



FACULTAD E INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

**ANÁLISIS DEL USO DE DOS PRODUCTOS DEL RECICLAJE DE
NEUMÁTICOS EN UN TABIQUE PARA AISLACIÓN ACÚSTICA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CONSTRUCTOR

PROFESOR GUÍA: MARÍA LUISA DEL CAMPO

CONSTANZA BEATRIZ CALQUIN MOYA

CURICÓ - CHILE

2020

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular official stamps and handwritten signatures in blue ink. The left stamp is from the 'DIRECCIÓN SISTEMA DE BIBLIOTECAS' of the 'UNIVERSIDAD DE TALCA'. The right stamp is from the 'SISTEMA DE BIBLIOTECAS CAMPUS CURICO' of the 'UNIVERSIDAD DE TALCA'.

Curicó, 2022

RESUMEN EJECUTIVO

En la presente memoria se investigan los productos del reciclaje de neumáticos aplicables a la construcción, centrándose en dos de ellos; láminas de caucho reciclado y fibra textil, ambos obtenidos de la molienda de neumáticos fuera de uso. Éstas materias primas se aplican en una solución constructiva diseñada para aislación acústica, con el fin de determinar las ventajas e inconvenientes de la propuesta. El modelo corresponde a un tabique de partición interior, proyectado en estructura de acero galvanizado y acabado de yeso-cartón, al cual se añaden estos materiales en distinta proporción y espesor. Los modelos son evaluados mediante una herramienta de software computacional considerando tres ejemplares, dentro de los cuales se prueban distintos espesores y configuraciones, determinando que el modelo que presenta mejores resultados de acuerdo con la relación espesor – aislación, es el tabique con configuración de revestimiento yeso-caucho-yeso. El tabique se comparó además en términos ecológicos y económicos con un tabique de uso convencional, contenido en el listado oficial de soluciones constructivas para aislación acústica, posicionándose como una alternativa potencialmente competitiva en el ámbito de la construcción.

ÍNDICE

RESUMEN EJECUTIVO	1
1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	7
1.1. Introducción	7
1.2. Objetivos	8
1.2.1. Objetivo general	8
1.2.2. Objetivos específicos.....	8
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	9
2.1. Neumáticos.....	9
2.1.1. Fabricación.....	10
2.1.2. Caucho.....	11
2.1.3. Neumáticos fuera de uso (NFU).....	12
2.2. Reciclaje de neumáticos	14
2.2.1. Tratamientos Mecánicos	14
2.2.2. Tecnologías de reducción de tamaño	14
2.2.3. Tecnologías de regeneración de neumáticos	15
2.2.4. Otras tecnologías; pirólisi - termólisis.....	16
2.3. Productos y subproductos del reciclaje de neumáticos	17
2.3.1. Granulado de caucho reciclado	17
2.3.2. Fibra textil reciclada de neumáticos.....	18
2.4. Aislación y absorción acústica	18
2.4.1. Ruido aéreo	19
2.4.2. Ruido de impacto	20
2.4.3. Aislación y absorción acústica	20
2.4.4. Materiales acústicos	21
2.5. Propiedades para el cálculo de absorción acústica del caucho y fibra reciclados	23
2.6. Materiales acústicos desarrollados a partir de productos del reciclaje de NFU	27

2.6.1.	Sistema para aislamiento acústico de paredes de separación	27
2.6.2.	Panel aislante y absorbente acústico de caucho y poliuretano aglomerado	29
2.6.3.	Panel aislante de fibra textil reciclada de neumáticos	29
2.6.4.	Aislante compuesto por gránulos de caucho y aglomerante en base PU.....	30
2.7.	Huella de carbono.....	31
2.8.	Reglamentación acústica según Ordenanza general de urbanismo y construcciones.....	32
2.9.	Análisis de absorción acústica mediante herramientas de cálculo computacional.....	33
2.9.1.	Insul.....	33
2.9.2.	SoundFlow	34
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA Y DESARROLLO		35
3.1.	Materiales	35
3.2.	Composición tabique acústico.....	37
3.3.	Modelación en software INSUL	40
3.3.1.	Datos	41
3.4.	Análisis del comportamiento acústico mediante los datos entregados por el software.....	42
3.5.	Análisis comparativo con solución constructiva para aislación acústica convencional	42
3.6.	Cálculo huella de carbono	44
3.6.1.	Huella de carbono para la obtención de caucho laminado reciclado.....	44
3.6.2.	Cálculo huella de carbono mediante factor de emisiones	49
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS.....		51
4.1.	Aislación acústica.....	51
4.1.1.	Tabique A.....	51
4.1.2.	Tabique B	52
4.1.3.	Tabique C.....	54
4.2.	Análisis comparativo.....	56
4.2.1.	Aislación acústica.....	56
4.2.2.	Huella de carbono.....	57

4.2.3. Costos	58
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
5.1. Conclusiones	60
5.2. Futuras líneas de investigación	60
BIBLIOGRAFÍA.....	62
ANEXOS.....	65
Anexo 1	65
Anexo 2	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Partes de un neumático	9
Figura 2: Diagrama tensión - deformación del caucho natural.	12
Figura 3: Proceso de molienda a temperatura ambiente.....	14
Figura 4: Niveles de tratamiento	16
Figura 5: Productos del reciclaje de neumáticos y origen.....	17
Figura 6: Proceso de reciclaje de NFU's y obtención de fibra textil	18
Figura 7: Ilustración del procedimiento de medición de aislación del ruido aéreo.....	20
Figura 8: Material poroso	22
Figura 9: Coeficiente de absorción acústica en función de la frecuencia, para distintos tamaños de partícula, considerando un espesor de 10 cm.	24
Figura 10: Curva de absorción acústica de una muestra de lana mineral en función del espesor de la capa para 6 frecuencias distintas.	24
Figura 11: Curva de absorción de una muestra de granulado de caucho en función del espesor de la capa, para 6 frecuencias distintas	25
Figura 12: Akustik-CI	29
Figura 13: Panel aislante desarrollado con fibra textil reciclada de NFU.....	30
Figura 14: Gráfico resultados ensayo ruido de impacto normalizado.....	31
Figura 15: Perfiles METALCON tabique	35
Figura 16: Placas yeso-cartón	36
Figura 17: Lámina de aglomerado de caucho granulado	36
Figura 18: Fibra textil reciclada de neumáticos	37
Figura 19: Tabique A	38
Figura 20: Tabique B	39
Figura 21: Tabique C	40
Figura 22: Captura configuración de muro	40
Figura 23: Configuración estructura muro.	41
Figura 24: Tabique divisorio listado oficial MINVU.....	43
Figura 25: Unidad de tabique.	44
Figura 26: Proceso de obtención de láminas de caucho reciclado	45
Figura 27: Transporte de NFU	46
Figura 28: Captura del modelo.....	51
Figura 29: Resultados tabique A.....	51
Figura 30: Índice de reducción acústica en el rango de frecuencias	52

Figura 31: Captura modelo tabique B	53
Figura 32: Índice de reducción acústica en el rango de frecuencias	54
Figura 33: Captura de tabique C modelado en Insul	55
Figura 34: Curva de la pérdida por transmisión tabique C.....	55
Figura 35: Comparación índice de reducción acústica.....	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Componentes principales y características de los neumáticos, valores medios.	10
Tabla 2: Propiedades físicas del caucho granular, según tamaño de grano.....	23
Tabla 3: Coeficiente de absorción por rango de frecuencia	25
Tabla 4: Propiedades de la muestra.....	26
Tabla 5: Composición fibra reciclada de neumáticos	26
Tabla 6: Propiedades fibra reciclada de neumáticos	27
Tabla 7: Solución constructiva con ACOUSTICEL M20AD	28
Tabla 8: Propiedades de la solución constructiva.	28
Tabla 9: Huella de carbono de un neumático nuevo.	32
Tabla 10: Espesor de capas tabique A.....	37
Tabla 11: Espesor fibra reciclada de neumáticos	38
Tabla 12: Espesores de capas tabique C.....	39
Tabla 13: Emisiones GEI en la producción de lámina de caucho reciclado	49
Tabla 14: Emisiones GEI perfiles de acero galvanizado según peso.	49
Tabla 15: I. de reducción acústica tabique B.....	53
Tabla 16: Índice de reducción acústica Tabique C.....	54
Tabla 17: Huella de carbono tabique Gyplac	57
Tabla 18: Huella de carbono tabique propuesto.....	57
Tabla 19: Costos tabique Gyplac	58
Tabla 20: Costos tabique propuesto	58
Tabla 21: Tabla resumen de resultados	59

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción

La sobrepoblación, la industria moderna, el consumismo y el estilo de vida actual han dado paso a la producción descontrolada de residuos sólidos, los cuales tienen un gran impacto ambiental, puesto que son desechados en vertederos o quemados de forma indiscriminada. Se estima que cada año en el mundo se producen alrededor de 2,01 mil millones de toneladas de residuos, y se pronostica que para el año 2050, esta cifra se elevará a 3,4 mil millones toneladas anuales (Kaza, S. et al, 2018). Es por esto, que durante la última década ha tomado fuerza la preocupación por el impacto ambiental del estilo de vida de la sociedad moderna, considerando además las devastadoras cifras entregadas en los últimos informes medioambientales de la Organización de Naciones Unidas (ONU), que dan a conocer el grave deterioro del planeta. Con estos antecedentes y en base a diversos acuerdos internacionales para fijar metas de sustentabilidad, los países han tomado acciones al respecto, entre ellas disminuir la cantidad de desechos y trabajar en la gestión de residuos. Actualmente, algunos países desarrollados son capaces de devolver al mercado hasta el 100% de algunos residuos tratados, a través de la impulsión de políticas de disminución y gestión de residuos, sirviendo de ejemplo para países como Chile.

En el año 2016, el gobierno chileno a través del Ministerio de Medio Ambiente promulgó la ley 20.920; *“Marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje”*, en la cual se establecen ocho residuos que son prioritarios de tratar en el país, entre ellos los neumáticos fuera de uso (NFU). Con esta ley se busca que cada productor o importador, se haga cargo de los residuos que generan los productos al término de su vida útil.

La Asociación Gremial Chile Neumáticos, según un estudio realizado el año 2016, estima que en Chile se generan anualmente 79000 toneladas de neumáticos fuera de uso, cifra que va en aumento cada año. De esta cifra solo el 14 % es sometido a un proceso de reciclaje, debido a que no existe una demanda significativa de los productos obtenidos del reciclaje de neumáticos.

Con estos antecedentes se estima que en los próximos años se producirá un aumento en la recolección y reciclaje de este residuo lo que hace necesario ampliar el campo de aplicación de los productos del reciclaje de NFU en el país.

Actualmente se están investigando potenciales usos para los productos del caucho reciclado, siendo los más reconocidos, combustibles, implementos deportivos, equipos de minería, calzado, y en la

construcción, principalmente en asfaltos, pisos de gimnasios, aisladores sísmicos y aisladores acústicos, sin embargo, representa un área poco estudiada y con grandes vacíos técnicos.

Otro foco de investigación, aún menos explorado son las fibras textiles incorporadas al neumático, las cuales es posible recuperar mediante el mismo proceso de reciclaje de NFU. Estas fibras presentan un comportamiento acústico prometedor, al igual que el caucho reciclado, que ha mostrado ser un absorbente acústico competitivo. Considerando estos materiales en desarrollo, la presente memoria busca ser un aporte para ampliar el campo de aplicación de los subproductos del reciclaje de neumáticos, incorporándolos a una solución constructiva para aislación acústica entre espacios interiores de una edificación.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Determinar el comportamiento de aislación y absorción acústica frente al ruido aéreo de un tabique de partición para interiores, diseñado con adición de caucho reciclado y fibra textil reciclada provenientes de neumáticos fuera de uso, en comparación con una solución constructiva convencional.

1.2.2. Objetivos específicos

- Modelar un tabique de partición interior con adición de caucho y fibra textil reciclados de neumáticos fuera de uso, en proporciones y espesores variables.
- Determinar el comportamiento acústico de la solución constructiva propuesta, mediante el uso de software de predicción acústica.
- Comparar la solución constructiva propuesta, con una solución convencional del listado oficial del MINVU, en términos técnicos y sustentables.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Neumáticos

El neumático fue inventado en el año 1880 por el norteamericano Charles Goodyear y desde entonces forma parte fundamental de todos los automóviles, por lo que su producción es directamente proporcional al crecimiento del parque automotriz. Corresponde a un elemento compuesto principalmente de caucho que recubre la rueda, conteniendo el aire, cuya principal función es proporcionar la correcta adherencia a la superficie de tránsito. (Castro, G., 2008).

Un neumático está formado por las siguientes partes, cuya disposición se ilustra en la Figura 1:

- Banda de rodadura: superficie exterior del neumático, conformada por caucho. Posee surcos que proporcionan el diseño del neumático.
- Laterales: parte lateral constituida de goma flexible que absorbe las deformaciones del neumático.
- Carcasa: está formada por varias capas textiles, corresponde al armazón del neumático y se encarga de recibir la presión. (Sánchez, 2012)



Figura 1: Partes de un neumático

Fuente: Sánchez, 2012.

- Talón: corresponde a dos aros de alambre trenzados, ubicados en la parte interior, que permiten la unión del neumático con la llanta.
- Lonas de cima: cables de acero fino, que garantizan firmeza y flexibilidad.

- Cinturón de acero: trenzado metálico que asegura la estructura del neumático.

Los componentes de un neumático están determinados por el tipo de vehículo para el cual está diseñado y con ello las funciones especiales que va a requerir. La composición general se puede apreciar en la Tabla 1.

Composición		Función
Caucho	45 – 47 %	Tensión estructural
Negro de Carbón	21,5 – 22 %	Mejorar propiedades físicas
Acero	16,5 – 25 %	Esqueleto estructural
Textil	5,5 % (vehículo de pasajeros)	Esqueleto estructural
Óxido de zinc	1 – 2 %	Catalizador
Azufre	1 %	Agente vulcanizante
Aditivos	5 – 7,5 %	
Metales pesados	Cobre, cadmio y plomo	
Poder calorífico ¹	32 – 34 MJ kg ⁻¹ (1 tonelada es equivalente a 0,7 toneladas de petróleo)	
Temperatura de combustión espontánea	400° Celsius	
Peso	6,5 – 11 Kg (Automóvil) 50 – 80 Kg (Camiones)	

Tabla 1: Componentes principales y características de los neumáticos, valores medios.

Fuente: (Ramos et al., 2011)

2.1.1. Fabricación

Para la fabricación de neumáticos destacan 5 procesos imprescindibles:

- Mezclado: En esta fase se combinan diferentes tipos de caucho, en una mezcladora industrial a alta temperatura, lo que da origen a un compuesto gomoso de color negro.

¹ Poder calorífico: cantidad de energía desprendida en la reacción de combustión, referida a la unidad de masa de combustible.

- Triturado: El caucho se enfría y se corta en tiras, capaces de formar la estructura básica del neumático.
- Construcción: Aquí se construye el neumático desde el interior al exterior. Se unen los elementos textiles, lonas, cables de acero, rodaduras, en una máquina especializada de construcción de neumáticos. El producto de esta fase se conoce como “neumático verde”.
- Vulcanización: Mediante este proceso el neumático verde adquiere las propiedades de resistencia necesaria para transformarse en el producto final. Esto se realiza mediante moldes calientes que comprimen el neumático y además le otorgan el dibujo de la banda de rodadura.
- Inspección: En esta fase se comprueban minuciosamente las propiedades del neumático

2.1.2. Caucho

El caucho o elastómero es un material polimérico cuyas dimensiones pueden variar según sea el tipo de esfuerzo al que son sometidos, volviendo a su forma cuando el esfuerzo se retira.

2.1.2.1. Caucho natural

El caucho natural es un producto vegetal fabricado a partir de la savia de aspecto lechoso o látex producido por el árbol *Hevea brasiliensis*, éste látex contiene entre un 30 a 36% del hidrocarburo de caucho y aunque hay centenares de especies en distintas partes del mundo capaces de producir látex, *Hevea brasiliensis* es la especie responsable del 99% de la producción. El caucho natural hoy en día representa solo el 30% en el mercado del caucho, el resto es producido de forma sintética. La principal producción de caucho natural se localiza en Indonesia, Tailandia y Malasia. (Beliczky & Fajen, s. f.).

Químicamente corresponde a una molécula compuesta por cis-1,4 polisopreno mezclado con pequeñas cantidades de proteínas, lípidos y sales inorgánicas, entre otros. (Castro, 2008).

Actualmente se fabrican diferentes productos del caucho natural, entre ellos se encuentran las planchas estriadas ahumadas, el caucho de especificación técnica, los crepés, el látex, el caucho natural epoxidizado y el caucho natural termoplástico, siendo este último uno de los utilizados para la fabricación de neumáticos, el cual, mediante un proceso de vulcanización logra características de material elastomérico, que le permiten soportar las cargas a las que estará sometido. En la Figura 2 es posible observar las diferencias de comportamiento a través del gráfico tensión – deformación.

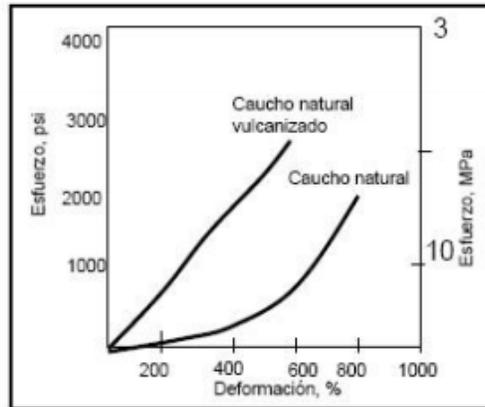


Figura 2: Diagrama tensión - deformación del caucho natural.
Fuente: Castro, 2008

2.1.2.2. Caucho sintético

El caucho sintético corresponde a una sustancia elaborada artificialmente mediante reacciones químicas de condensación o polimerización a partir de hidrocarburos insaturados, cuyas propiedades son similares al caucho natural.

