



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería  
Escuela de Construcción Civil

“RECICLAJE DE NEUMÁTICOS Y SU APLICACIÓN  
EN LA CONSTRUCCIÓN”

Tesis para optar al Título de:  
Ingeniero Constructor.

Profesor Patrocinante:  
Sr. Adolfo Montiel Mansilla  
Ingeniero Constructor.

PAULINA ALEJANDRA DELARZE DÍAZ  
VALDIVIA – CHILE  
2008

*Aquel que quiera construir torres altas,  
deberá permanecer largo tiempo  
en los cimientos...*



## AGRADECIMIENTOS

### **A Dios:**

Gracias por darme la sabiduría para descubrir lo correcto y la voluntad para elegirlo. Dame Señor, la fuerza para hacer que perdure.

### **A mi Padre:**

Gracias por enseñarme a amar la verdad, la justicia, la honestidad, la humildad, la rectitud, la discreción, el altruísmo...

Aún con lágrimas que brotan sólo con recordarte, agradezco a la vida por haberme regalado la oportunidad de compartir mi existencia con padre como tú. El dolor de tu temprana partida es terrible, pero cuando el tiempo de las lágrimas pase, nos dejará una rara sensación de cansancio y alivio, una calma exhausta que nos permitirá, a pesar de todo, CONTINUAR....

### **A mi Madre:**

*“Hay una mujer, que tiene algo de Dios...”* no existen palabras más ciertas para expresar la grandeza de una madre como tu...Gracias por ser tú mi Mamá.

Tú me enseñaste a respirar... a crecer con tus caricias y tus frases de amor. Tus brazos siempre se abrían cuando necesitaba un abrazo, tu corazón siempre comprendió cuando necesitaba una amiga. Tus ojos tiernos se endurecían cuando me hacía falta una lección. Tu fuerza y tu amor me guiaron y me dieron alas para volar.

Dios no podía estar en todas partes a la vez. Por eso creó a las madres.

### **A mi familia:**

Ustedes me han regalado la fuerza indispensable para seguir avanzando, a pesar de las dificultades. En ustedes siempre he encontrado una mano amiga, una palabra de aliento, un apoyo incondicional...ha quedado en mi alma el imborrable testimonio de que nunca he estado ni estaré sola.

### **A mis amigos:**

Gracias a ustedes por estar conmigo siempre, en los buenos y sobretodo, en los malos momentos. Gracias por permitirme depositar en ustedes mi confianza, por alegrarse de mis logros y por ayudarme a llevar la pesada carga de mis tristezas.

Recuerden siempre: *“La lucha que se pierde, es aquella que se abandona”*.

### **A mis profesores:**

Gracias por dedicarme su tiempo, por entregarme sus conocimientos y sus experiencias. Fortalecida con sus enseñanzas caminaré hacia el futuro construyendo, junto a Dios, una nueva historia.

### **A mi Universidad y quienes trabajan en ella:**

En mi corazón sólo hay sentimientos de gratitud y retribución hacia ustedes, porque aquí conocí a muchas personas de noble corazón que siempre estuvieron dispuestos a ayudarme, sin esperar retribución alguna. Pueden tener la satisfacción que entregaron lo mejor de sí.

## INDICE

<b>CONTENIDO</b>	<b>PÁGINA</b>
Resumen	
Summary	
Introducción	
Objetivos	
 <i>CAPITULO I : Descripción general del tema</i>	
I.1.- Generalidades .....	15
I.2.- Causas y consecuencias de la problemática ambiental.....	19
I.2.1) Diagnóstico situacional: problemática en Chile y el mundo.....	19
I.2.2) Consideraciones a una propuesta de política pública a la problemática ambiental.....	22
I.3.- Reciclaje de neumáticos.....	25
I.3.1) El neumático.....	25
I.3.2) Neumáticos, elaboración y producción.....	28
I.3.3) Reciclaje de neumáticos.....	31
I.3.4) Sistemas de tratamiento para los neumáticos en desuso.....	35
 <i>CAPITULO II : Aplicaciones en la construcción.</i>	
II.1.- Asfalto – caucho.....	40
II.1.1) Aplicaciones en Chile.....	41
II.1.2) Aplicaciones del “asfalto – caucho” en otras partes del mundo.....	56
II.2.- Energía a través del reciclaje de neumáticos.....	67
II.2.1) Métodos para obtener gas y energía eléctrica a partir de neumáticos reciclados.....	68
II.2.2) Uso de neumáticos reciclados en la producción de cemento.....	75
II.3.- Pavimentos de caucho reciclado.....	85
II.3.1) Pavimentos de caucho y sus aplicaciones.....	85
II.3.2) Alfombras de neumáticos reciclados.....	89
II.3.3) Otros pavimentos.....	91
II.4.- Recubrimiento de caucho reciclado para barreras metálicas de contención en carreteras.....	93
II.4.1) Problemática.....	95
II.4.2) Metodología.....	95

II.4.3) Ventajas y beneficios.....	97
II.5.- Membrana de caucho reciclado para diversas aplicaciones constructivas .....	97
II.5.1) Descripción .....	97
II.5.2) Aplicaciones.....	97
II.5.3) Propiedades.....	98
 <i>CAPITULO III :</i>	
<i>Conclusiones</i> .....	99
 Bibliografía.....	 101

## INDICE DE FIGURAS

<b>INDICE DE FOTOGRAFÍAS</b>	<b>PÁGINA</b>
<i>Foto N°1: Vertedero de neumáticos.....</i>	15
<i>Foto N°2: Acumulación de neumáticos en las carreteras.....</i>	16
<i>Foto N°3: Acopio no autorizado de neumáticos.....</i>	17
<i>Foto N° 4: Quema ilegal de neumáticos.....</i>	18
<i>Foto N°5: Vertedero de neumáticos.....</i>	18
<i>Foto N°6: Camión utilizado en la minería.....</i>	19
<i>Foto N° 7: Acopio ilegal de neumáticos en el Desierto Chileno.....</i>	19
<i>Fotos N° 8, 9 y 10: Acopios de neumáticos.....</i>	21
<i>Foto N° 11: Hornada de caucho.....</i>	28
<i>Foto N° 12: Fabricación banda de rodamiento.....</i>	29
<i>Foto N° 13: Formación del neumático.....</i>	29
<i>Foto N° 14: Vulcanización.....</i>	30
<i>Foto N° 15: Inspección electrónica.....</i>	30
<i>Foto N° 16: Inspección Visual.....</i>	30
<i>Foto N° 17: Almacenamiento.....</i>	30
<i>Foto N° 18: Acopio de neumáticos.....</i>	32
<i>Foto N°19: Cinta transportadora.....</i>	32
<i>Foto N° 20: Granos de caucho.....</i>	33
<i>Foto N° 21: Diferentes tamaños de granos.....</i>	33
<i>Foto N° 22: Empaque del producto.....</i>	34
<i>Foto N° 23, 24 y 25: Granulometría de los áridos.....</i>	51
<i>Fotos N° 26 y 27: Proceso de mezclado.....</i>	53
<i>Fotos 28 y 29: Proceso de colocación.....</i>	54

<i>Fotos N° 30 y 31: Proceso de compactación.....</i>	54
<i>Foto N°32: Pavimento de caucho reciclado en Guardería infantil.....</i>	85
<i>Foto N° 33: Pavimento de caucho reciclado.....</i>	85
<i>Foto N°34: Losetas de caucho reciclado.....</i>	86
<i>Foto N°35: Alfombra de neumáticos reciclados.....</i>	89
<i>Foto N° 36: Alfombra antideslizante de neumático reciclado.....</i>	91
<i>Foto N° 37: Adoquines de caucho reciclado.....</i>	91
<i>Foto Nª 38, 39, 40 y 41: Diferentes tipos de aplicaciones de adoquines de caucho.....</i>	92
<i>Foto N°42: Pavimento de caucho reciclado para piscinas.....</i>	93
<i>Foto N° 43: Protector de postes de barreras de contención.....</i>	93
<i>Fotos N° 44,45 y 46: Instalación de protectores de caucho reciclado en barreras de contención.....</i>	94
<i>Fotos N° 47 y 48: Dispositivo de ensayo.....</i>	96
<i>Foto N° 49: Impactador.....</i>	96
<i>Foto N°50: Membrana de caucho reciclado.....</i>	97

<i>Fig. 1: Diagrama de un neumático.....</i>	26
<i>Fig. 2: Esquema de una planta de reciclaje de neumáticos.....</i>	31
<i>Fig. 3: Esquema del proceso de trituración a temperatura ambiente.....</i>	36
<i>Fig. 4: Proceso de trituración criogénica.....</i>	37
<i>Fig.5: Diagrama del proceso de producción de materiales Asfálticos Modificados con Caucho.....</i>	42
<i>Fig.6: Proceso de mezclado por vía húmeda.....</i>	45
<i>Fig.7: Proceso de mezclado por vía seca.....</i>	46
<i>Fig.8: Tramo de prueba Región de Aisén.....</i>	49
<i>Fig.9: Esquema de corte de pavimento.....</i>	50
<i>Figs. 10 y 11 : Localización de los tramos testigo en el proyecto.....</i>	55
<i>Fig. 12: Influencia del tipo de fabricación en la densidad.....</i>	62
<i>Fig. 13: Esquema de la zonificación establecida.....</i>	63
<i>Fig. 14: Esquema del proceso de Termólisis.....</i>	70
<i>Fig. 15: Esquema del proceso de pirolisis.....</i>	72
<i>Fig. 16: Esquema del proceso de incineración.....</i>	73
<i>Fig. 17: Proceso de incineración con recuperación de energía.....</i>	74
<i>Fig.Nº18: Aislante entre madera, de caucho reciclado.....</i>	98
<i>Fig. Nº19 y 20: Aislante entre madera y hormigón, de caucho reciclado.....</i>	98

<i>Tabla I.1: Composición y características de los diferentes tipos de neumáticos.....</i>	26
<i>Tabla I.2: Análisis químico del neumático.....</i>	27
<i>Tabla I.3: Composición aproximada de un neumático de automóvil en peso.....</i>	28
<i>Tabla II.1: Métodos de producción de MdC.....</i>	44
<i>Tabla II.2: Diferencias entre los procesos de mezclado seco y húmedo.....</i>	46
<i>Tabla II.3: Especificaciones para la mezcla asfáltica con AMC.....</i>	50
<i>Tabla II.4: Especificaciones granulométricas.....</i>	51
<i>Tabla II.5: Diseños de prueba de AMC (MOPTT, 2001).....</i>	52
<i>Tabla II.6: Criterios considerados para la dosificación óptima de AMC.....</i>	52
<i>Tabla II.7: Valores obtenidos y aceptados.....</i>	53
<i>Tabla II.8. Características geométricas de los Tramos Testigo.....</i>	56
<i>Tabla II.9: Datos obtenidos en el ensayo de Inmersión-Compresión.....</i>	64
<i>Tabla II. 10 y II.11: Estudio de comportamiento con respecto al ruido.....</i>	65
<i>Tabla II.12 - Formulación final.....</i>	87
<i>Tabla II.13 - Condiciones de trabajo óptimas.....</i>	87
<i>Tabla II.14.- Propiedades de las baldosas de goma.....</i>	88

*Tabla II.15.- Propiedades de las baldosas de*

*las mantas de goma.....*

## **RESUMEN**

El creciente parque automotriz ha traído consigo un problema ambiental que se acrecienta en forma descontrolada: los neumáticos en desuso y la forma en que hoy se desechan, lo que constituye innumerables problemas para el medio ambiente.

Sin embargo, debido a diversos estudios y experiencias, se ha logrado determinar que es posible su reciclaje y su uso en un sinnúmero de aplicaciones, con resultados muy favorables.

Entre las aplicaciones propuestas están: su uso en asfaltos, como fuente de energía, pavimentos, recubrimiento en barreras de contención de carreteras y como membrana aislante, entre otros usos.

## **SUMMARY**

The increasing number of vehicles on the roads brought about an environmental problem that is growing out of control: old tires and the way they are disposed of.

This causes countless problems for the environment.

However, through different research and trials, it has been determined that they can be recycled and used for many different purposes with very favorable results.

Amongst which are: their use in asphalt, as an energy source, paving, covering of highway crash barriers, insulating membrane and others.

## INTRODUCCION

La fuerte demanda de neumáticos a todas las escalas, derivada de la cada vez mayor presencia del vehículo en la sociedad, ha dado lugar a la aparición de un grave problema como sumatoria de determinados desequilibrios medioambientales, contaminación atmosférica, ruidos, invasión de espacios tradicionalmente ocupados por los ciudadanos y como no la producción de residuos.

El principal problema que existe para el reciclaje de los neumáticos usados es la dispersión geográfica en la generación de estos residuos, que presenta serias dificultades al proceso de recogida, sobre todo económico, común a la aplicación de cualquier tecnología.

Además, se presentan una serie de problemas de almacenamiento, al ser un producto altamente inflamable y capaz de producir nubes tóxicas en caso de incendio, que se unen a las financieras, por el gran volumen que ocupan. Si nos centramos exclusivamente en el problema técnico de la eliminación de los neumáticos usados, éste pasa por la aplicación de las tecnologías de procesamiento para la separación de los componentes que actualmente se utilizan: mecánica y criogénica.

Sin embargo, existen empresas que han decidido tomar parte de esta problemática, y con el uso de la tecnología y la innovación, han podido comprobar que es posible el reciclaje de estos residuos y que además, es factible su utilización en múltiples prestaciones, interesantes aplicaciones, un sinnúmero de usos, con resultados muy favorables en todos los casos.

## OBJETIVOS

### *Objetivo General:*

- Investigar sobre el daño que se produce en el planeta debido a la acumulación irracional de residuos peligrosos, con el propósito de conocer de que manera se pueden reciclar y permitir la aplicación de éstos productos, en el área de la construcción.

### *Objetivos Específicos:*

- Establecer la problemática ambiental que se genera a partir de la acumulación de neumáticos en los vertederos del mundo para definir los alcances del daño medioambiental.
- Investigar sobre el proceso de reciclaje de neumáticos con el propósito de conocer los diferentes pasos y procedimientos a seguir para generar esta materia prima.
- Determinar las múltiples aplicaciones que tiene este material en la construcción con el objetivo de establecer cuales son las innumerables ventajas y/o desventajas que posee este material al ser aplicado en conjunto con otros materiales.

# CAPITULO I

## DESCRIPCIÓN GENERAL DEL TEMA

### I.1.- Generalidades

Nuestro país ha mostrado un notable desarrollo económico e industrial en los últimos años, lo que trae consigo un aumento considerable de los residuos industriales que afecta, no sólo al medio ambiente, sino también a la calidad de vida de población. Por lo tanto han surgido nuevos problemas que se deben a la debilidad que posee el marco regulatorio y a la falta de coordinación institucional, esto conlleva a la generación de dificultades para que se puedan identificar los residuos industriales y no permite una efectiva acción fiscalizadora por parte de la autoridad. Además se deben agregar todos los problemas que existen en cuanto a la insuficiente dotación de instalaciones que sean adecuadas para el tratamiento y disposición final de los residuos.

Todos estos inconvenientes traen como consecuencia que gran parte de los residuos industriales, que debieran identificarse y disponerse como residuos peligrosos, son emitidos a la atmósfera, descargados al alcantarillado, vertidos a los cursos de agua superficiales, o simplemente son derramados ilegalmente sin un tratamiento previo.

Sin embargo, se ha demostrado que en la práctica se pueden aplicar conceptos relacionados con la prevención en cuanto a la contaminación y la producción limpia. Por lo tanto, es posible revertir esta situación si se implementan modificaciones simples a los procesos productivos, que se pueden llevar a cabo con pocos recursos, lo que permitiría generar incrementos significativos en la productividad y una reducción drástica en la generación de residuos o emisiones; todo esto conlleva a mejorar la competitividad de las empresas y a obtener mayores beneficios económicos.



*Foto N°1: Vertedero de neumáticos*

Uno de los residuos que más problemas han traído al medio ambiente, a nivel mundial, son los **neumáticos en desuso** o también llamados **neumáticos fuera de uso (NFU o NFUs)**. El mayor problema se centra en la dificultad para su destrucción una vez que han cumplido su vida útil, ya que las montañas de neumáticos forman arrecifes donde la proliferación de roedores, insectos y otros animales dañinos constituye un problema añadido. La reproducción de ciertos mosquitos, que transmiten por picadura fiebres y encefalitis, llega a ser 4.000 veces mayor en el agua estancada de un neumático que en la naturaleza.



*Foto N°2: Acumulación de neumáticos en las carreteras*

Además estos residuos son acumulados en vertederos con el potencial peligro de incendios, además de constituir un factor de contaminación visual. Todo ello se agrava ante la falta de una legislación específica ambiental, que contribuya a un tratamiento de reciclaje.

Toda esta problemática nace principalmente por:

- El constante aumento del parque vehicular
- Mercado abierto con disponibilidad de neumáticos de diversos orígenes, calidades y precios.
- Los neumáticos inservibles se acumulan en grandes cantidades.

En nuestro país, este es uno de los graves problemas que hoy aqueja, principalmente, al sector de la gran minería: qué destino otorgar a los neumáticos provenientes de los grandes camiones utilizados en el transporte de minerales desde la mina a la planta de tratamiento de éstos.

Actualmente, estos neumáticos usados terminan en acopios a la intemperie, enterrados bajo desechos mineros, en botaderos de material estéril y recauchaje, ocupando gran espacio y generando desde luego, una enorme pérdida de energía sin precedentes.

Conscientes de esta problemática y siempre en la búsqueda de nuevos desafíos de inversión, actualmente hay empresas que han tomado la iniciativa al realizar proyectos propios en el rubro de reciclaje de residuos sólidos, aspiración que obviamente no ha estado exenta de tropiezos, debido a su carácter innovativo y la fuerte inversión económica que implica.

La importancia del reciclado de neumáticos radica en que significa una gran solución en lo que respecta al sector medioambiental, ya que de acuerdo a las diferentes experiencias a nivel mundial, este tratamiento posee múltiples aplicaciones, como por



ejemplo: ser utilizado en capas asfálticas de carreteras más seguras, aislantes para los vehículos, tejidos, compuestos de goma y, la última tendencia, quizá la más importante, para su conversión en energía eléctrica. Incluso se ha estudiado su aplicación como material absorbente acústico.

*Foto N°3: Acopio no autorizado de neumáticos*

Por lo tanto, entre los beneficios que trae consigo el reciclaje de neumáticos, se pueden señalar:

- Recuperación de materias primas: trozos y granulados de goma, polvillo de carbón, negro de humo, tela (plástica) y tela (plástica) pulverizada.
- Posibilidades de usos de combustible alternativo en centrales eléctricas, instalaciones industriales, y principalmente, en fábricas de cemento y cal.
- Eliminación de un desecho no biodegradable y no compactable de difícil manipulación y compleja disposición final. Es común que los neumáticos tiendan a aparecer en la superficie de la tierra luego de enterrados.
- Reducción de la contaminación de cursos de agua, calles, caminos, terrenos eriazos y campos.

- Reducción del riesgo de que se produzcan incendios con la consiguiente contaminación del aire, suelo y cursos de agua si los hubiera.
- Reducción de las posibilidades de acumulación de agua estancada, evitando la proliferación de insectos transmisores de distintas enfermedades (dengue, fiebre amarilla, encefalitis, etcétera)
- Ahorro en la extracción de piedras y otros materiales inertes de las canteras, cavas y ríos, para la producción de bases de caminos y capas asfálticas.
- Mejoramiento de los asfaltos.
- Reducción en peso y volumen de la carga que deben soportar los vertederos y rellenos sanitarios.



*Foto N° 4 : Quema ilegal de neumáticos.*



*Foto N°5: Vertedero de neumáticos*

## I.2.- Causas y consecuencias de la problemática ambiental

### I.2.1) Diagnóstico situacional: problemática en Chile y el mundo.

La poca conciencia del ser humano, la falta de una política ambiental eficiente, la poca capacidad innovativa, el vertiginoso crecimiento del parque automotriz, entre otros, han derivado en una contaminación irracional de nuestro planeta. Los neumáticos son uno de los residuos que tienen un alto impacto en el medioambiente: son de gran tamaño, no se descomponen, son ideales como nido de roedores e insectos, son potenciales focos de incendios con la consecuente contaminación no sólo del suelo sino también del aire y además las sustancias de las que están fabricados, penetran el suelo y contaminan las napas subterráneas de agua.



*Foto N°6: Camión utilizado en la minería*

Tal vez, recuperar neumáticos difícilmente determine una ganancia financiera para quien lo haga. Sin embargo, se deben considerar los beneficios ambientales, sociales y sanitarios que trae aparejado para las ciudades y su gente, razón por la cual se justifica ampliamente que este proceso de recuperación sea encarado a la brevedad.

En nuestro país, el problema de los neumáticos de desecho tiene su cuna en la gran minería. Según estadísticas de la CONAMA, allí, cerca de 1000 neumáticos, de 2,7 toneladas de peso promedio, son desechados mensualmente. En el período de un año, se



*Foto N° 7: Acopio ilegal de neumáticos en el Desierto Chileno*

acumulan alrededor de doce mil toneladas de residuos que se agregan a los existentes en los botaderos (“fuera de carretera”) lo que bordea, conforme a estimaciones conservadoras, las 60 mil toneladas.

Sin considerar los neumáticos denominados urbanos -los usados por vehículos livianos, camiones y autobuses- este stock crece a una tasa de doce mil toneladas anuales.

Por tratarse de material que no es biodegradable, la situación constituye una seria amenaza para el medio ambiente y se calcula que en diez años, la superficie que ocupará esta masa de desechos será el equivalente a cinco veces el "Estadio Nacional".

Los neumáticos se están convirtiendo en un gran problema ambiental en nuestro país. Difíciles o caros de reciclar, peligrosos de acumular y potencialmente muy contaminantes, nadie sabe qué hacer con ellos.

Los neumáticos no son biodegradables, sobrevivirán por millones de años, no pueden reutilizarse para hacer nuevos neumáticos, no pueden llevarse a los vertederos porque obstruyen el procesamiento de la basura y está prohibido acumularlos por el riesgo de incendio.

Cada mes los municipios de la Región Metropolitana recolectan unos ocho mil neumáticos y se estima que cada año se desechan uno dos millones y medio. ([www.conama.cl](http://www.conama.cl)).

El problema cruza a todas las comunas del país, en La Pintana han intentado varias fórmulas, los convierten en maceteros, han demostrado que incluso es posible construir usándolos como estructura soportante, pero son demasiados. La idea ahora es encontrar usos masivos.

