

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA**

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA  
QUÍMICA**



**TESIS**

**“DESARROLLO DE UN AGLOMERADO ASFÁLTICO CON POLVO DE  
CAUCHO, EN LA CIUDAD DE HUANTA – AYACUCHO”**

**PRESENTADO POR: José María SALVATIERRA CERDA**

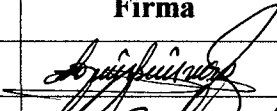
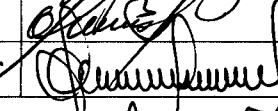

**AYACUCHO – PERÚ**

**2014**

Tesis  
Q 482  
Sal

**ACTA DE CONFORMIDAD DEL TRABAJO FINAL DE TESIS CORREGIDO**

Los que suscribimos, miembros del jurado designado para el acto público de sustentación de tesis titulado “**DESARROLLO DE UN AGLOMERADO ASFÁLTICO CON POLVO DE CAUCHO, EN LA CIUDAD DE HUANTA – AYACUCHO**”, presentado por el Bachiller José María SALVATIERRA CERDA, el cual fue sustentado el día 12 de Diciembre del 2014, en merito a la resolución decanal No 100 - 2014 – FIQM – D, damos la conformidad al trabajo final corregido, aceptando la publicación de la mencionada tesis y declaramos el documento APTO, para que pueda iniciar sus gestiones administrativas, que conduzcan a la expedición y entrega del Título Profesional de Ingeniero Químico.

Miembros del jurado	DNI	Firma
Ing. Juan Luis QUISPE CISNEROS	28263538	
Ing. Hernán Pedro QUISPE MISAICO	28206493	
Ing. Mesías Juan PEREZ CAVERO	28203525	

## **AGRADECIMIENTOS**

· Mi agradecimiento a Dios que me ha dado la vida y sabiduría y así poder haber concluido este trabajo.

A mi alma mater Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga a la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia, Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Química y a toda la plana docente que me dieron cátedra en el pre grado.

A mi asesor Ing. Aníbal P. García Bendezú quien atendió a mis consultas, las correcciones necesarias y en general me ha guiado en el trascurso de este trabajo de Tesis.

## **DEDICATORIA**

**A DIOS TODO PODEROSO Y AL SEÑOR DE PAMPA CRUZ:** Por bendecirme y guiarme en todo momento, por brindarme sabiduría y por ayudarme a levantarme en los momentos difíciles, por permitirme concluir esta parte de mi vida.

**A MIS PADRES:** Por inculcarme los valores que me han permitido llegar a esta meta. Por apoyarme incondicionalmente y darme sus consejos, este logro es gracias a ustedes, gracias por la confianza que siempre han tenido y depositado en mí.

**A MI NOVIA:** Evelin López, a quien desde que conocí, a sido la fuente de inspiración de superación, porque siempre ha estado a mi lado apoyándome, Gracias por todo el esfuerzo, tiempo, que me has dedicado para que pueda culminar este trabajo de tesis y lo demás que has hecho para que culmine la carrera.

**A MIS HERMANOS Y HERMANAS:** Por brindarme su apoyo incondicional, los momentos que hemos compartido, y estar a mi lado siempre.  
En especial a mi hermano Raúl Alf Salvatierra Cerda Q.E.D. que desde el cielo contribuye con mi motivación.

## ÍNDICE

	Pág.
AGRADECIMIENTO .....	ii
DEDICATORIA .....	iii
INDICE .....	iv
INTRODUCCION .....	01

### CAPITULO I

#### GENERALIDADES

1.1. Fundamentación del problema .....	03
1.2. Planteamiento del problema.....	05
1.2.1. Problema principal .....	05
1.2.2. Problemas específicos .....	06
1.3. Objetivos .....	06
1.3.1. Objetivo general.....	06
1.3.2. Objetivos específicos. ....	06
1.4. Justificación de la investigación.....	06
1.5. Delimitaciones de la investigación.....	07
1.6. Antecedentes de la investigación. ....	08
1.7. Tipo de investigación.....	11
1.8. Nivel de investigación.....	11
1.9. Diseño de la investigación. ....	11
1.10. Universo, población y muestra.....	11
1.11. Hipótesis.....	11
1.11.1 Hipótesis principal. ....	11
1.11.2 Hipótesis Secundarias. ....	11
1.12 Variables e Indicadores.....	12
1.12.1 Variables Independiente.....	12
1.12.2 Variables Dependiente. ....	12

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

2.1. Asfalto .....	13
2.1.1. Composición del asfalto.....	14
2.1.2. Fracciones del asfalto.....	15
2.1.3. Estructuras moleculares. ....	15
2.1.4. Obtención del asfalto. ....	15
2.1.5. Asfaltos derivados de petróleo.....	16
2.1.6. Obtención de asfaltos en refinerías. ....	17
2.2. Propiedades. ....	19
2.2.1. Propiedades mecánicas básicas. ....	19
2.2.2. Viscosidades de aplicación. ....	19
2.2.3. Propiedades generales. ....	20
2.2.4. Propiedades deseables.....	21
2.3. La Utilización del caucho.....	21
2.4. Composición y características de los neumáticos. ....	22
2.5. Desvulcanización. ....	29
2.6. Niveles de molienda.....	30
2.7. Valorización de los NFUs.....	31
2.7.1. Valorización material.....	31
2.7.2. Valorización energética.....	31
2.7.3. Vulcanizado.....	31
2.7.4. Reciclaje directo de materiales.....	31
2.7.5. Tecnologías utilizadas para la valorización material y energética de los NFUs.....	33
2.8. Tecnologías fuera de los sistemas de reciclado del material.....	36
2.8.1. Vulcanizado.....	36
2.9. Tratamientos mecánicos.....	37
2.10. Tecnologías de reducción de tamaño .....	38
2.10.1. Molienda a temperatura ambiente.....	38
2.10.2. Molienda criogénica.....	39
2.10.3. Molienda húmeda.....	41

2.11. Pirólisis-termólisis .....	41
2.12. Sistema global de gestión de NFUs .....	45
2.13. Aplicaciones .....	46
2.13.1. Valorización material .....	46
2.13.2. Aplicaciones de los neumáticos enteros.....	46
2.13.3. Aplicaciones de los neumáticos triturados .....	48
2.13.4. Aplicaciones en materiales bituminosos .....	51
2.13.5. En construcción .....	52
2.13.6. Valorización energética.....	53

**CAPITULO III  
METODOLOGIA**

3.1. Mezclas asfálticas en caliente .....	56
3.1.1. Propiedades de las mezclas .....	56
3.2. Método de diseño .....	58
3.3. Modificación de mezclas asfálticas mediante la incorporación de caucho de neumáticos desechados .....	61
3.3.1. Características de los neumáticos.....	61
3.2.2. Neumáticos desechados .....	63
3.3.3. Aplicación de granos de caucho en las mezclas asfálticas.....	64
3.3.4. Proceso por vía húmeda .....	65
3.3.4.1. Modificación del ligante .....	66
3.3.4.2. Especificaciones para el proceso por vía húmeda utilizadas .....	66
3.3.5. Proceso por vía seca .....	70
3.3.5.1. Tecnologías para el uso de caucho reciclado mediante vía seca.....	72

**CAPITULO IV  
PARTE EXPERIMENTAL**

4.1. Reactivos, materiales y equipos .....	74
4.1.1. Reactivos .....	74
4.1.2 Materiales.....	74
4.1.3. Equipos.....	75

4.2. Procedimiento experimental.....	75
4.1. Caracterización de los materiales.....	75
4.1.1. Agregados pétreos.....	75

**CAPÍTULO V**  
**RESULTADOS**

5.1. Resultado de la caracterización de los agregados .....	84
5.1.2. Ligante asfáltico .....	86
5.1.3. Mezcla de áridos .....	88
5.2. Diseño Marshall de la mezcla patrón .....	89
5.3. Preparación de la mezcla adicionando polvo caucho mediante proceso por vía seca.....	94
5.3.1. Caucho utilizado.....	94
5.3.2. Granulometría de la mezcla mejorada con caucho .....	96
5.3.3. Determinación del porcentaje óptimo de caucho .....	96
5.3.4. Metodología para el desarrollo del aglomerado asfáltico mejorado con caucho .....	97
5.4. Determinación del tiempo y temperatura de digestión .....	98
5.5. Efecto de la temperatura y tiempo de digestión en los parámetros Marshall.	103
5.5.1. Densidad.....	104
5.5.2. Estabilidad.....	106
5.5.3. Fluidez.....	107
5.5.4. Vacíos en la mezcla total.....	108
5.6. Diseño final .....	110
5.6.1. Parámetros Marshall.....	110
5.6.1.1. Densidad.....	110
5.6.1.2. Estabilidad.....	112
5.6.1.3. Fluidez.....	113
5.6.1.4. Vacíos en la mezcla total.....	115
5.6.2. Determinación del porcentaje de asfalto para el diseño.....	116
5.7. Verificación del porcentaje de caucho de diseño .....	118
5.7.1. Resistencia a compresión diametral .....	118



5.7.2. Módulo resiliente .....	120
5.7.3. Resistencia a la fatiga.....	120
5.7.4. Resultados finales.....	121
CONCLUSIONES .....	122
RECOMENDACIONES .....	123
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	124
ANEXOS	

## INTRODUCCIÓN

Los neumáticos fuera de uso (NFUs), suponen un grave problema, ya que la normativa ambiental existente impide su destrucción mediante depósito a vertedero. Dentro de las alternativas razonables para su reutilización, una de las más apropiadas corresponde a la trituración y separación selectiva de sus componentes. De éstos, el caucho se puede incorporar en las mezclas bituminosas en caliente para mejorar sus propiedades reológicas, ya que el caucho presente en los neumáticos, tanto el de origen natural como el sintético, se compone en más del 50 % de polímeros elastoméricos.

En el presente trabajo de investigación se pretende efectuar el estudio para el diseño y formulación de un aglomerado asfáltico con la incorporación de caucho procedente de neumáticos fuera de uso.

El desarrollo de este trabajo, nos permitirá aportar nuevas tecnologías en el sector de la construcción con el fin de mejorar la calidad, reducir costos, aumentar las prestaciones y contribuir con el desarrollo sostenible, aprovechando materiales excedentes de otros procesos de producción y los materiales reciclados, que resultan claramente reutilizables como ocurre con el caucho que se obtiene de los neumáticos usados.

Actualmente, el estudio sobre las posibilidades de utilizar los residuos, es uno de los objetivos prioritarios de carácter ambiental en la investigación científica y técnica, por lo que nuestra Universidad, no puede quedar exenta. Para ello es

necesario alcanzar un conocimiento profundo sobre los distintos tipos de residuos, el volumen de los mismos, las posibilidades técnicas, la repercusión económica, las limitaciones de uso y las precauciones que requiere su empleo. Además de asignar para cada residuo, el mejor aprovechamiento entre los usos posibles, a fin de obtener el mayor valor añadido.

La metodología a emplearse será la experimental, debido a que las variables van a poder ser manipuladas, lo que nos va a permitir una amplia gama de posibilidades y tener una amplia visión para tomar la mejor decisión, luego de que se culminen los trabajos experimentales efectuados en el laboratorio del MTC (GRA).

## **CAPITULO I**

### **GENERALIDADES**

#### **1.1. Fundamentación del problema**

En nuestro país y en nuestra ciudad, se generan muchas toneladas al año de neumáticos fuera de uso de los cuales muy pocos de ellos se destinan a ser reencauchados; absolutamente nada al reciclaje; un pequeño porcentaje a valorización energética en las plantas cementeras autorizadas y la mayor parte, es vertida, abandonada o colocada en depósitos o vertederos, como ocurre en la mayoría de los países del mundo. Hay que tener en cuenta, además, que se estima entre tres y cinco millones de toneladas las que ya existen de estos neumáticos acumulados y almacenados.

Para eliminar estos residuos se usa con frecuencia la quema directa que provoca graves problemas ambientales ya que produce emisiones de gases que contienen partículas nocivas para el entorno, aunque no es menos problemático el almacenamiento, ya que provocan problemas de estabilidad por la degradación química parcial que éstos sufren y producen problemas de seguridad en el vertedero.

Las posibilidades de reciclaje de los neumáticos fuera de uso, es decir el aprovechamiento de sus componentes materiales para otros usos distintos de la valorización energética, han experimentado en los últimos tiempos un importante aumento, esto basado en que en los últimos años se ha reducido en la Unión Europea en un 30 % el almacenamiento en vertederos y se han aumentado considerablemente otras opciones de tratamiento de los NFU.(1). Ver tabla N° 1.1

**Tabla 1.1: Modalidades de tratamiento de los NFU en la UE y en España**

Destino	%	
	UE	España
Exportación	11,0	6,4
Reencauchado	12,0	12,2
Reciclaje	30,0	13,9
Valorización Energética	32,0	17,2
Vertedero	15,0	50,3

La trituración es un proceso puramente mecánico y por tanto los productos resultantes son de alta calidad limpios de todo tipo de impurezas, lo que facilita la utilización de estos materiales en nuevos procesos.

El tratamiento, reutilización y reciclaje de residuos sólidos se ha convertido en una oportunidad para lograr que diferentes materiales sean reincorporados a procesos productivos, alargando de esta manera la vida útil y disminuyendo los impactos ambientales negativos generados por los diferentes productos y materiales.

Uno de los residuos del sector automotriz que más impacta al medio ambiente son las llantas, ya que ocasionan serios problemas de contaminación de las aguas, los suelos, el aire cuando se queman a cielo abierto y adicionalmente son sitios potenciales de reproducción de insectos transmisores de diversas enfermedades tales como el dengue, la fiebre amarilla y la encefalitis equina.

Nuestro país cuenta con un gran mercado de llantas y por ende un alto volumen de generación de este residuo, por lo que es necesario pensar en reciclarlas de un modo amigable con el ambiente. Actualmente, no existe ninguna resolución que establezca que los productores e importadores de llantas dispongan de puntos autorizados para la recolección, acopio, transporte y disposición final de las llantas usadas.

Este escenario representa una gran oportunidad de mercado, para proponer nuevos tratamientos y aplicaciones de los residuos de las llantas, de esta manera se daría solución al problema de disposición de llantas y a su vez se generarían procesos innovadores de reciclaje y aprovechamiento de residuos.

## **1.2. Planteamiento del problema**

Uno de los residuos que más caracterizan a las sociedades desarrolladas modernas, tan dependientes del automóvil, y de otras unidades de transporte, son los neumáticos fuera de uso. Aunque se trata de un residuo no peligroso, presenta una alta capacidad calorífica y no es degradable. Estas y otras características, constituyen factores que aconsejan la adopción de una norma que los regule teniendo en cuenta esas particularidades propias.

Es cierto que en principio los neumáticos usados no generan ningún peligro inmediato, pero su eliminación de manera inapropiada o su producción en grandes cantidades, puede contaminar gravemente el medioambiente u ocasionar problemas a la hora de eliminarlos. No en vano, los neumáticos han sido diseñados para resistir condiciones mecánicas y meteorológicas duras (son resistentes al ozono, la luz y las bacterias) lo que les hace prácticamente indestructibles por el paso del tiempo. Su almacenamiento en el vertedero no permite recuperar ni energía ni materia.

Los neumáticos enteros son flexibles y por su forma y tamaño limitan la rehabilitación del vertedero al ser difícilmente compactables, además son refugio ideal de insectos y roedores, y acumulan gases y lixiviados, frecuentes en los basureros. En mérito a estas aseveraciones que fundamentan el trabajo de tesis, nos planteamos las siguientes interrogantes:

### **1.2.1. Problema principal**

¿Será posible la obtención de un conglomerado asfáltico con polvo de caucho procedente del reciclado de neumáticos fuera de uso; para emplearlo en capas asfálticas de carreteras?

### **1.2.2. Problemas específicos**

1. ¿Cuál será el % en peso del polvo de caucho para obtener un aglomerado asfáltico óptimo?
2. ¿Cuáles serán los parámetros adecuados para obtener una mezcla óptima de un aglomerado asfáltico?
3. ¿Será posible obtener un aglomerado asfáltico a nivel de laboratorio?

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Obtener un conglomerado asfáltico, empleando polvo de caucho procedente del reciclado de neumáticos fuera de uso, para su empleo en capas asfálticas de carreteras.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

1. Determinar experimentalmente el porcentaje en peso de polvo de caucho para la obtención de un aglomerado asfáltico óptimo.
2. Determinar los parámetros bajo los cuales se obtiene una mezcla óptima con el agregado de polvo de caucho de neumáticos fuera de uso.
3. Desarrollar técnicas en el laboratorio que sean fácilmente adaptables a plantas asfálticas o a cualquier tipo de planta de producción de productos asfálticos.

### **1.4. Justificación de la investigación**

En la actualidad hay pocas empresas en el país y ninguna en nuestra ciudad que reciclan el caucho de los neumáticos, dado el gran parque automotor con que se cuenta, y por ende la gran cantidad de neumáticos desechados, se hace imprescindible reutilizar los desechos de este material. Por esta razón se hace necesario comenzar a conocer este tipo de residuo que se está generando, para determinar la posibilidad de intervenir en la selección y contar con una valoración del volumen del mismo.

La masiva fabricación de neumáticos y las dificultades para su disposición final una vez usados, constituye uno de los más grave problemas ambientales de los

últimos años en todo el mundo por lo que el trabajo de investigación a desarrollarse pretende dar solución en parte a esta problemática.

Las montañas de neumáticos forman arrecifes donde la proliferación de roedores, insectos y otros animales dañinos constituyen un problema añadido. La reproducción de ciertos mosquitos, que transmiten por picaduras fiebres y encefalitis, llega a ser 4 000 veces mayor en el agua estancada de un neumático que en la naturaleza, por lo que este proyecto tiene por finalidad evitar estos contextos. Además representan una oportunidad de mercado con altos beneficios tanto económicos como en el aspecto de conservación del ambiente. (2)

El desarrollo de este trabajo es importante debido a que actualmente en nuestro país y en nuestra ciudad, los neumáticos de automóviles y de otras unidades, son desechados en forma continua, sin registrarse en general ningún sistema formal de deposición selecta o lugares especialmente destinados al efecto y al formalizar su uso, se estaría generando una manera de control indirecto sobre este material desechado.

El sistema formado al incluir el material desechado al aglomerado asfáltico, será valorado claramente desde lo químico, lo físico y lo ambiental a efectos de incluir estos parámetros en los controles de calidad de las obras civiles y viales.

### **1.5. Delimitaciones de la investigación**

El presente proyecto de investigación se llevará a cabo en la ciudad de Ayacucho. El trabajo de investigación según el cronograma de trabajo tendrá una duración de 12 meses a partir de la aprobación del plan de tesis. Comprenderá la revisión bibliográfica, recolección de materia prima, procesamiento de la materia prima, la experimentación, compilación de información, Procesamiento de la información, redacción del informe y presentación del trabajo final.

Los resultados obtenidos en esta investigación permitirán a nuestra población Ayacuchana, contar con una alternativa para poder asfaltar tanta carretera afirmada que posee.



## **1.6. Antecedentes de la investigación**

### **Internacional:**

**Argentina:** La Comisión Permanente de Trabajo para el Reciclado de Neumáticos Usados, coordinada por el INTI desde 2003, señala como objetivos "la evaluación y desarrollo de las diversas propuestas logísticas y tecnológicas de reutilización de neumáticos al fin de su vida útil, y la promoción de la Legislación Ambiental específica." En esta dirección, la Comisión articuló a los distintos actores públicos y privados vinculados al tema para proponer un modelo de gestión y de legislación consensuado. En este grupo de trabajo participan el Programa de Reciclado Industrial y de Medio Ambiente del INTI, el Centro INTI-Caucho, la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable (SayDS), la Coordinación Ecológica Área Metropolitana Sociedad del Estado (CEAMSE), la Asociación de Fabricantes de Cemento Portland (AFCP), el Instituto del Cemento Portland Argentino (ICPA), la Federación Argentina del Neumático (FAN), la Asociación Reconstructores Argentinos de Neumáticos (ARAN), la Federación Argentina de la Industria del Caucho (FAIC), la Cámara Argentina de Reconstructores de Neumáticos (CAR), la Cámara de la Industria del Neumático (CIN) y las empresas Bridgestone/Firestone Argentina S.A., Fate S.A., Neumáticos Goodyear S.R.L., Michelin Argentina S.A. y Pirelli Neumáticos S.A. Asimismo brindan su apoyo las áreas ambientales de los Gobiernos de la Ciudad y de la Provincia de Buenos Aires.

Dicha Comisión se dedicó a profundizar, actualizar y evaluar el estado de situación de la disposición final de neumáticos usados en el mundo; las restricciones internacionales que los países fueron aplicando al tránsito e ingreso de neumáticos usados en sus territorios para evitar el aumento de sus pasivos ambientales; la situación interna de Argentina respecto al tema; el tratamiento de los neumáticos reencauchados y usados en las negociaciones internacionales de Argentina y el Mercosur; proyectos de reciclado de neumáticos; la evaluación de disponibilidad por región y nacional; proyectos de utilización como aporte energético y la factibilidad técnico económica de una planta modular de reciclado de neumáticos usados, definiendo tamaños, inversiones y tecnologías.

La Comisión realizó a su vez estudios logísticos, seleccionando una propuesta operativa para el área metropolitana. El primer resultado concreto de este trabajo es la licitación pública que la CEAMSE desarrolla en estos días. En este proceso, el INTI se encargó de reunir a los actores involucrados en el proyecto y de gestionar ante el CEAMSE, en representación de todo el grupo de trabajo, la participación y concreción del actual llamado a licitación como ejemplo y modelo testigo para trasladar a otras regiones del país. Asimismo colaboró en la redacción de los pliegos de la licitación y brindó asesoramiento en las áreas técnicas de la misma. Junto con el CEAMSE, el INTI será el encargado de revisar la aprobación de las licitaciones a adjudicar como co-evaluador técnico y realizará además auditorías técnicas a la planta recicladora.