- Neopreno: Es uno de los primeros cauchos sintéticos que se desarrollaron, corresponde a un polímero del monómero cloropreno, es resistente al calor y a productos químicos, como aceite y petróleo. Se usa principalmente en tuberías que conducen petróleo y aislante para cables y maquinarias.
- Buna o caucho artificial: Se obtiene a partir de butadieno y sodio, posee resistencia a la abrasión y a la acción de aceites.
- Cauchos de butilo: Se obtiene mediante copolimerización de isobutileno con butadieno o isopreno, es un caucho difícil de vulcanizar, es menos flexible que otros tipos de caucho, pero posee propiedades de resistencia a la corrosión y oxidación.
- Caucho SBR: Se le denomina caucho SBR al copolímero estireno butadieno, representa el tipo de caucho más utilizado a nivel mundial y es el principal componente en la fabricación de neumáticos.

2.1.3. Neumáticos fuera de uso (NFU)

Los neumáticos son diseñados para resistir condiciones ambientales adversas, se estima que el período de vida útil de un neumático está en torno a los 50000 Km (aproximadamente 5 años), esto varía con factores como la mantención adecuada y la calidad de los caminos transitados. Algunas

empresas han fabricado modelos cuya vida útil alcanza los 100.000 Km, pero no es lo habitual. (Sánchez Juan, 2012).

El recauchaje es un proceso que permite sustituir la banda de rodadura del neumático conservando su estructura, de esta forma es posible extender su vida útil, quedando con las características funcionales de un producto nuevo. Un neumático se considera como “fuera de uso” cuando ya ha agotado su periodo de vida útil, y no puede ser recauchado (o ya ha sido recauchado en el pasado). De esta forma, los NFU son considerados residuos sólidos, y representan una problemática medioambiental a nivel global.

2.1.3.1. Antecedentes Nacionales

En el año 2017 la asociación gremial Chile Neumáticos junto a la consultora AMPHOS, publicó el informe “Diagnóstico de sustentabilidad de neumáticos fuera de uso en Chile”, en donde se hizo una estimación de la generación de este residuo en base a la cantidad de neumáticos en circulación y las tasas de recambio, obteniendo una cifra de 79.000 toneladas anuales de NFU en el año 2016. En dicho informe también se menciona que de esta cifra solo el 14% es sometido a un proceso mecánico que permite su reincorporación al mercado y que este reciclaje limitado se debe a la escasa demanda de los subproductos del reciclaje de neumáticos, lo que genera poco interés de ampliar la capacidad o modernizar las plantas de tratamiento por parte de los inversionistas privados. (Sánchez et al., 2017)

2.1.3.2. Valorización de NFU

La valorización de los NFU se realiza mediante procesos de reciclaje variados, siendo las más importantes, la valorización material y valorización energética:

Valorización material: Se refiere a todos los métodos de reciclaje que permiten utilizar el neumático como material o materia prima. Los formatos de presentación de este tipo de valorización pueden variar entre enteros, troceados o molidos. Por ejemplo, los triturados pueden ser utilizados como aislante térmico y acústico, por otra parte, el molido o polvo de caucho suele ser utilizado como agregado en mezclas bituminosas, para lo cual se conocen dos vías:

- Vía húmeda, mediante la cual se fabrica un ligante betún-caucho de neumático reciclado.
- Vía seca, el triturado de neumático usado se emplea como sustituto de una fracción de los áridos utilizados para la fabricación del asfalto.
- Vía mixta, todavía en estudio, unifica las dos vías citadas.

Valorización energética: Los neumáticos se pueden utilizar enteros o triturados como combustible de sustitución en las cementeras, siempre que se respeten las disposiciones para la protección ambiental. También pueden reutilizarse en otras unidades de incineración, calderas industriales, centrales térmicas.

2.2. Reciclaje de neumáticos

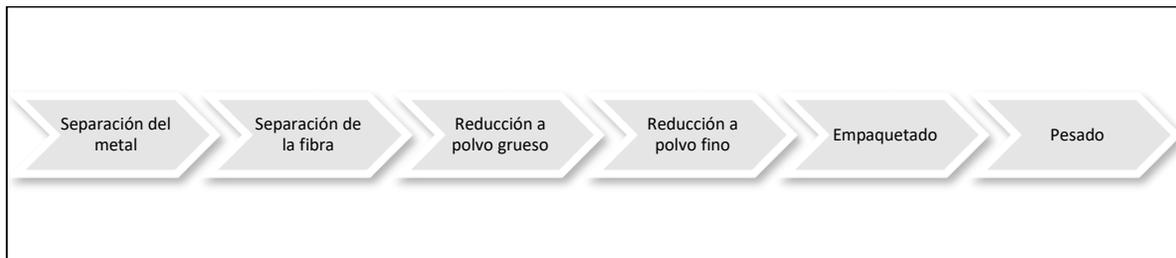
En el marco de este proyecto se utilizará la valorización material como base para obtener la materia prima necesaria. La tecnología empleada en el reciclaje dependerá del producto final que se espera y de la aplicación de éste. Los métodos empleados para el reciclaje material son los siguientes:

2.2.1. Tratamientos Mecánicos

Los tratamientos mecánicos corresponden a aquellos en que los neumáticos son comprimidos, cortados o fragmentados en piezas irregulares. En general, este proceso se lleva a cabo mediante trituradoras de dos o más ejes paralelos de cuchillas giratorias que giran a distintas velocidades favoreciendo la incorporación del neumático. Este proceso es un paso previo a la molienda, y se emplea generalmente para reducir el tamaño de almacenamiento del residuo.

2.2.2. Tecnologías de reducción de tamaño

Corresponde a la molienda del neumático ya triturado y se realiza por tres métodos; a temperatura ambiente, criogénico y húmedo.



*Figura 3: Proceso de molienda a temperatura ambiente
Fuente: elaboración propia.*

Molienda a temperatura ambiente: Antes de iniciar la molienda es necesario separar el componente metálico y la fibra textil de los trozos de neumático, el metal se separa mediante una cinta imantada y para la fibra textil se utilizan bandejas vibratorias y tamizado. El proceso de molienda se lleva a cabo en un molino de dos rollos tipo cracker, los cuales poseen ranuras con bordes afilados que rompen el caucho. Las actividades del proceso de molienda a temperatura ambiente se observan en la Figura 3 .

Según el tamaño de partícula requerido, se establece cuantas veces pasa el material por el rodillo, así como el tipo de rodillo empleado. “En general, el rodillo primario reducirá a tamaños entre 10-40 mesh, y los secundarios y de acabado podrán reducir a 80 mesh.²” (Cano et al., s. f.).

- Molienda criogénica: este proceso parte con el enfriamiento de las piezas con nitrógeno líquido hasta llegar al punto de congelación (-200° C) en donde el caucho se fragiliza perdiendo su elasticidad, lo que permite desintegrarlo fácilmente. Estas piezas, cuyo tamaño es menor a 8 mm, son ingresadas a un molino de impacto de donde se obtienen partículas de tamaño inferior a 1 mesh, este material se somete a secado y separación de la fibra y metal, para posteriormente ser clasificado por el tamaño de partícula. La principal característica de las partículas de polvo obtenidas con molienda criogénica es que tienen una superficie suave y casi sin oxidación superficial, a diferencia de las obtenidas con la molienda a temperatura ambiente, que con el calor del proceso tienden a oxidarse y tener una superficie rugosa e irregular.
- Molienda húmeda: Esta tecnología no es regularmente utilizada, consiste en una serie de ruedas de molienda con agua pulverizada inyectada continuamente para asegurar el enfriamiento del polvo. Después de este proceso se separa el agua del polvo y se seca.

2.2.3. Tecnologías de regeneración de neumáticos

- Desvulcanización: se puede realizar mediante procesos físicos, con la ayuda de una fuente de energía externa o mediante procesos químicos, en donde se utilizan disulfuros en un trabajo mecánico a temperatura elevada.
- Recuperación del caucho (reclaiming): es un proceso mediante el cual se busca romper los enlaces químicos, para poder reutilizar los componentes del caucho. Es un proceso sencillo para el caucho natural, pero muy complejo en el caso del caucho sintético.

² 1 mesh = 0,2 mm

2.2.4. Otras tecnologías; pirólisi - termólisis

En el proceso de pirólisis se calientan los trozos de neumático (1-3 cm) a temperatura moderada (400-800°C) en ausencia de oxígeno o con una cantidad limitada del mismo.

Con esta temperatura se consigue degradar el material, lo que lleva a una descomposición del neumático, donde los elementos orgánicos volatilizables (principalmente cadenas de caucho) se descomponen en gases y líquidos, y los elementos inorgánicos (principalmente acero y negro de carbono no volátil) permanecen como residuo sólido. (*Cano et al., s.f.*).

Los productos obtenidos en la pirólisis son el residuo carbonoso, aceite y gas.

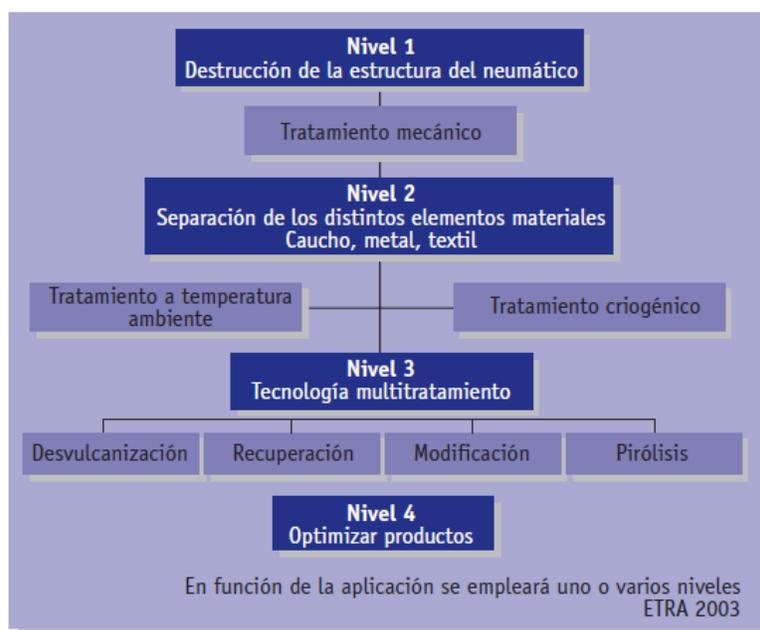


Figura 4: Niveles de tratamiento

Fuente: ETRA,2003

Estas tecnologías se clasifican según el nivel de tratamiento, por lo que, dependiendo de la aplicación del producto final, se requerirá de un nivel, varios, o todos los niveles de reciclaje. La clasificación de estos niveles se encuentra estandarizada por la Asociación Europea de Reciclaje de Neumáticos (ETRA), según se aprecia en la Figura 4.

2.3. Productos y subproductos del reciclaje de neumáticos

Dependiendo de la tecnología empleada y la procedencia del caucho, se obtienen distintos materiales y tamaños de éstos. En la Figura 5 se muestran los distintos productos, así como el origen y proceso involucrado en su producción.

<i>Producto</i>	<i>Tamaño</i>	<i>Fuente</i>	<i>Tecnología</i>
Neumático entero (W)		Neumáticos enteros coche- camión	Mecánica (M)
Trozos (X)	> 300 mm	Todas	Mecánica (M)
Tiras (shred) (S)	50-300 mm	Todas	Mecánica (M)/reducción a temperatura ambiente (A)
Astillas (chips) (C)	10-50 mm	Todas	Mecánica (M)/reducción a temperatura ambiente (A)
Granulado (G)	1-10 mm	Todas	Reducción a temperatura ambiente (A)/criogénico (C)
Polvo (P)	< 1 mm	Todas	Reducción a temperatura ambiente (A)/criogénico (C)
Polvo fino (F)	< 500 μ m	Todas	Reducción a temperatura ambiente (A)/criogénica (C)/recuperación (R)/desvulcanización (D)
Buffins (B)	0-40 mm	Neumáticos pisados camión-coche	Buffing (B)
Recuperado (reclaiming) (R)	Normalmente se suministra en bloques	Todas y granulado	Recuperación (R)
Desvulcanizado (D)	Depende del tamaño del polvo	Polvo de todas las fuentes	Reducción criogénica (C)/temperatura ambiente (A)/desvulcanización (D)
Pirólítico (Y)	< 10 mm	Todas	Pirólisis (P)/buffing (B)/Reducción criogénica (C)
Productos de Carbón (Z)	< 500 μ m	Pirólítico	Otras tecnologías (O)

Figura 5: Productos del reciclaje de neumáticos y origen
Fuente: Cano et al., s.f.

2.3.1. Granulado de caucho reciclado

El caucho granulado consiste en trocitos o gránulos obtenidos mediante molienda a temperatura ambiente o molienda criogénica de NFU. Por el rango de tamaños que es posible obtener, resulta ser un producto de aplicación versátil, entre las que destacan: aditivo de pavimentos, material para pistas de atletismos, aditivo de suelo en gimnasios, entre otras.

La densidad aparente del granulado de caucho reciclado es de 32,78 kg/m³. Según Shao (1995) los valores de conductividad térmica de las muestras de caucho de neumáticos varían entre 0.0973 y 0.1708 W/m·K. Como comparación, la conductividad térmica del poliestireno extruido es de 0.0276 - 0.0311 W/m·K, y del poliestireno expandido, 0.0328 - 0.0363. A pesar de que el caucho reciclado tiene una conductividad térmica más alta que el poliestireno extruido o expandido, aún se puede clasificar como material aislante.

2.3.2. Fibra textil reciclada de neumáticos

Mediante el proceso de granulado de NFU, se separan las fibras textiles y acero del caucho, materiales que también son valorizados y comercializados por algunas plantas de reciclaje, como es el caso de TIRES SpA., el proceso general es el indicado en la Figura 6.

Los neumáticos están compuestos por diferentes tipos de fibras, encontrándose en mayor proporción de acuerdo con el peso; poliamida con casi un 58 %, seguida del Poliéster con un 26% y finalmente fibras de naturaleza proteínica y celulósica en un 8%. Estas fibras poseen propiedades de absorción y aislación acústica, así como también de aislación térmica.

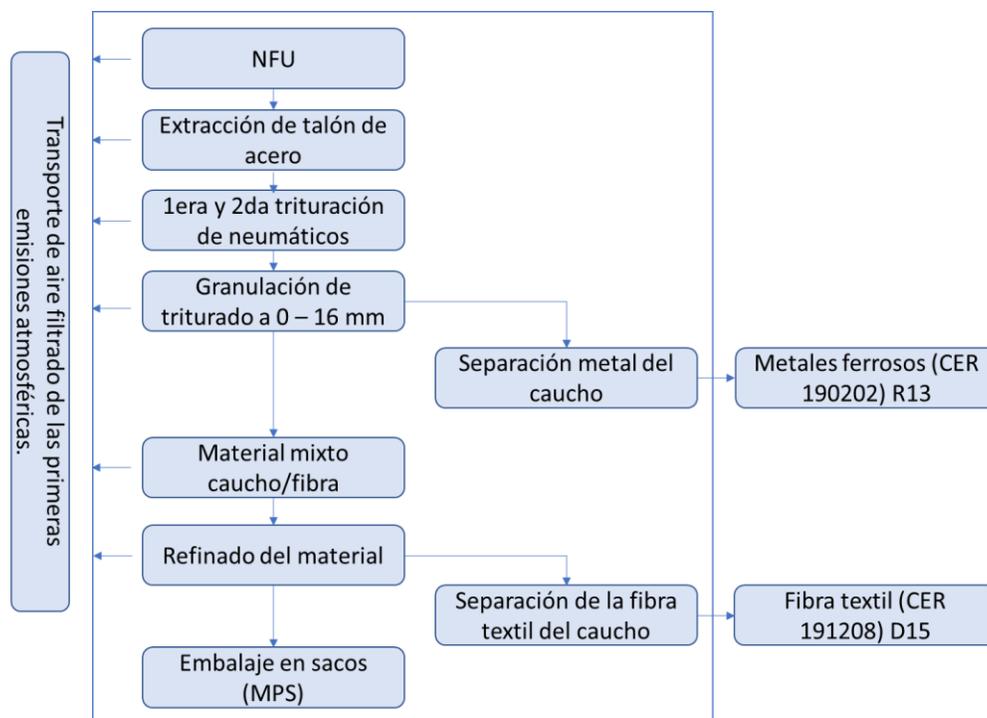


Figura 6: Proceso de reciclaje de NFU's y obtención de fibra textil
Fuente: (Tires SpA, 2013)

2.4. Aislación y absorción acústica

El sonido se define como una “*forma de energía producida por la vibración de las moléculas de un cuerpo a determinada intensidad, creando zonas de compresión y depresión (expansión) que afectan al agente conductor (sólidos, líquidos, gases)*”. Este movimiento produce ondas sonoras que son capaces de propagarse en todas las direcciones, pudiendo ser captadas por las sensibles células del

oído humano. Como características principales estas ondas poseen una frecuencia y una amplitud, la primera está relacionada con el tiempo que dura el ciclo de compresión-depresión, por ejemplo, un sonido agudo tendrá una frecuencia alta y un sonido grave una baja frecuencia. La amplitud, en cambio, está relacionada con la energía de onda, una mayor amplitud posee más energía, por lo que sonará más “fuerte”. La forma más conocida de medir este parámetro es mediante la escala “decibel” (dB), *“el dB es una escala logarítmica y corresponde a la división en 120 rangos del tramo entre el límite audible y el umbral del dolor”*. (Gob De Chile M I N V U, s. f.).