Pablo Badenier, director de la Conama en la Región Metropolitana, dice: "nosotros esperamos, ya que hay un nicho para futuras empresas, que tengan sistemas de poder reutilizar el neumático".(29 de mayo 2005, noticiero Teletrece).

Por el momento siguen siendo parte de casi todos nuestros paisajes, pero quienes los usan, los automovilistas y transportistas, no asumen ningún rol en esta crisis medioambiental.

Los neumáticos en desuso, su masiva fabricación y la dificultad que existe para su destrucción, se están convirtiendo, en los últimos años, en uno de los mayores problemas medioambientales en todo el mundo. Según la agencia EFE, sólo en España, la generación de neumáticos usados se encuentra alrededor de las 300.000 toneladas anuales, de las

cuales un 45% se deposita en vertederos controlados sin tratar, otro 40% en vertederos no controlados, y sólo el 15% se deposita tras haberlos triturado previamente. En Europa, las cifras son aún más alarmantes, ya que, según estadísticas más recientes, en los últimos años se han generado unos 205 millones de neumáticos, lo que viene a ser unos tres millones de toneladas.

Las cifras son difíciles de dimensionar, sólo en Estados Unidos hay unos tres billones acumulados, en Alemania unas 630 mil toneladas, suma y sigue, en Chile es difícil de saber, porque la gran mayoría están botados a la orilla de caminos, en sitios eriazos o en vertederos clandestinos.



*Fotos N° 8, 9 y 10: Acopios de neumáticos*

## **I.2.2) Consideraciones a una propuesta de política pública a la problemática ambiental.**

Cada vez es mayor la preocupación por preservar el medio ambiente, lo cual es lógico si consideramos los desastres ecológicos que hemos vivido en los últimos tiempos. Este incremento de la sensibilización social se ha visto reflejado en el progresivo aumento de los requisitos medioambientales exigidos a las empresas.

No es fácil conocer las obligaciones legales que le aplican a una empresa y si nos referimos específicamente a los requisitos medioambientales la dificultad se multiplica. Así, cuando buscamos normativa sobre algún aspecto medioambiental determinado, nos encontramos con una legislación parcialmente derogada, modificada por otra normativa que a la vez esta modificada, o simplemente no existe regla alguna.

Nuestro gobierno posee la facultad de fijar disposiciones específicas, relativas a la producción y gestión de diferentes tipos de residuos, entre ellos los neumáticos en desuso, que por su peculiaridad, requieren de una normativa de desarrollo específica cuya finalidad sea prevenir la incidencia ambiental de estos residuos.

Por lo tanto, se debe incorporar a este ordenamiento la responsabilidad del productor, que es una de las figuras más relevantes dentro de de esta problemática. Obligaciones exigibles en cuanto al productor por la puesta en el mercado de productos generadores de residuo. Dichas obligaciones afectarían tanto al propio producto como al residuo. Es decir, considerar limitaciones a las actividades que puedan ocasionar daño al medio ambiente.

Por lo tanto, el objetivo que se persigue es proponer algunas consideraciones que, se espera, sean útiles para establecer una normativa que determine la obligación de elaborar planes empresariales de prevención donde se permita identificar cuales son los mecanismos de prolongación de la vida útil de los neumáticos y que facilite su reutilización y reciclado al final de su vida útil. Del mismo modo, debe obligar a los productores a hacerse cargo de la gestión de residuos derivados de sus productos.

Las obligaciones hacia los productores pueden realizarse directamente, mediante convenios de colaboración, o por medio de la organización de sistemas propios de gestión.

La normativa debe establecer además, las operaciones de almacenamiento y requisitos técnicos de las instalaciones. Junto con ello se debe establecer la prohibición de depositar estos residuos en vertederos.

A los efectos de fomentar una mayor y mejor concienciación ciudadana en materia de prevención de residuos y, concretamente, de los neumáticos en desuso, se debe establecer la obligación de especificar en las facturas de venta de los neumáticos nuevos la repercusión en su precio final de los costes de gestión del residuo a que den lugar esos neumáticos cuando se conviertan en neumáticos en desuso.

Por último, se debe contar con la colaboración de las diferentes instituciones que tengan relación con el medio ambiente a fin de garantizar el cumplimiento de esta normativa. Se trata, con ello, de disponer de datos fiables para, entre otros fines, elaborar, revisar, ejecutar y realizar el seguimiento del plan de reciclaje de neumáticos, así como verificar el grado de cumplimiento de sus objetivos ecológicos.

Se busca una normativa que tenga por objeto prevenir la generación de neumáticos en desuso, establecer el régimen jurídico de su producción y gestión, y fomentar, por este orden, su reducción, reutilización, reciclado y otras formas de valorización, con la finalidad de proteger el medio ambiente.

Se incorporan a continuación algunas definiciones que permitirán facilitar la comprensión de algunos conceptos.

Se entiende por:

*a) Neumáticos en desuso:* Los neumáticos que se han convertido en residuo, es decir que ya han cumplido con su vida útil., es decir, es un neumático que ha perdido su valor o uso para su propósito original, ya sea por uso, daño o defecto.

*b) Productor de neumáticos:* La persona física o jurídica que fabrique, importe o adquiera en el país neumáticos que sean puestos en el mercado nacional.

c) *Generador de neumáticos en desuso*: La persona física o jurídica que, como consecuencia de su actividad empresarial o de cualquier otra actividad, genere neumáticos en desuso. Queda excluido de tal condición el usuario o propietario del vehículo que los utiliza.

d) *Poseedor*: el generador de neumáticos fuera de uso o la persona física o jurídica que los tenga en su poder y no tenga la condición de gestor de neumáticos en desuso.

e) *Gestor de neumáticos en desuso*: La persona física o jurídica que realice cualesquiera operaciones de gestión de neumáticos fuera de uso y que esté autorizada al efecto cuando corresponda.

f) *Recauchaje*: Proceso que consiste, fundamentalmente, en sustituir por una nueva la banda de rodamiento del neumático usado, cuya carcasa aún conserva las condiciones suficientes para permitir su utilización, de acuerdo con la legislación y normas técnicas en vigor.

g) *Neumáticos de reposición*: Los neumáticos que sus productores ponen en el mercado por primera vez para reemplazar a los neumáticos usados de los vehículos.

h) *Primera puesta en el mercado*: La primera vez que el neumático es objeto de transmisión en el territorio nacional mediante un acto de enajenación debidamente documentado.

i) *Agentes económicos*: Los productores o distribuidores de neumáticos, talleres de cambio y reparación de neumáticos, recauchadores, productores de vehículos, centros autorizados de descontaminación de vehículos y gestores de neumáticos fuera de uso.

j) *Exportador de neumáticos*: Cualquier persona que recoja y/o maneje neumáticos desechados enteros para ser procesados o dispuestos en facilidades autorizadas fuera de Chile.

k) *Importador de neumáticos*: Cualquier persona que reciba o traiga neumáticos a Chile, ya sea nuevo o usado para su distribución, venta o uso. Incluye a cualquier persona que importe neumáticos como parte de un vehículo o vehículo de motor

l) *Licencia*: Es la emisión de un permiso ya sea para operar una facilidad de reciclaje y el procesamiento de neumáticos u otro similar.

*m) Manejador de neumáticos desechados:* Es toda persona autorizada que recibe, recoge, maneja y/o transporta neumáticos desechados para llevarlos a los centros de procesamiento o reciclaje, de acuerdo a las especificaciones. El manejador de neumáticos desechados podrá ejercer como reciclador y/o procesador de neumáticos siempre y cuando cumpla con los requisitos establecidos.

*n) Reciclador de neumáticos desechados:* Es la persona autorizada, que interviene en el proceso de transformación de materia de neumáticos desechados para producir nuevos productos o utiliza los neumáticos para uso final. El reciclador de neumáticos desechados podrá ejercer como procesador y/o manejador siempre y cuando cumplan con los requisitos establecidos.

### **I.3) Reciclaje de neumáticos**

#### **I.3.1) El neumático**

Antes de centrarnos en la problemática del residuo, objeto de esta investigación, que no es otro que el neumático usado, vayamos al origen para conocer el producto de partida: el neumático.

Un neumático es básicamente un elemento que permite a un vehículo desplazarse en forma suave a través de superficies lisas. Consiste en una cubierta principalmente de caucho que contiene aire el cual soporta al vehículo y su carga. Su invención se debe al norteamericano Charles Goodyear quién descubrió, accidentalmente en 1880, el proceso de vulcanización, con el que se da al caucho la resistencia y solidez necesaria para fabricarlo.

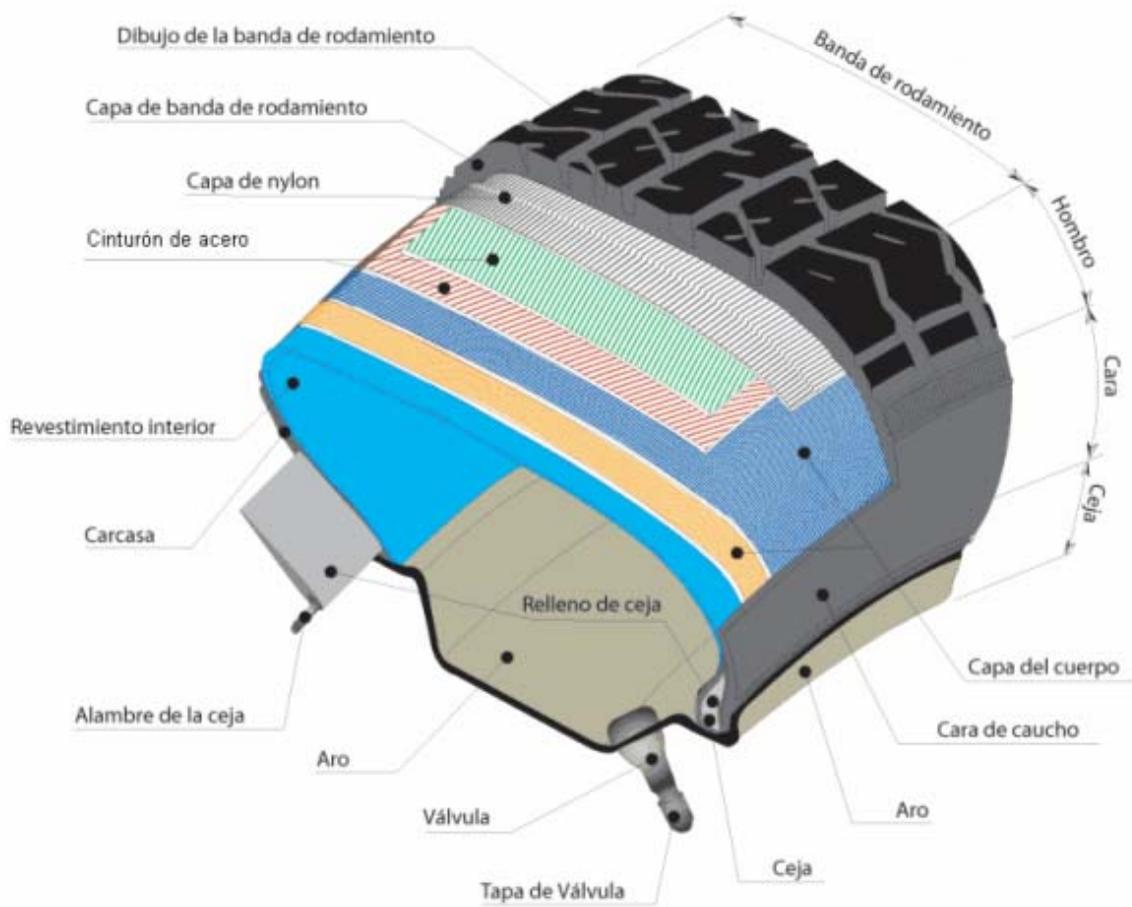


Figura 1: Diagrama de un neumático

**Tabla I.1. Composición y características de los diferentes tipos de neumáticos.**

*Neumáticos de Pasajeros (automóviles y camionetas)*

Caucho natural	14 %
Caucho sintético	27%
Negro de humo	28%
Acero	14 - 15%
Fibra textil, suavizantes, óxidos, antioxidantes, etc.	16 - 17%
Peso promedio:	8,6 Kg
Volumen	0.06 m <sup>3</sup>

*Neumáticos MCT (camiones y microbuses)*

Caucho Natural	27 %
Caucho sintético	14%
Carbón negro	28%
Acero	14 - 15%
Fibra, suavizantes, óxidos, antioxidantes, etc.	16 - 17%
Peso promedio	45,4 Kg.
Volumen	0.36 m <sup>3</sup>

*Fuente: Rubber Manufacturers Association*

Aunque suelen variar según el tipo de neumáticos y el país de fabricación, los diferentes elementos químicos que componen un neumático se muestran en la tabla I.2. junto a sus porcentajes respectivos:

**Tabla I.2.- Análisis químico del neumático**

<b>Elemento</b>	<b>Porcentaje</b>
Carbono (C)	70
Hidrogeno (H)	7
Azufre (S)	1.3
Cloro (Cl)	0,2...0,6
Fierro (Fe)	15
Oxido de Zinc (ZnO)	2
Dióxido de Silicio (SiO <sub>2</sub> )	5
Cromo (Cr)	97 ppm
Níquel (Ni)	77 ppm
Plomo (Pb)	60-760 ppm
Cadmio	5-10 ppm
Talio	0,2-0,3 ppm

*Fuente: Combustibles alternativos, Holderbank 1997.*

El neumático ocupa un destacado primer lugar entre todos los artículos de goma y se compone mayoritariamente de caucho, aunque llevan otros aditivos en diferentes porcentajes.

**Tabla I.3.-Composición aproximada de un neumático de automóvil en peso**

Caucho	62,0
Betún	3,0
Óxido de zinc	3,0
Negro de humo	25,0
Ácido esteartico	2,5
Alquitrán pino	1,3
Azufre	2,0
Antioxidante	0,6
Acelerador	0,6
<b>Total</b>	<b>100,0</b>

Fuente: [www.goodyear.cl](http://www.goodyear.cl)

### **I.3.2) Neumáticos: Elaboración y Producción**

#### **Proceso de fabricación del neumático:**

Cada neumático pasa por una serie de etapas, que comienza con la selección de las materias primas y termina con la inspección final. Este proceso garantiza que cada neumático reúne los más altos estándares de calidad.

#### **1. Mezclando los materiales**

En una mezcladora se unen varios tipos de gomas naturales y sintéticas junto con negro de humo, sulfuro y diversos productos químicos con el fin de ir cumpliendo con los requerimientos de cada tipo de neumático. La mezcla resultante se denomina "Hornada Maestra" y tiene la forma de unas sábanas de caucho frío. Parte de este material se utiliza para ser sometido a nuevos tratamientos, mientras que la mayoría pasará directamente a la etapa de extrusión.



Foto N° 11: Hornada de caucho

## 2. Extrusión de la banda de rodamiento

Se aplica una fuente de calor a la goma para hacerla más elástica. Después, se



introduce el material en unas máquinas de extrusión donde se fabrica tanto banda de rodamiento como los costados, que requieren dos compuestos diferentes de goma. El resultado es una tira de goma que más tarde se enfría y se corta en función del neumático del que se trate.

Foto N° 12: Fabricación banda de rodamiento

## 3. Tejiendo las capas

A través de un proceso denominado "calendering" se tejen en torno de las sábanas de caucho una serie de hilos de materiales tales como rayón, nylon, acero y poliéster. Las sábanas se van uniendo a través de este proceso.

Una vez terminado esta fase, las sábanas se cortan en las medidas adecuadas.

## 4. Preparación del Núcleo

El núcleo se fabrica a través de la alineación de cables de acero a lo largo de la goma, para después enrollarse repetidamente con el fin de obtener el diámetro específico y la resistencia precisa para cada tipo de neumático.

## 5. Proceso de Construcción

El proceso de construcción se desarrolla en dos fases:

Fase 1: Se colocan las sábanas de goma tejidas en una máquina especial.

Fase 2: El neumático se forma inflando su carcasa y aplicando otros componentes, además de dos cinturones de acero.



Foto N° 13: Formación del neumático

## 6. Vulcanización

El neumático se coloca en una prensa para su curación durante 10 o 15 minutos a



una presión y temperatura específicas. Una vez que el calor y la presión han sido aplicados al neumático, se retira el molde, dando como resultado sus dimensiones finales, forma y el diseño de banda de rodamiento.

*Foto N° 14: Vulcanización*

## 7. Limpieza

El exceso de goma resultante del anterior proceso se retira, quedando el neumático terminado.

## 8. Inspección Final

Cada neumático pasa por un proceso de inspección tanto visual como electrónica para garantizar el nivel de calidad adecuado en prestaciones y materiales.



*Foto N° 15: Inspección electrónica*



*Foto N° 17: Almacenamiento*



*Foto N° 16: Inspección Visual*

### I.3.3) Reciclaje de neumáticos

#### I.3.3.1) Introducción

El sistema propuesto tiene la capacidad de procesar 2,000 kg/h de neumáticos. El anual estimado es aproximadamente 7,000 toneladas que presumen una media de 3,500 horas de trabajo efectivo. La cantidad de goma obtenida es un 70% a 80% del peso total de material de los neumáticos procesados (con trazas de fibras especiales). El 30% a 20% restante se componen del acero que forman la camisa o cinturón del neumático. Este lleva una mínima presencia de goma y es totalmente reutilizable en el campo del hierro y Acero.

- \* El área cubierta para la instalación de la planta es de aproximadamente 2,000 m<sup>2</sup>.
- \* El sistema entero puede ser manejado por 4 operadores por turno.
- \* La potencia total instalada cercana a 200 HP.
- \* Necesidades de mantenimiento mínimas. Se reduce a máquinas trituradoras (afilado/cambio cuchillas y discos refinadores).

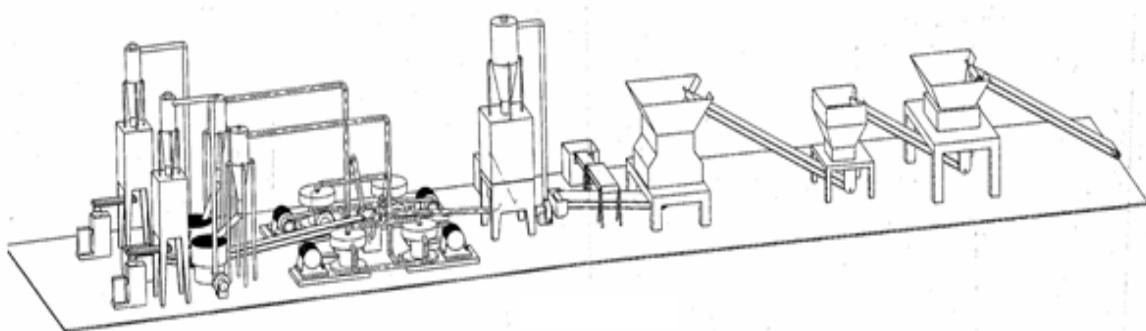


Fig.2: Esquema de una planta de reciclaje de neumáticos.

### I.3.3.2) Características Técnico-Económicas



Foto N° 18: Acopio de neumáticos

El concepto técnico de la planta se basa en el siguiente plan:

- ↻ Sistemas mecánicos de transformación diseñados para operación limpia.

- ↻ Operación de proceso: un solo paso para asegurar confiabilidad y bajo consumo de energía.
- ↻ Limita la necesidad de mantenimiento de bajo nivel.
- ↻ Adaptable al entorno para evitar ser una fuente de contaminación.
- ↻ Auto contenido para satisfacer las necesidades del espacio.

Bajo estos criterios, la planta cumple con las siguientes características:

- ↻ Sólida Estructura Metálica.
- ↻ Fondo de la planta rotatorio para mantenimiento y limpieza.
- ↻ Ausencia de polución residual.
- ↻ Reducida necesidad de mantenimiento ordinario.
- ↻ Uso limitado de trabajo a las caras afiladas en las máquinas de corte y a los discos trituradores de refinación.
- ↻ Consumo bajo de energía limitado a 0.35 Kwh./Kg.
- ↻ Toda la maquinaria ocupa un área de 600 m<sup>2</sup> aproximadamente.

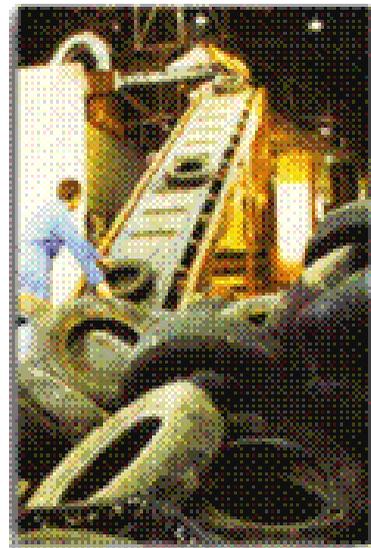


Foto N°19: Cinta transportadora.

### **I.3.3.3) Composición del Sistema**

Seis secciones, en cuanto a calidad, cantidad y seguridad, íntegramente controlado por un sistema computarizado.

*a) Sección de triturado*

*b) Sección de granulado*

*c) Sección de Pulverizado*

*d) Sección de desmetalizado*

*e) Sección compuesta de aireado y redes vibratorias intercambiables*

*f) Sección de empaclado*

El sistema abarca por otra parte, una serie de bandas transportadoras para conectar los pasos continuos, (cargado, drenado y recirculado), y un sistema de filtración por aire.

### **I.3.3.4) Descripción Ciclo Trabajo**



*Foto N° 20: Granos de caucho*

Este material, cae en la cinta transportadora al siguiente paso del proceso, con una acción análoga a la anterior, reduce las dimensiones del material hasta una medida de 50 mm. El material obtenido, a través de una banda transportadora de cinta entra en una tercera máquina que con un sistema similar a las anteriores, reduce el caucho a 16 mm, destacando así la presencia de acero del interior de los neumáticos.



*Foto N° 21: Diferentes tamaños de granos.*

Una banda transportadora posterior, recoge lo procesado para pasarlo debajo de un imán permanente, recogiendo cualquier material ferroso presente, mientras que el caucho se lleva a través de un transporte neumático y es colocado en los silos. En este punto del ciclo, el caucho, ya sin presencia de acero, puede iniciar el proceso de refinación.

Los granos de goma, a través de un vertedor son enviados en la máquina de pulverizado, la cual con la acción de embrague entre dos discos rotatorios en sentidos inversos, reduce el grano a las dimensiones deseadas, agregando o quitando discos según se requiera. Una vez terminado el procesado del material es llevado mediante transporte neumático para su separación y almacenado.