Por su parte, el Directorio del CEAMSE aprobó los pliegos de la licitación para instalar la planta recicladora, la que se concretará con aportes privados. A la fecha, el INTI tiene registradas unas 15 empresas privadas nacionales y extranjeras con contactos en el país interesadas en esta licitación. De la planta construida a partir de este proyecto se podrán obtener distintos productos, para diversas aplicaciones:

- Producto proveniente del neumático en una primera etapa de trozado, sin separación de tela y metal. De esta manera puede servir, por ejemplo, como combustible para cualquier tipo de caldera u horno que esté adaptado para quemar residuos sólidos sin contaminar el medio ambiente.
- Separando las partes del neumático se obtienen metal y residuos textiles reciclables, además de polvo de goma de diferentes granulometrías con el que se pueden obtener productos varios, como por ejemplo: alfombras para piso, lomos de burro, amortiguación en canchas de césped sintético (éstas utilizan casi 100 Toneladas por cada una), plásticos cargados, picaderos para caballos de carrera (se comprobó que con polvo de goma los caballos tienen menos riesgo de conjuntivitis), pisos de goma y asfaltos (contribuye fundamentalmente a la disminución de ruido y permite aumentar su durabilidad), entre otros.

Actualmente existen empresas con equipos portátiles que realizan el trozado primario en el lugar de depósito, lo que facilita su traslado hasta el lugar de disposición final, permitiendo de esta forma transportar mayor cantidad de

neumáticos por camión. Esta modalidad resulta una buena alternativa para evitar la instalación de plantas de tratamiento fijas donde no se justifique la inversión y para llegar a zonas poco pobladas del interior del país. (3)

**España:** “El Gobierno ha decidido que a partir de ahora las carreteras públicas que adjudique deberán construirse utilizando polvo de neumáticos viejos en el asfalto. Este polvo de caucho, unido al betún, hace que las carreteras sean menos ruidosas, más resistentes a las rodaduras y filtren mejor el agua. La decisión, que el Ministerio de Fomento ha pactado con Medio Ambiente y que hará oficial con una orden a sus delegaciones provinciales en las próximas semanas, permitirá acabar en unos años con los centenares de miles de neumáticos que actualmente se acumulan en los vertederos. El uso de neumáticos viejos en las llamadas carreteras de goma permitirá reciclar al año 160 000 toneladas de polvo de neumático.”(4)

**F.A. López, A. López Delgado, F.J. Alguacil y J. Manso;** En su trabajo de investigación “Situación actual del tratamiento de neumáticos fuera de uso y posibilidades de obtención de negro de humo de alta pureza”, manifiestan que en los últimos años en España, se ha reducido en un 30 % el almacenamiento en vertederos y se han aumentado considerablemente otras opciones de tratamiento de los neumáticos fuera de uso (NFUs).

**Tabla 1.2: Evolución del tratamiento de los NFU en España en los últimos años**

Destino	1998		1999		2005	
	T NFU	%	TNFU	%	TNUF	%
Exportación	3 631	1,5	-	-	15 000	5,0
Recauchutado	35 664	14,6	26 500	11,1	45 000	14,9
Reciclaje	1 000	0,4	3 500	1,5	41 000	13,6
Valorización Energética	8 000	3,3	3 500	4,6	50 000	16,5
Vertedero	195,000	80,2	198 000	82,8	151 000	50,0
<b>Total</b>	<b>242 995</b>		<b>239 000</b>		<b>302 000</b>	

Fuente:

(4) GEDESMA. "Reciclaje y Productos Reciclados". 2001

(5) II Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso. Ministerio de Medio Ambiente. 2008 y SIGNUS. Memoria Anual 2007.

A nivel nacional y a nivel local no se han encontrado trabajos orientados al reciclaje de neumáticos fuera de uso.

### **1.7. Tipo de investigación**

Explicativa

### **1.8. Nivel de investigación**

Experimental

### **1.9. Diseño de la investigación**

Experimental

### **1.10. Universo, población y muestra**

**Universo:** Todos los neumáticos fuera de uso.

**Población:** Neumáticos fuera de uso (NFUs) de la ciudad de Ayacucho.

**Muestra:** Neumáticos fuera de uso (NFUs) seleccionados

### **1.11. Hipótesis**

#### **1.11.1. Hipótesis principal**

Si se emplea polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso, es posible la obtención de un conglomerado asfáltico para que pueda ser empleado en capas asfálticas de carreteras.

#### **1.11.2. Hipótesis secundarias**

1. La determinación del porcentaje óptimo de adición del polvo de caucho, facilitaría la obtención del conglomerado asfáltico adecuado.

2. La determinación de parámetros adecuados del proceso posibilitaría la obtención de una mezcla óptima de aglomerado asfáltico.

3. El desarrollo de pruebas experimentales a nivel de laboratorio posibilitaría la obtención del aglomerado asfáltico.

## **1.12. Variables e indicadores**

### **1.12.1. Variable independiente:**

**(X):** Polvo de caucho procedente del reciclado de NFUs.

#### **Indicadores:**

**X<sub>1</sub>:** Clasificación

**X<sub>2</sub>:** Troceado

**X<sub>3</sub>:** Triturado

**X<sub>4</sub>:** Micronizado

### **1.12.2. Variable dependiente:**

**(Y):** Diseño y desarrollo de un aglomerado asfáltico.

#### **Indicadores:**

**Y<sub>1</sub>:** Caracterización de materiales: Áridos, Betún, Caucho.

**Y<sub>2</sub>:** Ajuste granulométrico y diseño por el método Marshall.

**Y<sub>3</sub>:** Susceptibilidad al agua (inmersión, compresión)

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

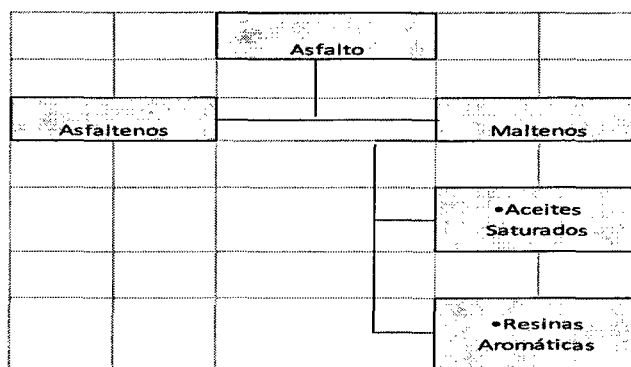
#### 2.1. ASFALTO

El asfalto es un material viscoso, pegajoso y de color negro; su consistencia es variable, está constituido mayoritariamente por una mezcla de hidrocarburos pesados. Se encuentra en yacimientos naturales o se obtiene por refinación del petróleo y es usado como aglomerante en mezclas asfálticas para la construcción de carreteras o autopistas (entendiéndose como aglomerante aquellos materiales capaces de generar fuerzas para unir fragmentos de una o varias sustancias o materiales y dar cohesión al conjunto por métodos físicos). También es utilizado en impermeabilizantes, material en forma de placa o lámina de distinta naturaleza (filtros asfálticos, materiales de polímeros sintéticos, membranas de fibras orgánicas, etc.), destinado a impedir el paso del agua en forma líquida a través de la instalación. Puede formar parte de esta, en el caso de que el pavimento se encuentre en planta baja y la solera de hormigón apoye directamente sobre el suelo natural, colocándose entonces inmediatamente encima de la solera. Está presente en el petróleo crudo y compuesto casi por completo de bitumen (producto semi-sólido extremadamente pesado de la refinación del petróleo, compuesto de hidrocarburos pesados utilizado para construcción de caminos y para impermeabilización de techos).

Los principales yacimientos de roca asfáltica están en Europa y Norteamérica, pero hay depósitos en todo el mundo. Los asfaltos de roca norteamericanos suelen

componerse de arenisca o caliza o una mezcla de ambas, impregnadas con betún; los calizos se diferencian por su estructura física de los que contienen arenisca. Los asfaltos de roca se usan para pavimentar calles. Se mezclan uno o varios asfaltos de roca pulverizados para obtener una composición media, se extiende la mezcla, se aplica calor si es necesario, y por medio de presión se iguala la superficie.

### 2.1.1. Composición del asfalto



**Figura N°2.1: Composición del asfalto**

Los asfaltenos son una familia de compuestos químicos orgánicos, resultan de la destilación fraccionada del petróleo crudo y representan los compuestos más pesados y por tanto, los de mayor punto de ebullición.

Estadísticamente son compuestos similares de cadenas largas, muchos de ellos aromáticos y con polaridad (propiedad de las moléculas que representa la desigualdad de las cargas eléctricas en la misma) relativamente alta, los asfaltenos son insolubles en los maltenos.

Los maltenos son la fracción soluble en hidrocarburos saturados de bajo punto de ebullición. Están constituidos por anillos aromáticos, nafténicos y con muy pocas cadenas parafínicas.

Generalmente existe mayor proporción de maltenos que de asfaltenos cuando se habla de asfaltos.

El mayor contenido de maltenos es lo que le da la calidad a un asfalto, esto quiere decir que la naturaleza química de los maltenos regula en gran parte las propiedades químicas de los asfaltos.

#### **2.1.2. Fracciones del asfalto:**

- Asfaltenos: son sólidos, se consideran la estructura del asfalto.
- Aromáticos: son sólidos o pastosos a temperatura ambiente. Están relacionados con la ductilidad y contribuyen al envejecimiento.
- Resinas: son líquidos a temperatura ambiente. Reblandecen y envejecen el asfalto.
- Aceites saturados: son líquidos a temperatura ambiente. No cambian con el tiempo y afectan a la susceptibilidad térmica.

#### **2.1.3. Estructuras moleculares:**

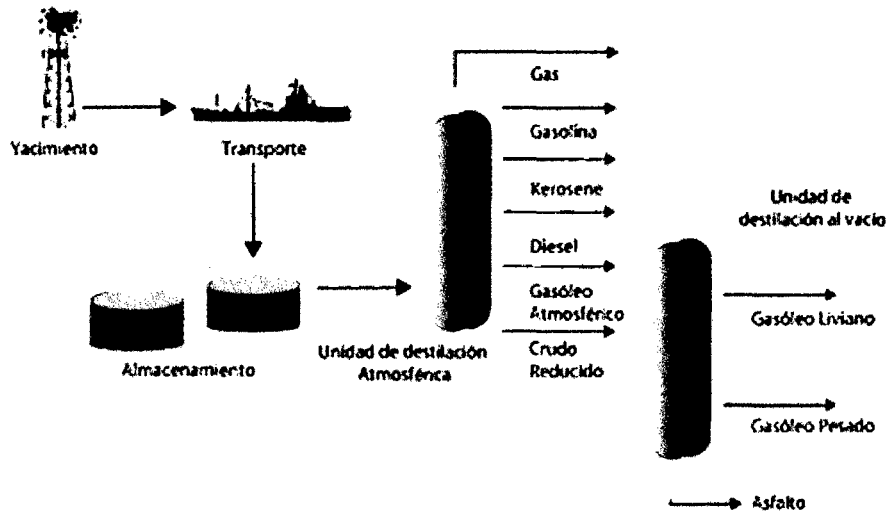
- Asfaltenos: son insolubles en n-Heptano, materiales aromáticos altamente polares y complejos de alto peso molecular. Confieren dureza y viscosidad al asfalto.
- Resinas: muy polares, dispersan a los asfaltenos.
- Aromáticos: son las moléculas de menor peso molecular en el asfalto, son el medio en el que están dispersos los asfaltenos. Son no polares y buenos solventes.
- Aceites saturados: cadenas lineales y ramificadas de hidrocarburos alifáticos. Son aceites viscosos no polares.

#### **2.1.4. Obtención del asfalto**

A pesar de la fácil explotación y excelente calidad del asfalto natural, no suele explotarse desde hace mucho tiempo ya que, al obtenerse en las refinerías petroleras como subproducto sólido en el craqueo (proceso químico industrial de tratamiento de los productos procedentes de la destilación fraccionada del petróleo que consiste en la rotura, por calentamiento a temperatura y presión elevadas, de los productos gaseosos, líquidos o sólidos obtenidos en el proceso de refino; permite obtener moléculas más pequeñas y moléculas ramificadas: el craqueo es un proceso importante en la obtención de gasolinas y como fuente de alquenos) o fragmentación que se produce en las torres de destilación, resulta mucho más



económica su obtención de este modo. Sucede algo parecido con la obtención del gas, que también resulta un subproducto casi indeseable en el proceso de obtención de gasolina y otros derivados del petróleo.



**Figura N° 2.2: Obtencion del asfalto**

El asfalto a menudo se confunde con el alquitrán de hulla o la brea. El alquitrán de hulla proviene del carbón de piedra, no del petróleo. El asfalto es una sustancia sólida o semisólida. Se mezcla con solventes para volverlo más líquido y más fácil de trabajar. Algunos de los solventes que se usan para mezclar con el asfalto son nafta, tolueno y xileno. Estos solventes son sustancias peligrosas, inflamables, muy apestosas y que aumentan los peligros potenciales de los trabajos con asfalto. Existen muchos diferentes tipos y grados de asfalto que se usan actualmente.

### **2.1.5. Asfaltos Derivados de Petróleo**

Los asfaltos más utilizados en el mundo hoy en día, son los derivados de petróleo, los cuales se obtienen por medio de un proceso de destilación industrial del crudo. Representan más del 90 % de la producción total de asfaltos. La mayoría de los petróleos crudos contienen algo de asfalto y a veces casi en su totalidad. Sin embargo existen algunos petróleos crudos, que no contienen asfalto. En base a la proporción de asfalto que poseen, los petróleos se clasifican en:

-Petróleos crudos de base asfáltica.

-Petróleos crudos de base parafínica.

-Petróleos crudos de base mixta (contiene parafina y asfalto).

El asfalto procedente de ciertos crudos ricos en parafina no es apto para fines viales, por cuanto precipita a temperaturas bajas, formando una segunda fase discontinua, lo que da como resultado propiedades indeseables, tal como la pérdida de ductilidad. Con los crudos asfálticos esto no sucede, dada su composición.

El petróleo crudo extraído de los pozos, es sometido a un proceso de destilación en el cual se separan las fracciones livianas como la nafta y kerosene de la base asfáltica mediante la vaporización, fraccionamiento y condensación de las mismas. En consecuencia, el asfalto es obtenido como un producto residual del proceso anterior.

El asfalto es además un material bituminoso pues contiene betún, el cual es un hidrocarburo soluble en bisulfuro de carbono ( $CS_2$ ). El alquitrán obtenido de la destilación destructiva de un carbón graso, también contiene betún, por lo tanto también es un material bituminoso pero no debe confundirse con el asfalto, ya que sus propiedades difieren considerablemente. El alquitrán tiene bajo contenido de betún, mientras que el asfalto está compuesto casi enteramente por betún, entre otros compuestos.

El asfalto de petróleo moderno, tiene las mismas características de durabilidad que el asfalto natural, pero tiene la importante ventaja adicional de ser refinado hasta una condición uniforme, libre de materias orgánicas y minerales extraños.

#### **2.1.6. Obtención de Asfaltos en Refinerías:**

El crudo de petróleo es una mezcla de distintos hidrocarburos que incluyen desde gases muy livianos como el metano hasta compuestos semisólidos muy complejos, los componentes del asfalto. Para obtener este debe separarse entonces las distintas fracciones del crudo de petróleo por destilaciones que se realizan en las refinerías de petróleo.

### **-Destilación Primaria:**

Es la primera operación a que se somete el crudo. Consiste en calentar el crudo en hornos tubulares hasta aproximadamente 375°C. Los componentes livianos (nafta, kerosene, gas oil), hierven a esta temperatura y se transforman en vapor.

La mezcla de vapores y líquido caliente pasa a una columna fraccionadora. El líquido o residuo de destilación primaria se junta todo en el fondo de la columna y de ahí se bombea a otras unidades de la refinería.

### **-Destilación al Vacío:**

Para separar el fondo de la destilación primaria, otra fracción libre de asfaltenos y la otra con el concentrado de ellos, se recurre comúnmente a la destilación al vacío. Difiere de la destilación primaria, en que mediante equipos especiales se baja la presión (aumenta el vacío) en la columna fraccionadora, lográndose así que las fracciones pesadas hiervan a menor temperatura que aquella a la que hervían a la presión atmosférica. El producto del fondo de la columna, un residuo asfáltico más o menos duro a temperatura ambiente, se denomina residuo de vacío. De acuerdo a la cantidad de vacío que se practica en la columna de destilación, se obtendrán distintos cortes de asfaltos que ya pueden ser utilizados como cementos asfálticos.

### **-Desasfaltización con propano o butano:**

El residuo de vacío obtenido por destilación al vacío, contiene los asfaltenos dispersos en un aceite muy pesado, que, a la baja presión (alto vacío) y alta temperatura de la columna de vacío, no hierve (se destila). Una forma de separar el aceite de los asfaltenos es disolver (extraer) este aceite en gas licuado de petróleo. El proceso se denomina "desasfaltización" y el aceite muy pesado obtenido, aceite desasfaltizado. Se utiliza como solvente propano o butano líquido, a presión alta y temperaturas relativamente moderadas (70 a 120 °C). El gas licuado extrae el aceite y queda un residuo semisólido llamado "bitumen".

### **-Oxidación del asfalto:**

Es un proceso químico que altera la composición química del asfalto. Éste está constituido por una fina dispersión coloidal de asfaltenos y maltenos. Los maltenos actúan como la fase continua que dispersa a los asfaltenos. Las propiedades físicas de los asfaltos obtenidos por destilación permiten a los mismos ser dúctiles, maleables y reológicamente aptos para su utilización como materias primas para elaborar productos para el mercado vial. Al "soplar" oxígeno sobre una masa de asfalto en caliente se produce una mayor cantidad de asfaltenos en detrimento de los maltenos, ocasionando así de esta manera una mayor fragilidad, mayor resistencia a las altas temperatura y una variación de las condiciones reológicas iniciales.

## **2.2. PROPIEDADES**

### **2.2.1. Propiedades Mecánicas Básicas**

Cuando el asfalto es calentado a una temperatura lo suficientemente alta, por encima de su punto de inflamación, este comienza a fluidificarse, a veces como un fluido Newtoniano (fluidos donde el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la rapidez de deformación) y sus propiedades mecánicas pueden definirse por su viscosidad. A temperaturas más bajas, el asfalto es un sólido visco-elástico, sus propiedades mecánicas son más complejas y se describen por su módulo de visco-elasticidad, conocido como el módulo de stiffness.

### **2.2.2. Viscosidades de aplicación**

En muchas aplicaciones, el asfalto es calentado hasta hacerse lo suficientemente fluido para cada aplicación en particular. La siguiente tabla nos indica la viscosidad que debe tener el asfalto para una aplicación determinada. Se asume que la aplicación se llevará a cabo a la máxima viscosidad posible, es decir la mínima temperatura posible. En algunos casos, menores viscosidades pueden utilizarse, dependiendo de los materiales que se utilicen, debido a que pueden ser dañados por la temperatura excesiva.

**Tabla 2.1: Viscosidad del asfalto para una determinada aplicación**

<b>Aplicación</b>	<b>Viscosidad requerida (cst)</b>
Spray	20 - 100
Llenado de juntas	100 - 200
Mezclado de Juntas	200
Impregnación	20 - 200
Impermeabilización	200 - 1000
Pintado	600
Recubrimiento	1 000
Bombear	1 500 – 2 000

### **2.2.3. Propiedades generales**

El asfalto tiene una alta resistencia (o una baja conductividad) y es en consecuencia un buen material aislante. La resistencia de todos grados comerciales decrece con el incremento de la temperatura.

Asfaltos duros tienen una resistencia dieléctrica más alta que la de asfaltos menos viscosos; la resistencia dieléctrica decrece con el aumento de la temperatura.

El asfalto es moderadamente un buen material aislante térmico.

Los asfaltos son miscibles entre ellos en todas las proporciones. La penetración y el punto de ablandamiento de una mezcla de dos asfaltos puede ser estimada utilizando tablas.

Bajo severas condiciones, el asfalto podrá ser fácilmente combustible y en algunas condiciones como ser en techados algunos retardadores de fuego pueden ser utilizados para reducir la inflamabilidad y la velocidad del fuego.

El asfalto es generalmente considerado con alta y buena resistencia al ataque a los químicos tales como ácidos, sales, álcalis, etc. Información general sobre la resistencia a las propiedades es como sigue:

- Resistencia al ataque se incrementa con la dureza del asfalto.
- Asfaltos oxidados son más resistentes que los asfaltos directos de penetración.
- Asfaltos desasfaltizados con propano tienen una buena resistencia al ataque químico

- Agregando un 5 % de una parafina dura (punto de fusión por encima de 60 °C) al asfalto pueden mejorar la resistencia al ataque de ácidos.
- El ataque químico sobre el asfalto es peor cuando se incrementa la temperatura, se incrementa el tiempo y se incrementa la concentración del químico.
- El ataque sobre un asfalto inmerso en un químico líquido es más severo que si el ataque se realiza con el mismo químico en forma de gas o vapor. (5)

#### **2.2.4. Propiedades deseables**

- Alta elasticidad a elevadas temperaturas.
- Suficiente ductilidad a bajas temperaturas.
- Baja susceptibilidad a cambios de temperaturas.
- Bajo contenido de parafina.
- Buena adhesión y cohesión.
- Alta resistencia al envejecimiento.

### **2.3. LA UTILIZACIÓN DEL CAUCHO**

La reutilización de neumáticos es de amplio uso y difusión en aquellos países que poseen normativas ambientales claras y eficientes.

El caucho puede ser natural o sintético. El de origen natural se elabora a partir del látex, que es una resina blanca lechosa que sale de la corteza del árbol de caucho. Este, si bien es originario de Brasil, fue llevado a Inglaterra en 1876 y de allí exportado a otras zonas bajo dominio británico, determinando que hoy las principales plantaciones (un 90 % del mercado mundial) se encuentren en el sudeste asiático, principalmente en Malasia.