En general los ruidos del entorno están compuestos por varias frecuencias, éstos podrían llegar a ser molestos o no deseados, y es cuando se denominan “ruidos”.

El estudio del sonido se realiza en bandas de una octava o 1/3 de octava, en donde el ancho de banda se duplica al duplicar la frecuencia, de esta forma el ancho de banda de una octava es el doble de la octava anterior. Un tercio de octava es una banda de frecuencia que corresponde a la tercera parte de una octava, y se utiliza porque coincide con el comportamiento espectral del oído.

2.4.1. Ruido aéreo

El ruido aéreo se transmite mediante compresiones o expansiones del aire, las que, al chocar con una superficie, la hacen vibrar, transmitiéndose sus deformaciones al espacio adyacente, esto se convierte en una fuente de producción de sonido, por lo que el ruido percibido será mayor que el calculado si solo se toma en cuenta la transmisión a través del elemento de separación

El método de medición del aislamiento al ruido aéreo, de un elemento o configuración, ya sea horizontal o vertical, está definido en las normas NCh 2785.Of2003 y NCh 2786.Of2003 y consiste en el siguiente procedimiento:

- Una fuente generadora de ruido se ubica en la sala emisora. Mientras se emite ruido rosa, se registran mediante un sonómetro, el nivel de presión sonora en la sala emisora y en la sala receptora. El ruido rosa se caracteriza porque la potencia disminuye a medida que aumenta la frecuencia, es decir, las frecuencias inferiores en el ruido rosa son más fuertes y tienen más poder que las frecuencias más altas.
- Se debe registrar también el Tiempo de Reverberación en la sala de recepción, para mediante un cálculo simple, obtener la Absorción Acústica equivalente de la sala.
- Estas mediciones se realizan para todas las bandas de frecuencia, obteniéndose una tabla o gráfico de valores. Este gráfico se contrasta con una curva de referencia (ISO 717/1) y el valor de esta curva en 500 Hz corresponde al Índice de Reducción Acústica Aparente Ponderado

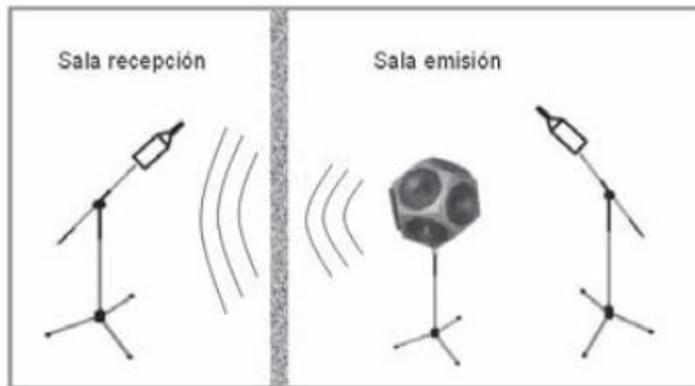


Figura 7: Ilustración del procedimiento de medición de aislamiento del ruido aéreo.

Fuente: OGUC, s.f.

2.4.2. Ruido de impacto

El ruido de impacto es provocado por golpes o choques sobre superficies horizontales, y se transmite en forma de vibración, con muy pocas pérdidas de energía. Estas vibraciones generan un efecto similar al caso del ruido aéreo, con compresiones y depresiones en el aire, predominando en este caso, frecuencias bajas.

El método de medición de la transmisión de ruido de impacto de un elemento o configuración horizontal está definido según las normas ISO 140/6 e ISO 140/7:

Al igual que en el caso de la aislación al ruido aéreo, se calcula la Absorción equivalente en la sala de recepción a través de la medición del Tiempo de Reverberación de esta.

Estas mediciones se realizan para todas las bandas de frecuencia, obteniéndose una tabla o gráfico de valores. Este gráfico se contrasta con una curva de referencia (ISO 717/2), y el valor de esta curva en 500 Hz corresponde al Nivel de Ruido de Impacto Normalizado Ponderado.

2.4.3. Aislación y absorción acústica

Cuando una onda sonora choca con un obstáculo que separa dos medios (una pared, por ejemplo, ya que está entre un medio de transmisión de sonido como es el aire) ocurren tres fenómenos: absorción, reflexión y transmisión.

Parte de esa energía se reflejará en esa superficie. Otra parte se transformará en energía calorífica mediante el fenómeno que conocemos como absorción y una última parte será transmitida al medio contiguo al obstáculo (transmisión).

“El aislamiento acústico es el método principal de control de la propagación del sonido en los edificios. En particular, el aislamiento acústico se ocupa de reducir la transmisión del ruido entre dos locales o en general, entre un recinto y otro. El aislamiento modifica la diferencia entre el nivel de intensidad acústica en un local emisor y el nivel de intensidad acústica en un local receptor.” (Texsa S.A., 2009). De esta forma los mecanismos de aislación acústica buscan proteger un recinto contra la penetración de sonidos, disminuyendo la energía transmitida a través del elemento. Los materiales adecuados para aislación acústica son aquellos con la capacidad de reflejar o absorber una parte importante de la energía de la onda entrante.

Por otro lado, la absorción acústica pretende mejorar la acústica de un recinto, reduciendo el sonido que vuelve al mismo. En este tipo de aislación se aumenta la energía disipada y/o transmitida sin importar el reparto de esta ni el ruido que llegue a él o los recintos colindantes.

2.4.4. Materiales acústicos

Los materiales acústicos se clasifican según la función específica que desempeñan a la hora de enfrentarse con el ruido, entre ellos existen tres tipos: absorbentes de sonido, barreras de sonido y materiales del tipo amortiguador.

- a) *Materiales absorbentes de sonido: Son materiales porosos, en donde “la absorción acústica se produce por una doble pérdida energética de las ondas sonoras al chocar con el material. Por un lado, se produce una pérdida energética por la vibración de las fibras que componen el material y por otro, el rozamiento del aire con el esqueleto del material.”* La eficacia de este tipo de material depende netamente del espesor, el montaje y la densidad. Entre ellos destacan la lana de roca, lana mineral, fibra de vidrio, espumas. El coeficiente de absorción acústica de estos materiales es proporcional al aumento de la frecuencia del sonido, en frecuencias inferiores a 500 Hz la efectividad de los absorbentes es menor, por lo que en general se requiere un mayor espesor en estos casos. (Hernández, 2012)

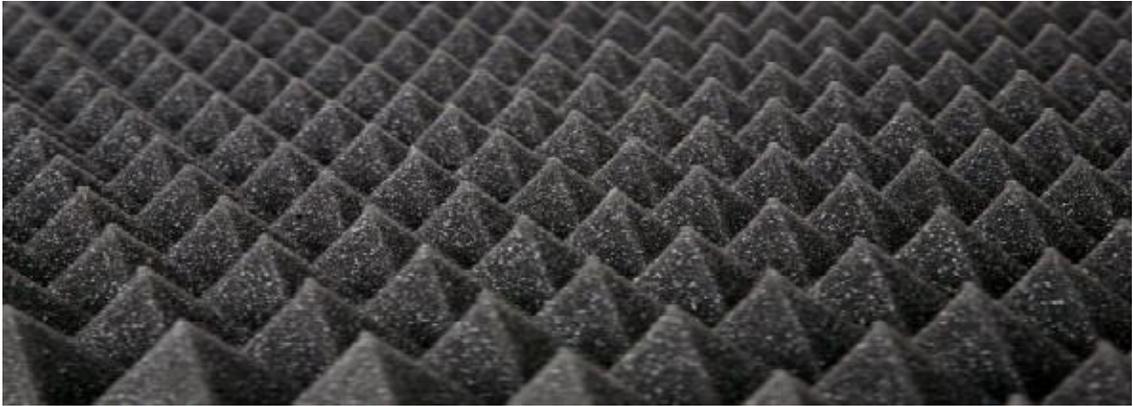


Figura 8: Material poroso
Fuente: (Hernandez, 2012)

- b) Materiales del tipo barreras para pérdida por transmisión: Son materiales muy densos y rígidos, en los cuales se produce pérdida de transmisión. La pérdida de transmisión es una relación logarítmica entre la potencia de sonido en un lado del muro y la potencia de sonido transmitido al otro lado del muro. En muros más pesados y densos existe una mayor pérdida por transmisión, debido a que se produce una menor excitación del material por el ruido aéreo. Para estos materiales se cumple lo que en acústica se conoce como “ley de masa”, que establece dos principios básicos: para cada duplicación del peso superficial del muro, se reducen cerca de 5 o 6 dB de ruido transmitido, y para cada duplicación de la frecuencia del ruido, se reducen alrededor de 5 o 6 dB de ruido transmitido.
- c) Materiales tipo amortiguador: Se utilizan principalmente para reducir el ruido estructural que se transmite a través de vibraciones por una estructura. En materiales como la madera, hormigón y ladrillos, el ruido se atenúa alrededor de 2 dB en 30 metros, para el caso del acero, en cambio, la misma atenuación se produce en 20 veces esta distancia. Los materiales amortiguadores de sonido son capaces de convertir la energía acústica en calor por fricción, creando resistencia mecánica al sonido transmitido por la estructura. (Díaz, 2013)

2.5. Propiedades para el cálculo de absorción acústica del caucho y fibra reciclados

Dentro de las propiedades de interés para el cálculo en acústica, se conoce la resistividad al flujo de aire, porosidad y tortuosidad. En el caso del caucho, para estas propiedades, se tienen los valores mostrados en la Tabla 2.

Muestras de granulometría homogénea			
Granulometría (mm)	Resistividad (σ)	Porosidad (Ω)	Tortuosidad (T)
1.4	6082.8	44.3%	2.24
2	2858.1	51%	2.08
3	1418	54%	1.95
4	1288.7	53.5%	1.47
6	712.5	54.4%	1.38
Muestras de granulometría heterogénea			
0 – 7	1077.8	48,4%	1.58
0 – 3	3318.6	54.1%	1.54

*Tabla 2: Propiedades físicas del caucho granular, según tamaño de grano.
Fuente: (Rodríguez Montejano, 2003)*

El caucho granulado corresponde a un material absorbente acústico de amplio espectro, además de poseer excelente estabilidad frente a agentes climáticos e inalterabilidad en el tiempo. El coeficiente de absorción acústica se ve favorecido, a medida que se disminuye el tamaño de partícula. Éste efecto se puede apreciar en la gráfica de la Figura 9.

La onda acústica puede propagarse en el interior de un material en una distancia infinita, pero se atenúa progresivamente a lo largo de su propagación, por ello es posible definir un espesor crítico en el cual la atenuación de energía alcanza un grado determinado. Para el caso del granulado de caucho existe este espesor crítico en donde se llega a un punto de saturación, es decir, aumentar más allá de este espesor la capa aislante no se traducirá en una mejora del coeficiente de absorción

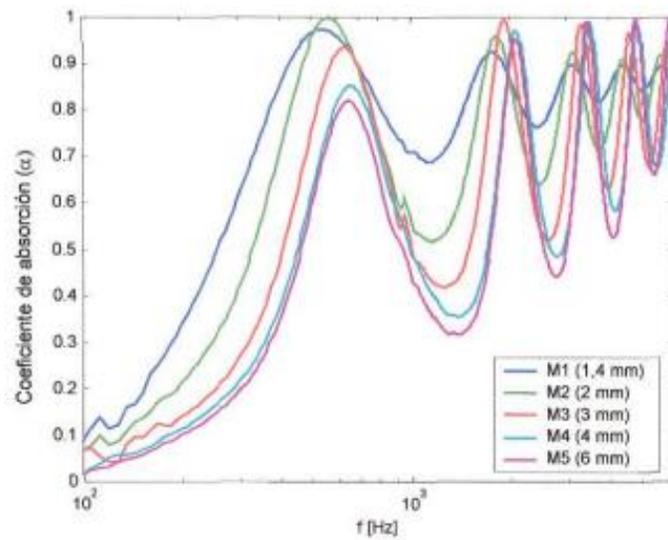


Figura 9: Coeficiente de absorción acústica en función de la frecuencia, para distintos tamaños de partícula, considerando un espesor de 10 cm.
Fuente: (Rodríguez Montejano, 2003)

En la Figura 10 se observa el comportamiento del coeficiente de absorción acústica según el espesor de la capa para el caso de lana mineral, mientras que en la Figura 11 para el caso del caucho granular, ambos casos graficados en seis frecuencias distintas.

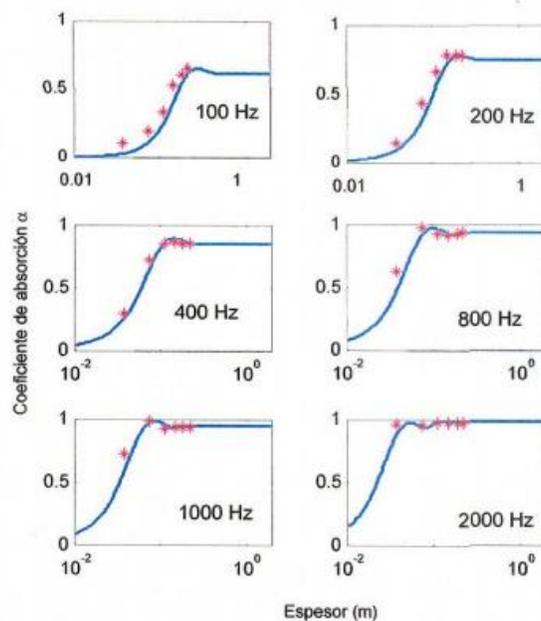
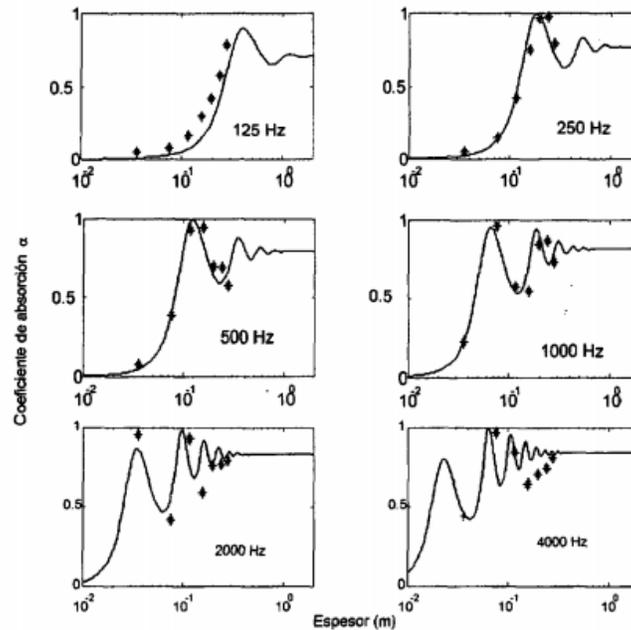


Figura 10: Curva de absorción acústica de una muestra de lana mineral en función del espesor de la capa para 6 frecuencias distintas.
Fuente: (Rodríguez Montejano, 2003)



*Figura 11: Curva de absorción de una muestra de granulado de caucho en función del espesor de la capa, para 6 frecuencias distintas
Fuente: Rodríguez Montejano, 2003*

Rodríguez probó que una forma de optimizar las propiedades absorbentes de los paneles acústicos a base de caucho reciclado es empleando superficies acanaladas, de esta forma se genera mayor área de absorción incrementando el coeficiente de absorción sin la necesidad de aumentar el volumen utilizado.

Para el caso de la fibra o pelusa reciclada de NFU la absorción acústica varía de acuerdo con la frecuencia del sonido. Canto (2016) en su tesis doctoral, investigó las propiedades acústicas de estas fibras en presencia de distintas frecuencias de ruido, obteniendo los coeficientes de absorción acústica presentes en la Tabla 3.

Frecuencia (Hz)	Coefficiente de absorción acústica
400 – 999	0,83
1000 – 1999	0,93
2000 – 2999	0,96
3000 – 3999	0,97

*Tabla 3: Coeficiente de absorción por rango de frecuencia
Fuente: (Canto, 2016)*

Para obtener estos coeficientes de absorción, utilizó una muestra con características descritas en la Tabla 4.

Parámetros físicos	
Espesor	3,08 cm
Densidad	0,303 g/cm ³
Parámetros acústicos	
Porosidad	0,76
Tortuosidad	3
Permeabilidad	769,26 mm/s

Tabla 4: Propiedades de la muestra
Fuente: Canto, 2016

La muestra está constituida por una mezcla de dos tipos de fibra provenientes de los NFU's, de dos plantas de reciclaje distintas, combinadas en dos capas. La fibra uno, tiene un rango de longitudes extenso que oscila entre 2 y 43 mm encontrándose algunas fibras entre 74 y 78 mm, la distribución es muy variada encontrando un pico entre 13 y 16 mm y un mínimo en el intervalo de 0 a 2,25 mm. La segunda, está constituida por fibras muy cortas, casi polvo, con una distribución más uniforme de las longitudes, entre 2 y 8 mm, considerando que el 45% de las fibras tienen una longitud entre 4 y 7 mm y el mínimo lo componen fibras de 0 hasta 2,25 mm (12%).

Según el estudio, un panel con esta composición optimizada de fibra textil proveniente de neumáticos reciclados otorga resultados de absorción acústica similares a los de la tradicional lana mineral.

Otra investigación también determinó los parámetros acústicos de la pelusa reciclada de neumáticos de diferentes muestras, que originalmente poseen la composición descrita en la Tabla 5 y a pesar de ser sometida a un proceso de limpieza, no es posible separar todas las partículas de acero y caucho. Para probar el comportamiento acústico, los investigadores utilizaron la fibra con adición de una resina acrílica de aplicación textil (Resitex CPS), la cual se utilizó en solución acuosa 53 g/l, y también sin ella.