### **I.3.3.5) Producción**

El sistema está preparado para obtener varios tipos de producto terminado basado en la demanda del mercado y cada uno de los numerosos campos en los cuales puede ser usado tanto en forma de grano como de polvo. El rango va desde un polvo de 0.07 mm hasta granos de 16 mm. Simplemente cambiar las redes del tamizado vibratorio.

Los productos mas utilizados son:

- \* Polvo de hasta 0.7 mm (tamaño máximo)
- \* Grano de 2 mm (material entre 0.8 y 2 mm)
- \* Grano de 3.5 mm (material entre 2 y 3.5 mm)
- \* Grano de 5 mm (material entre 3.5 y 5 mm)
- \* Grano de 10 mm
- \* Grano de 16 mm



*Foto N° 22: Empaque del producto*

Los productos son empacados en la Planta dependiendo del tamaño del polvo, en bolsas de papel de 25 Kg. cada una y los granos en una bolsas con 800 Kg. aproximadamente. Se da atención especial a la clasificación de los neumáticos referidos, en orden para permitir una subdivisión de los mismos como:

1. Neumáticos de Automóvil
2. Neumáticos vehicular con porta cámara – cinturón
3. Neumáticos vehicular sin porta cámara – cinturón

#### **I.3.4) Sistema de tratamiento para neumáticos en desuso:**

##### **I.3.4.1) Reutilización de neumáticos usados sin variación de estructura:**

Las dos únicas posibilidades de reutilización de neumáticos usados, como tales neumáticos sin variar su estructura son: Recauchado y Utilización directa

#### **Recauchado**

Consiste en sustituir la banda de rodamiento desgastada por una nueva, lo que permite que se prolongue la duración del resto de la cubierta por un período similar a la duración de una cubierta nueva y con prácticamente las mismas prestaciones.

Entre las ventajas del recauchado se pueden citar:

1. Favorece al medio ambiente, debido a que se controla la eliminación de los neumáticos.
2. Se evita el desperdicio inútil de 4 a 5 Kg de goma que se desecharía al producirse el desgaste de la banda de rodadura que viene a ser de 1,5 Kg de goma.
3. El bajo consumo de combustible que se precisa para la producción de un neumático renovado, 5,5 litros en contraste con los 35 litros necesarios para la fabricación nueva.

#### **Utilización directa de los neumáticos usados.**

La utilización directa, sólo consume una parte mínima de los neumáticos usados y nunca podrían considerarse como una solución del problema global:

Entre las aplicaciones directas se pueden destacar.

- Defensas de muelles y embarcaciones
- Arrecifes artificiales
- Rompeolas
- Barreras de protección en vías de tráfico
- Protección de capas impermeabilizantes en vertederos de residuos, entre otros.

### I.3.4.2) Reutilización de neumáticos usados con variación de estructura:

Actualmente los sistemas de tratamiento más experimentados y utilizables para valorizar estos residuos son:

- Trituración a temperatura ambiente
- Trituración Criogénica
- Incineración con recuperación de energía
- Pirolisis
- Termólisis

#### Trituración a temperatura ambiente

Proceso puramente mecánico de trituración para conseguir “gránulos” de diferentes tamaños dependiendo de las etapas a las que se haya sometido.

La eficacia de la separación entre el acero triturado y los textiles, del caucho, es función del grado de molienda.

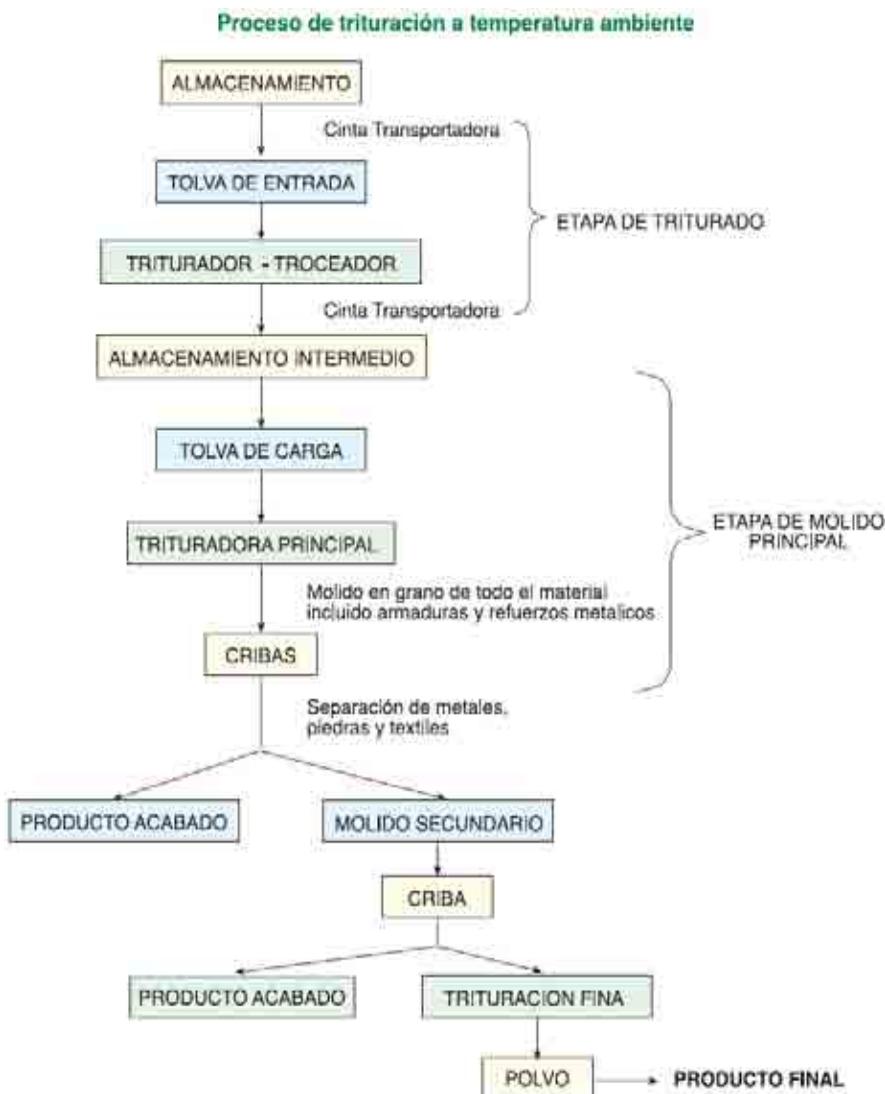


Fig. 3: Esquema del proceso de trituración a temperatura ambiente.

## Trituración criogénica

Los neumáticos se someten a baja temperatura, del orden de  $-195,8^{\circ}\text{C}$  que corresponden al Nitrógeno líquido, en forma de espuma criogénica, en un túnel de ciclo cerrado aislado al vacío, a la cual el caucho se vuelve frágil y quebradizo. Se obtiene una excelente molienda, del orden de los 0,1 mm y una buena separación de cenizas, acero y fibras textiles.

El método descrito presenta la ventaja de recuperar los materiales que conforman los neumáticos en desuso de forma no contaminante. Por otra parte el sistema de tratamiento presenta problemas en cuanto a la complejidad de sus instalaciones y su alto coste de implantación y mantenimiento.

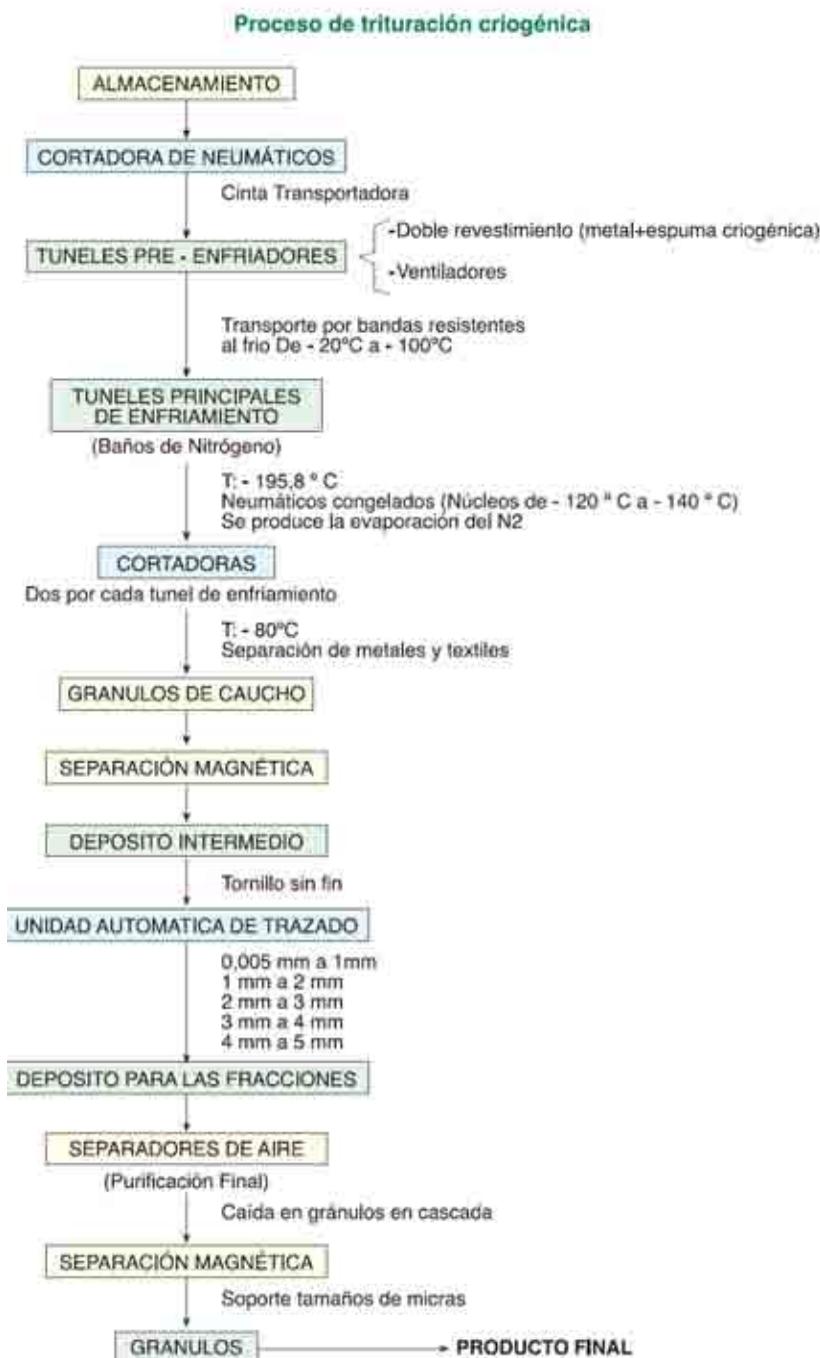


Fig. 4: Proceso de trituración criogénica.

## **Incineración**

Proceso por el que se produce la combustión de los materiales orgánicos del neumático a altas temperaturas en hornos con materiales refractarios de alta calidad. Es un proceso costoso y además presenta el inconveniente de la diferente velocidad de combustión de los diferentes componentes y la necesidad de depuración de los residuos por lo que no resulta fácil de controlar y además es contaminante. Genera calor que puede ser usado como energía, ya que se trata de un proceso exotérmico. Con este método, los productos contaminantes que se producen en la combustión son muy perjudiciales para la salud humana, los que sin embargo, con la aplicación de tecnología pueden ser aprovechados sin que produzcan daños a la salud humana. Entre ellos el Monóxido de carbono - Xileno - Hollín - Óxidos de nitrógeno, Dióxido de carbono - Óxidos de zinc - Benceno - Fenoles, Dióxido de azufre - Óxidos de plomo, Tolueno. Además el hollín contiene cantidades importantes de hidrocarburos aromáticos poli cíclicos. El zinc, en concreto, es particularmente tóxico para la fauna acuática. También tiene el peligro de que muchos de estos compuestos son solubles en el agua, por lo que pasan a la cadena trófica y de ahí a los seres humanos.

## **Pirolisis**

Aun está poco extendido, debido a problemas de separación de compuestos carbonados que ya están siendo superados. Según los datos de la empresa Chemysis SA., este procedimiento (fabrica piloto) está operativo en Taiwán desde 2002 con cuatro líneas de pirolisis que permiten reciclar 9000 toneladas / año. En la actualidad el procedimiento ha sido mejorado y es capaz de tratar 28.000 toneladas de neumáticos usados/año, a través de una sola línea.

Los productos obtenidos después del proceso de pirolisis son principalmente:

- GAZ, similar al propano que se puede emplear para uso industrial .
- Aceite industrial liquido que se puede refinar en Diesel. / Coke / Acero.



## CAPITULO II

### APLICACIONES EN LA CONSTRUCCIÓN

#### II. 1.- Asfalto – Caucho

El *Asfalto Modificado con Caucho* es una mezcla asfáltica en caliente modificada con polvo obtenido de neumáticos de desecho. Posee características favorables desde el punto de vista ambiental y vial. Por una parte presenta mejores respuestas en condiciones climáticas extremas, y por otra permite reutilizar el caucho proveniente de los neumáticos, un material difícil de reciclar.

Dentro de las alternativas razonables para su reutilización, una de las que se considera mas apropiada, corresponde a la trituración del neumático, separación selectiva de sus componentes, molido e incorporación del caucho en las mezclas bituminosas en caliente, para mejorar las propiedades reológicas de las mezclas asfálticas.

El polvo de caucho de neumáticos está constituido, por varios polímeros naturales y sintéticos: caucho natural (NR), estireno butadieno (SBR), polibutadieno (BR), polisoprenos sintéticos (IR), entre otros, que lo hacen apropiado para modificar el betún de las mezclas asfálticas. Estos polímeros se encuentran formando una estructura elástica, en la que los puentes de azufre formados durante la vulcanización entre cadenas de polímeros juegan un papel importante a la hora de definir el comportamiento del material. Precisamente la presencia de estos enlaces, marca la diferencia entre los polímeros que habitualmente se utilizan en la modificación de betunes y el polvo de caucho de neumáticos.

En este proceso, la incorporación del polvo de caucho, se realiza directamente en el proceso de amasado, sobre los áridos calientes, antes de la incorporación del betún y una vez fabricada la mezcla, tras un tiempo de maceración, se procede al extendido y compactación.

## **II.1.1) Aplicaciones en Chile**

### **II.1.1.1) Introducción**

El uso del caucho como modificador posee una larga historia. En 1843 se registro una de las primeras patentes en el mundo para el uso de bitumen modificado con caucho natural. Posteriormente desde 1920 hasta la fecha, ha sido cada vez mas empleado en las mezclas asfálticas en caliente principalmente en Estados Unidos. A principios de los 80 se comenzó a experimentar con la mezcla de partículas de caucho con asfalto y posteriormente en 1995 en Estado Unidos se introdujo el uso de miga de caucho (MdC) como modificador.

Desde el punto de vista ambiental y de la ingeniería vial, el uso a gran escala del caucho proviene de neumáticos como modificador plantea una nueva perspectiva. Especialmente en la reutilización del creciente volumen de neumáticos de desecho y en las propiedades que le confiere el caucho a las mezclas asfálticas.

Las mezclas asfálticas en caliente modificadas con caucho (MACC), permiten obtener un pavimento resistente al agua, y con una mejor respuesta a los cambios térmicos, resistencia a la ruptura, y una mayor viscosidad en la medida que la proporción de asfalto aumenta. Estudios realizados en Alaska, muestran que las MACC, presenta un mejor comportamiento a la fatiga y un mejor comportamiento al agrietamiento térmico a bajas temperaturas que las mezclas tradicionales.

En la undécima región Aysén, aun cuando las solicitudes de tránsito son bajas, existe una importante variabilidad climática y térmica durante el año, lo que se traduce en variaciones térmicas que oscilan entre los  $-20\text{ °C}$  en invierno y los  $+25\text{ °C}$  en verano, y temperaturas medias mínimas de  $0,0\text{ °C}$  y medias máximas de  $+21,1\text{ °C}$ . Esto determina que los pavimentos asfálticos se vean enfrentados a un mayor riesgo de agrietamiento térmico y deformaciones, por lo cual es necesario que su diseño considere este amplio rango de prestaciones. En la región, el uso del asfalto para pavimentos representa un 45 % de la red vial pavimentada que alcanza el 9% de la red vial total. Su uso se ha incrementado en los últimos años y prevé una mayor demanda del material con la pavimentación del camino Longitudinal Austral Norte, que se inició en el año 1999.

Proporcionalmente, los pavimentos asfálticos existentes en la región emplearon mayoritariamente mezclas asfálticas en caliente.

Recientemente, se han empleado asfaltos multigrados en la pavimentación de la Ruta X – 65, que une el sector de Villa Cerro Castillo con la ciudad de Puerto Ibáñez. En dicho sector, las condiciones climáticas son comparativamente más rigurosas que en el resto de la región, por lo cual la Dirección Regional de Vialidad (DRV) decidió pavimentar un tramo de prueba, utilizando un pavimento con una mezcla asfáltica en caliente modificada con migas de caucho (MdC). La DRV decidió estudiar el comportamiento de este tipo de producto con el fin de evaluar posteriormente la posibilidad de aplicarlo con mayor frecuencia en los programas de pavimentación de la red vial estructurante previsto para los próximos años. A continuación se describirá el trabajo realizado por la DRV Aysén en el uso de MACC en la pavimentación de la Ruta X – 65.

### II.1.1.2) El asfalto modificado con caucho

#### II.1.1.2.1) La producción de Mezclas de Asfalto Modificado con Caucho

La producción de Asfalto Modificado con Caucho (AMC) comienza con la preparación del modificador, esto es el caucho triturado. La materia prima proviene de la goma presente en los neumáticos de automóviles y camiones y en menor medida, de neumáticos de aviones. Los neumáticos más empleados en la producción de MdC es el de camiones, puesto que contienen una mayor proporción de goma natural. La cual es más fácil de dispersar y posee mayor compatibilidad con el asfalto (Rouse, 1997).

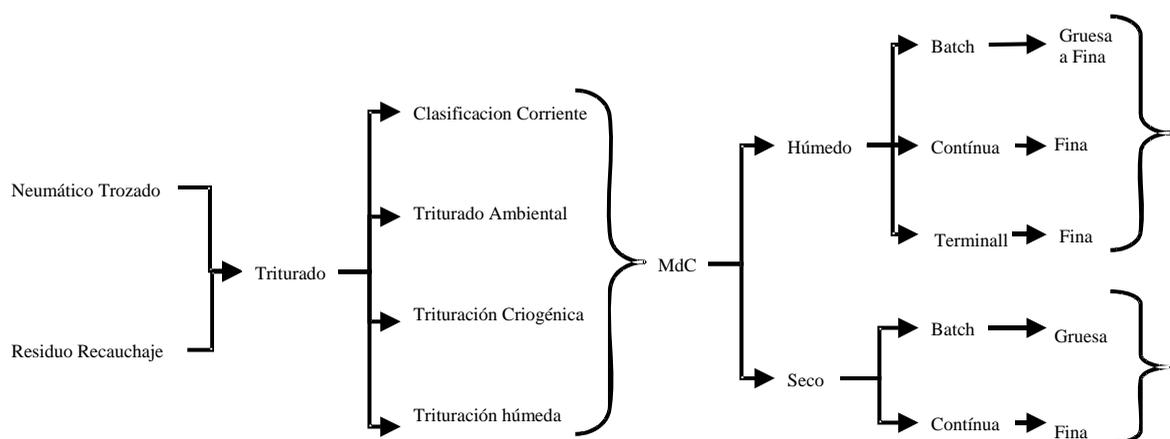


Fig.5: Diagrama del proceso de producción de materiales Asfálticos Modificados con Caucho.

En ella se muestra que el proceso comienza con la trituración y clasificación de la migas de caucho, para lo cual existen cuatro procesos. El producto resultante son migas de caucho que se emplean como modificador. Este modificador, se utiliza de dos formas en el diseño de mezclas asfálticas. Una es el mezclado húmedo en donde se le agregan las migas de caucho directamente al asfalto, produciendo un asfalto modificado, para posteriormente realizar el diseño de mezcla asfáltica en caliente. El otro método contempla la adición de las partículas de caucho como filler directamente en el proceso de preparación de la mezcla asfáltica, caso en el cual el asfalto que se agrega no se encuentra modificado. Finalmente, y dependiendo de la granulometría de las partículas de caucho, y dependiendo del tipo de mezclado, se obtienen productos diferentes que son aptos para distintos tipos de aplicaciones.

#### **II.1.1.2.1.a) La trituración**

Existen básicamente cuatro técnicas de trituración: Clasificación Corriente, Trituración Ambiental, Trituración Criogénica y Trituración Húmeda.

- **La Clasificación Corriente:** consiste en recuperar los residuos provenientes del recauchaje de neumáticos, donde se obtienen partículas de tamaño variable, entre 3 y 25 mm. Estas partículas se tamizan y clasifican a fin de obtener un producto que se ajuste a una banda granulométrica determinada. En este proceso la producción que se puede obtener es limitada, puesto que el recauchaje de neumático no es una práctica masiva. Por otro lado, es complejo lograr partículas uniformes dado que se trata de un residuo, pudiendo en algunos casos ser inútiles para su uso como modificador, aún cuando se ajuste a una banda granulométrica.

- **La Trituración Ambiental:** se realiza a temperatura ambiente de forma mecánica, generándose partículas cuyos tamaños dependen del tipo de maquinaria empleada y del uso de MdC. Al triturar caucho se obtiene una mezcla de partículas, telas y acero. Los fragmentos de acero son extraídos por un imán y los de fibra o textiles, son

separados aplicando corrientes de aire de modo tal de dejar únicamente partículas de caucho.

- **La Trituración Criogénica:** se utiliza en combinación con la trituración ambiental. Consiste en enfriar con nitrógeno líquido chips de neumáticos. Los chips se ingresan a una cámara donde son bañados con nitrógeno líquido para reducir su temperatura a  $-87\text{ }^{\circ}\text{C}$ , haciéndolos frágiles y de fácil molienda.

- **La Trituración Húmeda:** utiliza partículas con tamaños menores a la malla # 20. Éstas se humedecen y se hacen pasar por un sistema de molienda, produciendo partículas uniformes y con un rango de tamaños amplio y predecible. Este sistema exige un sistema de secado para controlar el contenido de humedad, elemento que no se requiere en los otros procesos.