En un principio las utilidades de esta materia prima eran pocas. Fue el comerciante de ferretería Charles Goodyear (1800 – 1860) quién descubrió que, mezclándolo con el azufre y calentándolo, se evitaba que fuese tan pegajoso cuando estaba caliente y tan rígido cuando enfriaba. A partir de este proceso llamado vulcanización se comenzó a fabricar una gama muy amplia de productos como aislamiento para cables eléctricos, mangueras, cintas transportadoras y de manera destacada cubiertas para transporte de automóviles, camiones, aviones, etc. Hacia fines de siglo XIX Michelin en Francia, Dunlop en Inglaterra y

Goodrich en Estados Unidos fabricaron las primeras cubiertas para automóviles. Adecuadas reglamentaciones limitan el uso de los neumáticos, debido al deterioro que se produce en el dibujo del mismo, estando su vida útil relacionada con la calidad del neumático en general, el tipo de caucho y el uso y tratamiento que el mismo reciba. Según el Manual de Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos, editado por CEMPRE – Uruguay, “el proceso de regeneración de la cubierta implica la separación de la goma vulcanizada de los demás componentes y su digestión con vapor y productos químicos, como álcalis, mercaptanos o aceites minerales. El producto de esta digestión es refinado en molinos hasta la obtención de un manto uniforme, o extrusado, para obtener un material granulado (...) la goma regenerada se usa en compuestos destinados a productos con menor exigencia en cuanto a desempeño, tales como alfombras, protectores, suelas de calzado, neumáticos industriales y para bicicletas”. Se puede enumerar su uso en otros fines, como por ejemplo vallas de seguridad, cercos de contención de arena en las playas, paragolpes de embarcaciones, hamacas, juegos, etc. En particular queremos destacar que en Estados Unidos se ha comenzado a exigir en las licitaciones públicas que las empresas constructoras utilicen un porcentaje de 5 % de neumáticos trozados o en polvo en las obras a construir. De acuerdo a la molienda se originan distintos tamaños de partículas de caucho. Actualmente en Alemania, donde las cubiertas también se queman o terminan en los vertederos, los científicos de la Universidad de Chemnitz han descubierto un procedimiento por el cual después de moler la goma se las funde con plástico propileno, que permite fabricar un material resistente a la tracción, extensible y fácil de trabajar, con el que se pueden producir por ejemplo paragolpes de vehículos. Según el citado manual del CEMPRE en Estados Unidos, Japón y Alemania se están ensayando diversos procesos de pirolisis con el objetivo de transformar los hidrocarburos presentes en los neumáticos en nuevos materiales como aceite y negro humo, enmarcado dentro de la re-obtención de materia prima.(6)

#### **2.4. COMPOSICION Y CARACTERISTICAS DE LOS NEUMÁTICOS**

En la actualidad, la mayoría de los neumáticos de vehículos de pasajeros como los de camión son radiales, por lo que están compuestos de una banda de rodamiento

elástica, una cintura prácticamente inextensible y una estructura de arcos radialmente orientada, sobre una membrana inflada y sobre unos aros también inextensibles que sirven de enganche a otro elemento rígido, que es la llanta. También existe otro tipo de neumáticos llamados diagonales, utilizados principalmente en camiones.

La complejidad de la forma y de las funciones que cada parte del neumático tiene que cumplir se traduce también en una complejidad de los materiales que lo componen. El principal componente del neumático es el caucho: casi la mitad de su peso.

La fabricación de neumáticos concentra un gran porcentaje de la industria del caucho constituyendo el 60 % de la producción anual del mismo.

Los elastómeros o cauchos son materiales poliméricos cuyas dimensiones pueden variar según sea el tipo de esfuerzo al que son sometidos, volviendo a su forma cuando el esfuerzo se retira.

El caucho natural se extrae a partir del árbol *Hevea Brasiliensis* que es un látex con partículas de caucho en suspensión. Después de un proceso de secado y de ahumado se utilizan diferentes productos. Hoy en día alcanza el 30 % del mercado de los cauchos, el resto lo ocupan los cauchos sintéticos. Los tipos de caucho más empleados en la fabricación de los neumáticos son:

Cauchos naturales (NR)

Polibutadienos (BR)

Estireno – Butadieno (SBR)

Polisoprenos sintéticos (IR)

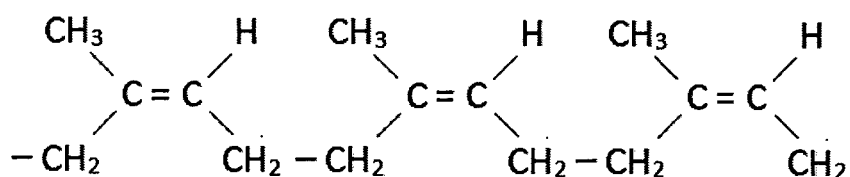
La matriz de caucho más utilizada es el copolímero estireno-butadieno (SBR), en el que la proporción es de aproximadamente un 25 % en peso de estireno, o una mezcla de caucho natural y SBR.

Todos los tipos de cauchos poseen diferentes propiedades, pero también con algo en común: todos, una vez vulcanizados, pueden ser muy duraderos, por lo que necesitarían una gran cantidad de tiempo para su degradación.

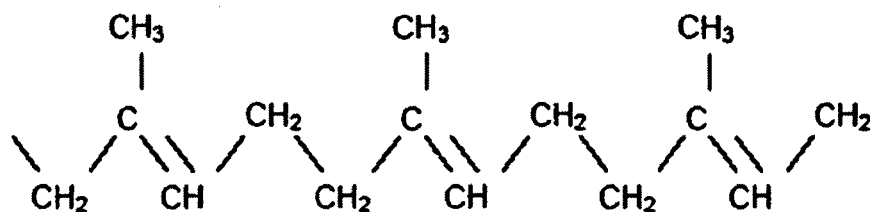
La combinación se realiza de modo que los cauchos naturales proporcionen elasticidad y los sintéticos, estabilidad térmica. Esta combinación de efectos favorece la durabilidad y la capacidad de adaptarse a las nuevas exigencias del tránsito. La estructura de los cauchos naturales está formada por cis-1,4 polisopreno mezclado con pequeñas cantidades de proteínas, lípidos y sales



inorgánicas, entre otros. Se encuentra así un polímero de cadena larga y enredada en forma de espiral, de peso molecular medio,  $5 \times 10^5$  g/mol, que a temperatura ambiente está en un estado de agitación continua. Este comportamiento general es debido en parte al impedimento estérico del grupo metilo y el átomo de hidrógeno, en el mismo lado del doble enlace carbono-carbono. Esta cadena se complementa con otro isómero estructural llamado gutapercha:



Segmento de una cadena de polímeros de caucho natural



Segmento de cadena polimérica de la gutapercha

**Figura 2.3: Estructura de un caucho natural y de la gutapercha**

El proceso de vulcanización a que se someten los neumáticos es un entrelazamiento de cadenas de polímeros con moléculas de azufre a alta presión y temperatura:

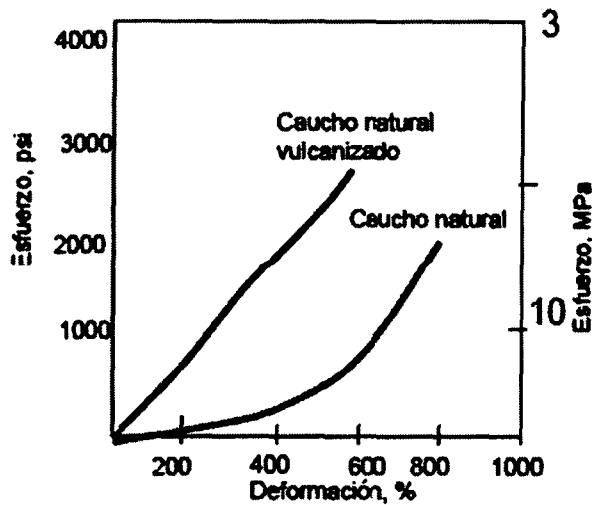


Figura 2.4: Caucho natural y caucho natural vulcanizado

En el proceso de vulcanización el caucho pasa de ser un material termoplástico a ser uno elastomérico. Las posibilidades de deformación son muy diferentes, como se ilustra en la Figura 2.4.

La adición de cargas hace abaratar el valor del neumático, dándole cuerpo y rigidez, se utilizan negro de humo y arcillas modificadas.

Además de caucho, los neumáticos están compuestos por:

- Rellenos reforzantes: el negro de humo, formado de partículas muy pequeñas de carbono, que aumenta la tenacidad y la resistencia a la tracción, a la torsión y al desgaste.
- Fibras reforzantes: textiles y de acero, usualmente en forma de hilos, que aportan resistencia a los neumáticos: algodón, nylon y poliéster. La cantidad de acero y fibras sintéticas reforzantes en los neumáticos varía según el fabricante.
- Plastificantes: se adicionan para facilitar la preparación y elaboración de las mezclas, utilizándose para el control de la viscosidad. Reducen la fricción interna durante el procesado y mejoran la flexibilidad a bajas temperaturas del producto: aceites minerales (aromáticos, nafténicos y parafínicos) y de tipo éster.
- Agentes vulcanizantes: el azufre se usa para entrecruzar las cadenas de polímero en el caucho.
- Acelerantes: compuestos órgano - sulfurados, benzotiazol y derivados, óxido de zinc y ácido esteárico.

- Retardantes: n-nitroso difenil amina.
- Otros componentes (antioxidantes o antiozonizantes, adhesivos).

En forma general el neumático está compuesto por los siguientes componentes:

**Tabla 2.5: Composición de un neumático**

Componentes	Tipo de vehículo		Función
	Automóviles % en peso	Camiones % en peso	
Caucho natural	14	27	Estructural-deformación
Caucho sintético	27	14	Estructural-deformación
Negro de humo	28	28	Mejora oxidación
Acero	14 - 15	14 - 15	Esqueleto estructural
Fibra textil, suavizantes, óxidos, antioxidantes, etc	16 - 17	16 -17	Juventud
Peso promedio	8,6 kg	45,4 kg	
Volumen	0,06 m <sup>3</sup>	0,36 m <sup>3</sup>	

Fuente: Rubber manufacturers Association

En cuanto a su composición química, puede variar según el uso a que están destinados:

**Tabla 2.6: Composición química de un neumático**

Elementos	%
Carbono	70 - 83
Hidrógeno	5 - 7,5
Azufre	1,2 - 1,9
Color	0,1 - 0,8
Nitrógeno	1,5
Oxígeno	5
Zinc	1,2 - 2,7
Hierro	5 - 18
Otros	5

Algunas de las cuestiones importantes sobre la composición de los neumáticos son las siguientes:

- Los neumáticos contienen cloro en un 1% de su peso.
- Los policlorobifenilos (PCB), peligrosos productos clorados cuya fabricación está prohibida, están presentes en los neumáticos viejos, mezclados con algunos de sus componentes (aceites y plastificantes).
- Los componentes de los neumáticos contienen varios metales pesados en diferentes cantidades.

En la Figura 2.5. Se puede observar la constitución esquemática de un neumático. Se evidencia la heterogeneidad de la materia prima constitutiva del polvo o molienda de caucho, a pesar de que antes de las primeras moliendas se retiren parte de los componentes.



**Figura 2.5: Constitución esquemática de un neumático**

En la Tabla 2.7. Podemos observar la relación de algunas de las principales propiedades entre el caucho natural vulcanizado y otros elastómeros sintéticos. Se observa el bajo valor tensional y la alta elongación que poseen:

**Tabla 2.7: Principales propiedades del caucho natural en relación a otros elastómeros sintéticos**

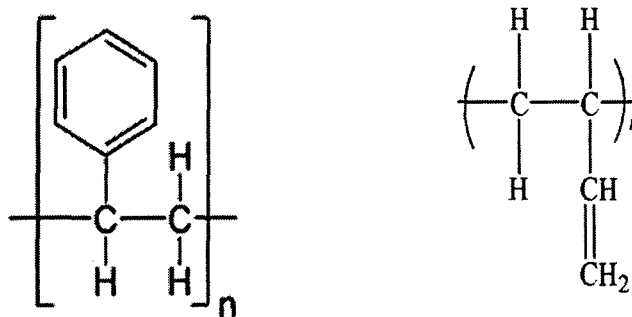
Elastómero	Resistencia a la Tracción PSI	Elongación %	Densidad g/cm <sup>3</sup>
Caucho natural vulcanizado	2,5 – 3,5	750 - 850	0,93
SBR	0,2 – 3,5	400 - 600	0,94
Neopreno	3 - 4	800 - 900	1,25
Silicona	0,6 – 1,3	100 - 500	1,1 – 1,6

Como se ha mencionado, entre los cauchos sintéticos más utilizados se encuentran los de tipo estireno butadieno, siendo el más ampliamente utilizado el SBR. Después de la polimerización este material contiene entre el 20 al 23 % de estireno. En la Figura 4 se observa la conformación de la cadena.

La presencia del butadieno permite el entrecruzamiento con el azufre, siendo capaz de producir el isómero cis que tiene una mayor elasticidad que la del caucho

natural. El estireno permite tener un caucho más duro y más tenaz, haciendo que no cristalice bajo grandes esfuerzos.

El SBR es más económico que el caucho natural, por lo que ha sido más difundido y utilizado desde hace tiempo en neumáticos, pero previamente tienen que ser tratados, pues elevan fácilmente su temperatura y absorben con facilidad aceites y naftas derramadas. Su performance es amplia y se encuentra ubicada entre los -50 a 82 °C.



Poliestireno

Polibutadieno

Figura 2.6: Conformación de la cadena

### 2.5. DESVULCANIZACIÓN

El proceso de vulcanizado deja la distribución de las cadenas poliméricas como se observa en la Figura 2.7.

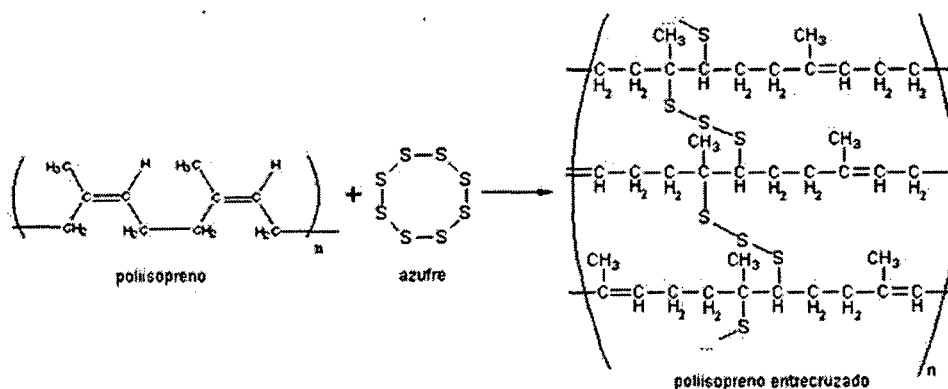


Figura 2.7: Cadena vulcanizada

El desvulcanizar es un proceso costoso y pocas veces aplicable en la utilización de los neumáticos para la adición a asfaltos. El proceso consiste en la rotura de los enlaces S-S del polvo de caucho mediante técnicas térmicas y químicas. Se están

desarrollando nuevos procesos que son propiamente de reciclado, que vuelve el caucho a su comportamiento plástico. Existen procesos químicos (De-Link), mecánicos (ultrasonidos) y bacteriológicos.

## **2.6. NIVELES DE MOLIENDA**

Los niveles de molienda del caucho se pueden clasificar en:

### Nivel de trituración previa

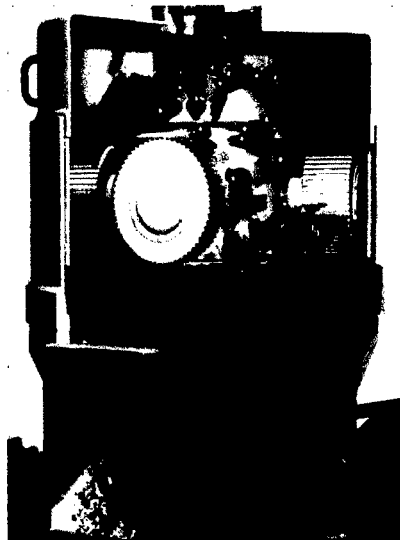
Se realiza un triturado previo con trituradoras de 2 o más ejes, con cuchillas que giran entre 15 y 20 RPM. El tamaño de producción puede no ser estable, pero eso no tiene gran importancia en esta etapa porque se considera de trituración macro.

### Nivel de trituración final

Existen dos métodos en los que se requiere que previamente haya sido retirado el componente metálico. Los métodos se enuncian a continuación.

1. A temperatura ambiente: con molinos clásicos y por cilindros se separa la parte textil.

2. Criogénesis: se realiza entre  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  dando un producto más afín y de mejor finura de hasta valores que pasan un 100 % la malla N° 100 de ASTM.



**Figura 2.8: Molienda de caucho en forma preliminar y en procesos de criogénesis**

## **2.7. VALORIZACIÓN DE LOS NFUs**

Para valorizar los neumáticos usados se privilegiarán los procedimientos que permiten reciclar directamente los materiales y en consecuencia usar con moderación los recursos naturales. Se pueden citar:

**2.7.1. Valorización material:** enteros, troceados, molidos, los neumáticos pueden ser reutilizados y valorizados en diversas aplicaciones. Pueden destacarse las aplicaciones en arrecifes de los neumáticos enteros, como aislante térmico y acústico de los neumáticos triturados, o las aplicaciones en materiales bituminosos. La utilización del polvo de neumáticos usados, en aplicaciones en la red vial a través de betunes modificados, puede seguir otras posibles vías:

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

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

**2.7.3. Vulcanizado:** si los neumáticos están todavía en buen estado, pueden revestirse de una nueva superficie de rodadura.

**2.7.4. Reciclaje directo de materiales:** valorizando los productos resultantes de la preparación de neumáticos fuera de uso.

- El negro de carbono, utilizado en caucho, pinturas, y en la fabricación de carbono activo.
- El polvo de neumático, utilizado en la fabricación de neumáticos nuevos, pero también en adhesivos a base de látex, y revestimientos “silenciosos”.
- Granulado de neumático, con posibles utilidades en la construcción ferroviaria, también para reducir emisiones sonoras.



Existen diversas técnicas que permiten llevar a cabo la valorización material y/o energética de los neumáticos fuera de uso:

- **Tecnologías fuera de los sistemas de reciclado del material**, entre las que se incluye el **vulcanizado**, por el que se aprovecha la carcasa metálica del neumático.
- **Tratamientos mecánicos**, donde se procede al triturado del neumático.
- **Tecnologías de reducción de tamaño**, mediante moliendas que permiten obtener polvo de caucho que pueden ser mecánicas a temperatura ambiente, moliendas criogénicas o húmedas.
- **Tecnologías de regeneración**, la recuperación o reclaiming y la desvulcanización.
- **Otras tecnologías**, como la pirólisis y la termólisis.

Las tecnologías y aplicaciones que permiten valorizar material y energéticamente el caucho y los neumáticos usados, son numerosas. No es necesario ceñirse a una única y lo más ventajoso es utilizar varias de ellas para reducir lo más posible las grandes cantidades de neumáticos que se producen y que en estas últimas décadas se han ido acumulando.

La valorización energética es una de las posibilidades que actualmente se manejan para eliminar o reducir la cantidad de neumáticos usados y al mismo tiempo limitar el consumo de combustibles fósiles. Los neumáticos usados triturados, se emplearían como combustible alternativo, por ejemplo en los hornos de cementeras, mejorando la competitividad de éstas ya que los neumáticos usados son menos costosos que el fuel. Sin embargo existe una tendencia (más desarrollada en Europa) hacia el empleo del caucho molido en instalaciones deportivas, (se está diversificando en otras construcciones de ingeniería civil) y en mezclas bituminosas (principalmente en carreteras).

La pirólisis presenta más reticencias en su comercialización debido al coste de la instalación necesaria. Una salida interesante podría ser el empleo de industrias mixtas formadas por cementera (u otro proceso) y pirólisis, de esta manera se ahorrarían costes, empleando los aceites pirolíticos como combustible (de elevado

poder calorífico) y el negro de carbono para fabricación de elementos que no requieran elevadas características técnicas.

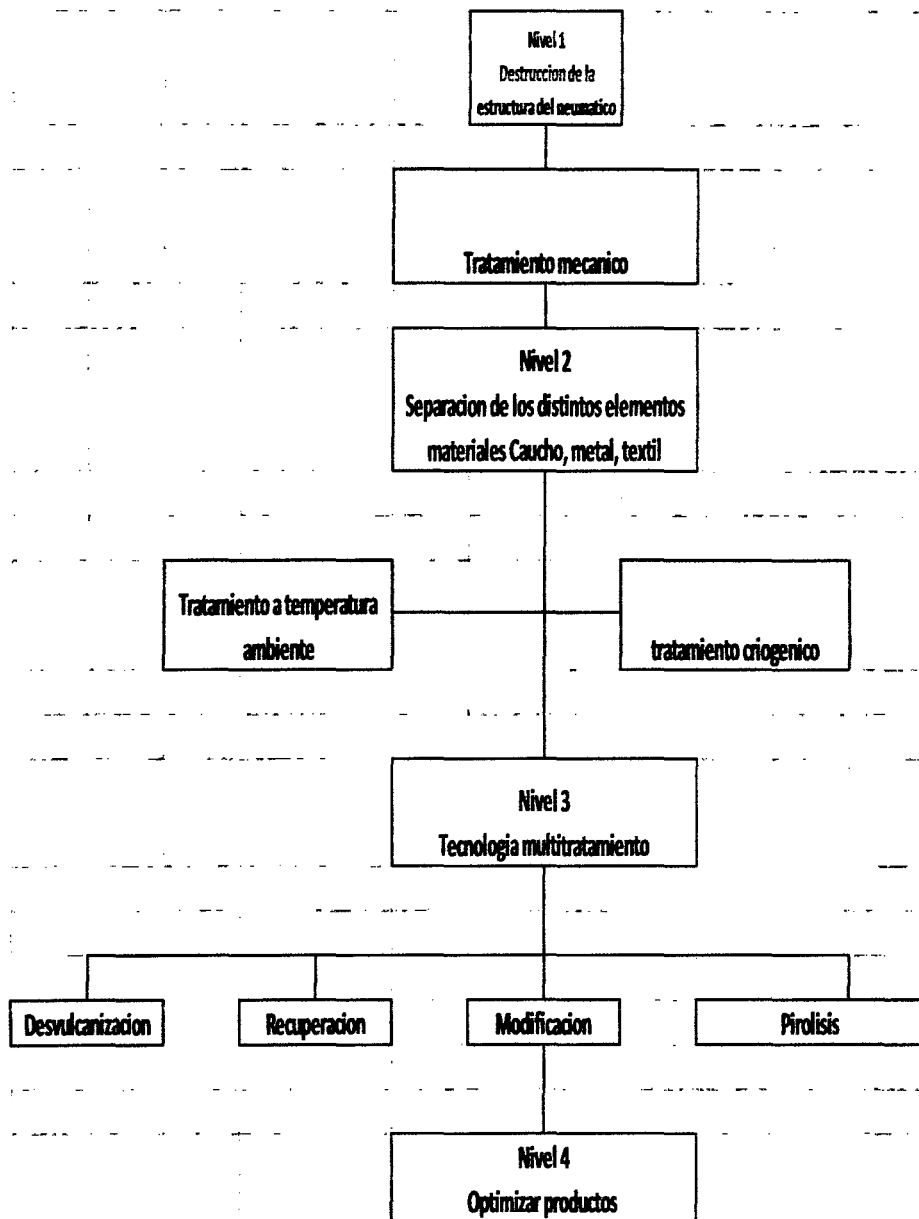
Con respecto a la valorización material, se concluye que es factible eliminar la mayor parte de los neumáticos que se desechan empleándolos en carreteras. Esta eliminación puede hacerse sin más inversiones que las necesarias para la trituración de neumáticos y ambas vías de utilización, seca y húmeda, pueden aportar ventajas importantes a la carretera desde el punto de vista técnico. Dichas vías suponen un ahorro de las materias primas en origen y una mejora, de las propiedades (deformación plástica, comportamiento a fatiga, módulo dinámico...), respecto al modificado con polímeros.