Material	Porcentaje
Caucho	72,4
Fibra textil	27,2
Acero(hebras)	0,1
Otros (negro de humo, aceites, hidrocarburos)	0,3

Tabla 5: Composición fibra reciclada de neumáticos
Fuente: (Maderuelo-Sanz et al., 2012)

Los resultados obtenidos para las diferentes muestras se visualizan en la Tabla 6.

Muestra	Propiedades físicas				Propiedades acústicas		
	Espesor (mm)	Densidad (kg/m ³)	Presión (Mpa)	Índice de impregnación (%) (resina)	Porosidad	Tortuosidad	Resistividad al flujo (Rayls/n)
M-A	5,4	693	0,315	80	418	1138	34549
M-B	6,3	511	0,032	80	569	1550	11067
M-C	6,3	546	0,032	0	544	1480	7780
M-D	5,2	637	0,158	80	466	1268	23832
M-E	23	441	0,003	80	630	1716	14543
M-F	16,5	591	0,011	0	501	1365	16538
M-G	10	739	0,126	80	390	1063	14460

*Tabla 6: Propiedades fibra reciclada de neumáticos
Fuente: (Maderuelo-Sanz et al., 2012)*

2.6. Materiales acústicos desarrollados a partir de productos del reciclaje de NFU

A continuación, se describen materiales y elementos que han sido desarrollados por empresas de distintos países a partir de productos del reciclaje de NFU, con fines de aislación y/o absorción acústica en construcción.

2.6.1. Sistema para aislamiento acústico de paredes de separación (ACOUSTICEL M20AD)

Consiste en un panel diseñado para mejorar las propiedades acústicas en todo tipo de muro, desarrollado en Reino Unido por Sound Service Ltda., y comercializado en espesores que van desde los 20 mm hasta 50 mm como máximo. El material tiene una densidad de 800 kg/m³, está compuesto de caucho reciclado y aglutinantes, pudiendo aportar una reducción acústica de hasta 48 dB y un coeficiente de conductividad térmica (λ) de 0,12. El fabricante plantea la mejora en el acondicionamiento acústico por medio de 2 casos ilustrados en la Tabla 7. Se obtiene como mejor resultado la solución que plantea incorporar la almohadilla aislante más 2 placas de yeso cartón, considerando que agregar un relleno de lana mineral en el espacio entre vigas, incrementaría la aislación en 5 dB.

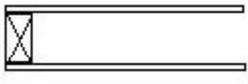
	1	Revestimiento de yeso cartón de 12.5 mm separadas por los pies derechos de 75 mm espaciados a 600 mm.
	2	Añadiendo 1 capa de M20AD (20mm) y doble yeso cartón en uno de los lados.
	3	Añadiendo 1 capa de M20AD (20mm) y doble yeso cartón en ambos lados

Tabla 7: Solución constructiva con ACOUSTICEL M20AD

Fuente: SoundService, s.f.

Instalación: Esta almohadilla aislante está diseñada para instalarse como solución constructiva de mejoramiento acústico, sobre un muro con revestimiento de yeso cartón o similar. Para esto la superficie debe estar completamente lisa y libre de suciedad, se recomienda quitar todo tipo de papel mural y pinturas descascaradas que puedan dificultar la adherencia. Además, todas las uniones piso-muro, recortes y encuentros con artefactos eléctricos, como interruptores, se deben sellar adecuadamente con sellador acústico.

Caso	Espesor nominal del tabique (mm)	Peso (kg/m ²)	Resistencia al fuego (minutos)	Reducción acústica sin relleno (dB)	Reducción acústica mínima con relleno de lana mineral (75mm) (Db)
1	100	19	30	30	34
2	145	53	30	40	45
3	190	87	60	42	47

Tabla 8: Propiedades de la solución constructiva.

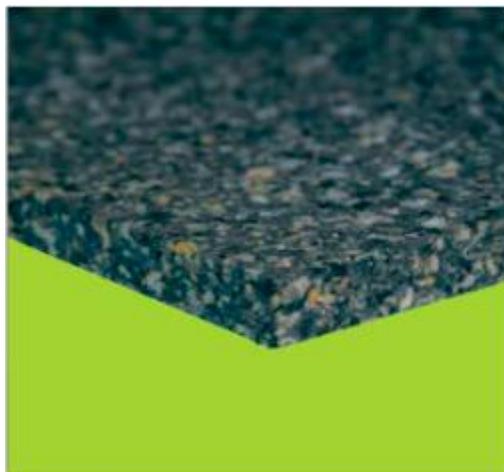
Fuente: (SoundService Ltda., s. f.).

Para fijar la plancha se utiliza el adhesivo Sta-Stuk del mismo fabricante, éste se debe esparcir por ambas superficies a unir, formando una película por toda el área de manera homogénea, tanto en la superficie del muro como del aislante, que enseguida se adhiere aplicando presión uniforme en toda la superficie. El período de fragüe del adhesivo depende de la temperatura, por lo que puede ser inmediato en climas cálidos o tardar hasta 12 horas. Posterior a esto, se fijan del mismo modo 2 planchas de yeso-cartón de 13 mm sobrepuestas, esta vez adheridas con el adhesivo Sta-Put, (SoundService, s.f.).

2.6.2. Panel aislante y absorbente acústico de caucho y poliuretano aglomerado (AKUSTIC-C1)

Este panel fue desarrollado por la empresa italiana N.D.A. Nuovi Dimensioni Ambientali S.R.L. y está constituido en un 90% por caucho reciclado y poliuretano. El material es elástico, transpirable, moldeable, y tiene densidad de 100 kg/m³.

El panel se fija mediante el adhesivo acrílico en dispersión acuosa ADESILEX VS45. Para ello, se requiere realizar una limpieza en la superficie, cuidando que quede libre de polvo, grasas y residuos que pudieran dificultar la adhesión. Después se aplica la pasta de manera uniforme con una espátula dentada en cantidad suficiente que asegure la total impregnación del dorso. Luego se deja actuar un tiempo variable entre 0 y 15 minutos, dependiendo de las condiciones de temperatura y humedad. Transcurrido este tiempo, se instala el panel, masajeando toda la superficie con una espátula de madera para facilitar la adherencia. (Mapei, s. f.).



*Figura 12: Akustik-C1
Fuente: (N.D.A., s. f.)*

2.6.3. Panel aislante de fibra textil reciclada de neumáticos

Según un proyecto desarrollado en 2015 por COMSA S.A.U. en España, es posible el desarrollo de un panel con propiedades de aislamiento acústico y térmico equivalentes a la solución convencional de lana de roca, mineral, de vidrio, entre otras. El panel desarrollado con fibra textil y cola de empapelar presentó un comportamiento aislante y mecánico excelente y un 20% más económico que las soluciones tradicionales. (COMSA, 2015).



*Figura 13: Panel aislante desarrollado con fibra textil reciclada de NFU
Fuente: (COMSA, 2015)*

2.6.4. Aislante compuesto por gránulos de caucho y aglomerante en base PU (Silent Acoustic)

Silent Acoustic es una lámina aislante ecológica desarrollada en Chile por Polambiente para mejorar la acústica entre espacios, puede ser instalado en pisos, muros y cielos, ofreciendo una reducción de la transmisión de sonido de 20 dB. El aislante se comercializa en espesores de 3 mm a 10 mm y se compone de gránulos de caucho y aglomerante en base a PU, material 100% reciclado. El comportamiento acústico se ensayó midiendo el nivel de ruido de impacto normalizado, obteniendo los resultados que se muestran en la Figura 14: Gráfico resultados ensayo ruido de impacto normalizado, en donde:

f : Frecuencia [Hz]

L: Nivel de ruido de impacto medio, medido en recinto receptor [dB]

RF: Ruido de Fondo en recinto receptor [dB]

T60: Tiempo de Reverberación [s]

L'n: Nivel de ruido de impacto normalizado [dB]

ΔL : Mejora del aislamiento al ruido de impacto [dB]

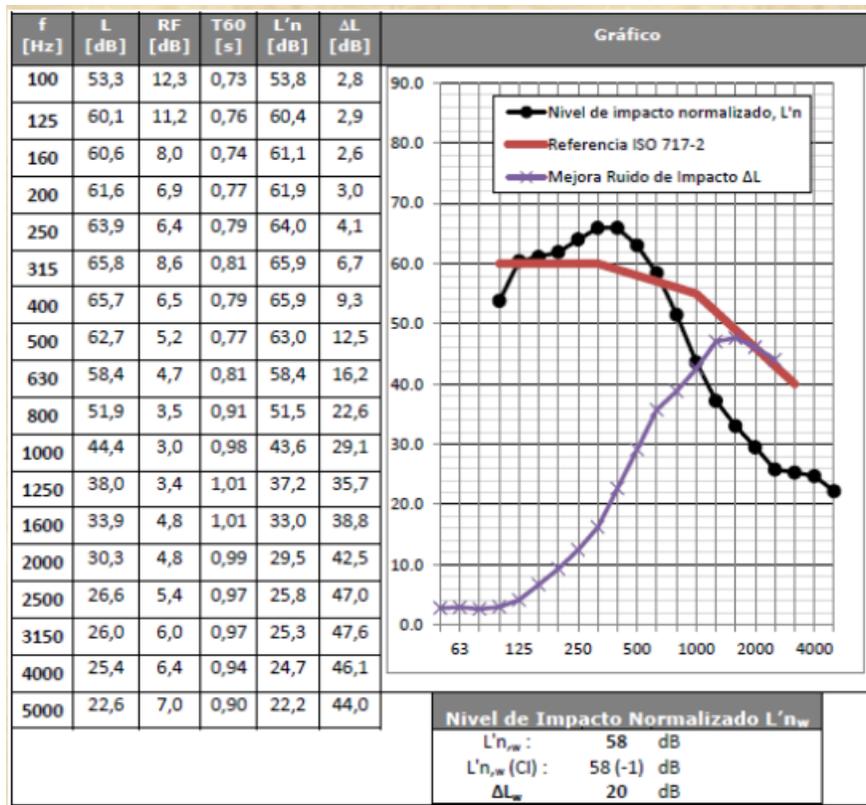


Figura 14: Gráfico resultados ensayo ruido de impacto normalizado
Fuente: POLAMBIENTE, s.f.

2.7. Huella de carbono

“La Huella de Carbono corresponde a una cuantificación de las emisiones de gases de efecto invernadero medida a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto o servicio. Es decir, desde la adquisición de materias primas, pasando por su producción y terminando con la distribución, almacenaje, el consumo y el desecho del producto.” (Prochile, 2011)

La huella de carbono de un neumático nuevo está principalmente determinada por la etapa de uso de éste, produciéndose en esta etapa el 90% de las emisiones de CO₂. El desglose de estas cifras se puede observar en la Tabla 9.

Clase		Neumáticos generales [kgCO ₂ /neumático]
Etapa de materia prima	Fabricación de materias primas	126,2
	Envío de materias primas	21,8
Etapa de fabricación	Fabricación	35,6
Etapa de distribución	Envío	10,4
Etapa de uso	Uso	2.167,50
Etapa de fin de vida y reciclaje	Fin de vida útil sin reutilización	0
Total, de cantidad de emisiones de GEI en neumáticos nuevos		2.361,50

Tabla 9: Huella de carbono de un neumático nuevo.

Fuente: (The Japan Automobile Tyre Manufacturers Association, 2012)

2.8. Reglamentación acústica según Ordenanza general de urbanismo y construcciones (OGUC)

La OGUC establece las directrices para aislación acústica mediante el índice de reducción acústica de las diferentes soluciones constructivas. Para este caso, se indica que los elementos constructivos que dividan o separen las unidades dentro de la edificación deberán cumplir las características mencionadas a continuación:

1. Los elementos constructivos horizontales o inclinados, tales como pisos, y rampas, deberán tener un índice de reducción acústica mínima de 45dB (A) y presentar un nivel de presión acústica de impacto normalizado máximo de 75dB, verificados según las condiciones del número 4. de este artículo.
2. Los elementos constructivos verticales o inclinados que sirvan de muros divisorios o medianeros, deberán tener un índice de reducción acústica mínima de 45dB(A), verificados según las condiciones del número 4.
3. Las uniones y encuentros entre elementos de distinta materialidad, que conforman un elemento constructivo, deberán cumplir con las disposiciones señaladas anteriormente en los números 1. y 2.
4. Para efectos de demostrar el cumplimiento de las disposiciones establecidas en los números 1 y 2 se deberá optar por una de las siguientes alternativas:

- A. La solución constructiva especificada para los elementos horizontales, verticales o inclinados deberá corresponder a alguna de las soluciones inscritas en el Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Aislamiento Acústico del Ministerio de Vivienda y Urbanismo.
- B. Demostrar el cumplimiento de las exigencias señaladas en los números 1. y 2. para la solución especificada, mediante Informe de Ensayo o Informe de inspección.

2.9. Análisis de absorción acústica mediante herramientas de cálculo computacional

Es posible predecir el comportamiento acústico de una solución constructiva mediante programas basados en modelos matemáticos. Éstos utilizan las características físicas de las diferentes capas del elemento, pudiendo estimar con un grado de fiabilidad elevado el comportamiento de estas capas frente la incidencia de un campo sonoro. (Venero et al., 2003)

En los apartados a) y b) se describen dos softwares que se utilizan en el cálculo de la aislación acústica en paneles o muros de construcción.

2.9.1. Insul

Insul es un programa para predecir el aislamiento acústico de paredes, pisos, techos, y ventanas, además del sonido de impacto y ruido de lluvia en pisos y techo. El programa es capaz de hacer buenas estimaciones de la pérdida de transmisión (TL) y el sonido de impacto (Ln) en bandas de 1/3 de octava, así como estimar el índice de reducción acústica ponderado. Se puede evaluar rápidamente nuevos materiales y sistemas, o investigar los efectos de los cambios en los diseños existentes, el modelo de predicción utilizado es la teoría de las placas elásticas, en donde se incluyen tolerancias para efectos de paneles gruesos.

Con este programa es posible realizar la predicción del índice de reducción acústica de manera confiable con un rango de error de ± 3 dB. (Insul, 2020)

En frecuencias bajas, la eficiencia de radiación de una partición de tamaño finito se reduce y la pérdida de transmisión medida es mayor que la ley de masa simple. Este efecto es más pronunciado para elementos como ventanas que a menudo se prueban con áreas pequeñas. Sin embargo, incluso para pruebas normales realizadas según ISO 140 con un área de 10-12 m², el efecto es significativo en las

frecuencias de prueba más bajas. Insul tiene en cuenta este efecto en el cálculo de la pérdida por transmisión.

Otro efecto considerado por el software es la separación entre montantes para paredes con estructura de acero o madera liviana, ya que el modo del primer panel a menudo puede caer en o muy cerca de la banda de 1/3 octava de 125 Hz, es decir la vibración del panel, puede disminuir la pérdida por transmisión y por lo tanto reducir el efecto aislante de la partición, esto se hace notar en espaciamientos iguales o menores a 40 cm.

2.9.2. SoundFlow

Es un software de simulación para calcular la absorción, reflexión y transmisión de sonido en estructuras multicapa, como el caso de paredes, pisos techos, configurando los distintos espesores y materiales del elemento. El software incorpora una base de datos con los materiales más utilizados en aislación acústica, divididos en tres tipos: absorbentes, paneles perforados y placas. La clasificación depende de las características acústicas básicas del material, por ejemplo, los mecanismos de conducción y absorción del sonido. Para cada tipo, se utilizan diferentes propiedades físicas para definir el material en el cálculo. Los absorbentes, por ejemplo, se especifican por su resistividad al flujo. Las placas perforadas se caracterizan por su porosidad, entre otros. También se permite el ingreso y configuración de nuevos materiales. De este software se pueden obtener los siguientes parámetros; coeficiente de absorción, coeficiente de reflexión, pérdida de transmisión, impedancia de entrada, factor de reflexión, factor de transmisión. (SoundFlow, s. f.)

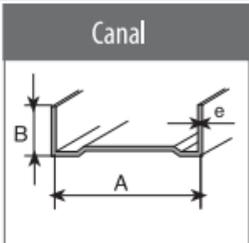
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA Y DESARROLLO

3.1. Materiales

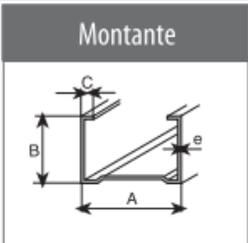
Para el estudio se modelan 3 soluciones constructivas de tabique para uso interior de tipo divisorio, considerando combinaciones de los siguientes materiales:

- Estructura en perfiles de acero galvanizado: compuesto por soleras, superior e inferior y montantes dispuestos a 60 cm. Los perfiles utilizados para los modelos son: “Montante normal perf.”, “Canal normal” y “esquinero perf.”, descritos en la Figura 15.