El tamaño posible de lograr según el método de trituración empleado se presenta en la siguiente tabla. (Tabla II.1). Sin embargo, esto no debe considerarse como un elemento discriminador respecto de cual método es más adecuado o no ya que en definitiva, depende del costo de ciclo de vida de la operación de cada método de trituración.

**Tabla II.1: Métodos de producción de MdC.**

<b>Método</b>	<b>Características</b>	<b>Tamaño</b>
Clasificación	Obtenido de desechos de recauchaje	3 a 25 mm.
Corriente	Obtenido de la Trituración de Neumáticos	13 a 76 mm.
Trituración a	Trituración en Astillas o Chips	13 a 76 mm.
Temperatura	Molido en Polvo de Caucho	0.85 a 13 mm.
Ambiente	Molido de Migas de Caucho	Bajo 4.75 mm.
Trituración	Trituración en Astillas o Chips	13 a 76 mm.
Criogénica	Molido en Nitrógeno Líquido	Bajo 4.25 mm.

### II.1.1.2.1.b) El mezclado de asfalto con caucho

Las migas de caucho resultantes del triturado pueden mezclarse con el asfalto mediante tres tipos de procesos: Proceso Húmedo, Proceso Seco o en Refinería.

La norma ASTM D 8 – 88 define el proceso húmedo como aquel proceso que permite obtener una mezcla de cemento asfáltico y caucho reciclado de neumático, o en ciertos añadidos, en los cuales el componente de goma, es por lo menos el 15% del en peso del ligante utilizado en la mezcla total, y este ha reaccionado con el cemento asfáltico en caliente lo suficiente para causar la hinchazón de las partículas de goma, su difusión y la reducción de viscosidad. La reducción de viscosidad depende básicamente del tipo de asfalto, del tipo de caucho, de la temperatura de mezclado y de la energía impuesta en el mezclado.

Una vez mezcladas las migas de caucho con el asfalto, ésta se calienta a una temperatura entre 190 y 205°C, para producir un bitumen en un mezclador. La mezcla resultante se bombea hacia un distribuidor donde ocurre una reacción físico química en la cual el caucho se hincha y suaviza. Posteriormente la mezcla de asfalto – caucho reaccionando se vierte en el mezclador con los áridos.



Fig.6: Proceso de mezclado por vía húmeda.

En el proceso de mezclado seco, las migas de caucho forman parte del agregado fino, en un porcentaje entre el 1 y el 4% respecto al peso total de los agregados. Estas se añaden directamente en el proceso de mezclado de los áridos con el asfalto. En la mezcla no se producen reacciones químicas importantes, debido al corto tiempo de mezclado, el cual no es suficiente para que se produzca una reacción similar a la que se produce en el método de diseño húmedo. No necesita equipos especiales para mezclar ya que el caucho esparte de los áridos. Las temperaturas de mezclado no son más altas que el proceso húmedo, generalmente entre 160 y 190°C.



Fig.7: Proceso de mezclado por vía seca.

Las diferencias entre estos dos procesos radican fundamentalmente en el tamaño de las partículas, la proporción de caucho, los costos y el tipo de equipamiento, como se muestra en la tabla II.2.-

**Tabla II.2: Diferencias entre los procesos de mezclado seco y húmedo.**

Característica	Proceso	
	Seco	Húmedo
Tamaño de las partículas de caucho	0.63 a 9.5 mm. 0.15 a 1.18 mm.	0.85 a 15 mm.
Cantidad de caucho utilizado	> 3% de la mezcla total	1,5 % de la mezcla total
Equipos	No necesita equipos especiales	Necesita estanque para realizar la digestión
Costo	Costos iniciales menores	Costos iniciales mayores

El proceso de mezclado en refinería es semejante al proceso húmedo, diferenciándose en la digestión del caucho dentro del cemento asfáltico se realiza en la refinería de petróleo, directamente en el pitch que resulta de la destilación del crudo. Este ligante modificado se transporta a obra donde se combina con los áridos y filler para producir la mezcla asfáltica.

#### **II.1.1.2.1.c) Criterios de diseño de AMC**

Los criterios de diseño de AMC son básicamente cuatro: el porcentaje de caucho, la temperatura de reacción, en tiempo de digestión y la velocidad del mezclado (MOPTT, 2001) A partir de combinaciones de valores de estas variables, es posible obtener diferentes dosificaciones de asfalto y caucho que pueden ser ponderadas en función de la viscosidad para llegar a una dosificación requerida que cumpla con requisitos de durabilidad, impermeabilidad, resistencia, trabajabilidad entre otras.

##### **a) Porcentaje de Caucho**

El porcentaje de caucho recomendado por diversos autores oscila entre un 10 y 25%, no existiendo consenso respecto de cual es el valor óptimo. El uso de porcentajes altos de caucho conduce productos con viscosidad alta que limitan su trabajabilidad.

Estudios realizados por Takkallou y Sinton (1992) muestran que un mayor porcentaje de caucho en asfalto, aumenta el punto de ablandamiento, reduce la penetración a 25° C y aumenta la viscosidad. Estas variables son importantes para determinar el tiempo máximo de almacenamiento del producto. Khedaiwi et al (1993) obtuvieron resultados similares a los obtenidos por Takallou y Sinton, pero determinaron además que existía una tendencia a la reducción de la temperatura de inflamación, especialmente cuando se utilizan partículas finas de caucho (bajo 0.85 mm), lo cual es una condición favorable en términos de seguridad.

### **b) Temperatura de reacción**

La temperatura de reacción se define como la temperatura requerida para que las partículas de caucho se hinchen. Experimentos desarrollados por Huffman (1980) muestran que la temperatura de fusión del caucho es de aproximadamente 300° C, por lo cual el valor máximo de temperatura, depende solo del cemento asfáltico.

Asimismo, Huffman (1980) determinó que a mayor temperatura de reacción se produce un aumento en la viscosidad para tiempos de digestión sobre 120 minutos.

### **c) Tiempo de digestión**

El tiempo de digestión es el tiempo mínimo requerido para que se produzca la reacción físico-químico del asfalto-caucho, de tal manera que se produzca la mayor afinidad posible entre ellos. Durante este tiempo se estabiliza la viscosidad del AMC. Por lo tanto, el tiempo de digestión determina la viscosidad del AMC.

Estudios más detallados realizados por Liang y Lee (1996), muestran que la estabilización de la viscosidad no solo depende del tiempo de reacción sino que también del tamaño de las partículas de caucho. Al utilizar partículas más finas se logran viscosidades más bajas y un intervalo de estabilización que oscila entre los 150 y 300 minutos. Asimismo, el tiempo de digestión que lleva a la estabilización de la viscosidad tiende a ser menos en la medida que la proporción de asfalto sea mayor.

### **d) Controles de calidad del AMC**

Los controles de calidad que se efectúan al AMC corresponden básicamente a aquellos empleados para el asfalto que se utiliza mezclas en caliente. A la luz de lo analizado anteriormente, uno de los controles más importantes es el de la viscosidad. La evidencia empírica muestra que cambios en los valores asociados a los criterios de diseño repercuten en la viscosidad y por lo tanto en las propiedades del asfalto modificado.

Por este motivo la viscosidad se emplea como índice que permite discriminar entre las posibles combinaciones de valores en que se encuentran los distintos parámetros de diseño, y compara así dosificaciones alternativas de asfalto y caucho.

### II.1.1.3) Aplicación de un tramo de prueba en la Región de Aysén



En la región de Aysén la red pavimentada está constituida equitativamente por pavimentos de asfalto y hormigón. No obstante lo cual, en proyectos recientes se ha optado por utilizar pavimentos asfálticos. Particularmente en la ruta X- 65 en la pavimentación se ha empleado una mezcla asfáltica multigrado y en un tramo de prueba una mezcla asfáltica con asfalto modificado con Caucho. En la figura 4 se muestra el emplazamiento del proyecto.

Fig.8: Tramo de prueba Región de Aysén.

El tramo de prueba en donde se utilizó el AMC, forma parte del proyecto de pavimentación de la ruta X – 65 (31,8 km de longitud) que une la Ruta 7 desde la bifurcación Cerro Castillo hasta la ciudad de Puerto Ibáñez. Se emplaza 100 km al sur de Coyhaique. En la figura 8 se muestra en color café, al trazado de la Ruta X – 65.

La pavimentación contempló el uso de una estructura de pavimento asfáltico de 50 cm. de espesor, compuesta por una capa de mezcla asfáltica de 6 cm., una base estabilizada de 20 cm. y una subbase granular de 24 cm.

Las especificaciones del proyecto, contemplaron el uso de una mezcla asfáltica multigrado, a excepción de un tramo de prueba de 500 mt, en el cual se empleó la mezcla asfalto – caucho. Las condiciones climáticas del sector donde se emplaza el proyecto son adversas. En invierno la temperatura llega a – 20 °C. en verano las temperaturas más altas

alcanzan los + 31°C. esto implica que las potenciales temperaturas que puede alcanzar el pavimento varía entre – 20 °C en invierno y + 50°C en verano.

### II.1.1.3.1) Características de la mezcla asfáltica

Para la pavimentación se emplearon dos tipos de mezclas asfálticas. Una densa del tipo IV – 112 y una semidensa tipo IV – A – 12, de acuerdo a las bandas granulométricas especificadas en el Volumen 5 del Manual de Carreteras. El asfalto empleado en toda la pavimentación fue de tipo CA 60 – 80.

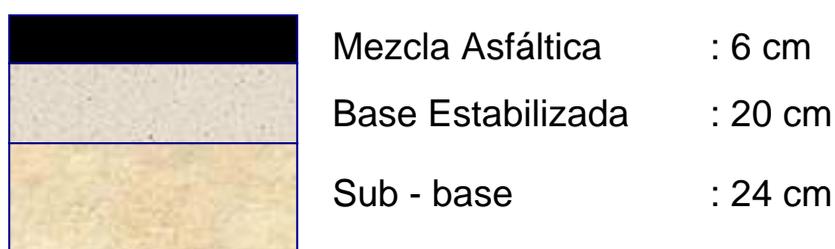


Fig.9: Esquema de corte de pavimento.

#### II.1.1.3.1.1) Los Áridos

Los áridos empleados para la mezcla asfáltica fueron los correspondientes a la banda granulométrica IV – A - 12, correspondiente a una mezcla semidensa. Las especificaciones exigidas para la mezcla asfáltica con AMC se muestran en la tabla II.3.-

**Tabla II.3: Especificaciones para la mezcla asfáltica con AMC**

Propiedad	Unidad	Especificación mezcla Asfalto Caucho
Partículas chancadas	%	100
Partículas lajeadas	%	Máx. 10
Desgaste de Los Ángeles	%	Máx. 20
Adherencia Riedel – Webel	%	Máx. 0 – 5
Equivalente de arena	%	Máx. 50
Desintegración por Sulfatos	%	Máx. 12

Fuente: VIII Provia 2004



Foto N° 23, 24 y 25: Granulometría de los áridos

#### II.1.1.3.1.2) El modificador de caucho (MdC)

El MdC empleado fue el caucho en migas obtenidos por trituración criogénica proveniente de una planta de producción existente en Brasil. Las especificaciones granulométricas del producto se muestran en la tabla II.4.

**Tabla II.4: Especificaciones granulométricas**

Tamiz		% Que Pasa
mm	ASTM	
2.0	# 10	100
0.85	# 20	60 – 100
0.63	#30	50 – 90
0.30	#50	0 – 45
0.080	#200	0 – 5

Otros requerimientos del Mcd son el contenido mínimo de caucho natural, que no debe ser inferior al 30 % y su densidad relativa que debe estar dentro del intervalo comprendido entre 1.10 y 1.25 kg/dm<sup>3</sup>. el cumplimiento de estos requisitos usualmente forma parte del control de calidad del producto que se realiza en la fábrica de origen. En Chile, no existe normalización respecto de cuales son las bandas granulométricas de caucho más adecuadas, ni respecto de la densidad y proporción de caucho natural contenida en las migas de caucho, por lo cual en este aspecto se consideraron los controles de calidad del producto de origen.

#### II.1.1.3.1.3) El asfalto modificado con caucho (AMC)

El diseño del asfalto modificado con caucho (AMC) fue realizado por una de las empresas proveedoras del asfalto que participaron en el proyecto de pavimentación. Aplicaron el Proceso Húmedo, que es el único método de dosificación en el que se posee experiencia en el país. (MOPTT; 2001). Los criterios de diseño que permiten determinar la dosificación óptima son la temperatura de reacción, tiempo de digestión y velocidad de mezclado, las que determinan el porcentaje en peso de caucho a emplear. En la siguiente tabla (II.5), se muestra una síntesis de los diseños de prueba realizados por la empresa proveedora.

**Tabla II.5: Diseños de prueba de AMC (MOPTT, 2001).**

Criterios	Niveles		
	1	2	3
Temperatura de mezclado, °C.	160	180	200
Cantidad de Caucho, %	18	20	22
Tiempo de mezclado, min.	60	90	120
Velocidad de mezclado, Rpm.	500	600	700

Para determinar el diseño óptimo se fabricaron 6 probetas para las distintas combinaciones de los parámetros mostrados en la tabla anterior. A partir de los diseños de prueba, la empresa proveedora de AMC determinó un diseño óptimo que considera un 18% en peso de caucho. Las características del diseño del AMC se muestran en la tabla II.6.-

**Tabla II.6: Criterios considerados para la dosificación óptima de AMC**

Variable	Unidad	Cantidad	Aceptación
Porcentaje de caucho	%	18	18 – 24
Temperatura de reacción	° C	180	180 – 210
Tiempo de digestión	h.	1	1 – 4
Velocidad de mezclado	Rpm	500	
Viscosidad	cP	2000 +/- 300	1000 – 3500

Los principales controles del AMC corresponden a aquellos que normalmente exigen las normas LNV. En la tabla II.7 se muestran los controles realizados, los valores obtenidos y los valores de aceptación.

**Tabla II.7: Valores obtenidos y aceptados.**

Propiedad	Controles	Aceptación
Viscosidad (Brookfield) a 175 °C (Cp)	2000 +/- 300	1000 – 3500
Penetración, 25 °C. 100 grs, 5 seg (1/10 mm)		25 – 75
Penetración, 4°C, 200 gr, 60 seg, (1/10 mm)		15
Resistencia (%)		20
Punto de ablandamiento (°C)		55 – 65
Punto de Inflamación (°C)		232.2

En terreno se fabricaron 5 lotes, totalizando 46 toneladas de AMC. Esto equivale a 8300 kg. de caucho o 3000 neumáticos / km. aproximadamente.

#### II.1.1.3.1.4) La mezcla de cemento asfáltico

La mezcla se diseñó aplicando el método Marshal especificado en la norma LNV – 47.

La mezcla se preparó en terreno. Para ello, junto a la planta de asfalto convencional se empleó un estanque Digestor provisto de un sistema de agitación y uno de calefacción para mantener una temperatura adecuada y constante y condiciones controladas de temperatura, tiempo y agitación.

#### II.1.1.3.2) Proceso Constructivo

El proceso de mezclado se realizó en una planta asfáltica de tambor, compuesta por 4 alimentadores de agregados, un tambor secador y mezclador, una bomba alimentadora de asfalto, correas transportadoras, el silo de almacenamiento y cabina de control.



Fotos N° 26 y 27:  
Proceso de mezclado



El proceso de colocación se realizó con una finisher del año 2003, la cual entregó niveles de compactación del orden del 85% respecto de la densidad de diseño. En terreno se observó que la mezcla fabricada con ligante asfalto – caucho tenía poco desplazamiento en comparación con la multigrado, debido fundamentalmente a la viscosidad de la mezcla en el momento de su colocación.



Fotos 28 y 29: Proceso de colocación

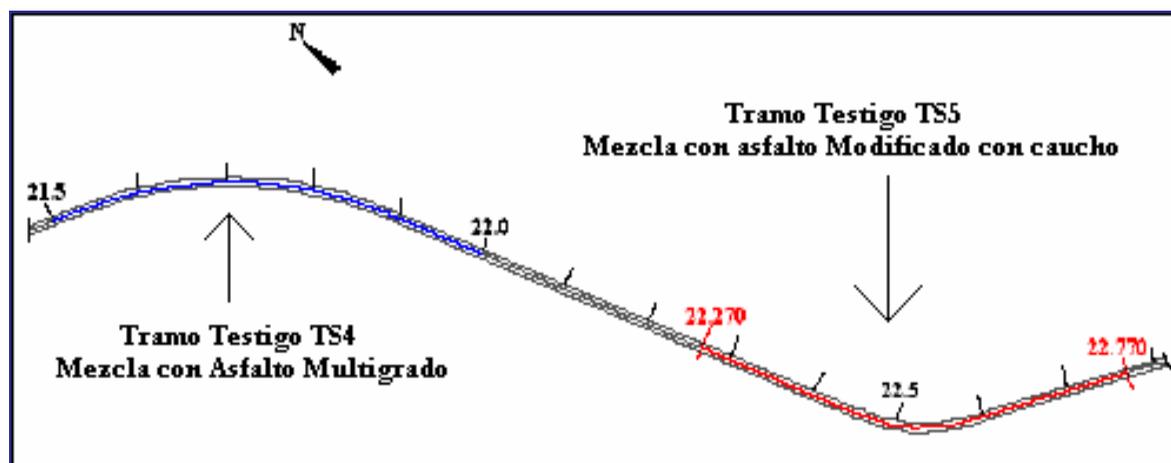
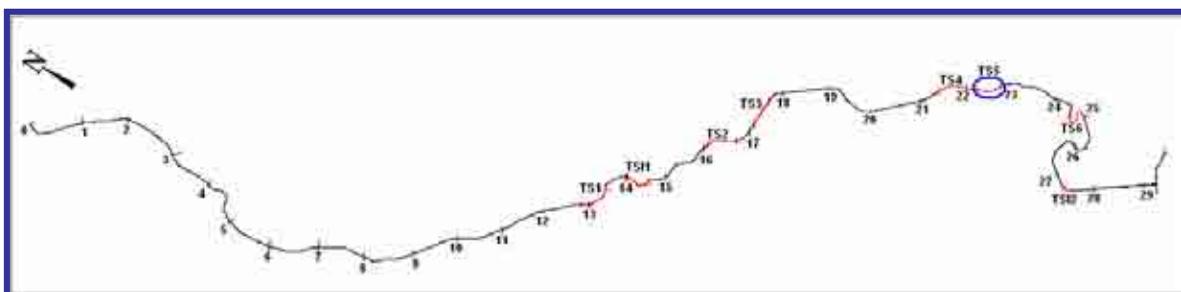
La compactación se realizó con un rodillo liso doble tambor el cual para obtener los niveles de densidad deseados utilizaba dos ciclos, además se ocupó dos rodillos neumáticos los cuales se empleaban hasta obtener la densidad requerida, la cual fue medida en terreno con densímetro nuclear.



Fotos N° 30 y 31: Proceso de compactación

### II.1.1.3.3) Plan de seguimiento

Se diseñó un plan de seguimiento con el objetivo de monitorear el comportamiento del AMC en condiciones climáticas extremas. Para ello se definieron inicialmente 5 tramos testigo, de los cuales dos serán empleados para contrastar el comportamiento entre las mezclas con asfalto multigrado y asfalto modificado con caucho. En las figuras 10 y 11, se muestran los tramos testigo.



Figs. 10 y 11 : Localización de los tramos testigo en el proyecto

Se optó por realizar un plan de seguimiento mediante inspección visual, control de IRI y resistencia al deslizamiento como mínimo dos veces al año, la primera, terminado el invierno, entre agosto y septiembre y la segunda en pleno período de verano entre enero y febrero. Por falta de recursos, no se consideró en el seguimiento la determinación del envejecimiento de la carpeta, reconociéndose sin embargo que es una variable importante de considerar. La inspección visual se realizará aplicando el protocolo SHRP – 338. para el control del IRI se ejecutará con el equipo Walking Prolifer y para la resistencia al deslizamiento, el Péndulo Británico.

Se seleccionó dentro del proyecto un tramo de comparación con consideraciones geométricas, ambientales y de tráfico similares al tramo de prueba y de igual longitud. Este se designó como TS4. el tramo de prueba en donde se empleó el asfalto caucho, se designó como TS5. En la tabla II.8 se muestran las características generales de los tramos testigo seleccionados y en las figuras 10 y 11, los tramos testigo seleccionados para contrastar el comportamiento entre ellos.

**Tabla II.8. Características geométricas de los Tramos Testigo**

<b>Criterio</b>	<b>Descriptor</b>	<b>TS4</b>	<b>TS5</b>
Geométrico	Peralte (%)	3.0	7.5
	Radio (m)	480	170
	Pendiente (%)	1.35	3.47
Tráfico	Ejes equivalentes Acumulados de diseño	767.405	767.405
Tipo de mezcla	Mezcla	Multigrado	Asfalto Caucho
	Densidad Marshall (kg / m <sup>3</sup> )	2257	2177
	% AMC	5.7 +/- 0.3	7.1 +/-0.3
Suelo de fundación	CBR (%) (Valor promedio)	11.5	11.5

Toda la información generada en el seguimiento, es almacenada en el Sistema de Información Geográfica de la Dirección Regional de Vialidad, con el cual es posible mantener actualizada la información y mantener una historia de datos que permitan hacer cruces de información y análisis.

## **II.1.2) Aplicaciones del “Asfalto – Caucho” en otras partes del mundo**

### **II.1.2.1) Aplicación en Argentina**

Por una inquietud del gobierno de la Ciudad de Buenos Aires, Autopistas Urbanas S.A. y del CEAMSE (Cinturón Ecológico Área Metropolitana-Sociedad del Estado) se presentó la posibilidad de realizar una prueba piloto empleando caucho molido de neumáticos en desuso como material componente de mezclas bituminosas. Los tramos experimentales se materializaron en un sector de la avenida Rivadavia en la ciudad de Buenos Aires.

Con el aporte brindado conjuntamente por el Laboratorio de Pavimentos e Ingeniería Vial de la Universidad Nacional de La Plata (La PIV) y Repsol YPF, la iniciativa se concretó a finales del mes de septiembre. Esta experiencia persigue verificar la factibilidad de adoptar esta tecnología en el medio urbano, cuantificando además las posibles mejoras derivadas de la incorporación del caucho molido a las mezclas asfálticas.

### **ANTECEDENTES**

En los últimos años, la búsqueda de soluciones efectivas a la disposición de los neumáticos desechados se ha ido intensificando. Este punto obedece en gran parte al crecimiento del parque automotriz y a la falta de un programa de recuperación de este tipo de residuo, circunstancias éstas que combinadas dan origen a uno de los problemas medioambientales más graves en todo el mundo.