La eliminación a través de la carretera no tiene ningún riesgo posible de contaminación, siendo sin duda un procedimiento ecológico.

#### **2.7.5. Tecnologías utilizadas para la valorización material y energética de los NFUs**

Existen varios tipos de tecnologías empleadas para la recuperación y/o reciclaje de los NFUs, según el uso que se le vaya a dar se empleará una o varias tecnologías. Se pueden distinguir las siguientes:

- **Tecnologías fuera de los sistemas de reciclado del material;** se puede citar el denominado Buffing (suele ser una parte del proceso de vulcanizado que no incluye a los neumáticos al final de su vida útil), recanalado y vulcanizado.
- **Tratamientos Mecánicos;** proceso mecánico mediante el cual los neumáticos son comprimidos, cortados o fragmentados en piezas irregulares. Entre ellos se encuentran fabricación de balas, troceado (ripping), trituración (cutting).
- **Tecnologías de reducción de tamaño;** se distingue entre el realizado a temperatura ambiente, criogénico y húmedo.
- **Tecnologías de Regeneración;** desvulcanización, recuperación del caucho (reclaiming), modificación superficial, modificación biológica.
- **Otras tecnologías;** Pirólisis-Termólisis.



En función de la aplicación se empleara uno o varios niveles

**FIGURA 2.9: Niveles de tratamiento.**

**TABLA 2.8: Caracterización de los productos según tecnologías empleadas.**

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

A continuación se explican detalladamente algunas de las tecnologías citadas.

## **2.8. TECNOLOGÍAS FUERA DE LOS SISTEMAS DE RECICLADO DEL MATERIAL.**

### **2.8.1. VULCANIZADO**

El **recanalado** es un paso intermedio, antes de convertirse en residuo, que consiste en remarcar el dibujo primitivo en aquellos neumáticos que no han perdido más del 75 % de su profundidad original.

Sin embargo, la reutilización más frecuente del NFU es proceder a su **vulcanizado**, aprovechando la carcasa metálica que ha de revestirse de caucho con unas características en consonancia con el destino del neumático. No obstante, dado que la carcasa sufre fatiga y deterioro a lo largo de su vida y debido a las exigencias en las normativas de calidad de los neumáticos (reglamentos 108, 109 de las Naciones Unidas sobre neumáticos vulcanizados), el número de vulcanizadas que un neumático admite es limitado y dependerá de la superación con éxito de los ensayos de carga y velocidad contemplados en los Reglamentos 30 y 54 de Ginebra. Actualmente son vulcanizados los neumáticos de camión y avión pero no los procedentes de coche o camiones pequeños.

El proceso de vulcanizado consiste en sustituir las gomas viejas del neumático y reconstruir su estructura original convirtiéndolo en un neumático de características similares al nuevo.

Atendiendo a la superficie renovada se pueden distinguir 3 sistemas:

- Vulcanizado integral; se renueva la banda de rodamiento y los flancos.
- Vulcanizado semi-integral; se renueva la banda de rodamiento y parte del flanco.
- Vulcanizado sólo de la banda de rodamiento.

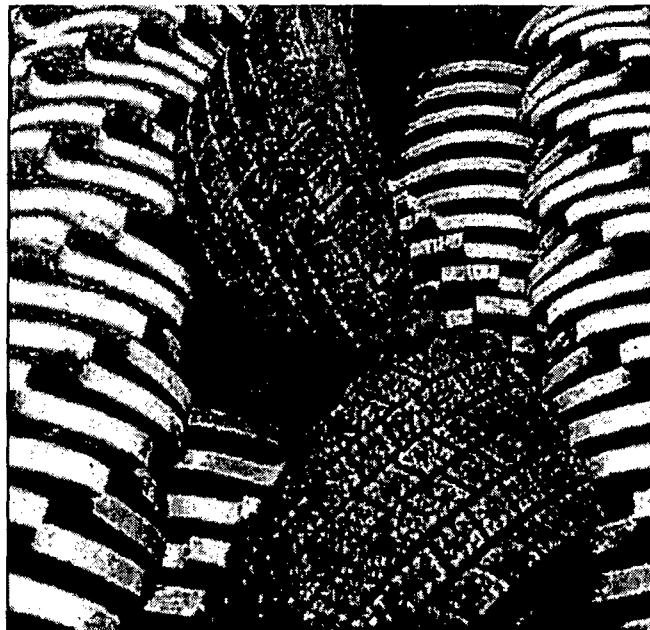
Atendiendo al sistema de adhesión de las nuevas gomas se pueden distinguir 2 tipos:

- Vulcanizado en caliente; el proceso de vulcanización se realiza en prensas a una temperatura comprendida entre 150-160 °C.
- Vulcanizado en frío; la banda de rodamiento está previamente vulcanizada y se adhiere mediante una goma (unión), vulcanizándose en autoclaves a una temperatura comprendida entre 98 - 125 °C.

El vulcanizado es probablemente uno de los caminos más sensibles para prevenir la acumulación de los neumáticos usados en los vertederos. Un aspecto positivo del vulcanizado es el hecho de que para la fabricación de un neumático nuevo de coche se necesita unos 32 litros de crudo mientras que el vulcanizado necesitaría unos 11 litros, en neumáticos de camiones se pasa de 100 a 32 litros de crudo. Por lo que produce una reducción de coste de material prima entre 30 - 50 %.

## **2.9. TRATAMIENTOS MECÁNICOS**

Muchas de las posibles aplicaciones de los NFU requieren de una trituración previa hasta el tamaño adecuado al uso específico que se le vaya a dar. Este proceso normalmente se realiza a través de trituradoras formadas por dos o más ejes paralelos de cuchillas que giran a distintas velocidades para favorecer la incorporación del neumático. La separación de los ejes define el tamaño de los trozos conseguidos. La utilización de este tipo de trituradoras es un paso previo a la molienda y en los vertederos o centros de recogida para disminuir el volumen de los neumáticos.



**Figura 2.10: Trituración de los neumáticos**

## **2.10. TECNOLOGÍAS DE REDUCCIÓN DE TAMAÑO**

Los tres mayores procesos empleados para producir polvo de caucho son la molienda mecánica a temperatura ambiente, la molienda criogénica y la molienda húmeda. El polvo de caucho también se puede obtener mediante buffings a partir de la industria del vulcanizado del neumático, normalmente el tamaño de partícula es mayor. Antes de la molienda a tamaños menores de 1 mesh (0,2 mm) el neumático se reduce a trozos relativamente grandes (< 300 mm, cuts) y después a tiras de tamaño entre 50-300 mm (shred).

Un tema muy sensible es el impacto medioambiental del polvo de los neumáticos, tanto el procedente del reciclado como el generado en el uso normal del neumático (debris), que se traduce en el lixiviado del ZnO. La clasificación de la comisión europea (2003/105/EC) señala el óxido de Zinc, como peligroso para el medio ambiente y muy tóxico para los organismos acuáticos.

### **2.10.1. Molienda a temperatura ambiente**

La molienda a temperatura ambiente se suele llevar a cabo en un molino de dos rollos tipo “cracker”, donde los rollos contienen ranuras con bordes afilados que rompen el caucho. Son molinos clásicos constituidos por un rotor y el estator que lo rodea. Previamente al molido es necesario separar el componente metálico para evitar daños al molino, se hace normalmente con separadores magnéticos dispuestos sobre las cintas. Para eliminar la parte textil se suele emplear cintas o bandejas vibratorias que originan el apelmazamiento de las fibras, que después se separan por tamizado u otros dispositivos. El proceso a temperatura ambiente normalmente envuelve las siguientes actividades; separación del metal, separación de la fibra, reducción a polvo grueso, reducción a polvo ultra fino, empaquetado y pesado. El equipamiento empleado se puede dividir en 8 grupos; cuchillas gruesas/afiladas, granuladores primarios y secundarios, raspadores, molinos cracker primarios y secundarios, rodillos de acabado y micro rodillos. La distribución y tamaño de la partícula del polvo depende del número de veces que se pasa el polvo por el rodillo y del tipo de rodillo empleado. En general, el rodillo primario reducirá a tamaños entre 10 - 40 mesh, y los secundarios y de acabado podrán reducir a 80 mesh.

Para una óptima valorización es necesario realizar, en el momento de la recepción de los neumáticos en la planta de tratamiento, un control de peso, selección de tipos, característica, composición, etc. así como separar aquellos que se puedan valorizar para el vulcanizado. Para que una planta de reciclado funcione correctamente debe ser proporcional al volumen de NFUs que existan en la zona (teniendo en cuenta que no es rentable transportar los NFUs a más de 300 km.). Existen experiencias negativas en Europa de la creación de plantas con capacidades superiores a las posibilidades del mercado. Además, debe tener una gestión logística de recogida acorde al volumen que se pretende reciclar. Estas instalaciones necesitan mucha potencia y tienen un fuerte desgaste de cuchillas de corte, cilindros y platos de garras, que requieren mantenimiento continuo y de coste elevado.

#### **2.10.2. Molienda criogénica**

A muy bajas temperaturas (-200 °C) el caucho se fragiliza desapareciendo su elasticidad característica siendo posible, por tanto, desintegrarlo fácilmente.

El proceso de molienda criogénica viene acompañado por un primer paso de enfriamiento de las piezas de caucho (menores de 7,62 mm) con nitrógeno líquido, congelándolas. Los trozos (shreds) congelados pasan por un molino de impacto (similar a un percutor o martillo) donde son molidos en elementos más finos que 1 mesh. El polvo obtenido se seca, se separan la fibra y el metal y se clasifica el polvo según los tamaños obtenidos.

La forma, tamaño, distribución de tamaños y características superficiales de las partículas de caucho molidas obtenidas por molienda criogénica son diferentes a las obtenidas por molienda a temperatura ambiente. Éstas últimas tienden a tener una forma irregular con una considerable rugosidad superficial y el caucho es parcialmente oxidado en la superficie debido al calor generado durante el proceso. Sin embargo, las partículas del polvo obtenidas por molienda criogénica presentan una superficie relativamente suave, un amplio rango de tamaño de partícula así como una mínima oxidación superficial. Estas diferencias en la naturaleza y reactividad pueden producir diferentes propiedades en el producto final.



Las cifras de consumo de la molienda criogénica respecto de la mecánica son similares (para una planta de 35,00 toneladas/año consumiría 400 Kw/h), o ligeramente inferiores, sin embargo hay que añadirle el gasto de nitrógeno, se estima en 0,5 - 0,9 Kg. /Kg. caucho molido (con finuras que van desde 40 mesh a 100/110 mesh) [11]. Es decir, la molienda criogénica presenta un coste capital más bajo pero un coste de operatividad mayor debido al elevado precio del nitrógeno líquido y a la fase adicional de secado requerida para eliminar la humedad.

Las aplicaciones típicas, en base a 45 mesh, para cada tipo de molienda son;

- Para cualquier uso de mortero y revestimientos mediante ligantes orgánicos, estireno-acrílicos. Por molienda criogénica se obtienen gránulos esféricos puros.
- Para morteros de clase inferior. Obtenidos mediante molienda mecánica; son gránulos planos o planiformes con bordes levantados y en forma de espigas duras fundidas (formadas por efecto térmico durante la molienda).
- Para pavimentos deportivos, modificantes de asfaltos, cargas de mezclas con plásticos, etc. ambos tipos de gránulos ofrecen iguales resultados.
- Sensibilidad a los agentes atmosféricos; el grado de humidificación es mayor en gránulos mecánicos, diferencia sólo importante para el peso real del polvo de caucho y su rendimiento.

Actualmente, el potencial del mercado se centra en el granulado a temperatura ambiente, pues la calidad requerida del polvo para las distintas aplicaciones empleadas no justifica la duplicación del coste (en el caso de molienda criogénica).

Sin embargo, a partir del año 2000 comienzan a aparecer aplicaciones rentables del granulado criogénico; como modificante de betunes y revestimientos aislantes que requieran buenas homologaciones de aislamiento acústico (UNE-EN ISO-140-3), térmico (UNE-92202), resistencia al fuego (UNE-23727-90) y adherencia e impermeabilidad al agua (Guía UEA tc). Así como su aplicación sobre los cultivos especiales de base hidropónica (técnica de optimización del entorno en cultivos interiores), con polvo de caucho como soporte en vez de la sílice, debido

a su baja densidad útil, que podría tener gran importancia para estaciones fijas interplanetarias, donde la variable peso tiene gran importancia.

### **2.10.3. Molienda húmeda**

No se ha escrito demasiado acerca de este tipo de molienda, aunque alguno de los procesos de reducción de tamaño a temperatura ambiente incluye extrusoras.

El procedimiento seguido normalmente consiste en una serie de ruedas de molienda con agua pulverizada inyectada continuamente para asegurar el enfriamiento del polvo. Después de este proceso se separa el agua del polvo y se seca.

### **2.11. PIRÓLISIS-TERMÓLISIS**

Entre las posibles vías de valorización de los neumáticos está la pirólisis, en la que los neumáticos se reducen a unas corrientes gaseosas, de aceite condensable, residuo carbonoso y metal. Aunque a pesar de las investigaciones realizadas hasta ahora apenas hay alguna operación comercial en funcionamiento, sigue habiendo en la actualidad proyectos basados en la pirólisis de neumáticos que tratan de llegar a la rentabilidad mediante distintas estrategias de valorización de los productos.

En el proceso de pirólisis se calientan los trozos de neumático (1-3 cm) a temperatura moderada (400 – 800 °C) en ausencia de oxígeno o con una cantidad limitada del mismo. La degradación térmica del material produce una descomposición del neumático donde los elementos orgánicos volatilizables (principalmente cadenas de caucho) se descomponen en gases y líquidos, y los elementos inorgánicos (principalmente acero y negro de carbono no volátil) permanecen como residuo sólido. Los gases pirolíticos están compuestos principalmente por metano, butenos y butanos junto con otros hidrocarburos ligeros; también contienen en baja proporción CO, CO<sub>2</sub>, y H<sub>2</sub>S. Los gases pirolíticos tienen un gran poder calorífico (68 - 84 MJm<sup>-3</sup>). Los sólidos pirolíticos (de iguales dimensiones que el original) se desintegran fácilmente en polvo de carbono, cordones de acero y filamentos.

Los productos obtenidos en la pirólisis son el residuo carbonoso, aceite y gas. Mediante la variación de la velocidad de calentamiento en el pirolizador se puede modificar la relación entre aceite condensable y gas no condensable (a mayor velocidad mayor producción de gas). Actualmente el aceite condensable es lo más problemático en un proceso de pirólisis, en cuanto a su aplicación. El gas de pirólisis se emplea como combustible para el propio reactor de pirólisis o para algún otro proceso como sustituto de combustible fósil.

Actualmente en el proceso de pirólisis de neumáticos, para que la operación resulte rentable es necesario valorar tanto la corriente gaseosa como la corriente de aceites condensables, aunque el mayor margen de valorización esté en el negro de carbono pirolítico.

Los productos obtenidos mediante pirólisis y sus características dependen de la fuente de alimentación, las condiciones experimentales y de las características específicas del sistema empleado (tamaño y tipo de reactor, eficiencia de la transferencia de calor, tiempo de permanencia...). Se ha observado una relación inversamente proporcional entre el tamaño de las partículas de neumático y la conversión pirolítica, así como que la temperatura de degradación máxima del mismo tipo de caucho bajo idénticas condiciones depende de la composición del neumático empleado, o que las constantes cinéticas dependen de la velocidad de calentamiento o de la conversión.

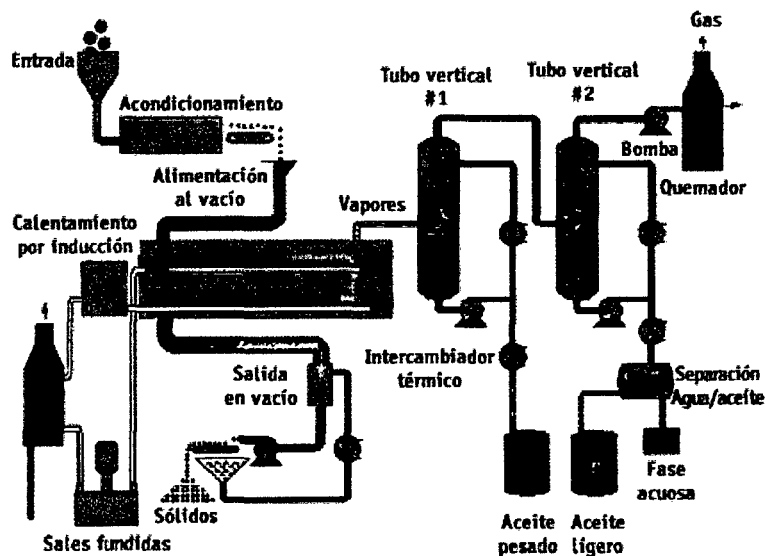


Figura 2.11: Proceso de pirociclado

Existen dos tipos principales de aceites residuales, H 09 y H 18, que se derivan de la pirolisis del caucho. El aceite H 09 es el que contiene un mayor porcentaje de coque (10 %), mientras que el aceite H 18 contiene un 1,8 %. El coque pirolítico se puede separar totalmente del aceite pirolítico, el cual puede emplearse como asfalto modificado. Un equipo de investigación de la Universidad Laval en Québec, ha estudiado el efecto del aceite H 18 sobre las propiedades del asfalto modificado con polietileno reciclado RPE-H 18 (en 5 – 10 %), demostrando que se mejoraban las prestaciones del asfalto a moderadas y altas temperaturas (15 a 90 °C).

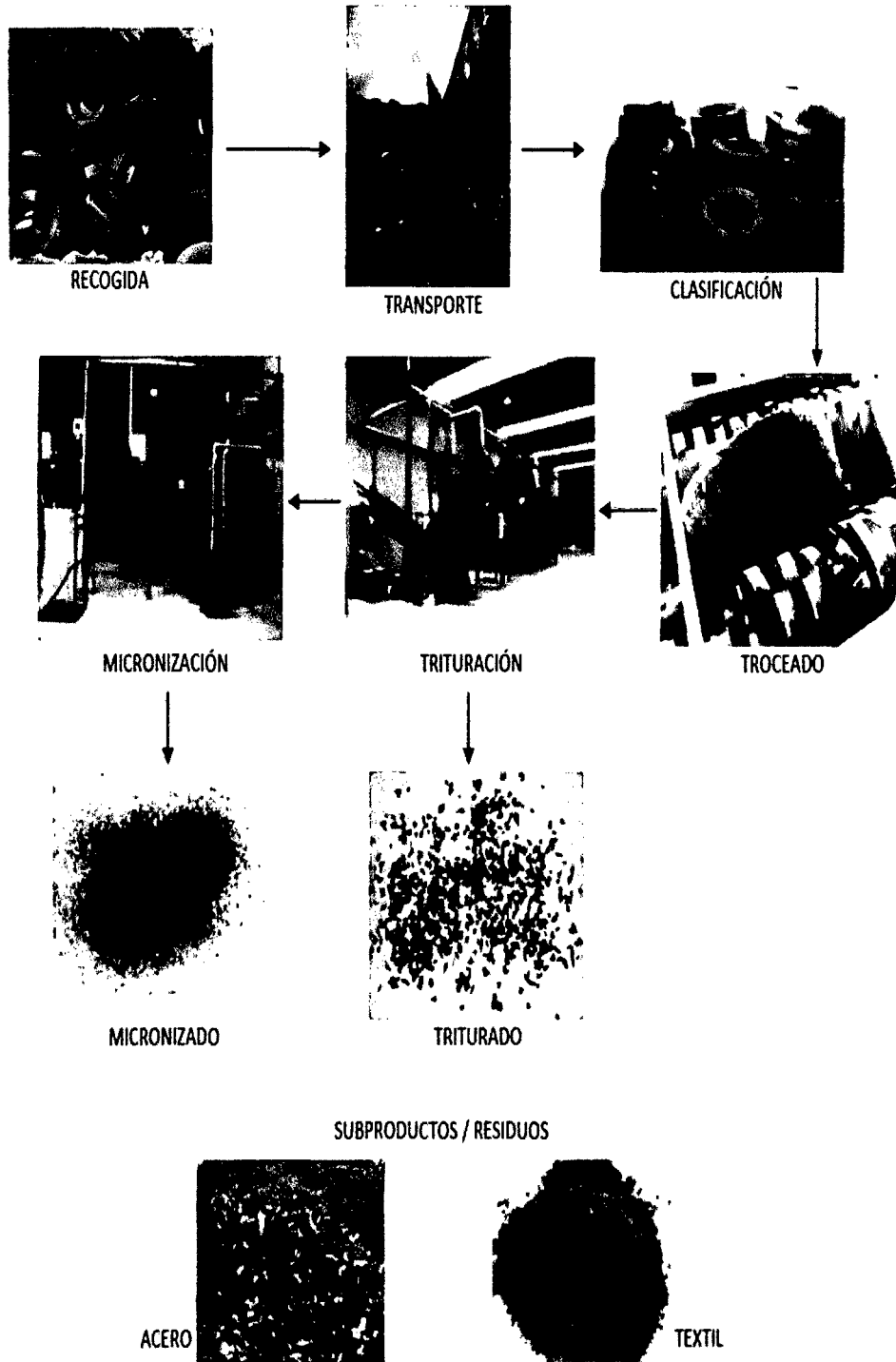
En la tabla 2.9. Se presenta un resumen de las distintas tecnologías explicadas, con las principales ventajas y desventajas de cada una.