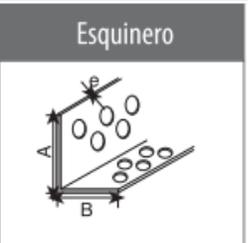
Especificaciones Metalcon Tabiques	Nomenclatura	Dimensiones				Peso P Kg/m	Largos (m)	Código Cintac
		A mm	B mm	C mm	e mm			
Montante Normal Perf.	60x38x0,5	60	38	6	0,50	0,56	2,40	36000034
Montante Normal Perf.	60x38x0,5	60	38	6	0,50	0,56	3,00	36000035
Montante Económico	38x38x0,5	38	38	5	0,50	0,48	2,40	36000032
Montante Económico	38x38x0,5	38	38	5	0,50	0,48	3,00	36000033
Canal Normal	61x20x0,5	61	20	-	0,50	0,39	2,40	36000198
Canal Normal	61x20x0,5	61	20	-	0,50	0,39	3,00	36000037
Canal Económico	39x20x0,5	39	20	-	0,50	0,31	2,40	36000197
Canal Económico	39x20x0,5	39	20	-	0,50	0,31	3,00	36000036
Esquinero Perf.	30x30	30	30	-	0,50	0,18	2,40	36000002
Esquinero Perf. Eco.	25x25	25	25	-	-	0,15	3,00	36000107



Canal



Montante



Esquinero

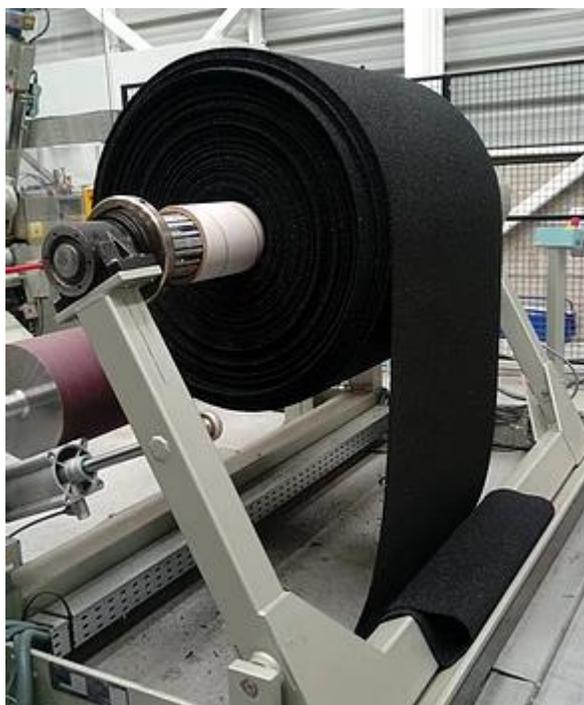
Figura 15: Perfiles METALCON tabique
Fuente: (Cintac, 2020)

- Placa de yeso cartón 12,5 mm de espesor: Mezcla de yeso y aditivos especiales, revestido en ambas caras por cartón de alta resistencia, en dimensión 2.40 x 1.20 mt. En la Figura 16 se observa un ejemplo de placas de yeso-cartón de la marca Knauf.



*Figura 16: Placas yeso-cartón
Fuente: (Knauf, 2020)*

- Aglomerado de caucho reciclado: se utiliza una lámina de granulado de caucho reciclado en diferentes espesores, aglomerado con resina de poliuretano. La densidad de este elemento es de 100 kg/m³. En la Figura 17 se observa una lámina de caucho aglomerado en rollo desarrollado por la empresa chilena Polambiente.



*Figura 17: Lámina de aglomerado de caucho granulado
Fuente: (POLAMBIENTE, s. f.)*

- Fibra reciclada de neumáticos: consiste en fibra obtenida de la molienda en el reciclaje de neumáticos, cuya densidad es de 591 kg/m³. Para efectos de cálculo para esta fibra se utilizarán los datos obtenidos en la investigación de Maderuelo-Sanz.



Figura 18: Fibra textil reciclada de neumáticos
Fuente: (Canto, 2016)

3.2. Composición tabique acústico

Para el estudio se diseñan tres soluciones constructivas de tabique compuestas en distintas capas:

- A- Tabique A: conformado por estructura de acero galvanizado revestido con una placa de yeso cartón a cada lado, sobre las cuales se adosa una lámina de caucho reciclado seguida de otra capa de yeso cartón de 12,5 mm de espesor. Para evaluar el comportamiento acústico de esta solución constructiva, se considerarán los espesores descritos en la Tabla 10.

TABIQUE A	Espesor (mm)				
	A1	A2	A3	A4	A5
Yeso-cartón	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
Caucho reciclado	5	10	15	20	30
Yeso-cartón	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
Espesor total tabique	120	130	140	150	170

Tabla 10: Espesor de capas tabique A
Fuente: Elaboración propia

El modelo de análisis es el que se muestra en la Figura 19.

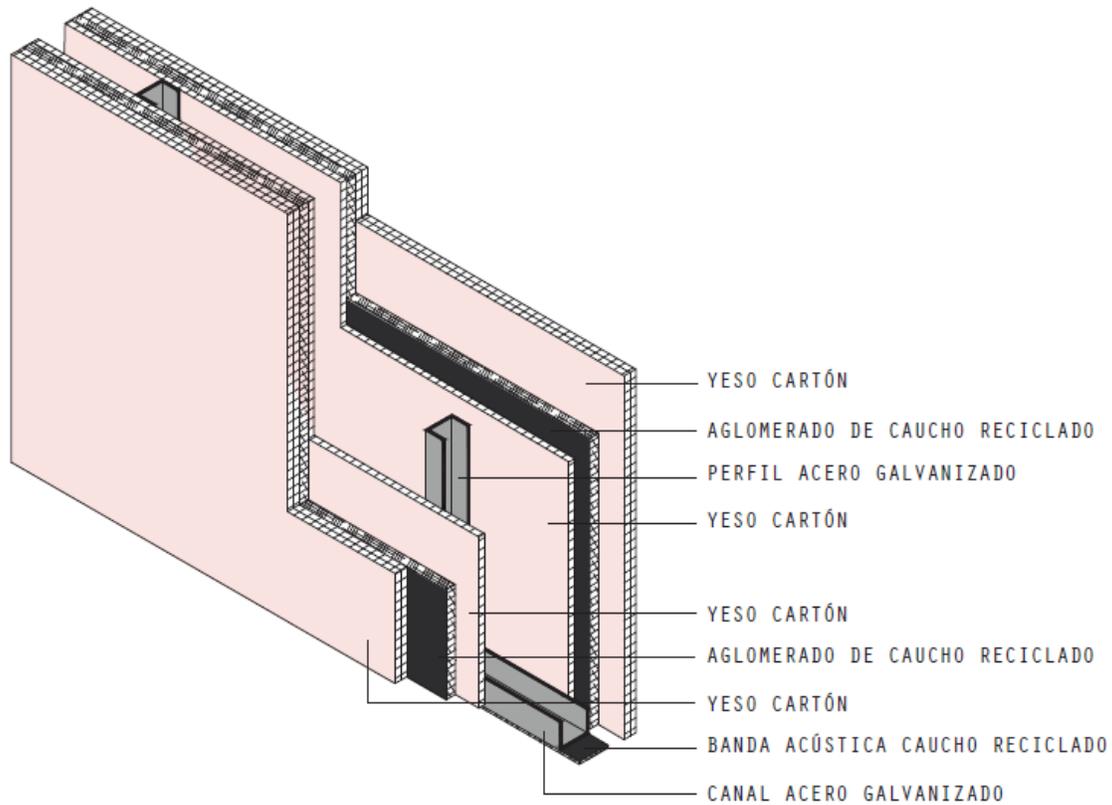


Figura 19: Tabique A
Fuente: Elaboración propia

B- Tabique B: conformado por estructura de acero galvanizado relleno con fibra reciclada de neumáticos entre montantes y revestimiento de doble placa de yeso-cartón. En este caso se prueba el comportamiento acústico de la solución constructiva al usar distintos espesores en la capa de fibra reciclada como se muestra en la Tabla 11.

TABIQUE B	Espesores (mm)			
	B1	B2	B3	B4
Fibra reciclada	30	40	50	60
Yeso-cartón	12,5	12,5	12,5	12,5
Yeso-cartón	12,5	12,5	12,5	12,5
Espesor total tabique	110	110	110	110

Tabla 11: Espesor fibra reciclada de neumáticos
Fuente: elaboración propia

En la Figura 20 se muestra la composición por capas del tabique B.

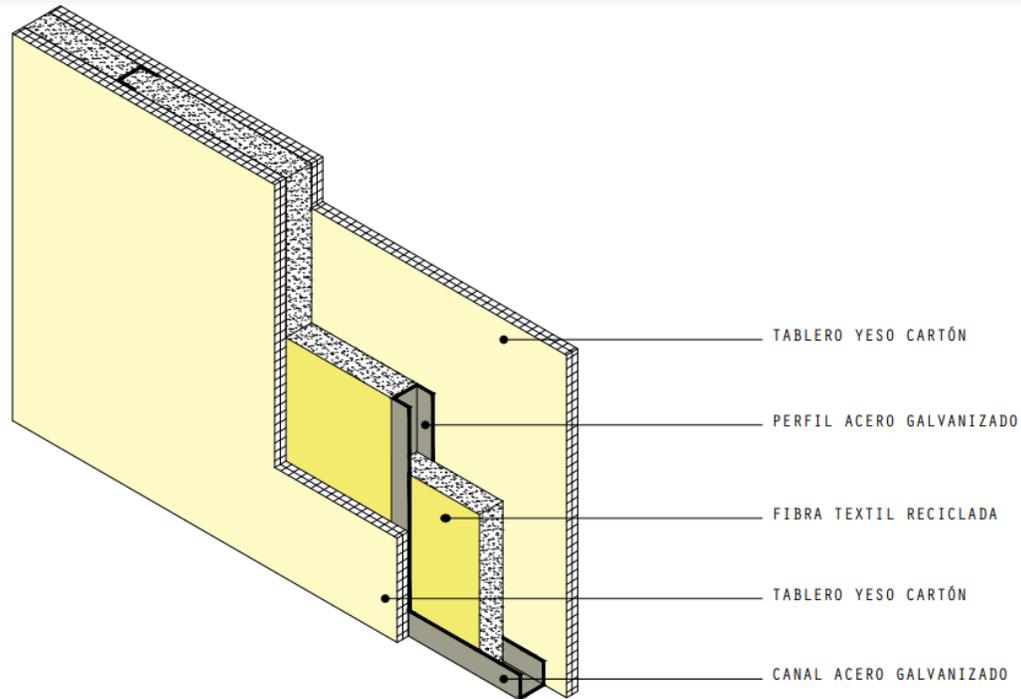


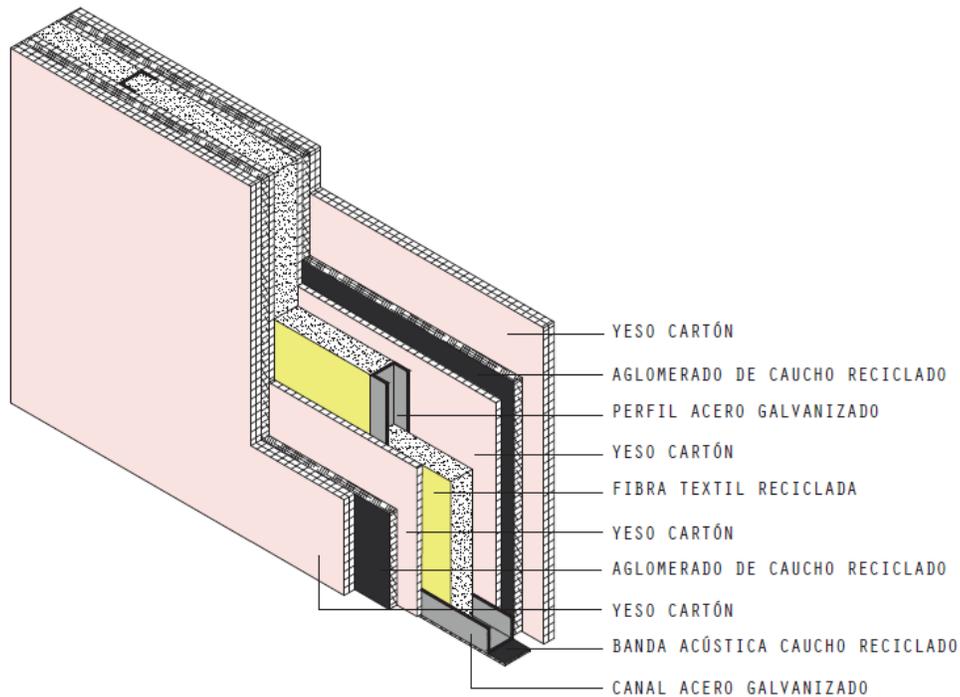
Figura 20: Tabique B
Fuente: Elaboración propia

C- Tabique C: conformado por estructura de acero galvanizado relleno con fibra reciclada de neumáticos entre los perfiles de acero galvanizado, con revestimiento de yeso cartón y adosado de caucho reciclado, seguido de una capa de yeso-cartón. En este caso se prueba el comportamiento acústico de la solución constructiva al usar la combinación de los dos elementos aislantes provenientes del reciclaje de neumáticos, utilizando como variable el espesor del caucho reciclado, como se muestra en la Tabla 12.

TABIQUE C	Espesores (mm)			
	C1	C2	C3	C4
Fibra reciclada	20	20	20	20
Yeso-cartón	12,5	12,5	12,5	12,5
Caucho reciclado	10	15	20	30
Yeso-cartón	12,5	12,5	12,5	12,5
Espesor total tabique	130	140	150	170

Tabla 12: Espesores de capas tabique C
Fuente: elaboración propia

En la Figura 21 se muestra la composición en capas del tabique C.



*Figura 21: Tabique C
Fuente: elaboración propia*

3.3. Modelación en software INSUL

El programa permite modelar soluciones constructivas simples, dobles o triples. En este caso es necesario utilizar un modelo del tipo “doble” en donde se configuran 2 paneles unidos por una estructura interna.



*Figura 22: Captura configuración de muro
Fuente: Elaboración propia.*

Como se observa en la Figura 22, cada panel puede portar hasta 6 capas de distinta materialidad, las cuales pueden ser elegidas desde una base de datos universal y modificadas manualmente en cuanto a sus propiedades. La estructura interna se configura mediante perfiles, entre los cuales se añade un material absorbente del sonido, ambos elementos pueden ser escogidos desde una base de datos al igual que los paneles, como se muestra en la Figura 23.

Single		Double	Triple																			
Panel 1	Frame 1	Panel 2	Leak																			
<p>Frame Material</p> <ul style="list-style-type: none"> All Masonry Metal Timber 	<p>Frame Type</p> <ul style="list-style-type: none"> Left steel stud + air gap Steel Stud (0.55mm) Steel Stud (1.0-1.6mm) Staggered Steel Stud Steel Stud + resil. rail Steel Stud (1.0-1.6mm) + resil. rail 	<p>Frame Parameters</p> <p>Cavity Width: 89 (mm)</p> <p>Stud Width: 38 (mm)</p> <p>Stud Depth: 89 (mm)</p> <p>Stud Spacing: 600 (mm)</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Keep cavity width constant</p>																				
<p>Absorption</p> <p>Product: <input type="text"/> Absorber Thickness: 60 (mm) Number of: 0</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Product</th> <th>Category</th> <th>Manufacturer</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fibreglass (10kg/m3)</td> <td>Fibreglass</td> <td>All Manufacturers</td> </tr> <tr> <td>Fibreglass (10kg/m3)</td> <td>Mineral Wool</td> <td>Empty</td> </tr> <tr> <td>Fibreglass (10kg/m3)</td> <td>Other</td> <td>Generic</td> </tr> <tr> <td>Fibra de Vidrio (10kg/m3)</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Fibra de Vidrio (22kg/m3)</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Product	Category	Manufacturer	Fibreglass (10kg/m3)	Fibreglass	All Manufacturers	Fibreglass (10kg/m3)	Mineral Wool	Empty	Fibreglass (10kg/m3)	Other	Generic	Fibra de Vidrio (10kg/m3)			Fibra de Vidrio (22kg/m3)		
Product	Category	Manufacturer																				
Fibreglass (10kg/m3)	Fibreglass	All Manufacturers																				
Fibreglass (10kg/m3)	Mineral Wool	Empty																				
Fibreglass (10kg/m3)	Other	Generic																				
Fibra de Vidrio (10kg/m3)																						
Fibra de Vidrio (22kg/m3)																						

*Figura 23: Configuración estructura muro.
Fuente: elaboración propia*

Para efectos del cálculo de esta solución constructiva, el caucho reciclado se utilizará como parte del panel de revestimiento y la fibra reciclada se utilizará como absorbente acústico incorporado en la estructura interna, dispuesta entre los perfiles de acero galvanizado.

El programa calcula la pérdida por transmisión en bandas de frecuencia de 1/3 de octava, desde 50 a 5000 Hz, sin embargo, el resultado de índice de reducción acústica se calcula en el rango de 100 a 3125 Hz, debido a que en este espectro se encuentra la mayoría de los ruidos de interés en una edificación.

3.3.1. Datos

Para iniciar el cálculo es necesario incorporar al programa los materiales reciclados a evaluar, esto es posible gracias al “editor de materiales” incorporado en el software, pudiendo introducir manualmente las propiedades determinantes para el cálculo acústico.

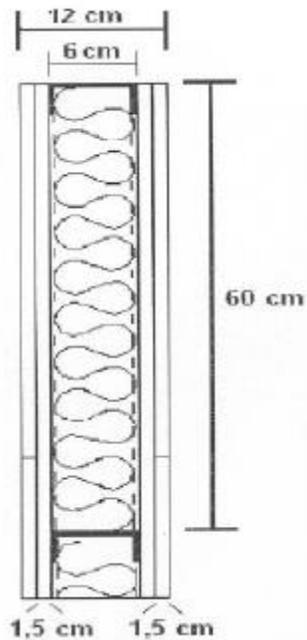
- Panel de caucho reciclado: se introducen los valores de densidad, módulo de Young y coeficiente de amortiguamiento y resistividad al flujo.
Densidad: 750 kg/m³, se considera la densidad de las láminas de caucho fabricadas por Polambiente S.A.
Módulo de Young: 0,017 (Meza et al., 2019)
Factor de amortiguamiento: 0,010
Resistividad al flujo: 3318,6 Rayl/m (Rodríguez Montejano, 2003)
- Fibra reciclada: Se introducen los valores de resistividad y densidad
Densidad: 591 kg/m³
Resistividad: 16538 Rayl/m (Maderuelo-Sanz et al., 2012)

3.4. Análisis del comportamiento acústico mediante los datos entregados por el software

El análisis de datos se lleva a cabo mediante tabulación y clasificación del comportamiento acústico en todo el rango de frecuencias estudiado, de esta forma, se establecen las frecuencias críticas en donde la solución constructiva presenta menor aislación del ruido, así como las frecuencias más favorables en su comportamiento, de manera de poder determinar los tipos de ruido sobre los que existirá alcance.