Para contar con un orden de magnitud consideremos algunos ejemplos. En el Reino Unido se desechan 25 millones de neumáticos al año, mientras que en Estados Unidos dicha cifra asciende a 250 millones. En lo referente a España, por año se generan unas 250.000 toneladas de neumáticos usados de las cuales sólo un 20 % son tratadas para su reutilización, mientras que el 80 % restante van a parar a los basurales.

La realidad Argentina, no escapa a las situaciones antes nombradas ya que diariamente se vuelcan en los basurales de los alrededores de la ciudad de Buenos Aires una gran cantidad de neumáticos usados, motivando a las autoridades a buscar una solución a esta problemática.

La formación de este tipo de basureros trae aparejado problemas característicos como:

- ❖ Ocupación de grandes volúmenes.
- ❖ Contaminación de zonas naturales.
- ❖ Contaminación de suelos y napas.
- ❖ Posibilidad de incendio (con la emanación de gases tóxicos que ello implica).
- ❖ Proliferación de roedores e insectos.

Ante este panorama, una de las técnicas actuales de reutilización del caucho, básicamente mecánica, consiste en la trituración del mismo dando origen a un material de granulometría fina el cual se incorpora dentro de las mezclas asfálticas con el objetivo de mejorar ciertos aspectos tales como susceptibilidad térmica, comportamiento elástico, resistencia a fisuración por fatiga y resistencia al envejecimiento.

Esto obedece en gran parte al hecho de que los neumáticos presentan dentro de sus componentes varios tipos de polímeros tales como SBR y SBS que, juntamente con el negro de humo, contribuyen al mejoramiento de las propiedades mencionadas.

El grado de aporte de la incorporación del caucho molido en la mejora de propiedades depende de numerosos factores dentro de los cuales podemos mencionar: la tecnología de la incorporación (vía seca o vía húmeda), naturaleza del caucho, granulometría del mismo, dotación y, para el caso de incorporación por vía seca, el tiempo de digestión.

#### **EXPERIENCIA: TRAMO DE PRUEBA**

En esta primera etapa se comunican los ensayos y estudios previos efectuados y la experiencia durante la elaboración y puesta en obra de las mezclas asfálticas. En una futura comunicación se complementarán los estudios y alcances logrados en esta prueba piloto.

El sector donde se desarrolló el tramo experimental se encuentra sometido a solicitudes bastantes particulares ya que por el mismo circulan una gran cantidad de autobuses de línea. Esto significa, si bien el tránsito no es pesado, grandes solicitudes

tangenciales debidas al frenado y arranque de los vehículos como así también altos porcentajes de cargas estáticas en las zonas de las paradas.

La superficie de rodamiento existente consistía en una carpeta asfáltica deteriorada, la cual fue fresada con anterioridad a la construcción del tramo de prueba. El riego de liga entre la vieja estructura y la nueva carpeta se efectuó a partir de una emulsión convencional de corte rápido.

Para la construcción del tramo experimental se emplearon cuatro mezclas asfálticas diferentes: dos de ellas elaboradas con caucho molido (1% en peso respecto de la mezcla) mientras que las dos restantes, a modo de referencia, solo poseían los cementos asfálticos bases.

Los ligantes utilizados fueron los siguientes:

- ❖ Cemento asfáltico convencional del tipo CA-20 (normativa IRAM 6835).
- ❖ Cemento asfáltico aditivado con asfaltita.

La forma en la cual se incorporó el caucho de neumáticos en desuso a las mezclas asfálticas fue, en ambos casos, por vía seca.

La planta utilizada para la elaboración de las mezclas en cuestión es del tipo discontinua y se encuentra ubicada en San Francisco Solano, en las afueras de la Capital Federal. Cabe acotar que en las dos mezclas asfálticas aditivadas con caucho molido se respetó un tiempo mínimo de digestión de 2 horas, tiempo éste que, aproximadamente, transcurría durante el transporte de la mezcla desde el lugar de elaboración hasta el lugar de colocación de la misma.

La construcción de los tramos experimentales se llevó a cabo los días 19 y 20 de septiembre del corriente año. La colocación de la carpeta se efectuó entre las 21 y 24 horas, aproximadamente por cuestiones operativas. Durante la colocación del concreto asfáltico en la primera jornada, se verificaron lloviznas de intensidad variable, que trajeron varias complicaciones, sobre todo en lo referente a las temperaturas de compactación, De todos modos los testigos extraídos del tramo no evidenciaron bajas importantes en las densidades logradas.

La determinación del contenido de ligante a utilizar en las mezclas asfálticas se realizó de acuerdo al método Marshall, mientras que para la determinación de la dotación del caucho como también para la estimación del tiempo de digestión, se utilizó el ensayo de inmersión-compresión detallado en la normativa española y se tomaron en cuenta las recomendaciones formuladas por el Dr. Juan Gallego en su trabajo de tesis referido a este tipo de mezclas.

Actualmente se está llevando a cabo un estudio reológico de los ligantes recuperados como así también un análisis de las propiedades fundamentales de los cuatro concretos asfálticos en estudio, tales como:

- ❖ Modulo dinámico (rigidez a bajas y altas temperaturas).
- ❖ Resistencia mecánica (ensayo de tracción indirecta compresión diametral).
- ❖ Deformaciones permanentes (wheel tracking test o ensayos triaxiales).
- ❖ Fisuración por fatiga (leyes de fatiga).

De esta manera se busca cuantificar la influencia de la adición de caucho, no sólo sobre las propiedades de los ligantes sino también sobre las características fundamentales de las mezclas con ellos elaboradas.

## **II.1.2.2) Aplicación en España:**

### **II.1.2.2.1) Introducción**

Actualmente en España, como ocurre en los demás países avanzados, el estudio sobre las posibilidades de utilizar los residuos, es uno de los objetivos de carácter medioambiental prioritario para la investigación científica y técnica. Por ello, es necesario analizar los distintos tipos de residuos, el volumen disponible, las posibilidades técnicas, la repercusión económica, las limitaciones de uso y las precauciones que requiere su empleo. Además es conveniente buscar para cada residuo, el mejor aprovechamiento entre los usos posibles, a fin de obtener el mayor valor añadido.

Mientras que con fecha 31/10/02 la Dirección General de Carreteras ha emitido la Orden Circular 5 bis/02 sobre las condiciones para la adición de polvo de neumáticos usados en las mezclas bituminosas, en la que expresa lo siguiente:

“En las obras públicas en que su utilización sea Técnica y económicamente viable, se dará prioridad a los materiales procedentes del reciclaje de neumáticos fuera de uso. En estos casos se exigirá la inclusión de estos requisitos en los correspondientes Pliegos de Prescripciones Técnicas” y más adelante añade “en las obras en las que la utilización del producto resultante de la trituración de los neumáticos usados sea técnicamente y económicamente viable se dará prioridad a estos materiales”.

#### **II.1.2.2.2) Metodología del proceso de fabricación**

Para definir el método para la fabricación de mezcla, se estableció un plan de trabajo, según los siguientes criterios de mezcla y maceración:

- ❖ Mezcla sin caucho fabricada a 150 °C y a continuación compactada. (de referencia).
- ❖ Mezcla con 1 % de caucho, fabricada a 150 ° C y a continuación compactada.
- ❖ Mezcla con 1 % de caucho, calentamiento de los áridos a 150 ° C, maceración de los áridos y el caucho durante dos horas, y a continuación del periodo de maceración adición de betún y compactación.
- ❖ Mezcla con 1 % de caucho fabricación de 150 °C, maceración de la misma a 150 °C durante 2 horas y a continuación la compactación.
- ❖ Mezcla con 1 % de caucho fabricación de 150 °C, maceración de la misma a 150 °C durante 2 horas, reamasado y a continuación compactación.

La fabricación se realizó con el 5 y 6 % de contenidos de betún sobre áridos, para la mezcla en blanco, sin caucho, y del 4, 5 y 6 %, para el resto de las dosificaciones. La curva de referencia fue una S-12, y el caucho empleado tenía una granulometría 0.5-1 mm.

En la representación gráfica, de la figura 12, se puede observar la evolución de la densidad, en las probetas Marshall, según el método empleado. Como criterio general, se observa que se produce, una evolución favorable tras un periodo de maceración, y que son más efectivos los métodos en los que se realiza un movimiento del material tras el periodo

de reposo en caliente. Como metodología de diseño, se optó por la realización de la mezcla mediante amasado y maceración posterior, si bien el proceso de obra esta ligado al proceso más efectivo, que consistente en un segundo reamasado, tras el periodo de maceración, como ocurre con el movimiento del material, que se produce en la puesta en obra, con los sinfines de la extendedora y posterior compactación. Por otro lado, la reacción del caucho se mejora con el aumento de la temperatura de trabajo, por lo que se recomienda trabajar a la máxima posible.

En este caso se diseñó con envueltas en torno a 175 °C, para los áridos, y la temperatura del betún próxima a los 160 °C.

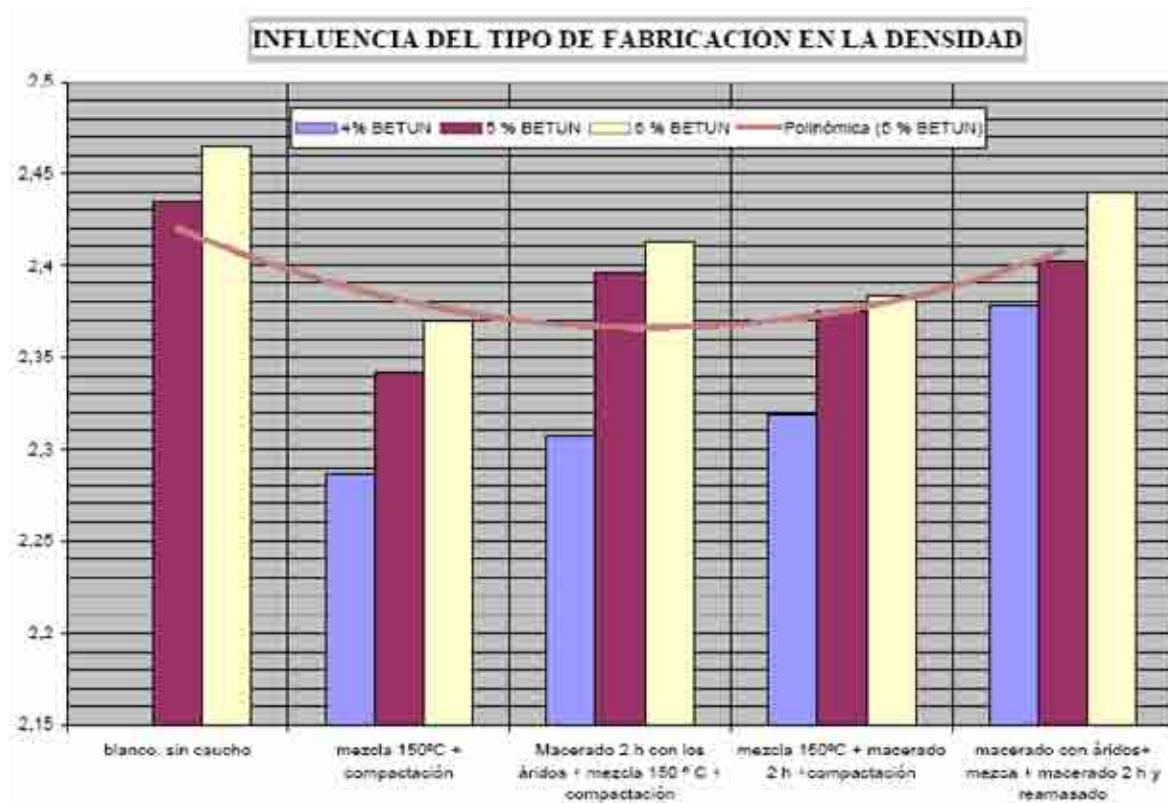


Fig. 12: Influencia del tipo de fabricación en la densidad.

### II.1.2.2.3) El proceso de diseño de un aglomerado con polvo de caucho

El proceso de diseño del aglomerado con del polvo de caucho incorporado, no difiere mucho con respecto al método empleado para obtener las fórmulas de trabajo habituales de un aglomerado convencional, salvo la determinación del tiempo de reacción.

- **Caracterización de materiales: Áridos, Betún, Caucho**

#### **Los Aridos:**

Inicialmente se trabajo con árido corneano procedente de la cantera situada en la localidad de Guijuelo (SALAMANCA), aunque debido a la elección del sitio para construir el tramo de prueba, se pasó a utilizar un árido cuarcítico de la GRAVERA que la empresa tiene situada en CASTRAZ (SALAMANCA).

#### **El Betún:**

El ligante empleado corresponde a betún convencional del tipo 60 / 70 procedente de la refinería de la Rábida, con una penetración a 25 °C de 66, punto de reblandecimiento de 49.8 y fragilidad fraass de (-)13. El resto de parámetros de caracterización cumple con la normativa en vigor.

**El Caucho:** El caucho empleado en el estudio de la fórmula de trabajo procede de la empresa RENEAL, con una granulometría 0-0.5 mm, y que corresponde al proceso de reciclado de ruedas de neumático procedentes de camiones y turismos.

#### **II.1.2.3) Tramo de Obra, localización y descripción del tramo**

El tramo experimental se encuentra en una carretera de La Diputación de Salamanca, que une la localidad de Castraz, con la CN-620, por donde han pasado los materiales necesarios para la ejecución de la Autovía construida por la UTE YELTES, mas el suministro de materiales para otras obras menores, desde la planta de PAS,S.L. por lo que se ha verificado que en los primeros 12 meses desde su puesta en servicio, han pasado mas de 3.000.000 Tm. En este tramo, se realizó un ensanche de calzada con Grava Cemento y se ha reforzado el firme con una capa base, tipo G-20 de 7 cm. y otra capa de rodadura, tipo S-12 en un espesor de 5 cm.

Para establecer una relación sobre el comportamiento de la adición de caucho, respecto a una mezcla convencional se ha zonificado la obra en tramos de 500 m, y se extendió de forma alterna, tramos de S-12 con 1% de caucho con tramos con S-12 convencional. En La figura 13, se presenta el esquema de la zonificación establecida.



Fig. 13: Esquema de la zonificación establecida.

#### II.1.2.4) Controles realizados sobre el tramo experimental

##### II.1.2.4.1) Controles realizados durante la construcción de la obra

Durante la ejecución del tramo experimental se han tomado muestras de aglomerado para verificar si se cumplían los criterios previstos en el diseño. La caracterización básica se ha realizado mediante los ensayos clásicos para la determinación del contenido de betún, el Marshall, el ensayo de Inmersión-Compresión y pista de laboratorio. Los datos de control obtenidos durante la obra, se indican en la tabla siguiente:

Tabla II.9: Datos obtenidos en el ensayo de Inmersión-Compresión

CONCEPTO	MEDIA	DESV. TÍPICA
Betún sobre Áridos (%)	5,34	0,04
Densidad Marshall (g/cm <sup>3</sup> )	2,31	0,01
Estabilidad Marshall (KN)	17,78	0,64
Deformación Marshall (mm)	2,89	0,09
Huecos en Áridos (%)	16,36	0,43
Huecos en mezcla (%)	4,9	0,42
Resistencia a C. Simple Mpa	4,09	0,01
Resistencia Conservada I-C (%)	96	4,00
Deformaci. en Pista 105-120 min (10 <sup>-3</sup> mm/min)	10,92	1,12

Los resultados obtenidos durante la construcción de la obra, arrojaron valores coherentes con los obtenidos en los ensayos previos realizados en el laboratorio.

#### **II.1.2.4.2) Ensayos de control una vez finalizada la obra y puesta en servicio**

También se ha realizado un seguimiento, sobre una serie de testigos extraídos y analizados por el Laboratorio del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Ministerio de Fomento, (CEDEX), mediante los que se verifica que la mezcla utilizada se corresponde con una mezcla Tipo S-12 con un 5,1 % sobre áridos de B 60/70 , a la que se le incorporó por vía seca un 1 % s/a de caucho triturado con un tamaño máximo de 0,4 mm.

**El Ligante:** Se extrajo el ligante tanto de los testigos como de la mezcla sin compactar, dando resultados similares en ambos casos con una penetración de 36 x 0,1 mm y punto de reblandecimiento en torno a 62 °C. En ambos casos se obtuvo un valor de recuperación elástica del 15 % lo que indica la presencia de caucho en el ligante.

**Testigos:** Se extrajeron testigos de los tramos fabricados con caucho y de los tramos fabricados de forma convencional, de 100 mm y 300 mm de diámetro.

**Densidades:** Las densidades medias en la zona con caucho son menores (2,214) que las obtenidas en los testigos de mezcla convencional (2,270).

**Contenido de ligante:** Los contenidos de ligante obtenidos son similares en ambas mezclas, 5,46 % sobre áridos en la mezcla con caucho y 5,42 en la convencional.

**Pista de laboratorio:** Los resultados medios obtenidos en los testigos de mezcla con caucho son bastante inferiores (11,0  $\mu\text{m}/\text{min}$ ) a los obtenidos en los de la mezcla convencional (22,8  $\mu\text{m}/\text{min}$ ).

**Módulos (Cooper):** Los módulos de las testigos de ambas mezclas, medidos a 5 y 25 °C, son similares, siendo ligeramente superior el de la mezcla con caucho (1680 frente a 1614 MPa a 25 °C y 9010 frente a 7920 MPa a 5 °C).

### II.1.2.4.3) Ensayos comparativos de Ruidos

Para verificar el comportamiento con respecto al ruido que produce la interacción de los neumáticos con este tipo de aglomerado, se utilizó el Método del Micrófono Fijo, situado a 7,5 m del eje del vehículo y a 1,2 m de altura sobre el suelo, según la norma ISO-362.

**Tabla II.10 y II.11: Estudio de comportamiento con respecto al ruido.**

MEDIDAS SOBRE CAMION				
VELOCIDAD		50,0	70,0	90,0
CAUCHO	1--1	71,1	83,4	86,8
				84,6
	MEDIA C-1	71,1	83,4	85,7
	2--1	75,1	78,0	83,3
	2--2	77,2	78,2	82,6
	MEDIA C-2	76,2	78,1	83,0
	MED. CAU. (T)	73,6	80,8	84,3
SIN CAUCHO	1--1	79,8	85,2	84,9
	1--2	78,9	83,9	86,1
	MEDIA SC-1	79,4	84,6	85,5
	2--1	68,7	82,1	84,6
	2--2 (*)	82,5	82,5	85,6
	MEDIA SC-2	75,6	82,3	85,1
	MEDIA S-C (T)	77,5	83,4	85,3
DISMINUCIÓN MEDIA DE RUIDO		3,8	2,7	1,0

MEDIDAS SOBRE COCHE				
VELOCIDAD		50,0	70,0	90,0
CAUCHO	1--1	62,3	70,6	74,8
			67,9	74,2
	MEDIA C-1	62,3	69,3	74,5
	2--1	62,5	67,8	71,9
	2--2	62,9	67,2	68,9
	MEDIA C-2	62,7	67,5	70,4
	MED. CAUCH	62,5	68,4	72,5
SIN CAUCHO	1--1	68,4	74,4	76,9
	1--2	66,8	71,8	77,4
	MEDIA SC-1	67,6	73,1	77,2
	2--1	66,2	71,9	75,1
	2--2	65,3	71,4	69,4
	MEDIA SC-2	65,8	71,7	72,3
	MEDIA S-C (*)	66,7	72,4	74,7
DISMINUCIÓN MEDIA DE RUIDO		4,2	4,0	2,3

La medición del ruido total emitido por el paso de un vehículo, en este caso se realizó con un camión tipo Dumper y con un vehículo liviano, lanzados a distintas velocidades, cuyos valores se registran en las tablas II.10 y II.11, en donde se puede apreciar las diferencias correspondientes, entre los dos tipos de aglomerados.

### II.1.2.a) Ventajas y beneficios

La carretera puede albergar en sus bases asfálticas buena parte del caucho contenido en los neumáticos en desuso. Existen varias tecnologías disponibles para ello: vía húmeda con betunes de alto contenido de caucho, vía húmeda con betunes almacenables y vía seca.

La fabricación de betunes de alto contenido de caucho se lleva a cabo mediante unidades móviles que se estacionan en la planta de fabricación de mezclas bituminosas, toman el betún de los tanques de la planta, lo modifican y insertan de nuevo en la planta.

De este modo el régimen de trabajo durante la fabricación de mezcla bituminosa es similar al que se sigue con mezclas bituminosas convencionales y no añade ningún trabajo adicional al personal de la planta.

Las mezclas fabricadas con betunes de alto contenido de caucho pueden incorporar entre el 8 y el 10% de ligante sobre el peso de los áridos, lo que unido a las características del ligante le confieren una excelente resistencia a las deformaciones plásticas (roderas), a la fatiga, a la reflexión de fisuras, a la desenvuelta por acción del agua, y al envejecimiento.

Las propiedades que otorga el caucho al asfalto, no es posible adquirirlas con otros ligantes del mercado, puesto que contenidos similares, harían la mezcla bituminosa propensa a las deformaciones plásticas.

Se han medido descensos del nivel de ruido de entre 6 y 9 dB, al recrecer un pavimento de losas de hormigón con mezclas fabricadas con betunes de alto contenido en caucho, en una carretera, resultando así mezclas de baja sonoridad. Ello las hace muy interesantes en entornos urbanos y semiurbanos.

De acuerdo a los análisis realizados en los laboratorios de distintas partes del mundo, se puede establecer, de manera confiable, la metodología a seguir para mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad de las mezclas asfálticas utilizando caucho molido. Estas mejoras se traducen en un aumento en la vida útil del pavimento, lo que al ser complementado con un análisis beneficio-costos permite concluir sobre las bondades en el uso del caucho molido como mejorador de mezclas asfálticas. El caucho es obtenido de forma económicamente viable usando llantas desechadas las cuales deben ser molidas hasta obtener tamaños apropiados, resolviendo de paso el problema ambiental que estos generan al finalizar su vida útil; este caucho recibe el nombre de grano de caucho reciclado ó GCR.

## **II.2.- Energía a través del reciclaje de neumáticos.**

Otro de los destinos de los neumáticos en desuso es la valorización energética. Estos procesos se basan en la recuperación del valor energético del neumático. Para ello es necesario contar con instalaciones apropiadas que cumplan en sus procesos con la totalidad de requisitos medioambientales existentes, o sea, minimizando las emisiones a la atmósfera y la generación de cenizas.