**TABLA 2.9: Resumen de las tecnologías empleadas para el reciclaje de NFU**

<i>Tecnología</i>	<i>Características</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
Recauchutado	Sustitución de las gomas viejas de los neumáticos y reconstrucción de la estructura original.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se necesita menos cantidad de crudo que en neumático nuevo.</li> <li>Reducción coste fabricación 30-50%.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Número limitado de recauchutados.</li> <li>Características ligeramente disminuidas.</li> </ul>
Tratamientos mecánicos	Trituración previa de los NFU para reducir el tamaño.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Permite la reducción del volumen, importante en vertederos.</li> <li>Facilita la molienda u otras técnicas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>No existen muchos estudios para mejora de la técnica.</li> </ul>
Tecnologías de reducción de tamaño	<ul style="list-style-type: none"> <li>Molienda a temperatura ambiente (mecánica).</li> <li>Molienda criogénica (enfriamiento del caucho mediante N<sub>2</sub>).</li> <li>Molienda húmeda (por chorro de agua).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Consigue reducir a tamaños que van desde 500 mm a inferiores de 500 μm.</li> <li>Molienda criogénica permite partículas de menor tamaño, superficie más suave y menor oxidación superficial.</li> <li>Muy empleada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lixiviado de ZnO.</li> <li>Molienda a T.A.; Coste elevado por la necesidad de un mantenimiento continuo de la maquinaria Mayor sensibilidad a los agentes atmosféricos.</li> <li>Molienda criogénica; Coste adicional por precio del N<sub>2</sub> y fase adicional de secado.</li> </ul>
Tecnologías de regeneración	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desvulcanización; rotura selectiva del enlace químico entrecruzado del azufre en el caucho vulcanizado.</li> <li>Recuperación; recuperar caucho vulcanizado mediante desvulc. o despolimerización.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Consigue una descomposición de los componentes del neumático.</li> <li>Permite reutilizar los componentes de caucho de los NFU para la fabricación de distintos elementos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Caucho obtenido con propiedades físicas inferiores al original.</li> <li>Importante una óptima elección de la materia prima y condiciones de proceso.</li> </ul>
Pirólisis	Calentamiento del granulado de NFU a temperatura 400-800°C en ausencia de oxígeno o con una cantidad limitada del mismo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Descomposición de los componentes del neumático.</li> <li>Gases pirolíticos tienen elevado poder calorífico.</li> <li>Negro de carbono se puede reutilizar para fabricación de nuevos elementos.</li> <li>Negro pirolítico para coloración y absorbente luz UV.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Problemática con la aplicación de los aceites condensables obtenidos.</li> <li>Características de los productos depende de las condiciones del proceso. Importante un ajuste de los parámetros.</li> <li>Carbono pirolítico tiene propiedades similares o inferiores a la serie 700.</li> </ul>

## 2.12. SISTEMA GLOBAL DE GESTIÓN DE NFUs

Registro del proceso de reciclaje de neumáticos fuera de uso.



## 2.13. APLICACIONES

### 2.13.1. Valorización Material

#### Panorama Europeo

Actualmente existen más de 500 productos en el mercado que usan NFU reciclados (ETRA 2005). La mayoría de ellos no se exportan o se comercializan en otros países, provocando que en un país exista una aplicación que se desconozca en los otros. Están creciendo las aplicaciones del troceado y de neumáticos enteros y las especialidades (p.e. elastómeros termoplásticos), mientras que en el caso del granulado hay una sobrecapacidad de producción que presiona los precios a la baja, siendo necesaria una ampliación de los mercados para ayudar a sostener los precios.

Una encuesta sobre el mercado de Europa revela que el principal mercado para el granulado de NFU es como relleno en superficies deportivas.

### 2.13.2. Aplicaciones de los neumáticos enteros

- **Arrecifes Artificiales**, se espera que los neumáticos usados en la creación de arrecifes artificiales puedan perdurar más de 30 años porque los neumáticos sumergidos en agua marina se encuentran en un medio estable químicamente y protegidos de la radiación ultravioleta, lo que limita la cantidad de lixiviados contaminantes.



**Figura 2.12: Neumáticos empleados como arrecifes artificiales**

- **Balas de Neumáticos**, Las balas prismáticas de 1 tonelada de peso se fabrican con prensas hidráulicas, que compactan entre 100 y 125 neumáticos por unidad. Las dimensiones habituales son 75 cm x 150 cm x 135 cm. Son una buena alternativa a los gaviones metálicos en la construcción de estructuras de contención y presas. Se han utilizado con éxito en la estabilización de márgenes fluviales degradados por la erosión del agua. Por su forma geométrica e instalación modular se adaptan muy bien a ser recubiertas con hormigón o fábrica para la formación de muros.
- **Barreras Acústicas**, los neumáticos constituyen la base de la estructura y se recubren con tierra, de esta forma no les afecta la luz. Como la estructura es inmóvil, el desgaste del material es mínimo.
- **Pistas Provisionales**, para la circulación de vehículos sobre terrenos poco estables en explotaciones forestales, accesos a canteras, etc.
- **Macizos de suelo reforzado**, los NFU agrupados en sistemas de tipo geomalla permiten la formación de macizos de suelo reforzado mediante la interposición de capas superpuestas de neumáticos enteros rellenos de material granular compactado. Las estructuras neumático-suelo muestran propiedades mecánicas superiores a los suelos de origen y pueden presentar diferentes aplicaciones específicas: como muros de sostenimiento de tierras, muros de estabilización en pie de taludes, muros antierosión en márgenes de cauces fluviales, rellenos ligeros en terraplenes, decoración y elementos de recreo en parques infantiles, ferias, etc.



**Figura 2.13: Macizos de suelo reforzado**



### 2.13.3. Aplicaciones de los neumáticos triturados

- **Rellenos ligeros**, empleados como relleno de terraplenes se utilizan fundamentalmente sobre cimientos compresibles o de baja capacidad portante para limitar las cargas transmitidas al cimiento y los asentamientos totales. Pueden realizar también mezclas de suelo o material granular con neumáticos troceados en aquellas situaciones donde la necesidad de una menor compresibilidad del relleno compense el aumento de peso frente al uso de neumáticos troceados en exclusiva.

Los rellenos ligeros también pueden utilizarse sobre estructuras o tuberías enterradas, para limitar las cargas sobre la estructura y la concentración de tensiones por consolidación diferencial, ya que su deformabilidad permite la generación de un efecto bóveda sobre la estructura. En zonas con problemas de inestabilidad, su baja densidad y suficiente resistencia al corte permite su empleo para la formación de taludes o bermas. Resulta un material especialmente adecuado como relleno ligero en trasdós de muros (estribos de puentes, muros de sostenimiento...).

- **Pistas de atletismo**, los gránulos de caucho procedentes de NFU son una materia prima básica en la composición de los distintos revestimientos sintéticos, que podemos clasificarlos en revestimientos realizados “in situ”, mixtos y prefabricados, atendiendo a su puesta en obra, que a su vez pueden ser compactos o multicapas si el tipo de mezclas que lo componen es homogéneo o compuesto por capas de distintas calidades. En la construcción de una pista de atletismo se emplean aproximadamente de setenta a ochenta toneladas de gránulos de caucho, según el sistema que se instale y de la superficie de la pista, siendo las partículas de caucho de un tamaño comprendido entre 1 y 4 mm.



**Figura 2.14: Pistas atléticas**

- **Aislamiento térmico**, los neumáticos triturados son materiales física y químicamente resistentes. Se puede considerar que presentan una capacidad de aislamiento térmico 8 veces superior a la de un suelo. La utilización de rellenos de NFU en terraplenes de carreteras proporciona una protección eficaz frente a la penetración de la helada en el suelo subyacente. El problema de la pérdida de capacidad portante de los suelos durante el deshielo primaveral es un factor primordial de diseño de carreteras en zonas frías. Las propiedades de protección frente a la penetración de la helada pueden aplicarse también a otras situaciones tales como la construcción de vertedero, de zanjas drenantes, etc.

- **Aislamiento acústico**, el caucho es un material con buena absorción acústica, por lo que resulta adecuado para la fabricación de pantallas antirruido en carreteras. Los NFU troceados, así como enteros o embalados, han sido utilizados como material de relleno de terraplenes longitudinales utilizados como barreras antirruido. Paneles de caucho granulados, aglomerado con resinas de poliuretano, se ha utilizado como capa de aislamiento en barreras acústicas prefabricadas.

- **Pistas multiuso**, las características generales que deben cumplir todos los pavimentos deportivos son: elasticidad, resistencia al deslizamiento y durabilidad. La elasticidad permite que el pavimento juegue un papel importante absorbiendo parte de la energía que el deportista transmite en sus impactos con el pavimento evitando así lesiones en sus articulaciones y en sus caídas. Las capas elásticas de mejor calidad se fabrican con gránulos de caucho procedentes de la trituración de neumáticos usados, utilizando generalmente como aglomerante una resina de poliuretano, se fabrican en distintos espesores a pie de obra o se suministran prefabricadas en forma de rollos. La capa final de acabado debe garantizar la correcta estabilidad del deportista en contacto con el pavimento así como el bote de la pelota por lo que la textura y calidad de ésta capa varía en función de distintos factores como son, la ubicación de la pista, en interior o al aire libre y el tipo de deporte.

- **Campos de hierba artificial**, existen en el mercado alfombras de hierba artificial, iniciadas para los campos de jockey, para la práctica del fútbol que consisten en una base asfáltica, seguidas de una capa de arena y otra de gránulos de caucho de NFU y por ultimo las fibras.
- **Colchonetas para animales**, recubiertas por 2 capas de tela sintética la cual protege al granulado contra los rayos ultravioleta. La capa interior es impermeable y puede lavarse y desinfectarse fácilmente.
- **Pavimentos de seguridad**, se utilizan principalmente en parques infantiles, guarderías y residencias de ancianos para evitar posibles lesiones por caídas al resultar un pavimento elástico. Su composición es a base de gránulos de caucho aglomerados con resinas de poliuretano. Una variante puede ser como protector de guardarrailes.(7)



**Figura 2.15: Pavimentos de seguridad**

- **Capas drenante en vertederos**, para la recogida de lixiviados se establece la instalación de una capa de drenaje de espesor superior a 0,5 mm. Esta capa requiere una permeabilidad superior a  $10^{-3}$  m/s y los rellenos de NFU troceados superan este requisito (10-2-10-1). Este material también es utilizado como relleno de las zanjas o pozos drenantes de recolección, protegido de la contaminación mediante una envuelta geotextil.

- **Sistemas de drenaje en carreteras**, se emplean los NFUs troceados como material de relleno de capas y zanjas drenantes en carreteras, las propiedades elásticas del relleno proporcionan una protección mecánica a las tuberías. Las propiedades aislantes del caucho hacen que sea un material de relleno idóneo en zonas sometidas a temperaturas bajas, impidiendo la congelación del agua contenida en él.

- **Calzado**, las suelas de los zapatos fabricadas con polvo o granulado son muy duraderas y a menudo duran más que el cuerpo del zapato.

- **Equipamientos viales y ferroviarios**, se han utilizado productos reciclados en equipamientos viales prefabricados (bordillos, badenes, isletas, bandas sonoras, conos de señalización, barreras de seguridad, quitamiedos, etc.). En los equipamientos ferroviarios destaca la utilización de losetas flexibles en pasos a nivel, aunque también se ha empleado en la fabricación de traviesas compuestas.

#### **2.13.4. Aplicaciones en materiales bituminosos**

**En carreteras:** una de las aplicaciones de los NFU es en la red vial, lo que supone un gran mercado potencial capaz de consumir por si solo todo el neumático que se recicle.

Las exigencias actuales en las carreteras hacen que sustituyamos el betún convencional por betunes modificados con polímeros, los más actualizados SBS (estireno-butadienoestireno), EVA (acetato de vinilo-etileno), polietilenos, EPDM (monómero dienoetileno- propileno), etc.



**Figura 2.16: Material bituminoso en carretera**

La aplicación en la red de carreteras tiene grandes ventajas para el empleo del caucho reciclado; se están utilizando productos elastoméricos a los que el caucho reciclado podría sustituir o complementar, pueden utilizar grandes volúmenes en cada obra y dado que la construcción de carreteras se da en todo el territorio nacional, no se necesita transportarlo a grandes distancias.

Dentro de la utilización en carreteras las posibles aplicaciones son muy variadas.

El triturado del neumático puede ser empleado para:

- Modificar betunes de destilación para su empleo en mezclas bituminosas, membranas SAM o SAMI antifisuras, membranas impermeabilizantes, material de juntas de dilatación, etc.
- Sustitución parcial de materiales pétreos en la estructura de mezclas asfálticas para ser empleados en capas de base e intermedias, capas de rodadura de granulometría densa, mezclas porosas.

#### **2.13.5. En construcción**

Existen estudios sobre la adición de granulado de caucho procedente de NFUs en cemento u hormigón, encontrándose los mejores resultados sobre cemento autocompactante o Portland. A pesar de que la incorporación de las partículas de caucho en materiales cementosos disminuye la resistencia, su uso se hace importante porque mejora la fragilidad del cemento, evitando el colapso. Lo que le confiere la posibilidad de la aplicación antisísmica y para usos no estructurales (donde la elevada resistencia no es una consideración importante).

Se ha encontrado la posibilidad de emplear el sistema cemento Portland tipo I caucho molido NFU (0,29 - 0,59 mm) en el campo de la construcción, muy prometedor como material de relleno para grietas y juntas. Se observó como efecto más notorio la reducción de la velocidad del pulso ultrasónico en este medio.

### **2.13.6. Valorización Energética**

#### **Producción de combustible**

La utilización como combustible trata de aprovechar la energía térmica que produce la combustión de la goma de los mismos.

Según Carlos Urcelay, consejero de Neuciclaje, S.A. Para el aprovechamiento energético, el neumático se puede presentar como neumático en polvo, troceado y entero. La selección se efectuará en función de las características del horno donde tenga lugar la combustión. Las características del horno de clínker, las altas temperaturas de funcionamiento, el alto tiempo de permanencia y la suspensión en el intercambiador de calor, por el que se desarrolla un proceso de adsorción, dan lugar a un sistema ideal de revalorización o utilización de combustibles secundarios. La combustión a temperaturas superiores a los 1200 °C, la atmósfera oxidante y los tiempos de permanencia entre 2 y 6 segundos garantizan la destrucción efectiva de los componentes orgánicos existentes en los residuos, eliminando la nocividad de los mismos y evitando la generación de cenizas susceptibles de tratamiento.

Los resultados de los análisis realizados por Laboratorios LABEIN del clínker, empleando neumático troceado en un porcentaje de sustitución del 20 %, son similares a los obtenidos utilizando como combustible solamente coque de petróleo.

Observándose que con la utilización de neumáticos se reducen las emisiones de NOX y SO<sub>2</sub>. Por lo que es absolutamente factible la valorización en hornos de cemento hasta un 20 % del combustible utilizado.



**Figura 2.17: Producción de combustible**

### **Aprovechamiento energético por gasificación**

La gasificación es un proceso termoquímico de descomposición de la materia orgánica en un ambiente caracterizado por un déficit de aire respecto al estequiométrico necesario para realizar la combustión completa de la misma. Es un proceso a 600 °C donde el combustible sólido reacciona con un agente gasificante (aire, oxígeno o vapor de agua).

En el tratamiento de NFU vía gasificación se obtienen 2 fases; una sólida (mezcla de negro de carbono (25 % en peso del total de NFU) y acero (12 % en peso del total de NFU)) en aprox. un 37 % en peso del total de los productos del proceso, y una fase gaseosa en un 63 %. Los dos componentes de la fase sólida se separan fácilmente con un tropel rotatorio de tamizado. El gas generado sale de los gasógenos a una temperatura superior a 350 °C y contiene 2 fases separables:

- Fase gaseosa no condensable; formada por una amplia gama de gases de gasificación (CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, hidrocarburos tipo C1, C2, C3, C4,...). Representa, en media, un 38 % en peso del total de NFU tratados en el proceso. Empleados como valorización energética en motores de gas adaptados al respecto.
- Fase gaseosa condensable; constituida por todo el espectro de alquitranes, aceites medianos y ligeros, BTX, etc. Constituye un 25 % del peso total de los NFU tratados. Los aceites condensados se pueden valorizar energéticamente como sustitutivos de un fuel-oil ligero o emplear en aplicaciones industriales específicas.

### **Aprovechamiento energético mediante Pirólisis**

Un método específico de la valorización energética por gasificación es la valorización energética por pirólisis.

Mediante la pirólisis se obtiene, de modo general, carbono pirolítico (33 % en peso), gases (20 % en peso), aceites (35 % en peso) y residuo metálico (12 % en peso).

Según las condiciones de procesado (velocidad de calentamiento, tamaño partícula, rango de temperatura,..) se obtendrán distintos porcentajes en peso de los elementos pirolíticos, así como características diferentes de los mismos.

Numerosos estudios se centran en obtener productos valiosos de carbono pirolítico, por ser los que presentan mayor potencial de valorización. Las vías de valorización del carbono pirolítico pueden ser: como combustible de sustitución (mezcla con carbón), como negro de carbono para carga en materiales poliméricos, o como materia prima en la fabricación de carbón activo.

Los aceites obtenidos se pueden emplear como combustible en hornos convencionales.

Los gases no condensables tienen un poder calorífico del orden de  $68 - 84 \text{ MJm}^{-3}$ , compuesto principalmente por hidrocarburos ligeros (olefinas y C1-C4 parafinas) junto con  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , elementos que pueden ser empleados para calentar el reactor de pirólisis, o como combustible en las cementeras.

Sin embargo, la valorización energética mediante pirólisis no está muy difundida debido al coste de las instalaciones necesarias.



## **CAPITULO III**

### **METODOLOGIA**

#### **3.1 MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE**

La mezcla asfáltica la constituye un material pétreo recubierto con una película de asfalto, uniformemente combinados, en proporciones previamente especificadas. Las cantidades relativas de estos materiales, determinan las propiedades y características de la mezcla.

Las mezclas asfálticas pueden fabricarse en caliente o en frío, siendo más comunes las primeras. Se denominan “mezclas en caliente”, pues para lograr que los áridos se mezclen homogéneamente con el asfalto, ambos componentes se llevan a temperaturas altas, sobre los 100 °C, para obtener una buena trabajabilidad de la mezcla. El proceso de mezclado se realiza en una Planta Asfáltica, y luego se transporta la mezcla al sitio de pavimentación y se coloca por medio de una pavimentadora o finisher, asegurándose que la superficie se encuentre preparada correctamente. Una vez extendida, se somete a un proceso de compactación, que hace que esta mezcla tenga propiedades resistentes al desgaste producido por el paso de los vehículos.(8)  
A través de este proceso, se obtiene una superficie suave y bien consolidada.

##### **3.1.1 PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS**

Las propiedades fundamentales que deben tener las mezclas asfálticas son las siguientes:

- **Durabilidad**, propiedad de la mezcla que hace que el pavimento sea capaz de resistir la desintegración debido al tránsito y al clima. Éste último, afecta principalmente al asfalto de la capa superficial por estar en contacto con el sol, el aire y el agua, pues produce que este material, pierda las propiedades aglutinantes, se oxide, se endurece y envejece, afectando la vida útil del pavimento.
- **Estabilidad**, se refiere a la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir las cargas de tránsito sin que se produzcan deformaciones. Esta propiedad depende de la cohesión de la mezcla y de la fricción interna.

La fricción interna es aportada por el material pétreo y depende del tamaño del árido y de la rugosidad de sus caras. Las mezclas con materiales más gruesos y de caras angulosas tendrán mayor estabilidad que mezclas con materiales finos.

La cohesión es la fuerza aglutinante de la mezcla que depende fundamentalmente de la capacidad que tenga el asfalto de mantener unidas las partículas del agregado. Esta propiedad varía inversamente con la temperatura y aumenta con el contenido de asfalto hasta llegar a un óptimo, luego hace un efecto lubricador.

La pérdida de estabilidad en un pavimento se traduce en ahuellamientos y ondulaciones.

- **Flexibilidad**, capacidad de la mezcla de adaptarse a las deformaciones por asentamientos de la base y subrasante sin agrietarse.
- **Resistencia a la fatiga**, capacidad del pavimento asfáltico de soportar esfuerzos provocados por el tránsito en repetidas pasadas.
- **Impermeabilidad**, las mezclas deben ser en lo posible totalmente impermeables, de manera que el agua superficial no pueda atravesar

hacia las capas inferiores, evitando con ello que éstas puedan perder capacidad de soporte.

- **Resistencia al deslizamiento**, capacidad del pavimento asfáltico de ofrecer resistencia al resbalamiento o deslizamiento, especialmente cuando está húmedo.
- **Trabajabilidad**, se refiere a la capacidad que tenga la mezcla de colocarse y compactarse con facilidad.

El objetivo principal en el diseño de mezclas asfálticas es encontrar la combinación más económica de agregados y asfalto, que le dé a la mezcla las propiedades antes vistas.

En resumen, podría decirse que lo que se busca con el diseño de las mezclas es cumplir con lo siguiente:

1. Asfalto suficiente para asegurar un pavimento durable a través del total recubrimiento de los agregados y trabazón de las partículas, bajo una adecuada compactación.
2. Estabilidad suficiente de la mezcla para satisfacer los requerimientos de servicio y las demandas del tráfico sin deformación o desplazamiento.
3. Porcentaje de huecos en la mezcla total compactada suficiente para absorber la consolidación producto del amasado del tránsito.
4. Adecuada trabajabilidad para permitir una operación de construcción eficiente en la colocación de la mezcla para pavimentación.

### **3.2 MÉTODO DE DISEÑO**

El diseño de una mezcla asfáltica consiste básicamente en seleccionar una granulometría y un porcentaje de asfalto de modo que, una vez fabricada y puesta en terreno, cumpla las propiedades para la cual fue diseñada. Los métodos de dosificación tienen como fin determinar el porcentaje de asfalto óptimo para una combinación determinada de agregados de acuerdo a las propiedades seleccionadas.

Previo al diseño de la mezcla, es necesario que todos los materiales constituyentes, agregados y asfaltos, sean analizados para decidir si son aptos o no para formar parte del pavimento a construir.

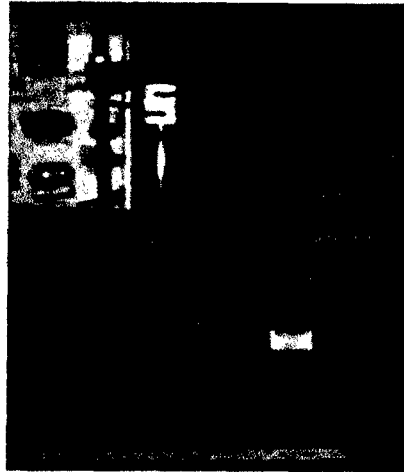
El método de diseño más utilizado en Perú para las mezclas en caliente, es el Método Marshall, el cual está basado en el empleo de ensayos mecánicos.