3.5. Análisis comparativo con solución constructiva para aislación acústica convencional

Para la comparación se selecciona un tabique de referencia del “Listado oficial de soluciones constructivas para el aislamiento acústico” del MINVU. Este corresponde a la solución constructiva “C13.2 Tabique Divisorio: estructura de acero galvanizado y recubrimiento de planchas de yeso cartón “Gyplac” estándar (15 mm), con aislante interior”, constituido por una estructura metálica dotada de montantes (pies-derechos), hechos con perfiles de acero galvanizado “Gyplac” tipo C de 60 x 38 x 0,5 mm, distanciados entre ejes cada 0,6 m, aproximadamente y de dos soleras (inferior y superior) de 61 x 20 x 0,5 mm. La estructuración está forrada por cada una de sus caras con dos planchas de yeso cartón “Gyplac” tipo estándar de 15 mm de espesor, traslapadas y la estructura está rellena por lana de vidrio de 60 mm de espesor y densidad de 14,5 kg/m³. El detalle en planta de este tabique se encuentra en la Figura 24.



*Figura 24: Tabique divisorio listado oficial MINVU
Fuente: (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2014)*

En base a los resultados obtenidos de los programas de predicción acústica se elige uno de los ejemplares modelados y se somete a un análisis comparativo con el tabique de referencia, considerando los siguientes aspectos:

- Comportamiento al ruido: Se comparan los resultados de predicción acústica otorgados por el software para el tabique propuesto y los datos entregados en el listado oficial para el tabique de referencia.
- Montaje y características generales: Diferencias y similitudes de base en cuanto al modelo, requerimientos de montaje, armado, fabricación y/o prefabricación.
- Impacto ambiental: Se estimará mediante el cálculo de la huella de carbono, en donde se consideran las emisiones implicadas en el proceso de producción de cada uno de los materiales que componen ambos tabiques. Los datos se obtienen en su mayoría mediante recopilación bibliográfica.

3.6. Cálculo huella de carbono

Se estima la huella de carbono considerando un recuento de las emisiones de CO₂ determinadas por los materiales que conforman el tabique del listado MINVU y el tabique propuesto. El cálculo se realiza utilizando el factor de emisiones de cada material, cuyo valor se obtiene mediante recopilación bibliográfica, exceptuando el caso de la lámina de caucho en donde será necesario calcular la huella de carbono estimada mediante los procesos de fabricación.

Para establecer un punto de comparación se determinan dimensiones arbitrarias como se observa en la Figura 25, donde se considera un alto de 2,3 m y largo de 3 mts, lo que corresponde dentro de este análisis a una unidad de tabique.

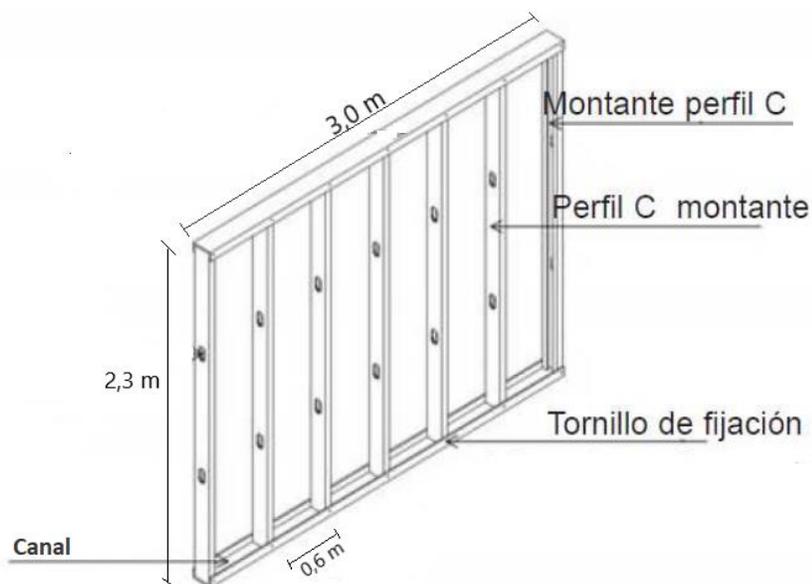


Figura 25: Unidad de tabique.

Fuente: Elaboración propia.

3.6.1. Huella de carbono para la obtención de caucho laminado reciclado

Según el Institute of Scrap Recycling Industries, reciclar neumáticos para convertirlos en combustible fósil, implica emisiones de 153 +/- 92 kg CO₂/Ton de neumático reciclado en Estados Unidos. Para efectos de esta investigación en cambio, se requiere conocer la emisión de CO₂ del reciclaje mecánico, en donde los neumáticos son sometidos a molienda para obtener un granulado que conformará la lámina de caucho a utilizar en el modelo.

Para el panel aislante de caucho aglomerado no se han encontrado referencias en cuanto al factor de emisiones de CO₂ por lo que se estimará realizando un análisis de las principales emisiones involucradas en su producción según el alcance estipulado en la Figura 26.

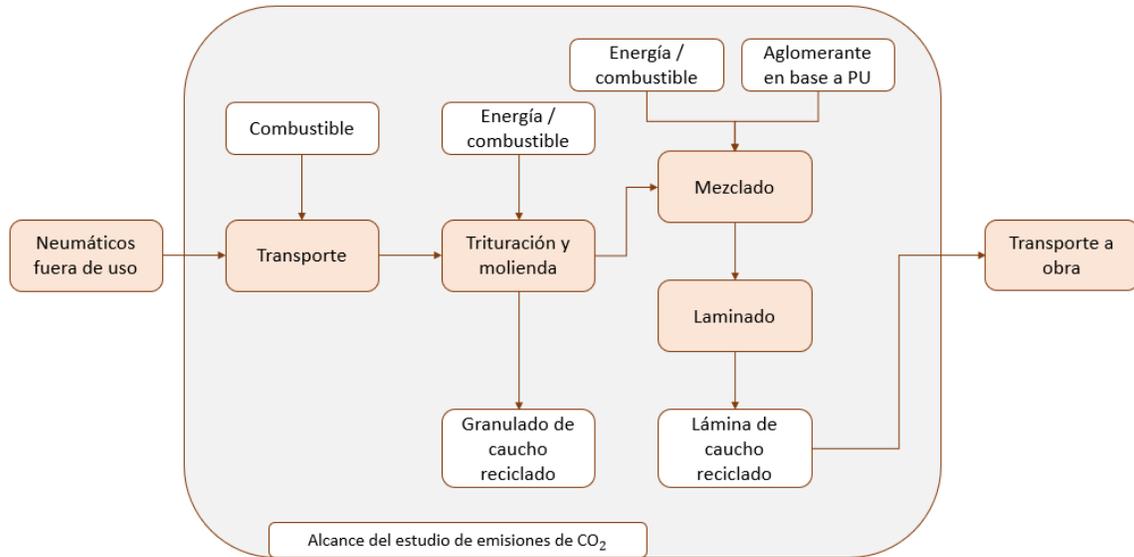


Figura 26: Proceso de obtención de láminas de caucho reciclado
Fuente: Elaboración propia.

En primer lugar, se obtiene el volumen total de la lámina de caucho contenida en una unidad de tabique, considerando para ésta un espesor de 20 mm:

$$2 * (2,3m * 3m * 0,02m) = 0,27 m^3$$

Con la densidad de la lámina de caucho se obtiene la masa:

$$750 \frac{kg}{m^3} * 0,27 m^3 = 202,5 kg$$

Considerando despreciable el peso en seco de la resina de poliuretano, se requiere la producción de 202,5 kg de caucho reciclado, para las láminas incorporadas en este tabique. Sin embargo, existen pérdidas asociadas al proceso que se considerarán como un 20%, necesitando entonces, 243 kg de caucho granulado en la fabricación de las láminas.

➤ **Transporte de NFU's a planta de reciclaje**

Se considera el combustible utilizado para el transporte en un camión Diesel con rampla como a una planta de reciclaje se observa en la Figura 27, teniendo en cuenta un trayecto de 100 Km entre el acopio de neumáticos y la planta de tratamiento.

Se emanan 2,65 kg de CO₂ por litro de petróleo consumido. Los camiones de carga tienen un rendimiento aproximado de 35 litros por cada 100 km recorridos.

$$2,65 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{l}} * 35 \text{ l} = 92,75 \text{ kgCO}_2$$

Este resultado es para la carga total, es decir, 20000 kg de neumáticos fuera de uso. Sin embargo, se requiere el valor para una unidad de tabique, sabiendo que el porcentaje en peso de caucho contenido en los neumáticos es de 60%, se obtiene el peso de NFU a reciclar, necesarios para una unidad de tabique:

$$243 \text{ kg} * 0,6 = 145,8 \text{ kg}$$

Posteriormente se obtienen las emisiones equivalentes para el traslado de 405 kg de NFU's:

$$\frac{20000 \text{ kg}}{92,75 \text{ kgCO}_2} = \frac{145,8 \text{ kg}}{x} = 0,68 \text{ kgCO}_2$$



*Figura 27: Transporte de NFU
Fuente: (Ecorel, 2020)*

➤ **Trituración y molienda**

En este proceso se considera la energía empleada para hacer funcionar la trituradoras y molino, considerando el proceso de reducción de tamaños descrito en el punto 2.2.1.

Se toma como referencia la trituradora Bomatic B12000DD, usada ampliamente en el reciclaje de neumáticos, cuya capacidad de producción es de 16.000kg /h (Bomatic, s. f.)

Para obtener granulado de caucho se requiere la disminución progresiva de tamaño a través del paso por 2 trituradoras y 2 granuladoras, es decir, el tiempo de paso por la maquina se multiplicará por cuatro:

$$\frac{16000 \text{ kg}}{405} = \frac{1 \text{ hora}}{x} \quad x = 0,025 \text{ h} * 4 = 0,1 \text{ hr}$$

Teniendo que el gasto energético de la máquina es 400 kW/h se estima el consumo de energía: (Cano et al., s. f.)

$$400 \frac{\text{kW}}{\text{h}} * 0,1 \text{ h} = 40 \text{ kW}$$

Con esta información del consumo es posible estimar la huella de carbono para la actividad mediante la calculadora de huella de carbono Cero CO2 de la ONG ECODES, obteniendo 16,4 kg de CO2 por unidad de tabique.

➤ **Mezclado**

En este proceso se incorpora el caucho granulado con resina de poliuretano en un cilindro mezclador, las emisiones consideradas en este proceso son 2; la energía y/o combustible para el funcionamiento del cilindro mezclador y la huella de carbono de la resina de poliuretano.

Se utilizan datos técnicos correspondientes a la mezcladora y extrusora de caucho ACTE 210/200, cuyo rendimiento es de 1100 kg/h y potencia de 160 kW/h. (ACERETECH, s. f.)

$$\frac{1100 \text{ kg}}{405} = \frac{160 \text{ kW}}{x} = 58,9 \text{ kW}$$

Con esta información del consumo es posible estimar la huella de carbono mediante la calculadora de huella de carbono Cero CO2, obteniendo 23,76 kgCO2 por unidad de tabique.

Por otro lado, la resina de poliuretano tiene un rendimiento de 0,35 kg/m2 (Rayston Chemycal SL, 2018).

Se necesitan 13,8 m² de lámina de caucho reciclado con lo que se calcula la cantidad de resina necesaria y las emisiones GEI producidas por dicha cantidad:

$$0,35 \frac{kg}{m^2} * 13,8 m^2 = 4,83 kg$$

Las emisiones propias de la fabricación de resina corresponden a 4,028 kg CO₂/kg (Freire et al., 2016), con lo que se calcula que la huella de carbono aportada por este material

$$4,028 kgCO_2 * 4,38 kg = 17,64 kgCO_2$$

Obteniendo un resultado de 17,64 kgCO₂ por una unidad de tabique, sumando un total de 76,54 kgCO₂ para la actividad de mezclado.

➤ **Laminado**

Se toma como referencia la laminadora de caucho XKY-550 que tiene un rendimiento de 540kg/h y un consumo de energía de 110 kWh. (Co.Ltd., 2018)

$$\frac{540 kg}{405} = \frac{110kW}{x} = 82,5 kW$$

Con esta información del consumo se obtiene la huella de carbono mediante la calculadora de huella de carbono Cero CO₂, resultando 82,5 kgCO₂ por unidad de tabique.

En la Tabla 13 se presenta el recuento de las emisiones de gases de efecto invernadero para la producción de caucho laminado equivalente a la cantidad necesaria para una unidad de tabique.

Actividad	Kg. CO2 por unidad de tabique
Transporte a planta	0,68
Trituración y molienda	16,40
Mezclado	76,54
Laminado	82,50
TOTAL EMISIONES EN LA PRODUCCIÓN DE LÁMINA DE CAUCHO	176,12

*Tabla 13: Emisiones GEI en la producción de lámina de caucho reciclado
Fuente: Elaboración propia*

3.6.2. Cálculo huella de carbono mediante factor de emisiones

➤ Perfiles de acero galvanizado

La fabricación de perfiles de acero galvanizado trae como resultado la emanación de 2,96 kg CO2/kg (Bolin & Smith, 2011).

En la Tabla 14 se determina la huella de carbono de los perfiles de acero galvanizado según el peso de estos en una unidad de tabique.

Perfil	Largo	Cantidad	Peso (kg/m)	Total (kg)	Factor de emisiones (kgCO2/kg)
Montante	2,4	7	0,56	9,41	2,96
Canal	3	2	0,39	2,34	
			Total	11,8	34,9

*Tabla 14: Emisiones GEI perfiles de acero galvanizado según peso.
Fuente: elaboración propia.*

➤ Yeso – cartón

El yeso cartón de 12,5 mm de espesor, tiene un peso de 9,3 kg/m² y en una unidad de tabique se emplean 27,6 m². (Volcan S.A., 2000). Por otro lado las emisiones de GEI de los paneles es de 0,335 kg CO2 / kg (Freire et al., 2016). Se calcula el peso según la siguiente ecuación:

$$9,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} * 27,6 \text{ m}^2 = 256,7 \text{ kg}$$

Se calculan las emisiones:

$$256,7 \text{ kg} * 0,335 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{kg}} = 86 \text{ kgCO}_2$$

Las emisiones de GEI del yeso cartón incluido en una unidad de tabique son 86 kgCO₂.

➤ **Fibra de vidrio**

El factor de emisiones en la producción de lana de vidrio corresponde a $0,57 \text{ kgCO}_2/\text{kg}$ (Leader et al., 2012).

Considerando que la densidad de la lana de vidrio es de 32 kg/m^3 , se tiene para una unidad de tabique:

$$32 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * (2,3 * 3 * 0,06) \text{m}^3 = 13,25 \text{ kg}$$

Se calculan las emisiones de GEI:

$$13,25 \text{ kg} * 0,57 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{kg}} = 7,6 \text{ kgCO}_2$$

Las emisiones de GEI en la producción de lana de vidrio para la cantidad contenida en una unidad de tabique corresponde a $7,6 \text{ kgCO}_2$.

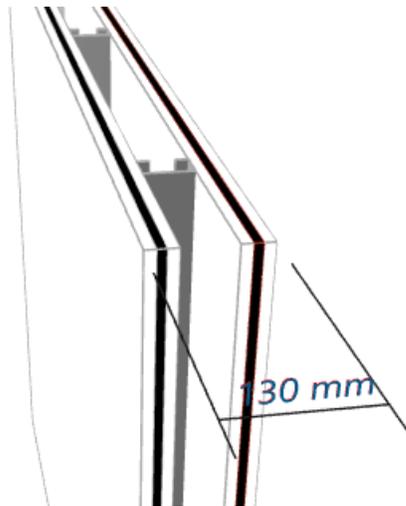
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. Aislación acústica

Luego de modelar las soluciones constructivas en el programa Insul, se obtuvo el índice de reducción acústica para cada alternativa propuesta.

4.1.1. Tabique A

Se clasifican los resultados de acuerdo con el espesor de la capa de caucho reciclado incorporada a la solución. En la Figura 28 se muestra una captura del modelo creado en el software Insul. El rango de frecuencias evaluado va desde los 50 a 5000 Hertz, y el comportamiento de aislación acústica en el rango queda mostrado en la Figura 30.



*Figura 28: Captura del modelo
Fuente: elaboración propia*

El índice de reducción acústica según el espesor de la lámina de caucho incorporada se muestra en la Figura 29.