En este sentido, es menester citar el gran poder calorífico contenido en los neumáticos, 7.000 a 8.000 Kcal/kg, que supera a muchas calidades de carbón, y a todos los componentes de los residuos sólidos urbanos, pero se sitúa por debajo del fuelóleo. Esto es consecuencia del alto contenido en compuestos hidrocarbonados en los polímeros de caucho, alcanzando composiciones básicas de más del 75 % en carbono.

Básicamente son tres los procesos térmicos que aceptan a los neumáticos usados:

**A) Termólisis y pirolisis controlada.** Son procesos basados en la descomposición, despolimerización y craqueo del caucho al someterlo a altas temperaturas. Si el aporte energético es externo se produce la termólisis, y si es interno por combustión del residuo, es la pirolisis. Se obtienen negro de carbono, aceites bituminosos, coque y gases, que pueden ser empleados como materia prima o combustibles, por lo que puede considerarse también un proceso de reciclaje.

**B) Incineración con recuperación de energía.** En instalaciones diseñadas al efecto o como sustituto, triturado, del carbón, es frecuente el empleo de neumáticos usados en centrales térmicas para cogeneración eléctrica. La incineración a más de 1.000 °C destruye completamente el neumático, y minimiza las emisiones de dioxinas y furanos.

**C) Incineración en cementeras,** donde se emplea en dos puntos, como combustible en los hornos o en las torres de enfriamiento. Como resultado de la combustión la fracción metálica se incorpora al "clinker", el azufre a la cal y las cenizas a la escoria. Todo ello garantiza la total eliminación del neumático.

### **II.2.1.- Métodos para obtener gas y energía eléctrica a partir de neumáticos reciclados.**

El proceso de incineración con recuperación de energía no es un verdadero proceso de reciclado, si se entiende como tal que en él, partiendo de un material degradado cuyas características no son aprovechables, se llega, mediante una serie de transformaciones, a obtener un producto con ciertas propiedades que permitan su utilización de nuevo en la fabricación de diversos productos demandados por la sociedad.

En el proceso de incineración se impide la reutilización del residuo ya que se produce la combustión del material, de forma que la energía de los enlaces de sus moléculas se va convirtiendo sucesivamente en energía mecánica y eléctrica, con un rendimiento del proceso bastante bajo. El proceso de incineración con aprovechamiento energético pueda considerarse como una valorización aún cuando últimamente se cuestiona este criterio, calificando el tratamiento como de eliminación.

No obstante, como resultado del proceso se obtiene energía eléctrica, que es producto estandarizado y debido a la demanda, fácilmente comercializable, simplemente mediante conexión a la red de alta tensión.

- **Neumáticos convertidos en energía eléctrica:** Los residuos de neumáticos, una vez preparados, se pueden convertir en energía eléctrica utilizable en la propia planta de reciclaje o conducirse a otras instalaciones o distribuidoras.

El calor obtenido de la combustión, una vez liberado, provoca que el agua existente en la caldera se convierta en vapor a alta temperatura y alta presión hasta una turbina. Al expandirse mueve la turbina y el generador acoplado a ella producirá la electricidad, que se transformará de nuevo para su uso.

- **Plantas de gasificación de neumáticos:** En el proceso productivo se obtienen separadamente los componentes de los neumáticos: negro de humo, acero y aceite base, así como un importante volumen de gas, que una vez limpio, es utilizado como combustible en los grupos generadores que lo transforman en energía eléctrica.

## **Termólisis**

Consiste básicamente en someter el material polimérico del neumático a un gradiente térmico en torno a los 500°C en atmósfera exenta de oxígeno. Como consecuencia de las reacciones de degradación térmica, se producen roturas de los enlaces químicos (craqueo), generándose hidrocarburos de cadenas cortas, medias y largas, constituyendo la fase gaseosa y sólida, siendo la composición básica del gas H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, Hidrocarburos y Vapor de agua.

En cuanto a los sólidos, se trata de productos carbonosos, utilizables como materia prima combustible o materia prima de sustitución (materia filtrante, cargas minerales, etc).

El proceso de valorización por Termólisis de los neumáticos en desuso, se puede dividir en tres fases:

1. Preparación del residuo
2. Descomposición térmica
3. Generación energética

Cada una de estas etapas se unen constituyendo una secuencia que conforman el proceso de valorización integral, de forma que lo que se obtiene de una, constituye la materia prima de la otra. Así, en la etapa de preparación se trituran los neumáticos a una granulometría adecuada, sirviendo de materia prima para la etapa de Termólisis. El proceso de Termólisis descompone este material polimérico heterogéneo en gases y material carbonado impidiendo la aparición de elementos contaminantes al medio ambiente. Por su parte, el material carbonado y los gases obtenidos en la Termólisis se conducen a una cámara de combustión para generar vapor de agua y con este, energía eléctrica. Esta energía eléctrica es consumida en los equipos que componen el sistema de tratamiento con la posibilidad de comercialización de los excedentes.

### Diagrama de flujo de proceso

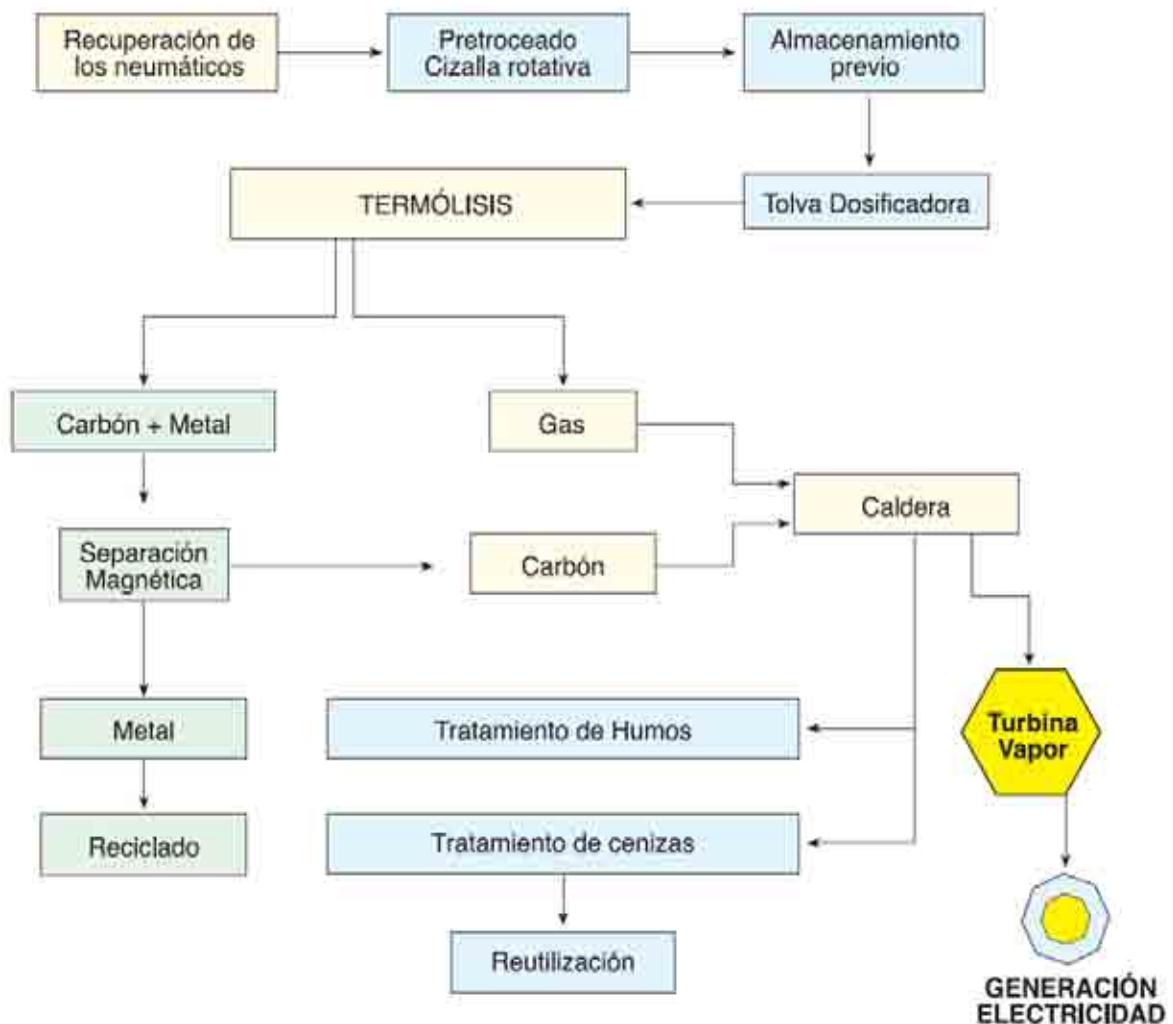


Fig. 14: Esquema del proceso de Termólisis

### Pirólisis

Consiste en producir la degradación térmica del material, en una atmósfera exenta ó pobre en oxígeno, produciendo gases y aceites utilizables como combustibles, quedando como residuo los componentes metálicos y el negro del carbono.

Este sistema de tratamiento presenta la ventaja de producir productos orgánicos de uso habitual en la industria, así como degradar totalmente el neumático. Por el contrario presenta el inconveniente de la separación de la gran cantidad de componentes producidos y la pequeña cantidad en la que se generan la mayoría de ellos.

Según el modo de transmisión de calor, los procesos de pirolisis se clasifican en dos categorías:

- **Autotérmicos:** El calentamiento de los neumáticos se realiza por contacto directo con una sustancia caloportadora (gas, aceite, esferas cerámicas, etc.). Este tipo de calentamiento es necesario cuando se pretende alcanzar la temperatura final del tratamiento en corto tiempo.
- **Alotérmicos:** Los neumáticos y el elemento calefactor están separados por una barrera física, como es la pared del reactor.

Si se analiza la velocidad de transmisión del calor o la presión de operación, la pirolisis se puede clasificar en:

- **Pirólisis lenta a presión atmosférica** que recibe también el nombre de carbonización, en el que la temperatura no supera los 400 – 500 °C. En este caso la pirolisis se realiza a vacío, los productos volátiles permanecen escasos segundos en el reactor, lo que evita reacciones de recondensación. Este proceso conduce a una mayor proporción de líquidos que el anterior, por esta razón recibe el nombre de destilación seca.
- **Pirólisis flash** en la que el tiempo de residencia de los gases en el reactor es generalmente inferior a medio segundo. Se trata de un proceso que requiere de una tecnología avanzada, ya que necesita alcanzar temperaturas del orden de los 1000°C, con una transferencia de calor que debe ser extremadamente rápida.

Por este método se producen fundamentalmente gases, por lo que puede hablarse de gasificación no oxidante.

Los procesos pirolíticos pueden llevarse a cabo en distintos reactores, siendo lo más utilizados:

- a) Horno vertical u horizontal
- b) Horno multipiso: Presenta la ventaja de poder recoger en cada piso distintas fracciones, según su temperatura de descomposición

- c) Reactor rotatorio
- d) Lecho poroso agitado
- e) Lecho fluidizado
- f) Tornillo de Arquímedes

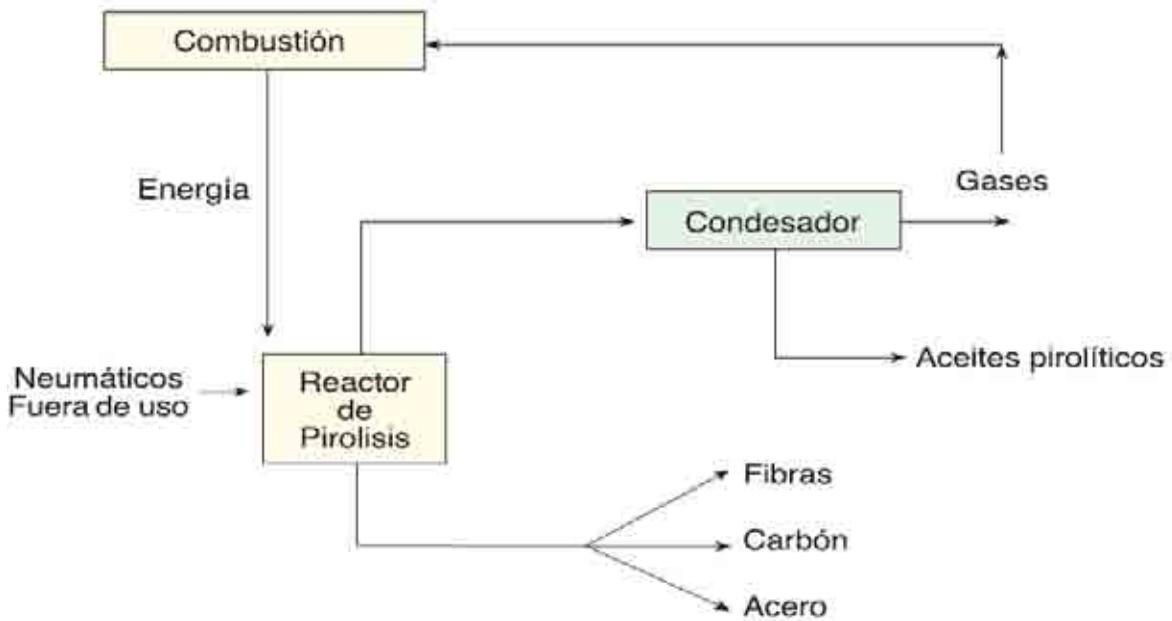


Fig. 15: Esquema del proceso de pirolisis

## Incineración

Es uno de los métodos más utilizados para la eliminación de neumáticos. Este sistema de tratamiento consiste en la combustión de los materiales orgánicos de los neumáticos en desuso a altas temperaturas, lo que obliga a utilizar revestimiento refractario de los hornos de gran calidad y por tanto elevado costo. Igualmente se exige para su aceptación por la normativa vigente un alto grado de depuración de los gases que se generan en el proceso. Presenta la ventaja de provocar un efecto exotérmico, que puede ser aprovechado como fuente de energía para ser utilizada en el propio proceso o en otros. Por último conviene recordar, que un neumático tiene un poder calorífico promedio de 7.440 Kcal/Kg y sus posibilidades de aprovechamiento son grandes, pudiéndose utilizar en gran cantidad de instalaciones siempre que cumplan con las exigencias técnicas y de autorizaciones administrativas que marca la normativa en vigor.

## Proceso de Incineración

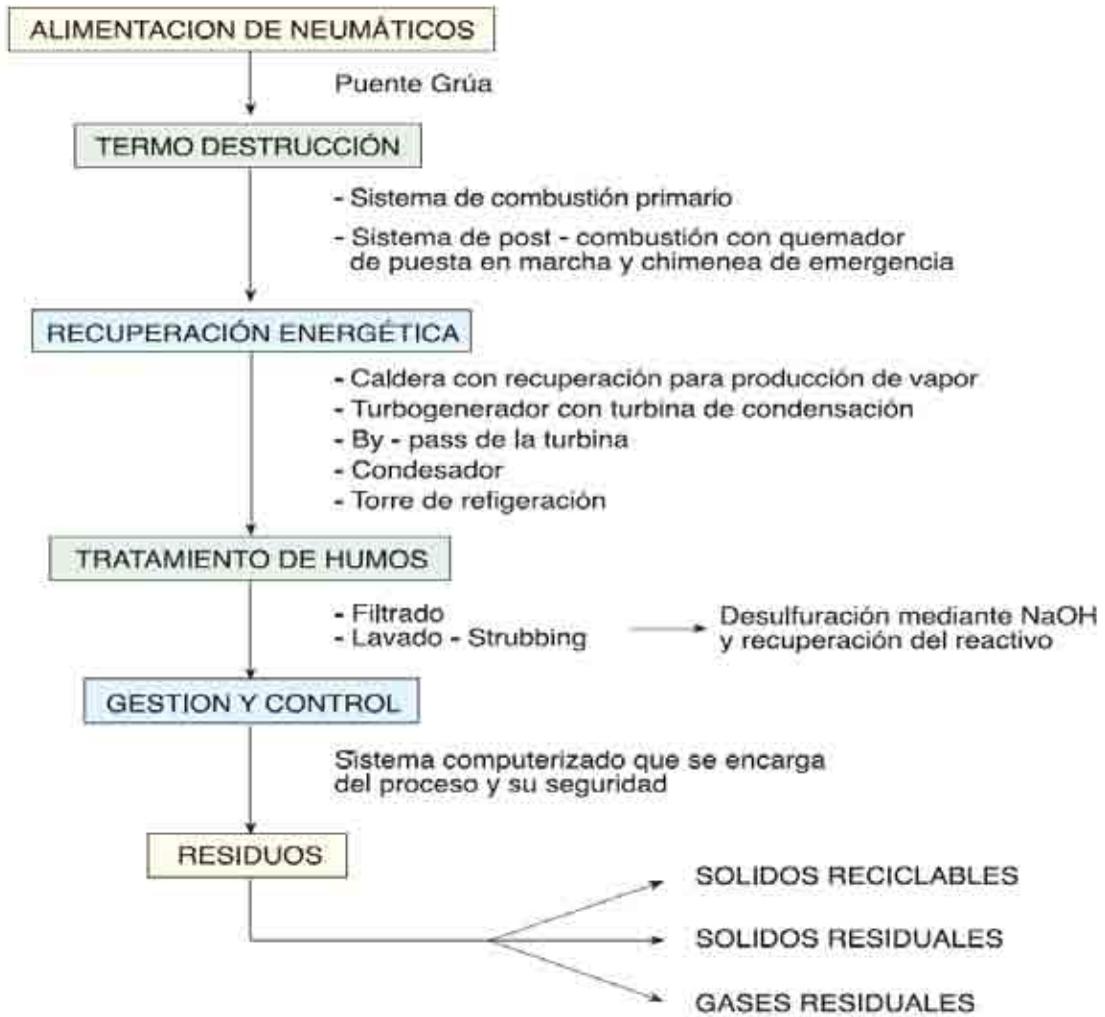


Fig. 16: Esquema del proceso de incineración.

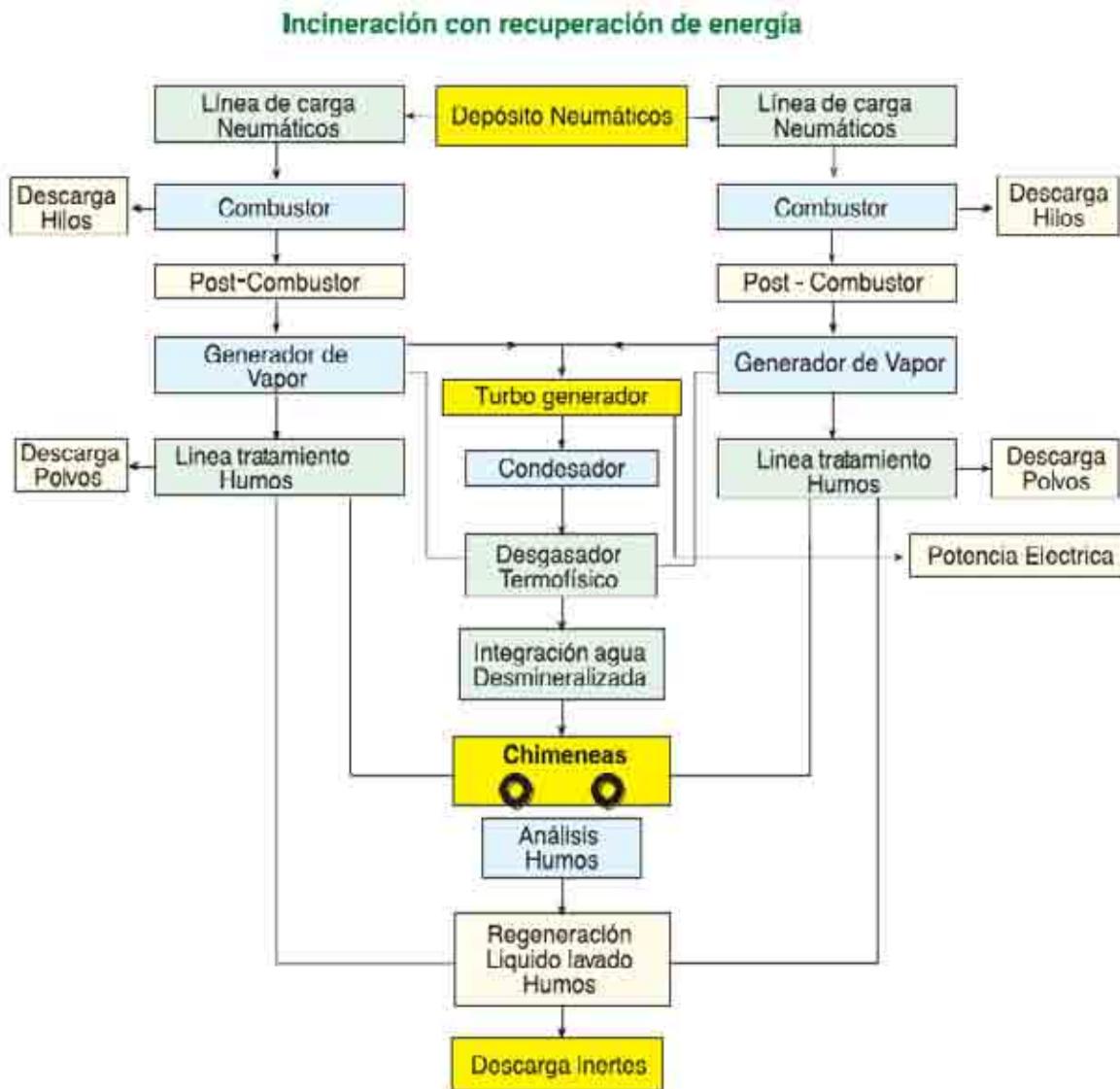


Fig. 17: Proceso de incineración con recuperación de energía

En el proceso de incineración se generan a su vez residuos que podrán ser reciclados o no:

**- Sólidos reciclables**

- Alambres de acero
- Polvo rico en ZnO provenientes de los filtros de mangas

**- Sólidos residuales**

- Fangos constituidos básicamente de  $\text{CaSO}_4$  ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y  $\text{CaSO}_3$

**- Gases residuales**

- Humos filtrados, lavados y post-recalentados

## II.2.2.- Uso de neumáticos reciclados en la producción de cemento

*“Cada neumático utilizado como combustible permite ahorrar entre 10 y 12 kilos de carbón o bien 27,5 litros de petróleo” (José Manuel Navaza Dafonte, Profesor del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Santiago de Compostela)*

El cemento es un material básico para la edificación y la ingeniería civil. Su principal propiedad es la de formar masas pétreas resistentes y duraderas cuando se mezcla con áridos y agua. El endurecimiento (fraguado) de la mezcla ocurre transcurrido un cierto tiempo desde el momento en que se realiza la mezcla, lo que permite dar forma (moldear) la piedra artificial resultante. Estas tres cualidades (moldeables, resistentes, duraderas) hacen que los productos derivados del cemento tengan una gran aplicación en la construcción de infraestructuras y otros elementos constructivos.