El Método Marshall es aplicable a mezclas en caliente con cementos asfálticos y que contengan agregados con tamaño máximo igual o inferior a 25 mm. Este procedimiento puede usarse tanto para el diseño en laboratorio como para el control de terreno.

El desarrollo del método implica la confección de una serie de probetas normalizadas de 2½" de altura y 4" de diámetro, las cuales difieren en el porcentaje de ligante. Suelen utilizarse al menos cinco contenidos de cemento asfáltico, variando entre uno y otro en 0,5 %, tratando de estar por encima y por debajo del óptimo esperado. Para cada contenido de ligante, se fabrican al menos tres probetas.

Las probetas se reparan de acuerdo a un procedimiento específico de calentamiento, mezclado y compactación.

Las temperaturas de mezclado y de compactación dependen del cemento asfáltico que se utilice para fabricar las probetas. La compactación del material dentro de los moldes se realiza a través del martillo Marshall, que es un dispositivo de acero, formado por una base plana y circular de 3, 7 y 8" de diámetro, equipado con un peso de 10 lb. (4,54 kg) y construido de modo de obtener una altura de caída de 18". Las probetas se compactan con 75 golpes por cara, o como se especifique según el tránsito de diseño.



**Figura 3.1: Prensa Marshall**

Las dos características principales de este método de diseño son el análisis Densidad-Huecos y el ensaye de Fluidez y Estabilidad de las probetas.

La estabilidad de la probeta es el valor de la carga máxima en Newton que alcanzará al ensayarla a compresión lateral en la máquina de ensaye Marshall, la cual está diseñada para aplicar carga a las probetas a través de unas mordazas semicirculares a una velocidad de deformación de 51 mm por minuto. La fluidez es la deformación, en cuartos de milímetros, que ocurre desde el instante en que se aplica la carga hasta lograr la carga máxima.

Con los valores obtenidos, y en base a los criterios definidos en el Manual de Carreteras en función del tipo de tránsito y el empleo de la mezcla, ya sea como carpeta de rodado, carpeta intermedia o capa base, se obtiene el porcentaje óptimo de asfalto y la mezcla de agregados pétreos que garantizan una buena estructura.

Existen situaciones en las cuales las mezclas asfálticas no son capaces de resistir la acción conjunta del tránsito y clima, por lo cual se hace necesario desarrollar mezclas más resistentes, mejorando sus propiedades mecánicas, haciendo énfasis en la durabilidad, el ahuellamiento y la fatiga.

El asfalto es susceptible a la temperatura. Por ser un material viscoelástico, presenta cambios continuos en sus características según el rango de temperaturas de operación: es rígido a bajas temperaturas y fluido a altas. El principal objetivo al utilizar agentes modificadores en el cemento asfáltico es lograr

propiedades reológicas no obtenidas en los asfaltos producidos con técnicas convencionales de refinación, principalmente las que tienen que ver con la sensibilidad térmica.

Los beneficios que se pueden obtener al modificar el asfalto son:

- Aumentar la durabilidad del pavimento.
- Disminuir la susceptibilidad térmica, de modo que se aumente la rigidez a altas temperaturas de servicio, mejorando la resistencia de las mezclas a la deformación permanente y, por otro lado, se reduzca la fragilidad del asfalto expuesto a bajas temperaturas, previniendo la fisuración térmica.
- Aumentar la resistencia a fatiga de las mezclas.
- Mejorar la adhesión del asfalto con los agregados pétreos.
- Mejorar la cohesión, brindando mejor retención de los agregados.
- Reducir el envejecimiento en servicio, ampliando la vida útil de las mezclas asfálticas, ya que se mantienen las ventajas iniciales.

En general, la incorporación de polímeros en las mezclas asfálticas ha permitido mejorar sus propiedades, como disminución de la deformabilidad y mayor resistencia a las sollicitaciones del tránsito. Los polímeros son sustancias orgánicas de alto peso molecular que logran hidratarse e hincharse al interactuar con el betún asfáltico.

Los polímeros más utilizados son los plastómeros EVA (etileno acetato de vinilo), los elastómeros SBS (estireno-butadieno-estireno) y el caucho molido.

### **3.3. MODIFICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE LA INCORPORACIÓN DE CAUCHO DE NEUMÁTICOS DESECHADOS**

Uno de los polímeros utilizados para modificar el ligante y las mezclas asfálticas es el caucho. Este puede ser especialmente fabricado o provenir de la recuperación de piezas en desuso, como es el caso de los neumáticos.

#### **3.3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS NEUMÁTICOS**

Las principales componentes de los neumáticos son cauchos naturales y sintéticos (SBS, SBR) y negro de humo. En menor cantidad, se encuentran el acero,

textiles y aditivos, entre los que se destacan aceites, óxido de zinc activado con cadmio, dióxido de titanio, sulfuro, sílica, resinas fenólicas y ácidos grasos.

El caucho natural se elabora a partir del látex, que es una resina blanca lechosa que se da en el árbol Hevea, más conocido como árbol del caucho, el cual se encuentra en selvas húmedas tropicales de Brasil, Colombia o Tailandia. Este látex es una dispersión acuosa que contiene entre un 25 % a un 40 % de caucho. Las cualidades que el caucho natural aporta a los neumáticos son: la maleabilidad, gran resistencia mecánica y adherencia de éstos sobre cualquier tipo de superficie, cualidades que hacen que en la actualidad aún siga siendo un elemento indispensable para la industria de los neumáticos, donde se consume aproximadamente el 70 % de la producción mundial.

El caucho sintético fue desarrollado en los años 30, para contrarrestar la falta de caucho natural. Las propiedades del caucho sintético son similares a las del natural, pero tiene otras ventajas sobre éste, como por ejemplo, mayor resistencia a la abrasión, alta adherencia al suelo y alta resistencia a la temperatura, más aún que el caucho natural.

En general, gran parte del caucho sintético es usado para la fabricación de los neumáticos de automóviles, pero para los de camiones y buses, es necesaria una proporción más grande de caucho natural, con el objeto de controlar mejor la generación de calor. Como dato adicional, se tiene que las llantas de los automóviles contienen aproximadamente 16 % de caucho natural y 31 % de sintético.

La combinación de cauchos naturales y sintéticos, se realiza de modo de que los primeros, proporcionen elasticidad y los segundos, estabilidad térmica. Esta combinación de efectos favorece la durabilidad y la capacidad de adaptarse a las nuevas exigencias del tránsito.

El negro de humo es obtenido por combustión o descomposición térmica parcial de gases naturales o hidrocarburos pesados. Este elemento en las llantas permite conseguir unas mezclas más resistentes a la rotura y a la abrasión, dándoles el característico color negro.

### 3.3.2 NEUMÁTICOS DESECHADOS

Cada año millones de neumáticos son desechados en todo el mundo. El principal inconveniente con los neumáticos usados es su disposición final, dado que la mayoría de ellos terminan en sitios eriazos o en vertederos clandestinos. El almacenamiento ocupa un espacio considerable, aparte del peligro por la posibilidad de incendios y además por ser un terreno ideal para la proliferación de roedores e insectos que a menudo son transmisores de enfermedades. La quema directa provoca graves problemas ambientales ya que produce emisión de gases que contienen partículas nocivas para el entorno. En los vertederos, imposibilitan la compactación y ocasionan problemas de estabilidad por degradación química parcial que sufren, generando inseguridad en los mismos.(3)



**Figura 3.2: Acumulación de neumáticos a la orilla del camino.**

Se ha estimado que un 80 % de los neumáticos desechados proceden de automóviles o camionetas, un 20 % de los vehículos pesados, y alrededor del 1 % restante son neumáticos especiales para motocicletas, aviones, equipos de construcción y vehículos especiales.

En el país no existe ningún método de reciclaje de los neumáticos. La única solución que se ha dado a mayor escala, es el uso como combustible en los hornos de cementeras, como reemplazo de parte del carbón necesario para la producción de clinker.



En la actualidad, se utilizan diversos métodos para valorizar los neumáticos desechados, a través de la obtención de granos de caucho, los cuales se usan como materia prima en la elaboración de mezclas asfálticas. El caucho reciclado es obtenido a través de la trituración de los neumáticos, separándolo de los demás componentes como el acero y las fibras textiles.

Según el método utilizado para la producción de granos de caucho, se obtienen diferentes características en cuanto a la forma y textura de ellos. Las técnicas de molienda más comunes son el proceso ambiental y la trituración criogénica.

### 3.3.3 APLICACIÓN DE GRANOS DE CAUCHO EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

El caucho proveniente de neumáticos desechados puede ser incorporado en las mezclas asfálticas por medio de dos métodos diferentes denominados como Proceso por Vía Húmeda, Proceso por Vía Seca.

En el Proceso Húmedo, el caucho actúa modificando el cemento asfáltico, mientras que en el Proceso Seco, el caucho es usado como una porción de agregado fino. Cada proceso es utilizado dependiendo del producto que se quiera obtener.

A continuación, se muestra la terminología asociada al uso de los granos de caucho en mezclas asfálticas:

**Tabla 3.1: Terminología asociada con el uso del caucho en las mezclas asfálticas.**

MATERIAL	VIA	PRODUCTO
GRANOS DE CAUCHO	Húmeda	Asfalto modificado con caucho o Asfalto-caucho
	Seca	Mezcla asfáltica mejorada con caucho

### 3.3.4 PROCESO POR VÍA HÚMEDA

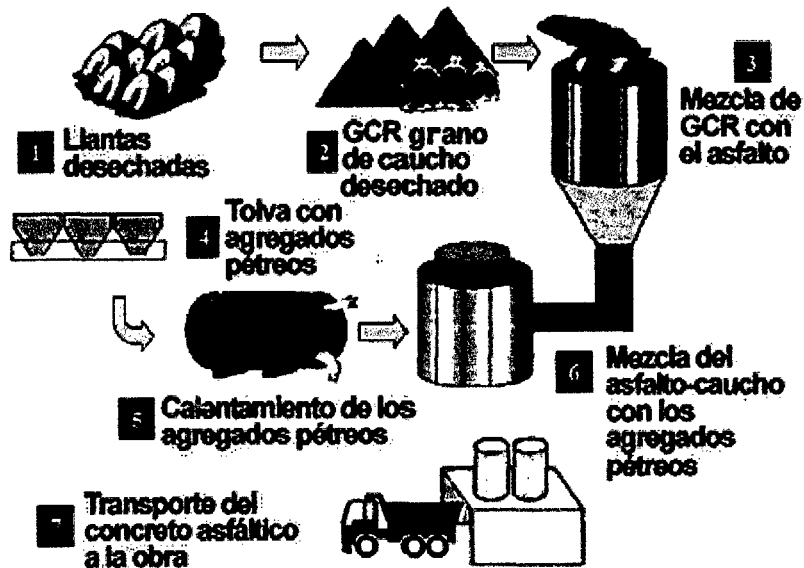
Este proceso consiste en la unión del grano de caucho reciclado con el cemento asfáltico para producir una mezcla modificada llamada asfalto-caucho, el proceso

se encuentra definido por la norma de la ASTM D8-88, el porcentaje de incorporación es de 15 % a 25 %.

La elaboración asfalto-caucho consiste en unir el grano de caucho reciclado con diámetro máximo de 2 mm, con el cemento asfáltica en un tanque de agitación, a donde se llevara a cabo la unión, es necesario tomar en cuenta la temperatura y el tiempo de reacción de estanque, por lo general la mezcla es elaborada a temperaturas de 170 °C – 210 °C por 1 a 4 horas.

Una vez que el asfalto-caucho alcance los parámetros requeridos, especialmente la viscosidad de la mezcla, se incorpora, en un proceso continuo, al mezclador de la planta asfáltica para unirse con los agregados pétreos.

En el siguiente esquema, se muestra la fabricación de las mezclas asfalto-caucho por el proceso vía húmeda:



**Figura 3.3:** Esquema de fabricación de asfalto modificado con caucho mediante el proceso por vía húmeda.

Una vez terminado el mezclado del asfalto-caucho con los agregados pétreos, el concreto asfáltico obtenido se transporta al sitio de pavimentación y se coloca por medio de una dosificador o finisher tradicional. Para la compactación, generalmente se utiliza un rodillo liso doble

#### **3.3.4.1 Modificación del ligante:**

Los granos de caucho al mezclarse con el cemento asfáltico, reaccionan con éste, hinchándose y ablandándose por la absorción de aceites aromáticos, los cuales son componentes químicos del asfalto que le dan la consistencia para que sea trabajable. Las partículas hinchadas se vuelven pegajosas, desarrollando propiedades adhesivas. Además, a medida que se reducen los aceites aromáticos que lubrican la mezcla, se observa un aumento en la viscosidad.

El proceso de hinchamiento de las partículas de caucho, no es del tipo química, pues las partículas no se funden en el asfalto. El proceso se asimila a lo que sucede con una esponja seca y dura al sumergirla en agua, pues a medida que la esponja absorbe el agua, se hincha y ablanda.

El grado de modificación del ligante depende de ciertos factores entre los cuales se encuentran el tamaño, textura y proporción de los granos de caucho, tipo de cemento asfáltico, tiempo y temperatura de mezclado, grado de agitación mecánica durante la reacción de la mezcla y el componente aromático del cemento asfáltico.

La viscosidad de la mezcla es el principal parámetro usado para supervisar la reacción, es por esto que debe ser chequeada a diferentes intervalos de tiempo durante el mezclado y el tiempo de reacción, hasta obtener la viscosidad requerida.

#### **3.3.4.2. Especificaciones para el Proceso por Vía Húmeda utilizadas: Dirección de Vialidad.**

La Dirección de Vialidad construyó dos tramos de prueba, utilizando especificaciones exigidas a los trabajos de construcción de capas superficiales de pavimento con mezcla asfáltica en caliente confeccionada

con ligante asfalto-caucho, incluyendo la provisión de materiales, el transporte, la confección, distribución y compactación de la mezcla.

A continuación se muestran los requisitos exigidos a los materiales constituyentes de la mezcla asfáltica, entre ellos los áridos, el ligante y el caucho; así como también los requerimientos de mezclado para la fabricación del ligante modificado y la producción de la mezcla asfáltica por vía húmeda.

a. Requisitos de los Materiales

- Áridos:

La fracción gruesa y fina, y el filler deben cumplir con los requisitos de una mezcla asfáltica en caliente.

- Mezcla de áridos:

Los áridos combinados deberán cumplir con la banda granulométrica denominada Semi Gap Graded, que se indica en la Tabla 3.2., cuando el objetivo del uso del asfalto caucho sea evitar la reflexión de grietas. En otros casos, se usa granulometrías convencionales.

(9)

**Tabla 3.2: Granulometría Semi Gap Graded.**

TAMICES		PORCENTAJE QUE PASA
mm	ASTM	
20	3/4"	100
12,5	1/2"	80 - 95
10	3/8"	64 - 79
5	Nº 4	49 - 57
2,5	Nº 8	43 - 51
0,63	Nº 30	37 - 45
0,30	Nº 50	30 - 38
0,16	Nº 100	15 - 24
0,08	Nº 200	9 - 12

- **Ligante asfalto-caucho:**  
Este ligante se compone de asfalto base y caucho de neumático triturado.
- **Caucho triturado:**  
Deberá provenir de la trituración de los neumáticos de vehículos corrientes usando el método ambiental o criogénico, o una combinación de ambos.  
Los requerimientos son los indicados en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3: Requerimientos del caucho triturado en partículas.**

<b>REQUERIMIENTOS DEL CAUCHO TRITURADO EN PARTICULAS</b>		
<b>(1) Granulometría</b>		
<b>Tamices</b>		<b>Porcentaje que pasa, %</b>
<b>mm</b>	<b>ASTM</b>	
<b>2</b>	<b>Nº 10</b>	<b>100</b>
<b>0,85</b>	<b>Nº 20</b>	<b>60 - 100</b>
<b>0,63</b>	<b>Nº 30</b>	<b>50 - 90</b>
<b>0,30</b>	<b>Nº 50</b>	<b>0 - 45</b>
<b>0,08</b>	<b>Nº 200</b>	<b>0 - 5</b>
<b>(2) Contenido de caucho natural</b>		<b>Mínimo 30 %</b>
<b>(3) Densidad relativa (kg/dm<sup>3</sup>)</b>		<b>1,10 – 1,25</b>

- **Mezcla asfalto-caucho:**
  - **Condiciones de preparación del ligante asfalto-caucho:**  
Porcentaje de caucho en masa con relación al ligante total: 18 – 24 %  
Temperatura de reacción de la mezcla: 180 – 210 °C  
Tiempo de reacción (a la temperatura de reacción): 1 – 4 horas
  - **Características del Estanque Mezclador:**  
El estanque deberá tener un sistema de calentamiento que permita mantener temperaturas entre 180 °C y 210 °C, agitadores tipo aspas para mantener en permanente agitación la mezcla asfalto-caucho durante el periodo de reacción y el lapso adicional según sea necesario, de acuerdo al funcionamiento integral de la planta.
  - **Requisitos del ligante asfalto-caucho después de la reacción:**

**Tabla 3.4. Requisitos del ligante asfalto-caucho después de la reacción según ASTM.**

Propiedades	Mín.	Máx.
Viscosidad Brookfield a 175 °C, [cP]	1 000	5 000
Penetración, 25 °C, 100 g, 5 seg [1/10 mm]	25	75
Penetración, 4 °C, 200 g, 60 seg [1/10 mm]	15	
Resiliencia, 25 °C [%]	20	
Punto de Ablandamiento [°C]	55	
PDR:		
Penetración Retenida, 4 °C [%]	75	

**b. Producción de la mezcla asfáltica según proceso húmedo**

1a Etapa: Preparación del ligante asfalto-caucho en un estanque provisto de un sistema de agitación a la temperatura y tiempo necesario para lograr la viscosidad especificada. Este estanque debe estar en terreno ubicado al lado de la Planta de Mezcla en Caliente.

2a Etapa: Luego, en un proceso continuo, se efectuará la mezcla con los áridos y filler en una Planta de Mezcla Asfáltica convencional. La temperatura de los áridos deberá estar entre 180 °C y 220 °C, dependiendo de la formulación en laboratorio.

- Requisitos para la dosificación Marshall:

**Tabla 3.5: Requisitos de la Mezcla Asfalto-Caucho.**

Propiedades	Mín.	Máx.
Estabilidad Marshall [kN]	8	
Fluencia [0,25 mm]	8	16
Huecos en la Mezcla [%]	3	6
Huecos en el Agregado Mineral (VAM) [%]	16	
Huecos Llenos con Ligante [%]	70	
Relación Filler / Ligante	1	1,5

### 3.3.5 PROCESO POR VÍA SECA

El proceso por vía seca es el método mediante el cual el caucho reciclado es mezclado con los agregados, antes de adicionar el cemento asfáltico. En este proceso, se usan los granos de caucho como un agregado en la mezcla asfáltica, los cuales pueden sumarse como un árido más o como sustituto de una pequeña parte del agregado fino, el cual puede estar entre el uno y tres por ciento del peso total de los agregados de la mezcla.

Si bien los granos de caucho son tratados como un árido, no pueden considerarse un material inerte, pues interacciona con el ligante de la mezcla asfáltica. Este proceso de interacción suele llamarse “digestión” del caucho. Mediante este proceso, el caucho pasa de ser un árido elástico a ser un modificador del ligante en la mezcla asfáltica.

La digestión es un proceso que prolifera desde la superficie de la partícula de caucho hacia su interior, por lo que será más rápida cuanto más fino sea el polvo de caucho, menor su proporción dentro de la mezcla asfáltica y cuanto más elevada sea la temperatura de la mezcla y el tiempo que se mantenga ésta caliente durante el proceso de fabricación y puesta en obra. En laboratorio, la digestión puede simularse manteniendo la mezcla en horno, a una temperatura en un rango 150 - 170 °C y un tiempo de una a dos horas, previamente a la compactación de la probeta.

Durante la digestión, no se producen reacciones importantes entre el caucho y cemento asfáltico debido al corto tiempo de mezclado, donde éste no es suficiente para que se produzca una reacción similar al proceso húmedo, por lo tanto, se asume que el efecto de la reacción caucho-ligante en el proceso seco es menor y, asimismo, tiene un efecto limitado en el comportamiento de la mezcla.

Sin el tiempo de digestión, no podría obtenerse la interacción entre el ligante y el caucho, provocando que éste funcione como un árido elástico de granulometría muy concentrada, lo que por un lado produce la apertura de huecos y por otro, impide la compactación por su componente elástico. Este tiempo de curado de la mezcla es fundamental, ya que en caso de no realizarlo correctamente, no solo no se provoca la modificación del ligante,

sino que se obtiene una mezcla de peores propiedades que una tradicional. Sin digestión, se producen riesgos por deterioros prematuros de la mezcla asfáltica en terreno. Se ha observado que el principal riesgo es por el ataque del agua a la mezcla colocada, llevándola a desintegrarse progresivamente. Para evitar esta situación, es necesario, durante el diseño de la mezcla asfáltica, estimar cual será la temperatura y el tiempo de digestión mínimo para alcanzar el grado de digestión suficiente, esto puede hacer a través del ensayo de Inmersión-Compresión, que mide el efecto del agua sobre la cohesión de las mezclas asfálticas compactadas. (Ver referencia N° [6])

En la siguiente figura, se muestra la fabricación de las mezclas asfálticas mejoradas con caucho a través del proceso seco:



**Figura 3.4: Esquema de fabricación de la mezcla asfáltica con caucho por vía seca.**

Los granos de caucho son mezclados con los áridos, anteriormente calentados. El cemento asfáltico es el mismo que se usa para mezclas convencionales, sin embargo, las temperaturas de mezclado son más altas, por lo general entre 160 y 190 °C, al igual que las de compactación, que están entre 150 y 160 °C.



A diferencia del proceso húmedo, este método no requiere de un equipo especial de mezclado, solo un sistema de alimentación que proporcione la cantidad adecuada de caucho que sea suministrada en el momento indicado para que se mezcle con los agregados cuando estos alcancen cierta temperatura y antes que el ligante sea adicionado.

Luego de mezclar el ligante con los agregados más el caucho, se le debe dar el tiempo a esta mezcla para que suceda el proceso de digestión. Este tiempo en obra, la mayoría de las veces está garantizado con el tiempo que toma el camión entre la planta, en la que se elabora la mezcla y el lugar de colocación del concreto asfáltico utilizando una extendidora tradicional.

