España.
- Segura, R. (2015, enero 9). El destino de las llantas de desecho. *Revista TyT*. <https://www.tyt.com.mx/nota/como-se-manegan-las-llantas-de-desecho-en-nuestro-pais-segunda-parte>
- Segura-Alcaraz, J., Crespo Amoros, J. E., Julia Sanchis, E., Nadal Gisbert, A., & Gadea Borrell, J. M., 2014. Estimación de la absorción acústica de paneles fabricados con neumáticos reciclados. *Dyna*, 89(3), 106–111. <https://doi.org/10.6036/5796>.

- Servicios Deportivos Integrales Canarios [SERDICAN]. (2016, octubre 24). El césped artificial de Mondo cumple con el reglamento europeo para sustancias químicas. SERDICAN. <https://serdican.es/el-cesped-artificial-de-mondo-cumple-con-el-reglamento-europeo-para-sustancias-quimicas/>
- Sienkiewicz, M., Kucinska-Lipka, J., Janik, H., & Balas, A. (2012). Progress in used tyres management in the European Union: A review. *Waste Management*, 32(10), 1742–1751. doi: 10.1016/j.wasman.2012.05.010
- Stumpf, M., Flach, F., Reschke PIREs, J., & Piva Kulakowski, M. (2013). Absorción acústica de compuestos de mortero con material de desecho. *Archivos de acústica*, 38 (3), 417–423. Obtenido de <https://acoustics.ippt.pan.pl/index.php/aa/article/view/61/60>
- Swift, M., Bris., P., & Horoshenko, K., 1999. Acoustic absorption in re-cycled rubber granulate. *Applied Acoustics*, 57 (1999) 203±212. doi.org/10.1016/S0003-682X(98)00061-9.
- Taborga, M. (2022, marzo 4). ¿Qué es la espuma acústica? dBcover. <https://dbcover.com/es/que-es-la-espuma-acustica/>
- Tarnopolski, A. & y E K, M. L. (1977). El ruido como problema de salud mental. Paho.org. <https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/17339/v87n2p163.pdf;jsessionid=14B8171620127D8E314D48CC60670AB5?sequence=1>
- TNU. (2020, marzo 30). TNU, Sistema Colectivo de Responsabilidad Ampliada de Productor de neumáticos fuera de uso (SCRAP). TNU. Disponible en <https://www.tnu.es/que-es-tnu/>
- Trevor, J. C., & D'Antonio, P. (2004). *Acoustic Absorbers and Diffusers Theory, Design and Application*. Taylor y Francis Group.
- World Health Organization, [WHO] 2011. *Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe*. Ginebra.
- Xu, X., Wang, H., Sun., Y., Han., J., & Huang., R., 2018. Sound absorbing properties

of perforated composite panels of recycled rubber, fiberboard sawdust, and high density polyethylene. *Journal of Cleaner Production*, 187, 215–221. doi:10.1016/j.jclepro.2018.03.174.

Yang, J., Kaliaguine, S., & Roy, C. (1993). Improved Quantitative Determination of Elastomers in Tire Rubber by Kinetic Simulation of DTG Curves. *Rubber Chemistry and Technology*, 66(2), 213–229. doi:10.5254/1.3538307