En el proceso de fabricación de cemento, pueden diferenciarse tres etapas básicas:

**a) Obtención y preparación de materias primas** (caliza, marga, arcilla) que son finamente molidas para obtener crudo.

**b) Cocción del crudo** en un horno rotatorio hasta temperaturas de 1.450 °C (2.000 °C de temperatura de llama) para la obtención de un producto semielaborado denominado **clínker** de cemento.

**c) Molienda conjunta del clínker con otros componentes** (cenizas volantes, escoria, puzolana, yeso) para obtener el **cemento**.

La fabricación de cemento es una actividad industrial intensiva en energía, térmica para la cocción de las materias primas; y eléctrica para las operaciones de molienda, manipulación de materiales e impulsión de gases. Los costes energéticos se sitúan alrededor del 30% de los costes de producción.

El Aprovechamiento energético y materia prima para hornos en la industria cementera, tiene un primer fundamento, y es el potencial calorífico de los neumáticos usados, lo que permite que sean utilizadas como sustitutos del carbón. Además, tiene la posibilidad de suplir un porcentaje del hierro utilizado en el proceso, gracias al contenido de acero en el neumático.

El producto final que se obtiene es energía y cemento. A nivel mundial es una medida existente.

El caucho, durante el proceso de vulcanización, sufre reacciones químicas que son irreversibles, por lo tanto, no es posible utilizar el caucho reciclado en la fabricación de neumáticos nuevos. Esta es la principal causa por la cual miles de toneladas de neumáticos son almacenadas anualmente en vertederos municipales o en vertederos ilegales. El problema no es menor, pues recientes estudios en materia de descomposición de materiales indican que los neumáticos, además de no ser biodegradables, afectarían el proceso de la basura, que sí lo es, y por este motivo están siendo rechazados en los vertederos. En nuestro país no existe aun una política clara en orden a establecer un mecanismo que permita tratar el problema. Esto, junto con el hecho de que no existen alternativas económicamente rentables de reutilización, como por ejemplo un mercado para productos derivados del caucho, tales como pisos y superficies o adiciones de goma para mejorar el asfalto en carreteras (lo cual podría eventualmente ser una solución a esta problemática) hacen que el problema persista en el tiempo.

Siguiendo el ejemplo de otras naciones, más avanzadas en el tema, comenzamos a vislumbrar las ventajas del reaprovechamiento energético de desechos como una alternativa rentable de sustitución de los combustibles tradicionales, lo que a su vez se traducirá en una mejor calidad de vida y reducción de desechos, convirtiéndolos en materias primas para otros procesos.

En la búsqueda por una mayor competitividad comercial, la industria mundial del Cemento está quemando residuos como combustible alternativo en sus hornos, buscando reducir el costo de los combustibles tradicionales. Esta estrategia ha posibilitado la generación de empresas proveedoras que han hecho del reaprovechamiento energético de residuos un gran negocio, el que ha encontrado, además, la aceptación de las autoridades medioambientales con el argumento de que el reaprovechamiento energético de residuos combustibles es ecológico porque ahorra combustibles fósiles y recursos naturales.

La calcinación de las materias primas para fabricar el clínker (elemento fundamental en la producción del cemento) la cual se lleva a cabo al interior de hornos rotatorios, es el núcleo fundamental del proceso dentro de las plantas cementeras; el cual requiere de una gran cantidad de energía, suministrada por el combustible, que se inyecta al horno, y representa el mayor costo económico en la fabricación del cemento. Las altas temperaturas en los hornos y largos tiempos de residencia inherentes al proceso de fabricación del cemento, suponen un alto potencial para la destrucción de compuestos orgánicos, lo que posibilita la utilización de una amplia variedad de combustibles, subproductos de otros procesos industriales o derivados de residuos, tanto líquidos (aceites usados, solventes, residuos de destilación, etc.) como sólidos (neumáticos usados, residuos de madera, papel, cartón, plástico, lodos urbanos e industriales, etc.). Es por esto, que las plantas cementeras reúnen las condiciones necesarias para llevar a cabo una quema limpia de neumáticos desechados y aprovechar así su alto contenido calórico en reemplazo del petróleo o carbón.

La industria cementera en países como Estados Unidos o México ha adoptado la incineración de diversos residuos, tanto líquidos como sólidos, en sus hornos. Esta práctica ha recibido el visto bueno de las autoridades ambientales de diversos países. La "valorización energética", que podría servir tanto como alternativa ecológica a la dependencia continua de combustibles fósiles, como mecanismo idóneo para la eliminación de una amplísima gama de residuos no biodegradables, en particular de neumáticos desechados, puede convertirse en un negocio rentable tanto para proveedores como para las plantas cementeras.

Las principales barreras que han impedido generalizar la técnica del uso de neumáticos desechados en la industria cementera chilena son: primero, que para el caso en que se requiere el trozado previo de los neumáticos, las ventajas en los costos son claramente marginales frente a los combustibles tradicionales (carbón, coque, petróleo, gas, fuel-oil); y segundo, el hecho de que no se tienen antecedentes de la fiabilidad y volumen de los suministros de neumáticos desechados, lo cual trae consigo, un riesgo

asociado, en términos de la recuperación de la inversión en las modificaciones que resultan necesarias de practicar al horno rotatorio.

En diversos proyectos llevados a cabo, la industria cementera chilena ha demostrado estar particularmente preocupada por la disponibilidad de suministros continuos de neumáticos en cantidades suficientes y a precios razonables. Por lo general las empresas de cemento no desean involucrarse en la recolección de neumáticos, prefiriendo externalizar este servicio a un proveedor responsable de su recolección y entrega.

En este estudio se pretende determinar las posibilidades económicas de aprovechar un nicho de mercado inexplorado hasta la fecha, como es la recolección y la entrega de neumáticos desechados para abastecer a la industria cementera de un combustible alternativo de bajo costo, haciendo rentable, para un inversionista privado, invertir en una empresa de aseo industrial encargada de esta tarea. Cementos Bío Bío posee la ventaja comparativa frente a la competencia, de tener la capacidad de incinerar neumáticos enteros, gracias a la cámara de combustión secundaria (comúnmente llamada precalcinador) que posee en el horno de cemento de su planta Curicó. Esto, sumado al interés manifiesto de la empresa en estudiar el tema, justifica la realización de un estudio de estas características.

Dado que las posibilidades reales de obtener ganancias a partir de la venta de neumáticos desechados dependen del éxito que tendría un proyecto de combustibles alternativo en la industria cementera, consumidor final de este insumo, se examinarán a su vez, las distintas aplicaciones tecnológicas existentes en la actualidad para implementar esta técnica en los hornos rotatorios de las plantas de cemento, junto a las condiciones y repercusiones, tanto medioambientales como económicas, que traería consigo la implementación de este singular e innovador proyecto de aprovechamiento energético de residuos.

#### **a) Emisiones del horno debidas a la combustión de neumáticos desechados**

No existe ninguna teoría que permita identificar con exactitud el efecto en las emisiones causadas por el uso de neumáticos desechados en los hornos de cemento. Estos sólo pueden obtenerse por medio de una medición real durante un ensayo.

De acuerdo a la experiencia internacional, existen varios ensayos que permite estimar la tendencia esperada en el peor de los casos para cada una de las emisiones.

##### **➤ Óxidos de nitrógeno y otros compuestos nitrogenados**

La formación de  $\text{NO}_x$  es una inevitable consecuencia de la alta temperatura de combustión (llama del orden de  $2.000^\circ\text{C}$ ). Es formado principalmente por el aire de combustión ( $\text{NO}_x$  térmico). Si bien una parte del contenido de nitrógeno en los neumáticos podría teóricamente provocar la formación de  $\text{NO}_x$  combustible, este efecto es superpuesto por otras influencias más importantes como, por ejemplo, el tamaño de la llama. Además ésta posibilidad se ve reducida dado los menores contenidos de nitrógeno en el neumático frente al carbón.

##### **➤ Dióxido de azufre y otros compuestos sulfurosos ( $\text{SO}_x$ )**

El azufre entra en el proceso como componente de los combustibles y de las materias primas (en este caso, como sulfatos o sulfuros). El azufre que entra como sulfuro en las materias primas es parcialmente evaporado (~30%) en las primeras etapas del proceso, y emitido directamente a la atmósfera en su mayor parte. El resto del azufre que entra por las materias primas y el total aportado por los combustibles será capturado íntegramente en el clínker y no aparecerá en las emisiones.

En general, los hornos de vía seca, trabajando con materias primas no altas en azufre, no presentan problemas significativos de emisiones de  $\text{SO}_x$  y su generación se ve reducida por el uso de neumáticos desechados al contener estos, menores porcentaje que el carbón. La emisión de  $\text{SO}_2$  es influenciada en mayor grado por sulfuro volátil en la mezcla de crudo que por combustible alternativo. El total aportado por los neumáticos es capturado en el clínker y no aparecerá en las emisiones.

En general, los hornos de vía seca con intercambiador, trabajando con materias primas no altas en azufre, no tendrán problema significativo de emisiones de SO<sub>x</sub>.

➤ **Monóxido de carbono (CO)**

La combustión en el quemador secundario de neumáticos a menudo produce una emisión mayor de CO. Una elevada tasa de combustión y/o valores máximos de la tasa de alimentación (neumáticos enteros) puede provocar problemas al ingresar aire falso que haga bajar la temperatura en el precalcinador.

➤ **Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)**

La emisión de CO<sub>2</sub> se sitúa entre 800 y 900 Kg./t de clínker. Casi un 60% de esta emisión proviene del proceso de calcinación, y es por tanto inevitable. El resto, deriva de la combustión de los combustibles. La emisión de CO<sub>2</sub> en la combustión de los neumáticos representa un porcentaje bajo en relación al aportado por las materias primas. Su formación es inherente al proceso de calcinación, y es por tanto inevitable.

Cabe señalar, que los cambios de tecnología, la mejora de la eficiencia de los procesos de combustión ha reducido más del 30% las emisiones asociadas de CO<sub>2</sub> en los últimos 25 años.

➤ **Compuestos orgánicos (hidrocarburos)**

Por lo general, no es de esperar ninguna correlación frente a la incineración de neumáticos, sin embargo, mediciones con métodos sensibles pueden ser necesarias en el marco del proyecto. Pueden evitarse varios problemas desde el principio, si se dedica suficiente atención a perfeccionar la incineración a altas temperaturas y si los neumáticos se utilizan sólo en el quemador primario bajo condiciones de funcionamiento normales. Las innumerables mediciones realizadas para usar neumáticos desechados permiten concluir que la incineración de neumáticos no repercute en tales emisiones.

### ➤ **Metales y compuestos metálicos**

El proceso cementero tiene una gran capacidad para capturar los metales que entran con los materiales o los combustibles. Los metales son absorbidos en el clinker o en el polvo recogido en el filtro. Está ampliamente demostrado que el uso de combustibles alternativos como los neumáticos, no conduce a un incremento significativo de los metales en el cemento ni en el polvo del horno, y que tampoco se ven afectadas las emisiones cuando se limitan las entradas de los volátiles (el neumático tiene bajísimos contenidos de Cd y Tl, y no contiene Hg).

El moderno sistema de reducción de la emisión de partículas en los gases de la chimenea es garantía de la reducción de las emisiones de metales.

### **b) Regulaciones y permisos**

Para autorizar la puesta en marcha de este tipo de proyectos, la empresa de cemento deberá realizar además, numerosas pruebas y tests para certificar ante las autoridades medioambientales (Conama) los niveles de emisión de gases que la planta emita a la atmósfera.

La necesidad de obtener estos permisos sobre emisiones atmosféricas y los retrasos a la hora de aceptar las propuestas por parte de la autoridad, pueden ser factores que afecten negativamente al proyecto. Por eso debe recurrirse a terceros (empresa especializadas) para realizar estos tests con la mayor diligencia y experticia necesaria. Esto supone (aunque despreciables en relación a la inversión en tecnología) costos y operaciones adicionales para la empresa que deben considerarse y programarse oportunamente.

La estrategia de reducción de la emisión de partículas en los gases de la chimenea es garantía de la reducción de las emisiones de metales.

### **c) La tecnología adecuada para la quema de neumáticos**

Como dijéramos, los neumáticos, ya sean enteros o trozados, pueden utilizarse como combustibles alternativo en los hornos rotatorios de las plantas cementeras; la utilización de los neumáticos desechados no afecta negativamente al rendimiento ambiental o a la calidad del producto. Recordemos además que el contenido en nitrógeno, azufre y ceniza es menor en los neumáticos que en el carbón típico; por lo tanto reduce el nivel de emisiones de óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre, y la totalidad de sus cenizas son absorbidas en la estructura del clínker, en particular su contenido de acero, que proporciona hierro adicional al cemento.

Es de suma importancia prever el control de entrada en la fábrica para los neumáticos desechados, a fin de evitar suministros indeseables o incluso peligrosos (tamaños no utilizables, llantas metálicas y otros materiales). Si bien la empresa de recolección se encargará de esta tarea, resulta inaceptable el ingreso de neumáticos al horno sin un control visual de la entrega. Para esto la empresa de cemento debería contratar personal encargado de esta labor.

La forma en que los neumáticos pueden usarse como combustible alternativo, entero o trozado, depende de la configuración del horno. El horno de cementos Bío Bío en Curicó por ejemplo, tiene la ventaja de estar equipado con un precalcinador que puede quemar neumáticos enteros; los hornos sin precalcinadores solamente pueden usarlos previo trozado, normalmente con un tamaño que varía entre 5x5 cm y 10x10 cms.

#### **II.2.2.a) Ventajas y beneficios**

##### **Ventajas medioambientales y beneficios sobre el cemento**

En general, el uso de neumáticos desechados como combustible en hornos cementeros reduce la producción de óxidos de nitrógeno y dióxidos de azufre, en relación a los carbones normalmente utilizados en la fabricación del cemento, ya que tienen un menor contenido de éstos elementos.

El azufre del neumático se incorpora a la cal de calcinación en forma de carbonato cálcico, que es una materia prima en la fabricación del cemento. Toda la ceniza se absorbe

en la estructura cristalina del clínker; de esta forma, no hay residuos procedentes del neumático en los hornos de cemento. Un elevado contenido de cenizas provoca un menor flujo de materias primas que pasan por el precalentador del horno, aumentando la temperatura del gas de escape, con lo cual se tiene una mayor pérdida térmica. En este sentido los neumáticos presentan una nueva ventaja frente al carbón.

No se ha descrito ningún efecto adverso sobre la calidad del cemento por el uso de neumáticos desechados como combustible alternativo, y no se presentan complicaciones operacionales adicionales a lo tradicional en el proceso.

La única particularidad que eventualmente podría observarse, es que el clínker presenta una tonalidad un poco más oscura de lo habitual, producto de la impregnación de componentes no combustionados presentes en los neumáticos (acero reforzado).

Las pruebas realizadas en hornos de Estados Unidos demuestran que los controles existentes sobre las emisiones atmosféricas de los hornos deberían ser suficientes como para permitir el uso de neumáticos como combustible, cumpliendo con las normas sobre emisiones y siempre y cuando, el porcentaje de neumáticos no exceda el 30% del valor calorífico total del combustible utilizado en los hornos.

Como dato adicional, mencionaremos que el Instituto para la Protección Medioambiental del estado de Baviera (Alemania), llegó a la conclusión de que la mejor forma de eliminar neumáticos desechados era quemarlos en los hornos de cemento.

### **Ventajas económicas**

El factor principal a favor de la utilización de neumáticos usados como combustible es el precio que se paga por tonelada. Los neumáticos compiten con los combustibles convencionales, carbón y coque de petróleo. Las empresas de cemento estarían dispuestas a comprar neumáticos solamente a un precio menor con respecto a lo que pagarían por el combustible tradicional de equivalente poder calorífico; de esta forma, se generan ahorros en combustible que permiten recuperar los costos generados por las modificaciones a realizar en los hornos y en los sistemas de alimentación especiales para los neumáticos y los costos de las pruebas necesarias para conseguir los permisos en caso de ser requeridos.

En los hornos con precalcinadores como es el caso de Bío Bío, capaces de quemar neumáticos enteros, los aspectos económicos al usar neumáticos como combustible son alentadores, tanto para el horno como para los suministradores.

Para efectos de nuestro estudio, el neumático se comparará económicamente con el carbón, por tener éste, un nivel de emisión y poder calorífico similar, que hacen que el neumático desechado pueda competir con él.

Por otro lado si las empresas cementeras cobrasen una tarifa a las empresas por incinerar sus neumáticos de desecho (como es el caso en algunos países desarrollados en donde los derechos de eliminación ascienden incluso hasta los US\$ 200/ton) el uso de neumáticos como combustible alternativo sería altamente rentable. Sin embargo esta hipótesis será descartada en este estudio, por lo poco probable de su implantación en el corto plazo debido principalmente a la displicencia de parte de las autoridades nacionales para legislar en este sentido.

Se ha demostrado, en otros países, que las emisiones atmosféricas de los hornos no se ven afectadas adversamente por el uso de neumáticos como combustible alternativo. Sin embargo, la mayoría de los países requieren ensayos de combustión para los combustibles alternativos usados en los hornos de cemento. Estos ensayos para conseguir los permisos originan costos que deberán ser tomados en consideración.

En este estudio de costos, resulta decisiva la demanda por este combustible alternativo. Algunas plantas cementeras como Melón y Polpaico han manifestado su interés en estudiar el tema y analizar su implementación por medio de varios estudios relativos al reaprovechamiento energético de desechos tanto sólidos como líquidos. Según la opinión experta de los ingenieros de Cementos Bío Bío, el uso de neumáticos desechados en los hornos será una práctica común en el corto plazo, esto debido a las necesidades cada vez mayores por hacer más competitiva la industria en términos de costos y a su vez ahorrar combustibles fósiles frente a la inminente escasez de estos recursos.

Cementos Bío Bío (que ya ha instalado en la planta Teno modernos equipos para quemar combustible alternativo líquido) tendría la intención de estudiar la posibilidad de

llevar a cabo un proyecto de reaprovechamiento energético de neumáticos desechados que traigan como beneficio el reducir los costos en consumo de combustible.

### **II.3.- Pavimentos de caucho reciclado**

#### **II.3.1.- Pavimentos de caucho y sus aplicaciones**

##### **II.3.1.1) Pavimentos de caucho reciclado para jardines infantiles**

Los materiales duros como el cemento, asfalto o tierra comprimida resultan peligrosos ya que si un niño se cae de cabeza puede sufrir daños cerebrales, incapacidad permanente o incluso la muerte.

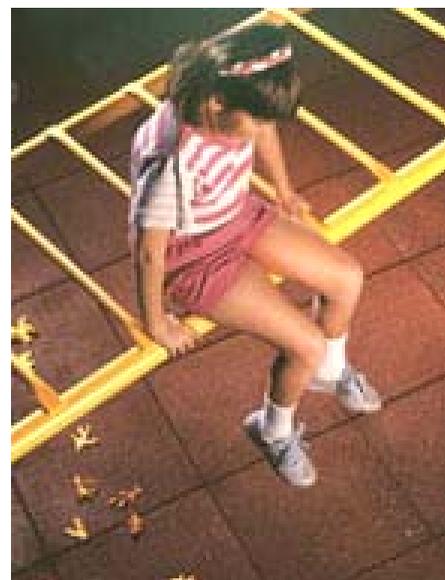


*Foto N°32: Pavimento de caucho reciclado en guardería infantil.*

La gravilla, la arena y la corteza picada ofrecen protección pero provocan ciertos problemas al requerir mantenimiento constante, riesgos sanitarios y un mayor peligro de daños en los ojos o ingestión accidental durante el juego.

La pavimentación de guarderías, jardines de infancia y, en general, zonas de juego infantil, requieren de unas prestaciones especiales respecto a la seguridad por caídas muy superiores a las de otros tipos de aplicaciones.

Para solucionar este requerimiento se han formulado las “baldosas elásticas de seguridad”, fabricadas a base de caucho reciclado y aglomerante de poliuretano, lo que le confiere una gran flexibilidad.



*Foto N° 33: Pavimento de caucho reciclado.*

Pueden colocarse adosadas unas a otras, sin ningún tipo de material de agarre, o pegarse al soporte con un adhesivo adecuado.

Las baldosas elásticas de seguridad también pueden ser utilizadas en otros campos de aplicación, ya sea en instalaciones deportivas en general, o como protección transitable de membranas impermeables.

Las losetas y piezas de caucho reciclado, son productos ecológicos, en los cuales aproximadamente el 90% de sus componentes son cauchos ya utilizados (neumáticos), los cuales son triturados y seleccionados para su posterior uso.



Estas losetas no contienen sustancias que sean perjudiciales para la salud: el ligante presente en la losetas está exento de CFC, PCB, Lindano y formaldehído.

Este producto, es adecuado para ser usado al aire libre.

*Foto N°34: Losetas de caucho reciclado*

Entre las ventajas que posee este producto, se cuentan:

- ✘ Amortiguación y absorción de impactos
- ✘ Suelo totalmente elástico
- ✘ Permeabilidad al agua (seca rápidamente sin dejar charcos)
- ✘ Acción antideslizante
- ✘ Acción Insonorizante
- ✘ Resistente a las condiciones climatológicas adversas
- ✘ Buena estabilidad dimensional

### ***Instalación:***

Las losetas de caucho reciclado anticáida se deben instalar en superficies duras, siendo superficies ideales para su instalación las de asfalto y hormigón entre otras.

Para su fijación solo serán necesarios puntos de adhesivo en algunas zonas de la instalación, debido a su peso elevado hace difícil su levantamiento pudiéndose instalar en ocasiones sin necesidad de adhesivos.

***Proceso de transformación:***

Para la fabricación de las piezas se ha trabajado con la utilización de diferentes adhesivos (poliuretano, epoxi, fenólica, etc.) y condiciones de trabajo (presión, temperatura y tiempo de ciclo). La formulación y las condiciones de proceso más adecuadas son las que se reflejan en las tablas II.12 y II.13.-

<b>Tabla II.12 - Formulación final</b>	
<b>FORMULACIÓN</b>	
<b>COMPONENTES</b>	<b>PARTES</b>
Granos de caucho de 4 mm.	100
Adhesivo poliuretano(componente A)	4
Adhesivo poliuretano (componente B)	1

<b>Tabla II.13 - Condiciones de trabajo óptimas</b>	
<b>CONDICIONES DE PROCESO</b>	
<b>VARIABLES</b>	<b>VALORES</b>
Presión de molde	0.5-1 bares
Temperatura del molde:	80°C
Tiempo de ciclo:	5-10 min.