Solución	Espesor lámina de caucho reciclado	Rw
A1	5	39
A2	10	43
A3	15	45
A4	20	47
A5	30	51

*Figura 29: Resultados tabique A
Fuente: Elaboración propia.*

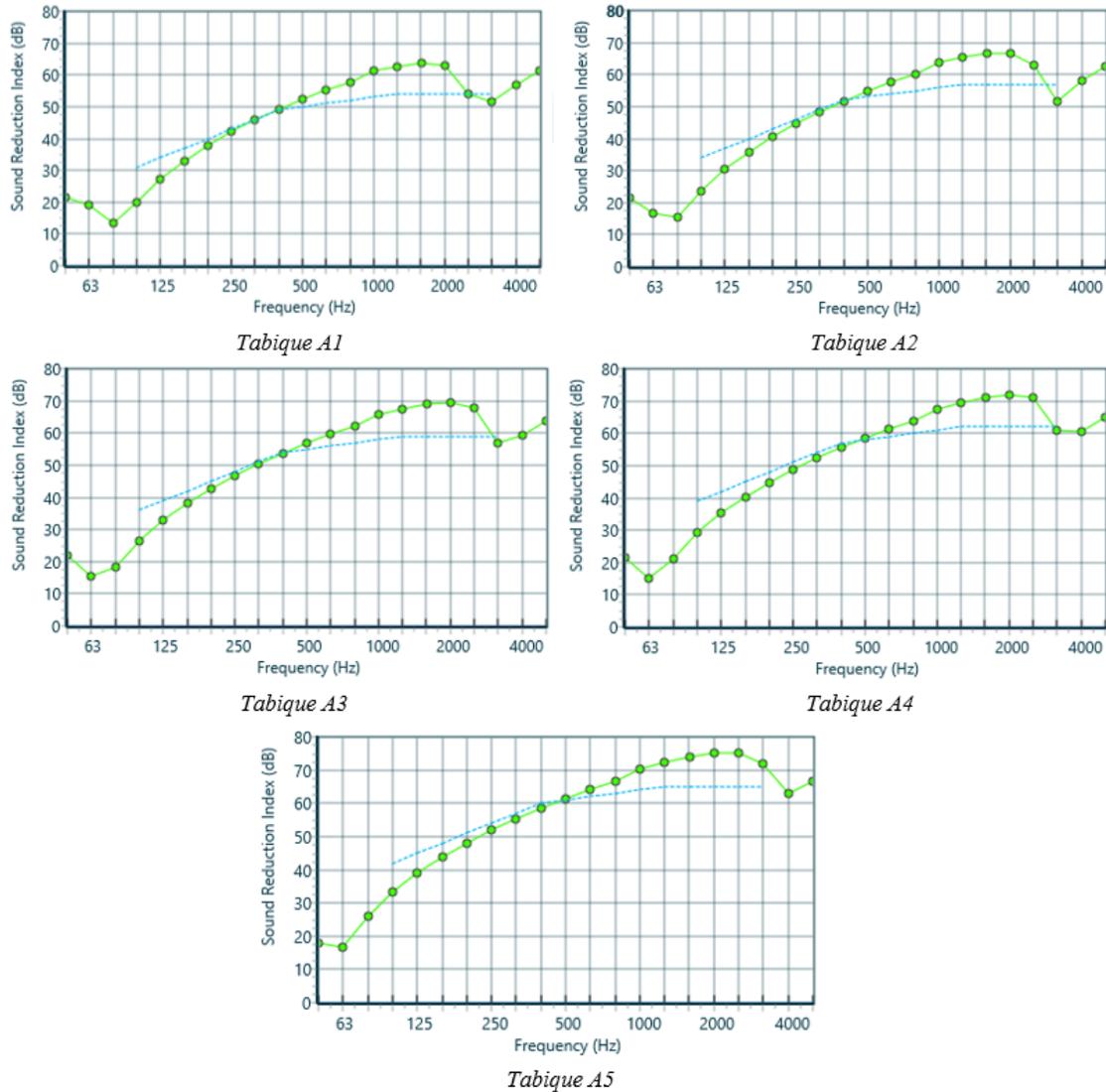


Figura 30: Índice de reducción acústica en el rango de frecuencias
Fuente: Elaboración propia

Cabe destacar que el Índice de reducción acústica del tabique previo a la incorporación de caucho reciclado era de 30 dB, es decir, al añadir una capa de caucho reciclado de 5 mm de espesor en cada panel de revestimiento se mejora el índice en 9 dB, desde esta base el aumento de la pérdida por transmisión es proporcional al aumento del espesor de la lámina de caucho reciclado.

4.1.2. Tabique B

Se clasifican los resultados de acuerdo con el espesor de la fibra textil reciclada incorporada a la solución. En la Figura 31 se muestra una captura del modelo creado en el software Insul.

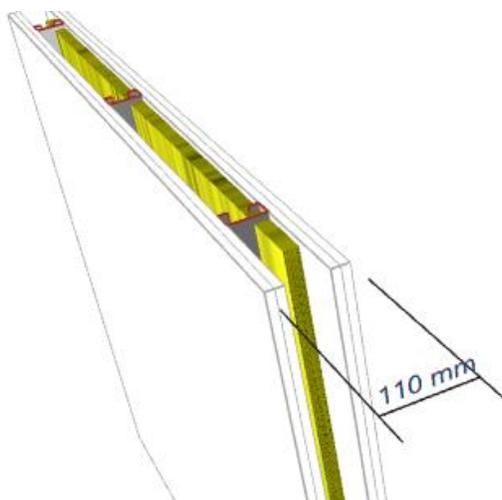


Figura 31: Captura modelo tabique B
Fuente: elaboración propia

El índice de reducción acústica según el espesor de la fibra incorporada se muestra en la Tabla 15.

Solución	Espesor fibra reciclada	Rw
B1	30	40
B2	40	40
B3	50	40
B4	60	41

Tabla 15: I. de reducción acústica tabique B
Fuente: elaboración propia

Considerando que la aislación acústica de la solución antes de incorporar la fibra (es decir, estructura de acero + yeso cartón), corresponde a un R_w de 35 dB, es posible determinar que la adición de fibra reciclada incrementa la pérdida por transmisión hasta en 6 dB. Sin embargo, la fibra reciclada de neumáticos por sí sola no aporta una mejora suficiente en el aislamiento acústico de esta solución constructiva, puesto que la norma chilena establece un R_w mínimo de 45 dB.

Se observa además que la variación en el espesor de la capa de fibra no es relevante en el comportamiento acústico del sistema, produciéndose una diferencia de tan solo 1 dB entre el espesor mínimo y máximo probado, por lo que se considera que este parámetro no será variable en la siguiente solución constructiva propuesta.

El comportamiento de aislación acústica en el rango de frecuencias estudiado se grafica en la Figura 32.

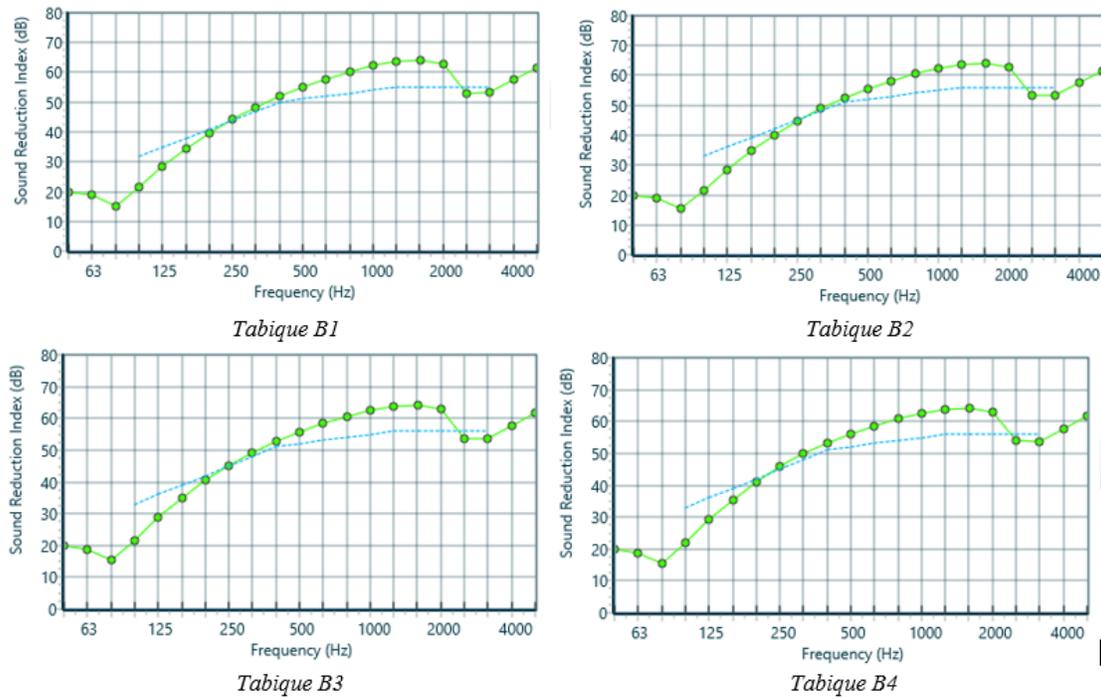


Figura 32: Índice de reducción acústica en el rango de frecuencias
Fuente: elaboración propia

4.1.3. Tabique C

Se clasifican los resultados de acuerdo con el espesor del caucho reciclado incorporado a la solución como se aprecia en la Tabla 16.

Solución	Espesor fibra reciclada (mm)	Espesor caucho reciclado (mm)	Rw (dB)
C1	20	10	42
C2	20	15	45
C3	20	20	48
C4	20	30	52

Tabla 16: Índice de reducción acústica Tabique C
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 33 se muestra una captura del modelo creado en el software Insul. Además, es posible visualizar la curva de comportamiento de la pérdida por transmisión en la Figura 34.

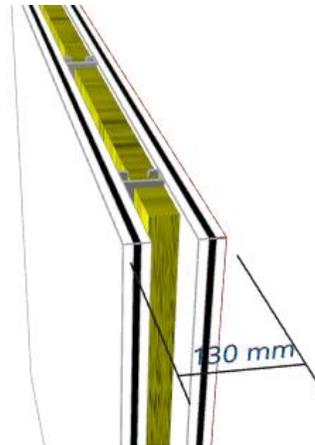


Figura 33: Captura de tabique C modelado en Insul
Figura: elaboración propia

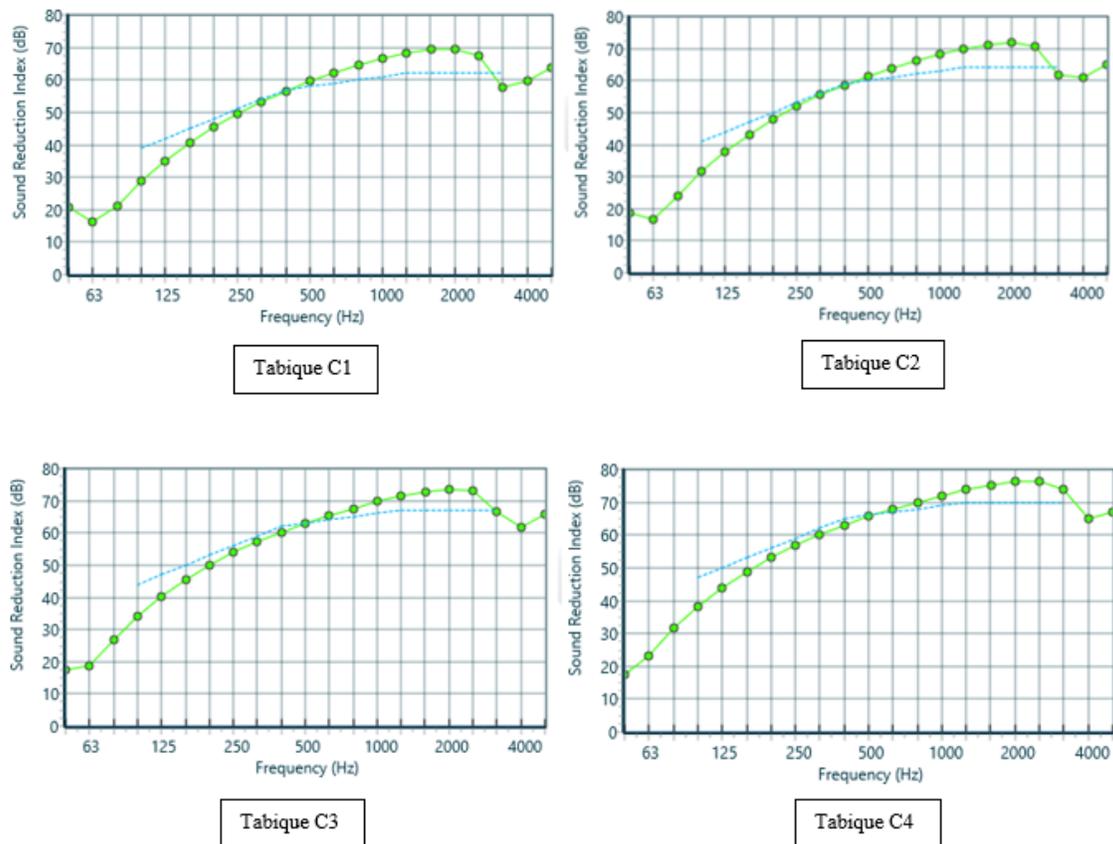


Figura 34: Curva de la pérdida por transmisión tabique C
Fuente: Elaboración propia

Se obtiene un resultado positivo en términos de aislación acústica al utilizar fibra reciclada de neumáticos y lámina de caucho en la solución constructiva. Sin embargo, si se compara la solución A4 que presenta el mismo espesor de tabique que la solución C3, ésta presenta un índice de reducción de 47 dB, en comparación a la solución C3 en donde la adición de fibra solo aporta en 1 dB a la reducción acústica del tabique, por lo que no se justifica el uso combinado de estos materiales.

4.2. Análisis comparativo

En base a los resultados para aislación acústica se selecciona el tabique A4 como el tabique propuesto para el análisis comparativo debido a que presenta una mejor relación aislación – espesor. A continuación, se detallan los resultados de la comparación entre el tabique Gyplac del listado oficial de soluciones constructivas para aislamiento acústico del MINVU y el tabique propuesto en la presente memoria.

4.2.1. Aislación acústica

En términos de aislación acústica, ambos tabiques presentan un coeficiente de aislación acústica ponderado de 47 dB, sin embargo, existen diferencias sustanciales en el rango de frecuencias estudiados, como se puede ver en la Figura 35. Entre las frecuencias de 1000 y 3000 Hz el tabique propuesto presenta un mejor comportamiento acústico que la solución propuesta en el listado oficial.

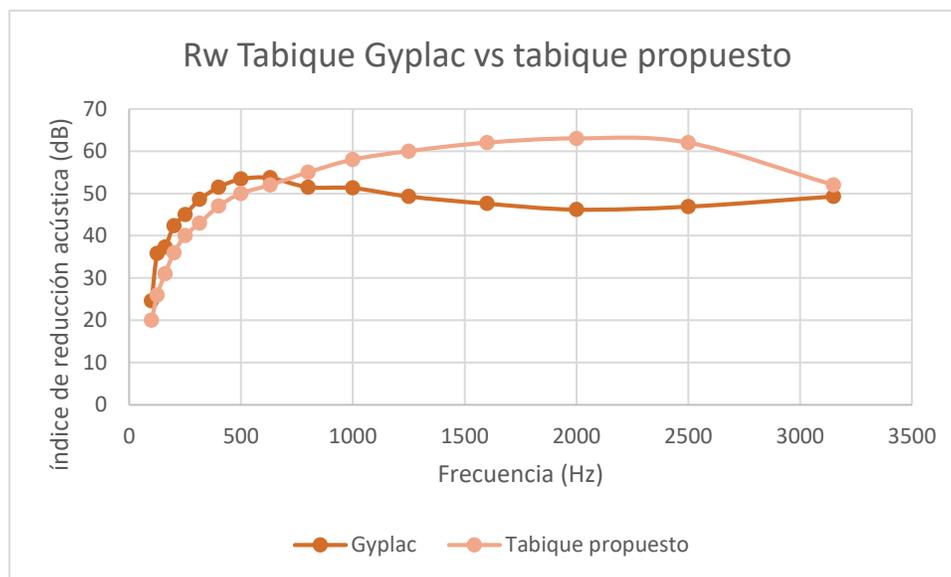


Figura 35: Comparación índice de reducción acústica.
Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Huella de carbono

Se han calculado las emisiones de CO₂ implicadas en las materias primas para la fabricación de ambas soluciones constructivas, en donde se obtuvo para el tabique Gyplac, los resultados contenidos en la Tabla 17.

Tabique Gyplac	
Material	Emisiones (kgCO ₂) por unidad de tabique producida
Perfiles de acero galvanizado	34,9
Lana de vidrio	7,6
Yeso- cartón	86
TOTAL	128,5

*Tabla 17: Huella de carbono tabique Gyplac
Fuente: Elaboración propia*

Del mismo modo, para el tabique propuesto se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 18.

Tabique propuesto	
Material	Emisiones (kgCO ₂) por unidad de tabique producida
Perfiles de acero galvanizado	34,9
Lámina de caucho reciclado	176,12
Yeso- cartón	86
TOTAL	340,71

*Tabla 18: Huella de carbono tabique propuesto
Fuente: Elaboración propia*

Sin embargo, en el caso del tabique propuesto, específicamente para la lámina de caucho reciclado, se ha considerado a los neumáticos fuera de uso como materia prima, sin tomar en cuenta que corresponde a un producto que está siendo reciclado cuando ya ha concluido su vida útil. Además, no se consideran técnicas de ahorro de energía ni innovaciones en el proceso de reciclaje, como lo podría ser la utilización de energías renovables en el funcionamiento de las plantas de reciclaje, o cualquier otro plan de optimización que utilicen las empresas para reducir su huella de carbono.

En ese sentido, cabe destacar que el reciclaje en sí supone un aporte significativo en la reducción de la huella de carbono de un producto, considerando los métodos de eliminación de residuos sólidos tradicionales en donde se someten a combustión, generando la emanación de gases altamente nocivos.