### **3.3.5.1 Tecnologías para el uso de caucho reciclado mediante vía seca.**

Las tecnologías más usadas en Estados Unidos para el uso de caucho reciclado mediante este proceso, son la tecnología Plus Ride y la tecnología Genérica o sistema TAK. Otra tecnología muy popular es la desarrollada en España y es actualmente usada en muchos países.

**a. Plus Ride.** Esta tecnología fue originalmente desarrollada en Suecia a finales de los años 1960, y registrada en los Estados Unidos bajo el nombre comercial Plus Ride por la firma Enviro Tire. El caucho reciclado es agregado a la mezcla en proporciones que van de 1 a 3 por ciento del peso total de los agregados. Los granos de caucho utilizados son gruesos para sustituir algunos agregados de la mezcla. Las partículas de caucho van desde 4,2 mm (1/4") a 2,0 mm (tamiz N° 10). El contenido de vacíos con aire en la mezcla asfáltica debe estar entre 2 y 4 por ciento, y por lo general son obtenidos con contenidos de ligante entre 7,5 a 9 por ciento.

**b. Genérica.** Este sistema fue desarrollado por el Dr. Barry Takallou a finales de los años 1980 y a principio de los años 1990, para producir mezclas asfálticas en calientes con granulometría densa. Este concepto emplea tanto el caucho reciclado grueso como fino para compatibilizar la granulometría de los agregados obteniendo una mezcla asfáltica mejorada. En este proceso, la granulometría del caucho es ajustada para acomodar la granulometría de los

agregados. A diferencia de las mezclas Plus Ride, la granulometría del caucho se divide en dos fracciones en la que la parte fina se encarga de interactuar con el cemento asfáltico mientras la parte gruesa entra a comportarse como un agregado elástico en la mezclas asfáltica.

El caucho puede llegar a necesitar una pre-reacción o pre-tratamiento con un catalizador para alcanzar un óptimo hinchazón de la partícula. En este sistema, el contenido de caucho reciclado no debe exceder el 2 por ciento del peso total de la mezcla para carpeta de rodadura.

c. Convencional. Esta tecnología fue desarrollada en España para usar el caucho reciclado en la mejora de mezclas asfálticas empleando granulometrías convencionales que no implican consumos elevados de cemento asfáltico, pero que aportan menor cantidad de caucho, aproximadamente un dos por ciento del peso total de los agregados. El caucho utilizado es generalmente de granulometría fina, con tamaños de los granos no mayor a 0,5 mm. Estas mezclas asfálticas han sido evaluadas dinámicamente en el laboratorio y colocadas en la vía con buenos resultados.

## **CAPITULO IV**

### **PARTE EXPERIMENTAL**

#### **4.1. Reactivos, materiales y equipos**

##### **4.1.1. Reactivos**

- Emulsión asfáltica
- Agua.
- Gas propano.
- Sulfato de Magnesio.
- Solución Stock.
- Polvo de caucho.
- Aditivos.

##### **4.1.2. Materiales**

- Termómetro
- Vasija de acero
- Bandejas
- Fiolas
- Vaso de precipitado
- Pie de Rey (vernier)
- Agregado grueso y fino.
- Moldes para probetas.
- Serie de tamices.

### **4.1.3. Equipos**

- Equipo de proctor modificado
- Máquina de los ángeles
- Equipo Marshall
- Prensa Marshall
- Balanza Electrónica
- Termostato
- Cocina a gas
- Horno 220 °C

## **4.2. Procedimiento experimental**

En esta sección describiremos el procedimiento experimental para los ensayos involucrados en el diseño de mezcla de asfalto en caliente, (mezcla patrón) y el estudio de la incorporación de caucho mediante vía seca.

Para realizar el estudio de la incorporación de caucho mediante vía seca, es necesario partir con una mezcla patrón, con el fin de comparar la variación de las propiedades de esta mezcla al añadirle diferentes porcentajes de caucho.

En este caso, la mezcla patrón corresponde a una mezcla convencional del tipo Semidensa, utilizada en el Proyecto de Asfaltado de las calles Zarumilla, 22 de junio y Jr. Puno de la localidad de Huanta - Ayacucho

En la mezcla patrón y en las mejoradas con caucho, se utilizarán los mismos materiales pétreos y cemento asfáltico.

## **4.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES**

### **4.1.1. AGREGADOS PÉTREOS**

Los agregados, para Mezclas Asfálticas en Caliente son usualmente clasificados por tamaños en agregados gruesos, agregados finos, o filler mineral. ASTM define a los agregados gruesos como las partículas retenidas en la malla N° 4 (4,75 mm); y filler mineral como el material que pasa la malla N° 200 (75 µm) en un porcentaje mínimo de 70 %.

Las especificaciones de agregados gruesos, finos, y filler mineral se dan en ASTM D-692, D-1073 y D-242, respectivamente. Los agregados adecuados para su uso en Mezclas Asfálticas en Caliente se determina evaluándolos para las siguientes características mecánicas:

- a. Determinación de la densidad y absorción de los agregados.
- b. Determinación cuantitativa de la distribución de los tamaños de las partículas de los agregados gruesos y finos.(Granulometría)
- c. Partículas chatas y alargadas.
- d. Índice de Plasticidad.
- e. Determinación de la resistencia al desgaste de los agregados, por medio de la máquina de Los Ángeles.

Los agregados utilizados provienen de cantera denominada Chillico, está ubicada en la localidad de Compañía, cuenca del Río Cachi a 30 Km Aproximadamente de la ciudad de Ayacucho los materiales a utilizar son agregado gruesos y finos. (10)

**a. Densidad y absorción.**

La finalidad de este ensayo, es determinar la absorción de los agregados gruesos expresada como porcentaje y su gravedad específica.

El peso seco de la muestra se determina por secado al horno y su volumen utilizando un recipiente de volumen conocido aplicando el principio de Arquímedes (según el cual un cuerpo dentro de una masa de agua desplaza un volumen de agua igual al del cuerpo sumergido).

**- Equipo necesario.**

- Sifón
- Probeta graduada y tarada de 1 000 cm<sup>3</sup> de capacidad y 0,1 cm<sup>3</sup> de precisión.
- Estanque con agua.
- Horno de secado con circulación de aire y temperatura regulable capaz de mantenerse en 110° ± 5° C.
- Herramientas y accesorios. Recipientes plásticos, poruña y paño.

- **Procedimiento.**

Para determinar la absorción del material, se toman 1 000 g de suelo retenido en la malla N° 4 ASTM y se lava en la malla N° 200 ASTM (0,08 mm), de modo de eliminar el material fino presente, hasta que el agua salga totalmente limpia. Esta muestra lavada, se seca en el horno hasta masa constante durante 24 horas.

Retirada del horno, la muestra se pesa ( $W_s$ ) y se sumerge inmediatamente durante 48 horas dentro del estanque de agua.

Cumplido el tiempo, se retira la muestra y se seca superficial e individualmente con un paño, evitando durante esta operación la evaporación de agua desde los poros de las partículas.

Finalmente se pesa la muestra, obteniendo el peso saturado superficialmente seco ( $W_{ss}$ ) y se determina el % de absorción (% A).

Para determinar el volumen de la muestra, se debe llenar el sifón con agua hasta que ésta se estabilice (esto ocurre cuando desde el sifón deja de escurrir agua). Inmediatamente, bajo la descarga de agua del sifón se coloca la probeta seca, graduada y tarada y se vacía la muestra al interior del sifón. Se espera que el agua deje de caer por la descarga y se determina el volumen desplazado ( $V_d$ ).

La determinación del volumen se determina de dos maneras:

- Leyendo directamente el volumen en la probeta graduada ( $V_1$ ),
- Pesando la probeta con el agua desplazada ( $W_1$ ) y descontando el peso de la probeta ( $W_2$ ).
- Para efectos de corrección se debe medir la temperatura del agua ( $T^{\circ}x$ ), por lo que el volumen de agua ( $V_2$ ) corresponderá al cociente del peso del agua y su densidad  $T^{\circ}x$ .

Se promedian los dos valores de volúmenes ( $V_1$  y  $V_2$ ) y se determina la gravedad específica ( $G_s$ ) de la muestra.

- **Cálculos.**

- Calcular el porcentaje de absorción (% A) de la muestra :

$$\% A = (W_{ss} - W_s) / W_s * 100(\%)$$

Dónde:

$W_s$  = peso de la muestra seca (g)

$W_{ss}$  = peso de la muestra saturada y superficialmente seca (g)

- Calcular el volumen desplazado ( $V_d$ ) por la muestra:

$$V_d = (V_1 + (W_1 - W_2) / D) / 2 \text{ (cm}^3\text{)}$$

Dónde:

$V_1$  = volumen desplazado leído directamente en la probeta ( $\text{cm}^3$ )

$W_1$  = peso de la probeta más el agua (g)

$W_2$  = peso de la probeta (g)

$D$  = peso unitario del agua a  $T^\circ\text{C}$  ( $\text{g/cm}^3$ )

- Calcular la gravedad específica saturada ( $G_h$ ) de la muestra:

$$G_h = (W_{ss}/V_d) * (1 / \gamma_w) \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Dónde:

$\gamma_w$  = peso específico del agua a  $4^\circ\text{C}$  ( $\text{g/cm}^3$ )

- Calcular el valor de la gravedad específica ( $G_s$ ) de la muestra:

$$G_s = G_h / (100 + \% A) * 100$$

#### a. Análisis granulométrico

La granulometría está definida como la distribución porcentual en masa de los distintos tamaños de partículas que constituyen el agregado pétreo. Se determina mediante el análisis granulométrico, el cual consiste en separar una muestra de agregado en fracciones de igual tamaño. La granulometría se expresa en función de los porcentajes parciales retenidos en cada tamiz.

#### b. Partículas chatas y alargadas.

Partículas planas y alargadas son definidas respectivamente, como aquellas partículas cuya dimensión última es menor que 0,6 veces su dimensión

promedio y aquellas que son mayores 1,8 veces la dimensión promedio. Para el propósito de esta prueba, la dimensión promedio se define como el tamaño medio entre las dos aberturas  $1''$  a  $\frac{3}{4}''$ ,  $\frac{3}{4}''$  a  $\frac{1}{2}''$ ,  $\frac{1}{2}''$  a  $\frac{3}{8}''$ , etc. entre las que los agregados son retenidos al ser tamizados.

Después de haber sido cribados por la malla de abertura cuadrada y de dos mallas respectivamente, las partículas planas y alargadas se separan usando como patrón los aparatos que se muestran, las partículas planas pueden ser separadas rápidamente pasándolas por cribas con ranuras, pero en este caso, se necesita un tipo de criba para cada tamaño. El porcentaje por peso de las partículas planas y alargadas se le designa con el nombre de índice de aplanamiento e índice de alargamiento.

### **Equipos**

1. Calibrador de aplanamiento y alargamiento.
2. Tamices:  $2\frac{1}{2}''$ ;  $2''$ ;  $1\frac{1}{2}''$ ;  $1\frac{1}{4}''$ ;  $\frac{3}{4}''$ ;  $\frac{1}{2}''$ ;  $\frac{3}{8}''$ ;  $\frac{1}{4}''$ .
3. Bandejas
4. Cuarteador
5. Balanza. Sensibilidad de 0,1 % el peso de la muestra que se ensaya.

### **Preparación de la muestra**

1. Separar por cuarteo una muestra representativa
2. Tamizar por las mallas indicadas y determinar el peso retenido entre dos mallas consecutivas.  $W_i$
3. Separar el material retenido en cada malla para ser ensayado.

### **NOTA:**

Si el porcentaje retenido entre dos mallas consecutivas es inferior al 5 %, no será ensayado.

Si el porcentaje retenido entre dos mallas consecutivas está entre el 5 % y 15 %, se separarán un mínimo de 100 partículas. Determinar su peso con aproximación al 0,1 %.



Si el porcentaje retenido entre dos mallas consecutivas es mayor al 15 %, se separarán un mínimo de 200 partículas. Determinar su peso con aproximación al 0,1 %.

### Procedimiento de ensayo

1. Cada una de las muestras separadas se hace pasar por el calibrador de espesores en la ranura cuya abertura corresponda a la fracción que se ensaya.
2. Pesar la cantidad de partículas de cada fracción, que pasaron por la ranura correspondiente, aproximación al 0,1 % del peso total de la muestra de ensayo.  $P_i$
3. Cada una de las muestras separadas se hace pasar por el calibrador de longitud por la separación entre barras correspondiente a la fracción que se ensaya.
4. Pesar la cantidad de partículas de cada fracción, retenida entre las dos barras correspondientes, aproximación al 0,1 % del peso total de la muestra de ensayo.  $R_i$

### Cálculos

$$IAPfi(\%) = \frac{P_i}{W_i} \times 100$$

Dónde:

$IAP_{fi}$  = Índice de aplanamiento de la fracción  $i$ , ensayada.

$P_i$  = Peso de la partícula que pasan por la ranura correspondiente.

$W_i$  = Peso inicial de la fracción.

$$IALfi(\%) = \frac{R_i}{W_i} \times 100$$

Dónde:

$IAL_{fi}$  = Índice de alargamiento de la fracción  $i$  ensayada.

$R_i$  = Peso de la partícula retenida entre la correspondientes barra.

$W_i$  = Peso inicial de esa fracción.

Para ambos índices, se deberá redondear los resultados al entero más próximo.

Fuente: Índice de Aplanamiento y Alargamiento de Agregados para Carreteras.  
MTC E221-1999.

### **Limite Líquido**

Esta propiedad se mide en laboratorio mediante un procedimiento normalizado en que una mezcla de suelo y agua, capaz de ser moldeada, se deposita en la Cuchara de Casagrande o Copa de Casagrande, y se golpea consecutivamente contra la base de la máquina, haciendo girar la manivela, hasta que el surco que previamente se ha recortado, se cierre en una longitud de 12 mm (1/2"). Si el número de golpes para que se cierre el surco es 25, la humedad del suelo (razón peso de agua/peso de suelo seco) corresponde al límite líquido. Dado que no siempre es posible que el surco se cierre en la longitud de 12 mm exactamente con 25 golpes, existen dos métodos para determinar el límite líquido: - trazar una gráfica con el número de golpes en coordenadas logarítmicas, contra el contenido de humedad correspondiente, en coordenadas normales, e interpolar para la humedad correspondiente a 25 golpes. La humedad obtenida es el límite líquido. - según el método puntual, multiplicar por un factor (que depende del número de golpes) la humedad obtenida y obtener el límite líquido como el resultado de tal multiplicación.

### **Limite Plástico**

Esta propiedad se mide en laboratorio mediante un procedimiento normalizado pero sencillo consistente en medir el contenido de humedad para el cual no es posible moldear un cilindro de suelo, con un diámetro de 3 mm. Para esto, se realiza una mezcla de agua y suelo, la cual se amasa entre los dedos o entre el dedo índice y una superficie inerte (vidrio), hasta conseguir un cilindro de 3 mm de diámetro. Al llegar a este diámetro, se desarma el cilindro, y vuelve a amasarse hasta lograr nuevamente un cilindro de 3 mm. Esto se realiza consecutivamente hasta que no es posible obtener el cilindro de la dimensión deseada. Con ese contenido de humedad, el suelo se vuelve quebradizo (por pérdida de humedad) o se vuelve pulverulento. Se mide el contenido de humedad, el cual corresponde al límite plástico. Se recomienda realizar este procedimiento al menos 3 veces para disminuir los errores de interpretación o medición.

### **Índice de plasticidad**

El índice de plasticidad es la diferencia entre el límite plástico menos límite líquido (10)

ASTM D4318-05 Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of soils

$$IP = Lp - Ll$$

### **f. Determinación de la resistencia al desgaste de los agregados, por medio de la máquina de Los Ángeles. ASTM C-131 y ASTM C-535.**

El Ensayo de Desgaste de Los Ángeles, ASTM C-131 ó AASHTO T-96 y ASTM C-535, mide básicamente la resistencia de los puntos de contacto de un agregado al desgaste y/o a la abrasión.

También se está usando el ensayo de abrasión para calificar la calidad de piedras, y bloques de roca para obras. Para lo cual se deberá someter primero a un proceso de chancado a fin de tener la muestra de ensayo.

Este método describe el procedimiento para determinar el porcentaje de desgaste de los agregados de tamaños menores a 37,5 mm (1 ½") y agregados gruesos de tamaños mayores de 19 mm (¾"), por medio de la máquina de los Ángeles.

#### **Equipos de Laboratorio**

1. Máquina de desgaste de Los Ángeles
2. Tamices. De los siguientes tamaños: 3", 2½", 2", 1½", 1", ¾", ½", ⅜", ¼", N° 4, N° 8. Un tamiz N° 12 para el cálculo del desgaste.
3. Esferas de acero. De 46,38 a 47,63 mm de diámetro de peso equivalente entre 390 a 445 g.
4. Horno. Capaz de mantener una temperatura de  $10 \pm 5^{\circ}\text{C}$
5. Balanza. Sensibilidad de 1,0 g.

#### **Procedimiento de Ensayo**

1. El material deberá ser lavado y secado en horno a una temperatura constante de  $105 - 110^{\circ}\text{C}$ , tamizadas según las mallas que se indican y mezcladas en las cantidades del método al que correspondan, según la Tabla N° 1 ó N° 2.

2. Pesar la muestra con precisión de 1 g, para el caso de agregados gruesos hasta de 1½” y 5 g para agregados gruesos de tamaños mayores a 3/4”.
3. Introducir la muestra junto con la carga abrasiva en la máquina de Los Ángeles, cerrar la abertura del cilindro con su tapa, ésta tapa posee empaquetadura que impide la salida de polvo fijada por medio de pernos. Accionar la máquina, regulándose el número de revolución es adecuado según el método.
4. Finalizado el tiempo de rotación, se saca el agregado y se tamiza por la malla N° 12.
5. El material retenido en el tamiz N° 12 se lava y seca en horno, a una temperatura constante entre 105 a 110 °C pesar la muestra con precisión de 1 g.

### **Cálculos**

El resultado del ensayo se expresa en porcentaje de desgaste, calculándose como la diferencia entre el peso inicial y final de la muestra de ensayo con respecto al peso inicial.

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{P_{inicial} - P_{final}}{P_{inicial}} \times 100$$

### **Observaciones**

1. Si el material se encuentra libre de costras o polvo no será necesario lavarlo antes y/o después del ensayo.
2. Para agregados gruesos de tamaños mayores a ¾” se puede determinar la pérdida después de 200 revoluciones. Al efectuar ésta determinación no será necesario lavar el material retenido en el tamiz N° 12. La relación de pérdida después de 200 revoluciones a pérdida después de 1 000 revoluciones, no debería exceder en más del 20 % para materiales de dureza uniforme. Cuando se realice éste paso se evitará perder todo tipo de material, incluido el polvo, porque éste será devuelto a la máquina para concluir con el ensayo.

Fuente: Abrasión Los Ángeles (L.A.) al Desgaste de los Agregados de Tamaños Menores de 37,5 mm (1½”). Norma MTC E207-1999

## CAPITULO V

### RESULTADOS

#### 5.1. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS PETREOS

**Tabla 5.1. Densidades y absorción del agregado pétreo.**

Ensayos	Gravilla ¾"	Gravilla ⅜"	Polvo Roca
Densidad Real Seca (kg/m <sup>3</sup> )	2,650	2,629	2,658
Absorción	1,12 %	1,78 %	0,63 %

**Tabla 5.2. Granulometría agregado pétreo.**

Tamices		Porcentaje que pasa, %		
mm	ASTM	Gravilla ¾"	Gravilla ⅜"	Polvo Roca
20	¾"	100		
12,5	½"	31		
10	⅜"	18	100	100
5	Nº 4	4	11	95
2,5	Nº 8	0	2	74
0,63	Nº 30			40
0,315	Nº 50			31
0,16	Nº 100			20
0,08	Nº 200			6

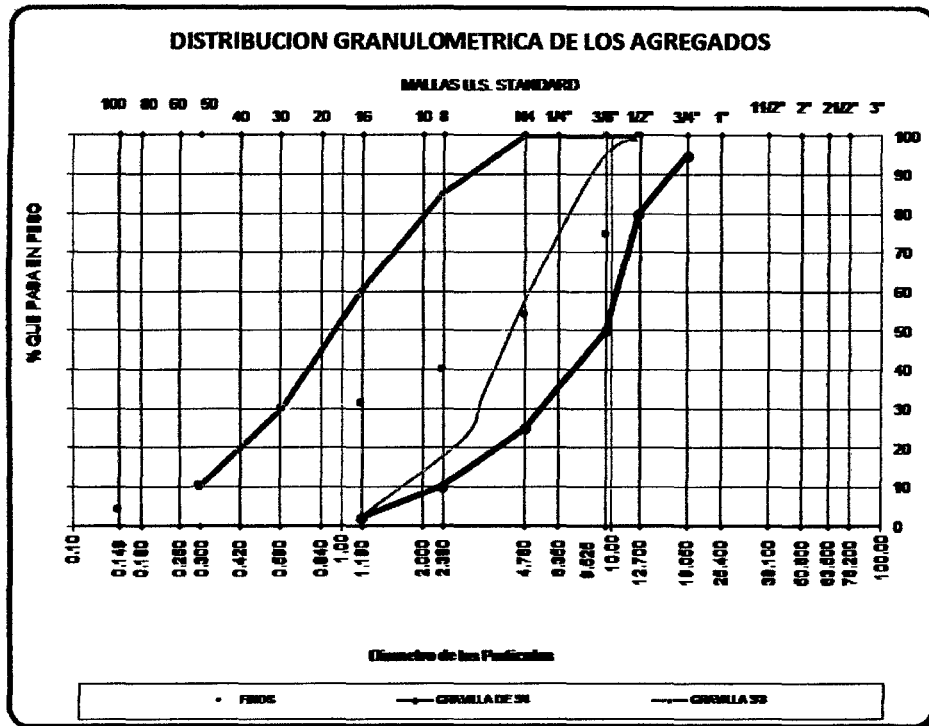


Figura 5.1. Curva de distribución granulométrica de agregados.

Tabla 5.3. Partículas chatas y alargadas agregado grueso.

Ensayos	Gravilla 3/4"	Gravilla 3/8"	Exigencia	Norma
Partículas chatas (%)	3,7	3,3	Max. 10	ASTM - 4794
Partículas alargadas (%)	4,2	4,1	Max. 10	ASTM - 4794

Tabla 5.4. Índice de Plasticidad agregado pétreo.