***Fabricación de baldosas***

Las baldosas son piezas de caucho de geometría cuadrada de 500x500x30-40 mm. En las pruebas realizadas se ha observado la importancia del tipo de adhesivo, el tamaño de grano como su geometría, en este estudio se ha seleccionado una granza de 4 mm. de geometría alargada.

El sistema de dosificación debe asegurar la homogeneidad del material en toda la superficie del molde. La cantidad de material se calcula en base a la densidad de la pieza final, 0.973 gr./cc. siendo el gramaje variable en función del espesor de la pieza.

### ***Proceso de fabricación de mantas de goma***

Se han elaborado en condiciones de planta piloto unas mantas de las siguientes dimensiones: 1 metro de ancho, espesor: 6-8 mm y una longitud de 3 metros. El sistema de dosificación debe asegurar la distribución homogénea del material en toda la superficie del molde. La cantidad de material: 0.973 gr por cc. de volumen de pieza.

### ***Resultados y conclusiones***

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas II.14 Y II.15.-

<b>Tabla II.14.- Propiedades de las baldosas de goma.</b>	
<b>BALDOSA DE GOMA</b>	
<b>PROPIEDAD</b>	
Densidad (g/cc)	0.957
Resistencia y módulo a la compresión (Mpa) a 70% de elongación	6
Resistencia a la cizalla	
Permeabilidad al agua	Impermeable
Resistencia a la tracción (MPa)	2.32
Determinación de la elongación a tracción (%)	24
Resistencia al impacto a caída de bola	Sin alteración
Determinación de la estabilidad térmica	Estable de 20-200 °C

<b>Tabla II.15.- Propiedades de las baldosas de las mantas de goma</b>	
<b>MANTA DE GOMA</b>	
<b>PROPIEDAD</b>	
Densidad (g/cc)	0.957
Resistencia y módulo a la compresión (Mpa) a 70% de elongación	6
Permeabilidad al agua	Impermeable
Resistencia a la tracción (MPa)	2.32
Determinación de la elongación a tracción (%)	24
Resistencia al impacto a caída de bola	Sin alteración
Deformación remanente	70 °C, 72 horas 12.5 % 23 °C, 24 horas 3%
Determinación de la estabilidad térmica	Estable de 20-200 °C

En lo que respecta a las conclusiones, se pueden sintetizar de la siguiente forma.

- ✘ La materia prima (mermas de neumáticos) es abundante y barata, actualmente la mayor parte termina en vertederos. En Europa se han desarrollado equipos para el triturado del caucho, pero en el mercado español el desarrollo es, todavía, solo incipiente.
- ✘ Tras las pruebas realizadas, se puede afirmar que los productos finales resultantes de la aglomeración de caucho con resinas presentan unas prestaciones interesantes para múltiples aplicaciones.
- ✘ Por otra parte, el aprovechamiento industrial de las mermas supondrá la eliminación o reducción de estos residuos y por tanto la disminución o incluso la eliminación de los gastos de vertido, además de los posibles beneficios que podría generar su aprovechamiento. Además, se logrará eliminar el impacto medioambiental evitando posibles problemas ante nuevas normativas.
- ✘ La búsqueda de nuevos productos y sectores supondrá una diversificación y ampliación de la demanda del material reciclado.

### II.3.2) Alfombras de neumáticos reciclados



Las alfombras de neumáticos reciclados, de reciente creación fabricados a partir de neumáticos reciclados de vehículos y aviones, para crear impresionantes felpudos para entradas a inmuebles, pasillos, etc.

Poseen una alta acción antisuciedad, lluvia, nieve y barro son retenidos, siendo capaz de extraer la suciedad de los zapatos fácilmente.

*Foto N°35: Alfombra de neumáticos reciclados*

Reduce los gastos de mantenimiento y limpieza, garantizando un aspecto limpio y estético de sus estancias, su gran resistencia al tráfico intenso garantiza su perfecto estado a través del tiempo.

Su naturaleza lo hace apropiado para su instalación en exteriores gracias a su resistencia a cualquier agresión, como el agua, el sol y la luz.

Se instala sobre cualquier solera base (hormigón, madera, metal, caucho, etc.) limpia, seca, firme y plana, ya sea un foso para alfombras o enmarcado con un perfil.

Su instalación se realiza de forma fácil, rápida y duradera.

***Descripción:***

- ✘ Peso Total: 9780 g/m<sup>2</sup> +/- 5%
- ✘ Fabricación: 100 % caucho reciclado proveniente de neumáticos de vehículos y aviones.
- ✘ Grosor de las losetas: 12 mm +/- 0,5 mm
- ✘ Soporte: Soporte estabilizador de Nylon y adhesivo aplicado por calor
- ✘ Dimensiones de las losetas: 30,5 X 30,5 cm
- ✘ Colores: Diferentes gamas de grises, marrones y negros
- ✘ Instalación: Exterior: Cola de tipo Neopreno
- ✘ Interior: Emulsión acrílica
- ✘ En ocasiones no será necesario ningún tipo de adhesivo para su instalación
- ✘ Base a cubrir: En todas las superficies planas, limpias, secas.
- ✘ Mantenimiento: Cepillo y aspiradora, ocasionalmente será necesaria una limpieza en húmedo con detergente.

## Utilidades y casos prácticos

Este producto es ideal no solo como un eficiente agente limpiador de la suciedad del calzado de los usuarios, además actúa eficazmente en rampas de acceso a inmuebles como producto antideslizante.



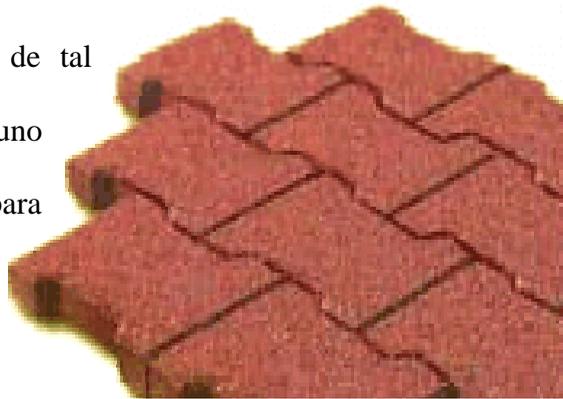
*Foto N° 36: Alfombra antideslizante de neumático reciclado.*

En la imagen tenemos un ejemplo de tal uso, debido a su superficie rugosa, actúa como un eficaz antideslizante, de gran utilidad para rampas de acceso de edificios (sillas de ruedas), lugares resbaladizos, etc.

### II.3.3) Otros pavimentos

#### Pavimento para establos y campos de golf

Los bloques de unión están hechos de tal modo que son virtualmente indestructibles. Es uno de los más duros, aunque flexibles, productos para suelos de caucho reciclado, adecuados para instalaciones equinas y de golf.



*Foto N° 37: Adoquines de caucho reciclado.*

Usos recomendados:

En entradas comerciales, clubes de golf, cuartos para esquís, espacios para caballos y establos, clínicas veterinarias, zonas de trabajo industrial, parques de atracciones, áreas recreativas, garajes, pabellones de ferias, pistas de patinaje, etc.

Son totalmente elásticos, resistentes a las inclemencias del tiempo, permeables al agua, resistentes al hielo, duraderas y no resbalan.



*Foto N° 38, 39, 40 y 41: Diferentes tipos de aplicaciones de adoquines de caucho.*

### **Pavimento de caucho reciclado para piscinas:**

Pavimento ecológico fabricado a partir de mezclas de caucho recuperado de neumáticos en desuso y aglomerado con un isocianato. Posteriormente se moldea y retícula en prensas bajo presión y temperatura.

Material antideslizante que reduce el riesgo de caídas. Recomendado para su uso en piscinas y zonas de juegos de agua.

Suelo elástico, resistente a la compresión y flexible. Creado especialmente para exteriores. Entre sus aplicaciones también se cuentan:

- ✘ Zonas de ocio y juego infantil.
- ✘ Parques y jardines.
- ✘ Colegios y guarderías.
- ✘ Urbanizaciones privadas.
- ✘ Instalaciones deportivas.
- ✘ Piscinas y parques acuáticos.

Algunas de sus características más destacables:

- ✘ Adaptable a todo tipo de superficies, tanto naturales como artificiales.  
Sin necesidad de ningún tipo de preparación del terreno.
- ✘ Su diseño permite un sencillo montaje y acoplamiento, prescindiendo del uso de adhesivos.

- ✘ ALTURA DE CAÍDA CRÍTICA 1,83 m. (HIC)

(Ensayo realizado en el laboratorio Centralizado de Ensayos del IBV de acuerdo con la normativa europea EN 1177: 1997).

- ✘ Producto flexible que evita cualquier tipo de lesión, amortiguando los impactos.

Norma EN 1177.

- ✘ De cómoda limpieza y gran durabilidad.

- ✘ Presenta una alta resistencia a la abrasión.

- ✘ Densidad placa: 0,5 gr/cm<sup>3</sup>.

- ✘ Material ecológico.

- ✘ Material Reciclado.

- ✘ Peso 25 kg/m<sup>2</sup> (4 cm.).



*Foto N°42: Pavimento de caucho reciclado para piscinas.*

#### **II.4) Recubrimiento de caucho reciclado para barreras metálicas de contención en carreteras.**

Se ha estudiado el comportamiento de recubrimientos para las barreras metálicas de contención en carreteras y los postes que las sujetan. La función de estos recubrimientos es la de proteger a los motociclistas y conductores de vehículos si impactan contra ellos en accidentes de carretera. Los protectores están fabricados con caucho reciclado de neumáticos en desuso y suponen una alternativa novedosa y ecológica a los productos existentes actualmente en el mercado. Los resultados obtenidos comparan la severidad del impacto cuando el poste está recubierto con el protector y sin él. Se concluye que la utilización futura de estos protectores es viable en cuanto a su efectividad técnica y a la alternativa económica que representan.



*Foto N° 43: Protector de postes de barreras de contención.*

## Protector de postes de barreras de contención

### *Descripción*

Protector de postes de barreras de contención, para motoristas y ciclistas en caso de colisión. Fabricado con granos de caucho de neumático en desuso y conformado según un diseño que absorbe el impacto del golpe y cubre las aristas cortantes de los postes.

### *Aplicaciones*

**Seguridad en carreteras:** protector de postes de barreras de contención

### **Propiedades**

- ✘ Gran capacidad de absorción a los golpes de impacto.
- ✘ Durable: mínimo 10 años.
- ✘ Fácil de instalar (no requiere maquinaria especial).
- ✘ Reciclado y reciclable

### **Composición**

- ✘ 100% granos de caucho reciclado.
- ✘ Origen: neumáticos en desuso.



*Fotos N° 44,45 y 46: Instalación de protectores de caucho reciclado en barreras de contención.*

#### **II.4.1) Problemática**

Tanto en España, como en otros países del mundo, en los últimos años, y con cierta periodicidad, los medios de comunicación se han hecho eco de una demanda ampliamente difundida por asociaciones de usuarios de motocicletas y bicicletas en foros de Internet y prensa escrita del medio: soluciones por parte de la Administración de los estados a las consecuencias de los accidentes de los conductores de vehículos de dos ruedas cuando impactan con las actuales barreras metálicas de contención de vehículos y los postes que las sustentan. Miles de kilómetros de carreteras en muchos países, están dotados de un sistema de contención de vehículos constituido por una valla con perfil de doble onda sustentada en unos postes anclados en el suelo. Estos postes, de sección doble T por su disposición en la carretera adicionan al propio impacto un efecto cuchilla cuando un objeto choca con ellos a cierta velocidad.

El mismo efecto, aunque con menor probabilidad de producirse, debe esperarse del borde de la propia valla.

Cuando se desarrolla un producto para una aplicación nueva, para la que no hay normativa vigente, es comprometido asegurar que el resultado del trabajo va a superar unas pruebas de homologación que intentan incorporar circunstancias tan complejas como las mencionadas. La complejidad aún se puede ver incrementada cuando el material empleado es nuevo y se fabrica a partir de productos reciclados.

#### **II.4.2) Metodología**

La siguiente figura, muestra el dispositivo de ensayo que se ha implementado en una nave industrial. Consiste en una barrera metálica de contención de perfil de doble onda montada con dos configuraciones: barrera metálica doble onda simple, sujeta por postes de 120 mm. que van colocados cada 4 mt., y con poste cada dos metros. La valla se fija a tres postes con tornillería homologada. El hincado en el suelo se obtiene atornillando los postes a unos soportes que a su vez están firmemente anclados en el suelo. La distancia entre la parte libre del poste y el borde superior de la barrera es de 700 mm.

Como impactador se ha utilizado un semicasquete esférico que se lanza contra la barrera en un movimiento pendular. Sus dimensiones de 165 y 128 mm de diámetro exterior e interior, respectivamente, se adaptan a los empleados en otros ensayos. Debido a que se esperaba gran severidad en los ensayos de impacto se ha utilizado, para la fabricación del semicasquete, un acero tratado.

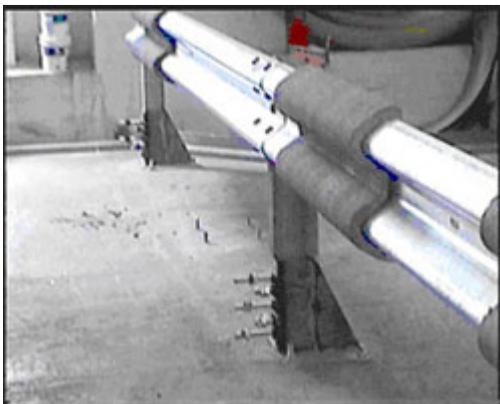
Los impactos se han realizado de acuerdo con las condiciones siguientes:

Angulo de impacto: 30° respecto a la barrera.

**Punto de impacto:** centro de masa (en adelante cdm) del poste / centro del vano, en el eje longitudinal de la barrera.

**Velocidad de impacto:** 40 km/h. Las dimensiones de la nave han condicionado no poder llegar a los 60 km/h.

El semicasquete cuelga de un cable de acero desde un dispositivo fijado a una vigueta de la nave que permite controlar la orientación del lanzamiento. El semicasquete se eleva hasta 6,5 m a través de una polea fijada a un cable que marca la dirección deseada del ángulo de impacto.



Fotos N° 47 y 48: Dispositivo de ensayo.

Se llevaron a cabo un total de 30 impactos repartidos en once categorías de ensayo.



Foto N° 49: Impactador.

### II.4.3) Ventajas y beneficios

De acuerdo con los resultados obtenidos estos ensayos, se puede afirmar que:

- ✘ Se ha puesto a punto un método válido para estudiar comparativamente diferentes sistemas de protección de motoristas en impactos contra barreras de contención metálicas y postes.
- ✘ Los protectores de caucho desarrollados muestran un excelente comportamiento en los ensayos, tanto en impacto contra el poste como contra la barrera. La reducción de la severidad del impacto con la utilización de este sistema de protección está alrededor del 60 %.
- ✘ Con los resultados obtenidos se establece que la utilización futura de estos protectores es viable en cuanto a su efectividad técnica y a la alternativa económica y ecológica que representa. Se ha obtenido un material cuya fabricación es relativamente sencilla y representa una alternativa interesante para la reutilización de los neumáticos fuera de uso, existentes en la actualidad.

## II.5) Membrana de caucho reciclado para diversas aplicaciones constructivas

### II.5.1) Descripción

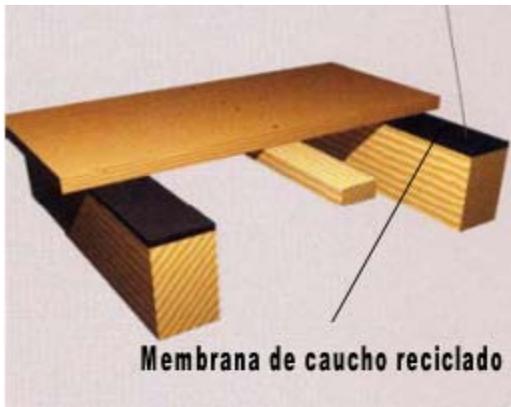
Membrana de caucho reciclado para diversas aplicaciones constructivas, sin asfaltos, de alta flexibilidad y resistencia al punzonado. De excelentes propiedades acústicas y reductoras de vibraciones.



Foto N°50: Membrana de caucho reciclado

### II.5.2) Aplicaciones

- ✘ Aislamientos acústicos de paredes.
- ✘ Producto antipisadas bajo pavimentos, parquet o cerámica.
- ✘ Impermeabilizaciones de cubiertas



Una de las aplicaciones de la membrana de caucho reciclado es como aislante entre la viga de piso y el entablado correspondiente. Esto ayuda a evitar filtraciones de humedad a través de la madera, además de evitar la propagación de los ruidos.

*Fig.Nº18: Aislante entre madera, de caucho reciclado.*

También se aplica como aislante entre el hormigón y la madera.



*Fig. Nº19 y 20: Aislante entre madera y hormigón, de caucho reciclado.*

### **II.5.3) Propiedades**

- ✘ Producto especialmente ideado para la construcción.
- ✘ Flexibilidad.
- ✘ Excelente resistencia.
- ✘ Muy buen aislante acústico (antivibratorio).
- ✘ Fabricado con materiales elásticos reciclados (caucho de neumático).
- ✘ Resultado de largos y continuados procesos de investigación y desarrollo.

### **CAPITULO III**

#### **CONCLUSIONES**

Una vez cumplida la vida útil de un neumático, éste es vertido al medio ambiente de forma irracional. El mayor problema se centra en la dificultad para su destrucción, ya que al estar acumulados, son fuente importante para la proliferación de roedores, insectos y otros organismos dañinos para el hombre. Además si de amenazas se trata, el desecho neumático constituye también un potencial peligro de incendio, que genera como si fuera poco una grave contaminación atmosférica y visual. Todo ello se ve agravado por la falta de una legislación ambiental específica y oportuna, que dé cuenta a través de una política pública de la utilización y reutilización de todo lo que producimos en el sentido más amplio posible.

En Chile, el principal punto de acumulación de desechos neumáticos se encuentra en el norte de nuestro país, en el importante sector de la minería, ya que en este campo productivo como es sabido, para el transporte y procesamiento de minerales se emplean vehículos y maquinaria de gran envergadura, de los cuales después de cumplir con su vida útil se desechan grandes neumáticos. Asimismo, la importancia del reciclado de los mismos radica en que se presenta como una gran “SOLUCION LIMPIA”, respecto del problema de contaminación medioambiental, puesto que en diversas partes del mundo se han realizado experiencias que permiten afirmar que se pueden recuperar residuos, los cuales prolongan su existencia al generar nuevos materiales e insumos, recursos energéticos, y beneficios medioambientales varios, lo cual sin duda se traduce en la recuperación de recursos económicos que antes literalmente “se botaban a la basura”.

Este procedimiento permitirá la aplicación del polvo de caucho (neumático reciclado) en distintas áreas de la construcción, por ejemplo:

- Como combustible alternativo para hornos cementeros (contribuyendo a paliar el déficit de recursos no renovables).
- Como ingrediente en la mezcla de asfaltos para carreteras (permitiendo la construcción de carreteras más durables y más seguras).



## BIBLIOGRAFÍA

- [www.codelco.cl](http://www.codelco.cl)
- [www.conama.cl](http://www.conama.cl)
- [www.gobiernodechile.cl](http://www.gobiernodechile.cl)
- [www.canal3.cl](http://www.canal3.cl)
- [www.youtube.com](http://www.youtube.com)
- [www.chilevision.cl](http://www.chilevision.cl)
- [www.metaproject.com](http://www.metaproject.com)
- [www.goodyear.com](http://www.goodyear.com)
- [www.vialidad.cl](http://www.vialidad.cl)
- [www.mop.cl](http://www.mop.cl)
- [www.provia.cl](http://www.provia.cl)
- [www.cbb.cl](http://www.cbb.cl)
- [www.melon.cl](http://www.melon.cl)
- [www.senseambiente.com](http://www.senseambiente.com)
- [www.lamillasport.com](http://www.lamillasport.com)
- [www.scielo.com](http://www.scielo.com)
- [www.segra.com](http://www.segra.com)
- [www.clenairnet.org](http://www.clenairnet.org)
- [www.ambienteplastico.com](http://www.ambienteplastico.com)
- [www.elcorreodigital.com](http://www.elcorreodigital.com)
- [www.consumer.es](http://www.consumer.es)
- [www.wasteideal.es](http://www.wasteideal.es)
- [www.instaladoresonline.com](http://www.instaladoresonline.com)
- [www.ambientum.com](http://www.ambientum.com)
- [www.panoramaenergetico.com](http://www.panoramaenergetico.com)
- <http://www.monografias.com/>
- [www.signus.es](http://www.signus.es)

- [www.neuciclaje.com](http://www.neuciclaje.com)
- [www.guascor.com](http://www.guascor.com)
- [www.basel.int](http://www.basel.int)
- [www.javeriana.edu.co/ofic](http://www.javeriana.edu.co/ofic)
- [www.asfaltomeros.com](http://www.asfaltomeros.com)
- [www.diariopyme.cl](http://www.diariopyme.cl)
- [www.uc.org.uy/index](http://www.uc.org.uy/index)
- [www.idu.gov.co](http://www.idu.gov.co)
- [www.edomex.gob.mx](http://www.edomex.gob.mx)
- [www.gtz.org.mx](http://www.gtz.org.mx)
- [www.wrf.org.uk](http://www.wrf.org.uk)
- [www.epa.gov](http://www.epa.gov)
- [www.itra.com](http://www.itra.com)
- [www.recyclers-info.com](http://www.recyclers-info.com)

- Caltrans.** "Asphalt Rubber Usage Guide". Departamento de transporte Estado de California. Report N° CA 95819-4612. Estados Unidos.2003.
- Gutiérrez P.** "Incorporación de Caucho de Neumático Desechable en Asfalto".Memoria de título. Profesor Guía: Ing. Julio Torrejón. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.2001.
- MOPTT.**"Mejoramiento de Asfalto en Base a Reciclado de Neumáticos". Castillo, J. y Torrejón, J. (Eds.) Probisa S.A., Bitumix S.A. e Instituto Chileno del Asfalto. 2001.