4.2.3. Costos

En la Tabla 19 se presentan los resultados del análisis de costos para el tabique Gyplac, en donde se han considerado los componentes principales.

Tabique Gyplac					
Material		Un.	Cant.	Precio unitario	Total
Perfiles de acero galvanizado (Metalcon Cintac)	Montantes	un	7	\$ 2.490	\$ 17.430
	Canales	un	2	\$ 1.590	\$ 3.180
Lana de vidrio		m2	6,9	\$ 2.534	\$ 17.485
Yeso-cartón		m2	27,6	\$ 2.453	\$ 67.703
Total					\$ 105.797

Tabla 19: Costos tabique Gyplac

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 20 se presentan los resultados del análisis de costos para el tabique propuesto, considerando los principales componentes de éste.

Tabique propuesto					
Material		Un.	Cant.	Precio unitario	Total
Perfiles de acero galvanizado (Metalcon Cintac)	Montantes	un	7	\$ 2.490	\$ 17.430
	Canales	un	2	\$ 1.590	\$ 3.180
Lámina de caucho reciclado (Polambiente)		m2	13,8	\$ 10.692	\$ 147.550
Yeso-cartón		m2	27,6	\$ 2.453	\$ 67.703
Total					\$ 235.862

Tabla 20: Costos tabique propuesto

Fuente: Elaboración propia

Se observa que el costo del tabique propuesto es considerablemente elevado con respecto al tabique de referencia, esto por el alto costo de producción de los derivados del reciclaje de caucho. Se ha tomado como referencia el precio de venta del metro cuadrado de lámina de caucho Silent Acustic de Polambiente S.A.

Finalmente, el resultado del análisis comparativo se encuentra resumido en la Tabla 21.

	Tabique Listado oficial	Tabique propuesto
Estructura	Acero galvanizado	Acero galvanizado
Elemento aislante principal	Lana de vidrio	Caucho reciclado
Espesor total (cm)	12	15
Aislación acústica (dB)	47	47
Costo	\$ 105.797	\$ 235.862
Huella de carbono (kgCO ₂)	128,5	340,71

Tabla 21: Tabla resumen de resultados

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

En el marco de este trabajo se ha determinado con éxito el índice de reducción acústica de un tabique divisorio para interiores, en adición de dos productos del reciclaje de neumáticos; fibra y caucho reciclados. En base a varias pruebas en software computacional, se determinó que la mejor solución constructiva estudiada corresponde al tabique en estructura de acero galvanizado con adición de láminas de caucho reciclado entre paneles de yeso cartón, posicionadas en ambas caras del revestimiento. El mejor resultado para este modelo se obtiene al utilizar láminas de 30 mm de espesor, quedando con un índice de reducción acústica de 51 dB.

Posteriormente en base al análisis comparativo con el tabique Gyplac, perteneciente al listado oficial de soluciones constructivas para aislación acústica del Ministerio de vivienda y Urbanismo, se determinó que el tabique propuesto presenta un mejor comportamiento acústico en el rango de frecuencias de 1000 a 3000 Hertz. Sin embargo, se encontró que la huella de carbono es más alta en la producción del tabique propuesto, efecto determinado principalmente por el proceso de reciclaje de neumáticos, en donde se hace necesario realizar una compensación de estas cifras con el efecto negativo que tendría no reciclar neumáticos.

En términos económicos, la producción de una unidad de tabique propuesto excede en aproximadamente \$130.000 el presupuesto del tabique convencional Gyplac, lo que se concluye que está determinado por el escaso mercado de reciclaje existente en el país.

Finalmente se puede establecer que, si bien utilizar láminas de caucho reciclado en tabiques de partición interior, cumple con los estándares de reducción acústica normados en Chile, y está al nivel de las soluciones constructivas tradicionales, falta aún trabajar principalmente en la reducción de los costos de la producción de láminas de caucho reciclado, para poder convertirse en una solución constructiva competitiva en el mercado.

5.2. Futuras líneas de investigación

A partir de esta memoria quedan abiertas algunas líneas de investigación que complementarían el trabajo realizado y que no han podido ser abordadas o se han abordado parcialmente:

- *Estudio del comportamiento acústico mediante ensayos prácticos:* Se hace necesario respaldar los resultados obtenidos teóricamente con ensayos de medición de aislamiento acústico al ruido aéreo.

- *Métodos de reducción de costos:* Uno de los aspectos investigados ha sido el alto costo de venta de láminas de caucho reciclado, por lo que un área interesante es la determinación de los factores influyentes en este valor y las posibles acciones de reducción de los costos de producción.

- *Reducción de huella de carbono:* La huella de carbono de esta investigación está determinada netamente por el proceso de fabricación de láminas de caucho reciclado, sin embargo, ha quedado fuera del alcance poder cuantificar la compensación de emisiones que se produce al reciclar neumáticos en contraste a las emisiones producidas del mal tratamiento del residuo, de esta forma obtener la huella de carbono real en la fabricación de láminas de caucho reciclado.

BIBLIOGRAFÍA

- ACERETECH. (s. f.). *ACT Conical Twin Screw Extruding Recycling Plant for PVC/U-PVC/C-PVC/O-PVC*. Recuperado 16 de diciembre de 2020, de <https://www.aceretech.com/ACT-Conical-Twin-Screw-Extruder-Recycling-Machine.html>
- Beliczky, L., & Fajen, J. (s. f.). *80. INDUSTRIA DEL CAUCHO INDUSTRIA DEL CAUCHO*.
- Bolin, C. A., & Smith, S. T. (2011). Life cycle assessment of borate-treated lumber with comparison to galvanized steel framing. *Journal of Cleaner Production*, 19(6–7), 630–639. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.12.005>
- Bomatic. (s. f.). *Serie Extra Fuerte Bomatic rotor de cuchillas*.
- Cano, E., Lidia, S., & García, C. (s. f.). *Valorización material y energética de neumáticos fuera de uso*. Recuperado 22 de julio de 2020, de www.madrimasd.org
- Canto, M. Z. (2016). *Investigación con fibra reciclada de neumático (F.R.N.) para aplicaciones acústicas*. 214.
- Castro, G. (2008). *Materiales y compuestos para la industria del neumático*.
- Cintac. (2020). *Manual de construcción*.
- Co.Ltd., Q. S. K. M. (2018). *Laminadora de caucho*. <http://rubbermachine.es/1-5-rubber-sheeting-mill/>
- COMSA. (2015). *Memoria I + D + i 2015 Revalorización de residuos secundarios de NFU*. 14845.
- De Chile M I N V U, G. (s. f.). *MANUAL DE APLICACION REGLAMENTACION ACUSTICA ORDENANZA GENERAL DE URBANISMO Y CONSTRUCCIONES*.
- Ecorel. (2020). *Transporte Neumáticos Fuera de Uso (NFU) – Ecorel*. <https://www.ecorel.cl/service/transporte-neumaticos-fuera-de-uso-nfu/>
- Freire, A., Marrero, M., & Muñoz, J. (2016). Bases De Costes De Construcción . Footprint Into Construction Cost Databases : a Case Study. *Revista Hábitat Sustentable*, 6, 6–17.
- Hernandez, M. (2012). *Ingeniería Acústica - Acústica Fácil - Ingeniería Acústica para profesionales, un enfoque diferente*. Absorbentes acústicos: tipo 1/5. <http://www.ingenieriaacusticafacil.com/ingenieria-acustica-absorbentes-acusticos-tipos-1-de5/>

- Horace, M.-Y., Kassahun, S., Daniel, Z., & Gajanan, S. (2003). Physical and chemical properties of recycled tire shreds for use in construction. *Journal of Environmental Engineering*, 129(10), 921–929. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2003\)129](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2003)129)
- Insul. (2020). *Tech Info*. <http://www.insul.co.nz/tech-info/>
- Knauf. (2020). *Placa yeso cartón Knauf ST*. https://www.knauf.cl/producto/e.id/67/PLACA_YESO_CARTÓN_KNAUF_ST
- Leader), E. (project, Research, F. I. for S. and I., & Öko-Institut. (2012). *Methodology for the free allocation of emission allowances in the EU ETS post 2012 Sector report for the mineral wool industry*. November 2009.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2011.12.001>
- Mapei. (s. f.). (*No Title*). Recuperado 12 de octubre de 2020, de https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider48/products-documents/282_es.pdf?sfvrsn=96103c57_0
- Meza, A., Sierra, R., Rodríguez, J., & Romo, F. (2019). *Diseño y Dispositivo de tiras de Llantas, una Opción de Reciclado*. <https://www.redalyc.org/jatsRepo/944/94461547004/html/index.html>
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2014). *Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Aislamiento Acústico*. 1434, 1–197. http://www.minvu.cl/incjs/download.aspx?gls_cod_nodo=20070606164405&hdd_nom_archivo=Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Aislamiento Acustico E12_2014.pdf
- N.D.A. (s. f.). *AKUSTIC - C1*. Recuperado 15 de noviembre de 2020, de <http://www.edifsl.es/Akustik C1.pdf>
- POLAMBIENTE I Aislacion Acustica y Termica, aislacion*. (s. f.). Recuperado 3 de noviembre de 2020, de <https://www.polambiente.com/aislacion-acustica-y-termica>
- Prochile. (2011). *Estudio de la huella de carbono del producto/servicio*. www.internationallawoffice.com/newsletters/detail.aspx?g=4a8e0b73-fd44-4710-843f-88645e55c83b
- Ramos, G., Alguacil, F. J., & López, F. A. (2011). The recycling of end-of-life tyres. *Technological*

- review(). *Revista de Metalurgia (Madrid)*, 47(3), 273–284.
<https://doi.org/10.3989/revmetalm.1052>
- Rayston Chemycal SL. (2018). *Aglomerante de poliuretano alifático para granza de caucho*.
www.kryptonchemical.com
- Rodríguez Montejano, R. M. (2003). *Propiedades acústica del caucho granular*.
<http://ezproxy.unal.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edstdx&AN=edstdx.10803.452013&lang=es&site=eds-live>
- Sánchez, I., Del Río, M., & Castaño, J. (s. f.). “*DIAGNÓSTICO DE SUSTENTABILIDAD DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)*”.
- Sánchez Juan, R. (2012). *Segunda vida de los neumáticos usados*.
- Shao, J., & Zarling, J. P. (1995). *Thermal conductivity of recycled tire rubber to be used as insulating fill beneath roadways*.
http://www.dot.state.ak.us/stwddes/research/assets/pdf/ine_trc_94_12.pdf
- SoundFlow. (s. f.). *Características - AFMG SoundFlow*. Recuperado 10 de agosto de 2020, de
<https://soundflow.afmg.eu/index.php/sf-features-en.html>
- SoundService Ltda. (s. f.). *Insonorización para paredes M20AD*. Recuperado 10 de octubre de 2020, de
http://www.soundservice.co.uk/tec_spec_M20.html
- The Japan Automobile Tyre Manufacturers Association. (2012). *Tyre LCCO 2 Calculation Guidelines*. April.
- Tires SpA. (2013). *Descripcion tratamiento neumaticos*. <http://www.tiresspa.com/es/descripcion-tratamiento-neumaticos.html>
- Venero, J., Alba, J., Ramis, J., & ChovA, S. A. (2003). *Evaluación del aislamiento acústico a ruido aéreo de particiones dobles mediante software de predicción*.
- Volcan S.A. (2000). *VOLCANITA ST*.

ANEXOS

Anexo 1: Tablas de resultados índice de reducción acústica por frecuencias

Tabique A1

Freq (Hz)	Rw (dB)	desviación
50	21	-10
63	19	-12
80	13	-18
100	20	-11
125	27	-7
160	33	-4
200	38	-2
250	42	-1
315	46	0
400	49	0
500	52	0
630	55	0
800	58	0
1000	61	0
1250	63	0
1600	64	0
2000	63	0
2500	54	0
3150	52	-2
4000	57	0
5000	61	0
Rw	50	
Rw + Ctr	39 dB	

Tabique A2

Freq (Hz)	Rw (dB)	desviación
50	22	-12
63	17	-17
80	15	-19
100	23	-11
125	30	-7
160	36	-4
200	40	-3
250	45	-1
315	48	-1
400	52	0
500	55	0
630	58	0
800	60	0
1000	64	0
1250	65	0
1600	67	0
2000	67	0
2500	63	0
3150	52	-5
4000	58	0
5000	63	0
Rw	53	
Rw + Ctr	43 dB	

Tabique A3

Freq (Hz)	Rw (dB)	desviación
50	22	-14
63	15	-21
80	18	-18
100	27	-9
125	33	-6
160	38	-4
200	43	-2
250	47	-1
315	50	-1
400	54	0
500	57	0
630	60	0
800	62	0
1000	66	0
1250	67	0
1600	69	0
2000	70	0
2500	68	0
3150	57	-2
4000	59	0
5000	64	0
Rw	55	
Rw + Ctr	45 dB	

Tabique A4

Freq (Hz)	Rw (dB)	desviación
50	21	-18
63	15	-24
80	21	-18
100	29	-10
125	35	-7
160	40	-5
200	45	-3
250	49	-2
315	52	-2
400	56	-1
500	59	0
630	61	0
800	64	0
1000	67	0
1250	69	0
1600	71	0
2000	72	0
2500	71	0
3150	61	-1
4000	60	-2
5000	65	0
Rw	58	
Rw + Ctr	47 dB	

Tabique A5

Freq (Hz)	Rw (dB)	desviación
50	18	-24
63	17	-25
80	26	-16
100	33	-9
125	39	-6
160	44	-4
200	48	-3
250	52	-2
315	55	-2
400	59	-1
500	62	0
630	64	0
800	67	0
1000	70	0
1250	72	0
1600	74	0
2000	75	0
2500	75	0
3150	72	0
4000	63	-2
5000	67	0
Rw	61	
Rw + Ctr	51 dB	

Anexo 2: Tablas de resultados índice de reducción acústica por frecuencias

Tabique B1

Freq (Hz)	Rw (dB)	desviación
50	20	-12
63	19	-13
80	15	-17
100	21	-11
125	28	-7
160	34	-4
200	40	-1
250	44	0
315	48	0
400	52	0
500	55	0
630	58	0
800	60	0
1000	62	0
1250	64	0
1600	64	0
2000	63	0
2500	53	-2
3150	53	-2
4000	58	0
5000	62	0
Rw	51	
Rw + Ctr	40 dB	

Tabique B2

Freq (Hz)	Rw (dB)	desviación
50	20	-13
63	19	-14
80	15	-18
100	22	-11
125	29	-7
160	35	-4
200	40	-2
250	45	0
315	49	0
400	52	0
500	55	0
630	58	0
800	60	0
1000	62	0
1250	64	0
1600	64	0
2000	63	0
2500	53	-3
3150	54	-2
4000	58	0
5000	62	0
Rw	52	
Rw + Ctr	40 dB	

Tabique B3

Freq (Hz)	Rw (dB)	desviación
50	20	-13
63	19	-14
80	15	-18
100	22	-11
125	29	-7
160	35	-4
200	41	-1
250	45	0
315	49	0
400	53	0
500	56	0
630	58	0
800	61	0
1000	63	0
1250	64	0
1600	64	0
2000	63	0
2500	54	-2
3150	54	-2
4000	58	0
5000	62	0
Rw	52	
Rw + Ctr	40 dB	

Tabique B4

Freq (Hz)	Rw (dB)	desviación
50	20	-13
63	19	-14
80	15	-18
100	22	-11
125	29	-7
160	35	-4
200	41	-1
250	46	0
315	50	0
400	53	0
500	56	0
630	59	0
800	61	0
1000	63	0
1250	64	0
1600	64	0
2000	63	0
2500	54	-2
3150	54	-2
4000	58	0
5000	62	0
Rw	52	
Rw + Ctr	41 dB	

Anexo N°2: Tablas de resultados índice de reducción acústica por frecuencias

Tabique C1

Freq (Hz)	Rw (dB)	desviación
50	21	-18
63	16	-23
80	21	-18
100	29	-10
125	35	-7
160	41	-4
200	45	-3
250	50	-1
315	53	-1
400	57	0
500	60	0
630	62	0
800	64	0
1000	67	0
1250	68	0
1600	69	0
2000	70	0
2500	67	0
3150	58	-4
4000	60	-2
5000	64	0
Rw	58	
Rw + Ctr	42 dB	

Tabique C2

Freq (Hz)	Rw (dB)	desviación
50	19	-22
63	17	-24
80	24	-17
100	32	-9
125	38	-6
160	43	-4
200	48	-2
250	52	-1
315	55	-1
400	59	0
500	61	0
630	64	0
800	66	0
1000	68	0
1250	70	0
1600	71	0
2000	72	0
2500	71	0
3150	62	-2
4000	61	-3
5000	65	0
Rw	60	
Rw + Ctr	45 dB	

Tabique C3

Freq (Hz)	Rw (dB)	desviación
50	17	-27
63	19	-25
80	27	-17
100	34	-10
125	40	-7
160	45	-5
200	50	-3
250	54	-2
315	57	-2
400	60	-2
500	63	0
630	65	0
800	68	0
1000	70	0
1250	71	0
1600	73	0
2000	73	0
2500	73	0
3150	67	0
4000	62	-5
5000	66	-1
Rw	63	
Rw + Ctr	48 dB	

Tabique C4

Freq (Hz)	Rw (dB)	desviación
50	18	-29
63	23	-24
80	31	-16
100	38	-9
125	44	-6
160	49	-4
200	53	-3
250	57	-2
315	60	-2
400	63	-2
500	66	0
630	68	0
800	70	0
1000	72	0
1250	74	0
1600	75	0
2000	76	0
2500	76	0
3150	74	0
4000	65	-5
5000	67	-3
Rw	66	
Rw + Ctr	51 dB	