Ensayos	Gravilla 3/4"	Gravilla 3/8"	Polvo Roca	Exigencia	Norma
Índice de Plasticidad	NP	NP	NP	NP	ASTMD 4318-84

Tabla 5.5. Resistencia al desgaste de agregado pétreo grueso.

Ensayos	Gravilla 3/4"	Gravilla 3/8"	Exigencia	Norma
Desgaste de los ángulos (%)	14,88	16,48	Max. 25	AASHTO T-96 y ASTM C-131

### **5.1.1 LIGANTE ASFÁLTICO**

El grado de penetración del cemento asfáltico se especifica en ASTM D-946, con cinco penetraciones estándares, 40-50, 60-70, 85-100, 120-150, 200-300; el Perú produce cemento asfáltico de petróleo PEN 40/50, 60/70, 85/100, 120/150. El ensayo de penetración mide la penetración de una aguja estándar dentro de un cemento para pavimentación bajo cierta temperatura, tiempo y carga. Obviamente un alto valor de penetración representa un cemento asfáltico blando. Por ejemplo, 40-50 es un grado alto, y 200-300 es un grado blando.

Para esta investigación, se decidió trabajar con un cemento asfáltico CA 60/70. La razón de esta elección fue para relacionar y comparar con los diseños realizados anteriormente para el proyecto de asfaltado de las calles de la provincia de Huanta la cual se hará la comparación respectiva con la mezcla adicionando polvo de caucho. A continuación, se muestran los resultados de los ensayos de caracterización realizados al cemento asfáltico, por la empresa proveedora.

**Tabla 5.6. Resultados cemento asfáltico.**

ENSAYOS	METODO ASTM	OTRO METODO	RESULTA DOS DEL ANALISIS	ESPECIFICACIONES	
				MIN	MAX
<b>PENETRACION:</b>					
A 25°C, 100g 5seg, 1/10mm	<b>D 5-06</b>		<b>131</b>	<b>120</b>	<b>150</b>
<b>DUCTIBILIDAD:</b>					
A 25°C, 5 cm/min, cm	<b>D113-07</b>		<b>≥150</b>	<b>100</b>	
<b>FLUIDEZ:</b>					
Viscosidad Cinemática a 100 °C cst	<b>D2170-07</b>		<b>1565</b>	<b>Reportar</b>	
Viscosidad Cinemática a 135 °C cst	<b>D2170-07</b>		<b>220</b>	<b>140</b>	
<b>SOLUBILIDAD:</b>					
Solubilidad en Tricloroetileno, % Masa	<b>D2042-09</b>		<b>99.9</b>	<b>99</b>	
Prueba de la Mancha, Nafta- Xileno(25%xileno)		<b>T 102</b>	<b>Negativo</b>	<b>Reportar</b>	
<b>VOLATILIDAD:</b>					
Punto de inflamación, C,O,C °C	<b>D92-05a</b>		<b>280</b>	<b>218</b>	
<b>DENSIDAD:</b>					
Gravedad API a 60°F, °API	<b>D70-09</b>		<b>8.6</b>	<b>Reportar</b>	
Gravedad Especifica a 60/60°F	<b>D70-09</b>		<b>1.010</b>	<b>Reportar</b>	
<b>SUCEPTIBILIDAD TERMICA:</b>					
Punto de Ablandamiento, °C	<b>D36- 95(00)e1</b>		<b>44.0</b>	<b>Reportar</b>	
Índice de Penetración			<b>0.2</b>	<b>-1</b>	<b>1</b>
Perdida por calentamiento, %Masa			<b>0.40</b>	<b>1.3</b>	
Penetración Retenida, % de la Original	<b>D 5-06</b>		<b>58</b>	<b>42</b>	
Ductilidad a 25°C, 5cm/min, cm	<b>D 113-07</b>		<b>134</b>	<b>100</b>	
<b>ADHERENCIA:</b>					
Revestimiento y Desprendimiento, %	<b>D3625- 96(05)</b>		<b>≥95</b>	<b>Reportar</b>	

Fuente: Petroperú informe N°GOPC-LAB-1677-2013



### 5.1.2 MEZCLA DE ÁRIDOS

La mezcla de los áridos cumple con los requisitos de una mezcla asfáltica en caliente, establecidos en la Parte II del Manual de Laboratorio Ensayos para Pavimentos volumen I. UNI. Los resultados de los ensayos de densidad y absorción de la mezcla de agregados, se muestran en la tabla 5.7.

**Tabla 5.7. Densidad y absorción de la mezcla de agregados.**

<b>Ensayos</b>	<b>Mezcla</b>
Densidad Real ( $\text{kg/m}^3$ )	2,587
Absorción	1,83 %

La granulometría exigida según las Normas Técnicas Peruana, se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 5.8. Granulometría Semidensa según NTP.**

Tamiz	Mezcla								
	Tamaño máximo nominal de agregados								
	2"	1 ½"	1"	¾"	½"	3/8"	Nº4	Nº8	Nº16
<b>GRADACIÓN DE AGREGADOS (GRAVA; FINO Y FILLER QUE SE REQUIERE) PORCENTAJE</b>									
2½"(63 mm)	100	-	-	-	-	-	-	-	-
2" (50 mm)	90-100	100	-	-	-	-	-	-	-
1 ½" (37,5 mm)	-	90-100	100	-	-	-	-	-	-
1" (25 mm)	60-80	-	90-100	100	-	-	-	-	-
¾" (19 mm)	-	56-80	-	90-100	100	-	-	-	-
1/2" (12,5 mm)	35-65	-	56-80	-	90-100	100	-	-	-
3/8" (9,5 mm)	-	-	-	56-80	-	90-100	100	-	-
Nº4 (4,75 mm)	17-47	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85	80-100	-	100
Nº8 (2,36 mm)	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67	65-100	-	95-100
Nº16 (1,18 mm)	-	-	-	-	-	-	40-80	-	85-100
Nº30 (600 µm)	-	-	-	-	-	-	25-65	-	70-95
Nº50 (300 µm)	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23	7-40	-	45-75
Nº100 (150 µm)	-	-	-	-	-	-	3-20	-	20-40
Nº200 (75 µm)	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10	2-10	-	9-20

Fuente: Manual de Laboratorio Ensayos para Pavimentos volumen I .UNI

## 5.2 DISEÑO MARSHALL DE LA MEZCLA PATRÓN

La cantidad de cemento asfáltico requerida se determina con el procedimiento Marshall, mediante la elaboración de probetas con distintos contenidos de ligante, con el cual se obtienen los parámetros Marshall que permiten determinar el porcentaje óptimo de ligante en la mezcla.

El Método de Diseño Marshall permite obtener un contenido óptimo de cemento asfáltico para mezclas asfálticas en caliente. Los parámetros que se

estudian durante el diseño son la Estabilidad, Fluidez, Densidad, Vacíos de la mezcla asfáltica y Vacíos en el agregado mineral. De acuerdo al criterio de diseño establecido, la determinación del contenido óptimo de asfalto se obtiene principalmente con la densidad, estabilidad y vacíos en la mezcla asfáltica.

Los criterios aplicados en la evaluación de las mezclas asfálticas diseñadas siguiendo el método Marshall se tomó de las Especificaciones Técnicas del MTC capítulo 4: Pavimento Asfáltico Sección 410 : Pavimento de Concreto Asfáltico Caliente. Los requisitos que deben cumplir las mezclas asfálticas se indican en la siguiente tabla.

**Tabla 5.9. Requisitos para Mezclas Asfálticas según Especificaciones Técnicas del MTC.**

<b>TIPO DE MEZCLA ASFALTICA</b>	<b>Estabilidad min. (N)</b>	<b>Fluencia (0,25 mm)</b>	<b>Huecos en la mezcla (%)</b>
Transito bajo	9 000	8 - 16	4 - 6
Transito medio	8 000	8 - 16	3 - 8
Transito alto	6 000	8 - 16	5 - 10

Para la determinación del contenido óptimo de ligante en la mezcla patrón, se elaboraron mezclas con cuatro contenidos diferentes de ligante. Los porcentajes utilizados fueron de 5 %, 5,5 %, 6 % y 6,5 %.

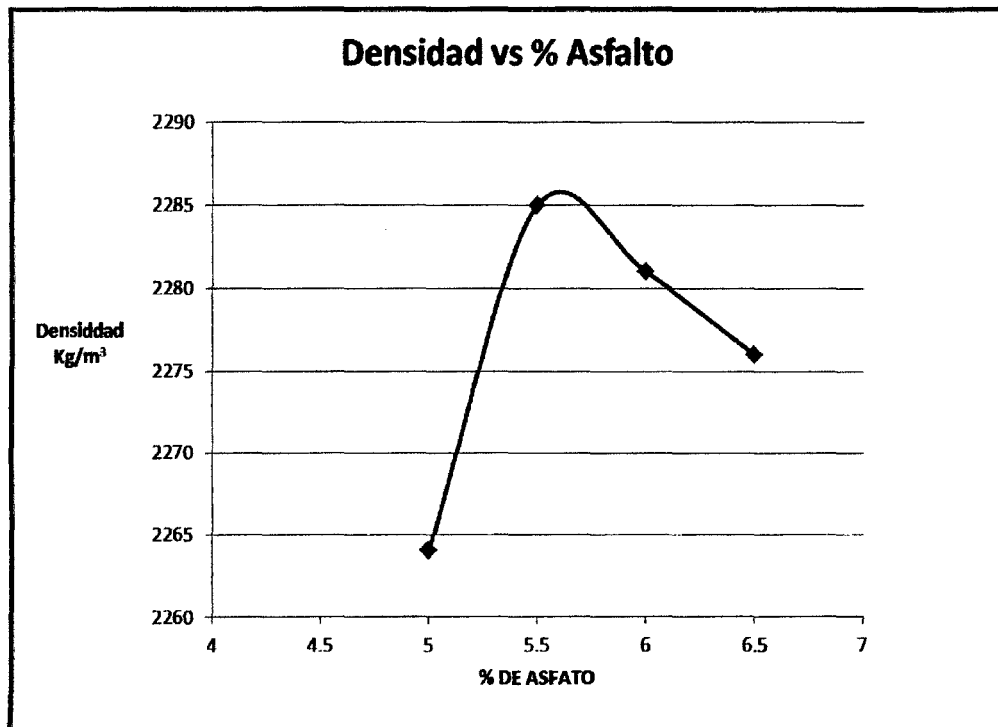
Las diferentes probetas Marshall se preparan según el método y se elaboran con 1 100 g de peso, en moldes de 10,2 cm de diámetro, y con una energía de compactación de 75 golpes por cada cara.

Los parámetros Marshall para cada contenido de asfalto, se obtienen del promedio de los resultados obtenidos de tres probetas, cuyos valores no difieran demasiado entre ellas.

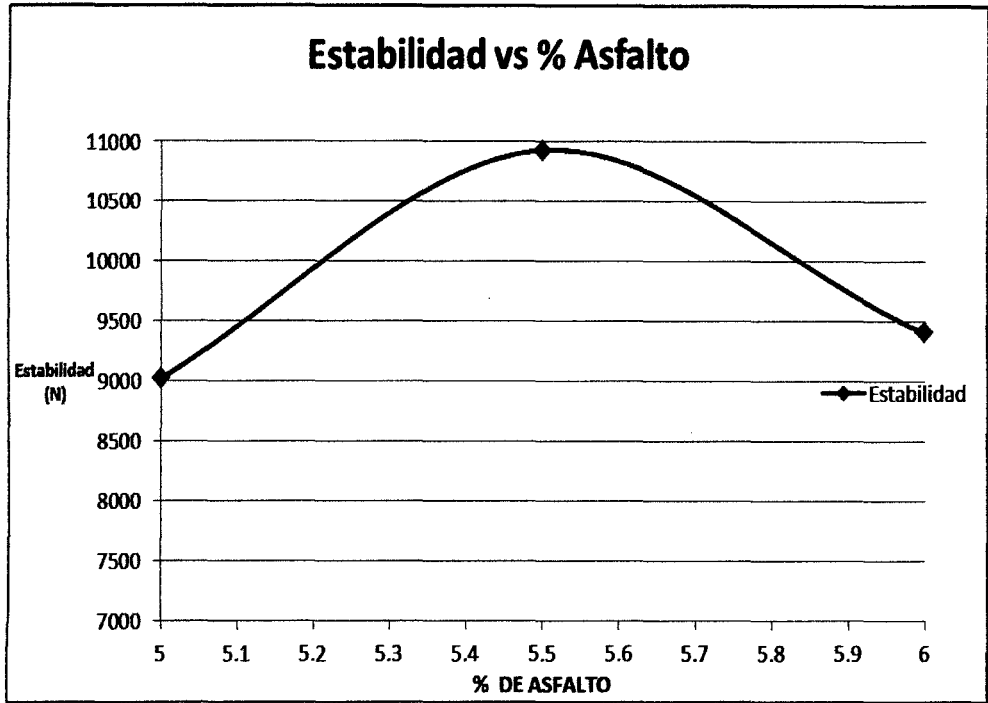
Los resultados del diseño Marshall de la mezcla patrón, se muestran a continuación:

**Tabla 5.10. Parámetros Marshall de la mezcla patrón.**

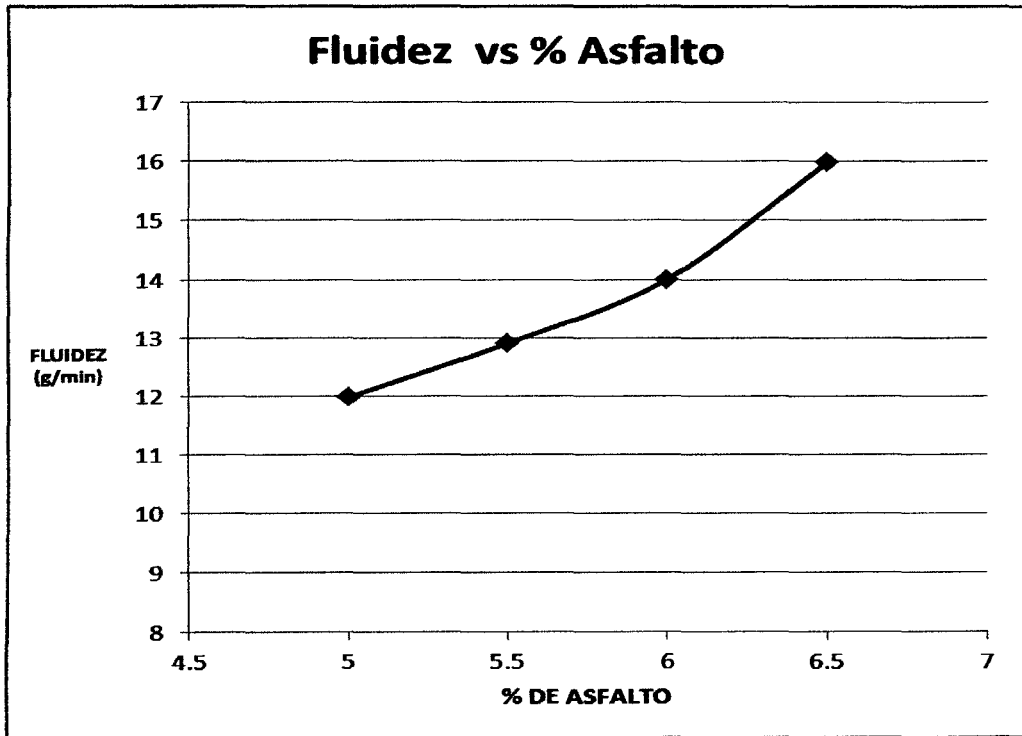
<b>DISEÑO MARSHALL</b>					
T° mezclado probetas	160 °C				
T° compactación probetas	140 °C				
	<b>UNIDAD</b>	<b>RESULTADOS</b>			
ASFALTO 60 - 70	% ref. g.	5,0	5,5	6,0	6,5
Densidad	Kg/m <sup>3</sup>	2 264	2 285	2 281	2 276
Estabilidad	N	9 019	10 927	9 409	8 268
Fluidez	g/min	11,98	12,9	14,0	15,98
Huecos o vacíos en la mezcla	%	6,8	6,0	5,5	5,2
Variación de vacíos en agregado	%	17,0	16,8	17,6	18,4



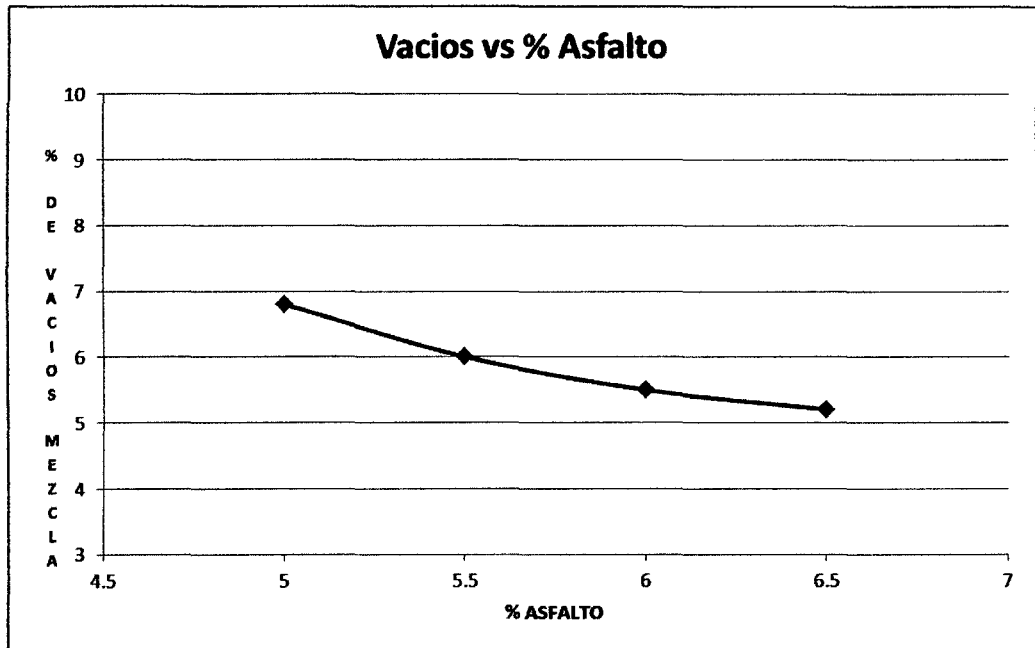
**Figura 5.2. Variación de la Densidad respecto al porcentaje de cemento asfáltico, para mezcla patrón.**



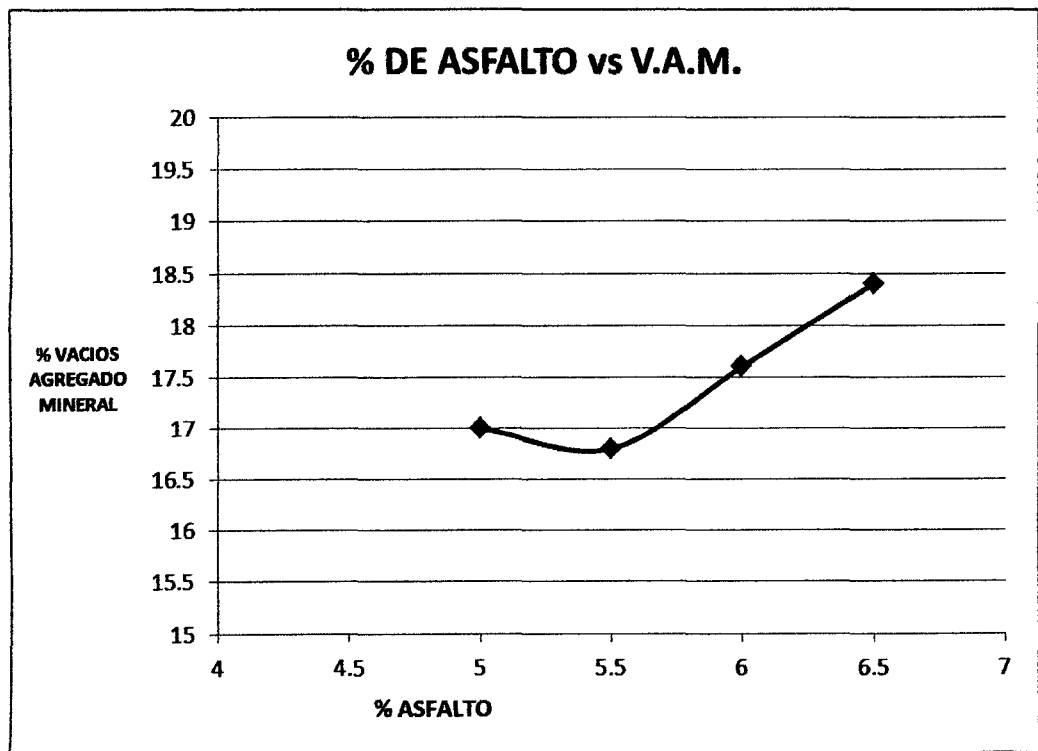
**Figura 5.3. Variación de la Estabilidad respecto al porcentaje de cemento asfáltico, para mezcla patrón**



**Figura 5.4. Variación de la Fluidez respecto al porcentaje de cemento asfáltico, para mezcla patrón.**



**Figura 5.5. Variación de los vacíos en la mezcla respecto al porcentaje de cemento Asfáltico, para mezcla patrón.**



**Figura 5.6. Variación de vacíos en el agregado mineral (V.A.M.) respecto al porcentaje de Cemento asfáltico, para mezcla patrón.**

**Tabla 5.11. Determinación del contenido óptimo de asfalto según a lo establecido en el método Marshall**

<b>DETERMINACION DEL CONTENIDO OPTIMO DE ASFALTO</b>	
<b>Porcentaje de asfalto que entrega la máxima densidad</b>	<b>5,6</b>
<b>Porcentaje de asfalto que entrega la máxima estabilidad</b>	<b>5,5</b>
<b>Mínimo porcentaje de vacíos con respecto al 5 % de asfalto en la mezcla patrón</b>	<b>6,8</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>6,0</b>

La determinación del contenido óptimo de asfalto, se realiza calculando el promedio entre los porcentajes de asfalto que entreguen la máxima Densidad, la máxima Estabilidad y el % mínimo de Vacíos para el 5% de asfalto en la mezcla patrón.

Para esta mezcla, el porcentaje óptimo de asfalto, se estima que es 6 %. Con este porcentaje, la Estabilidad y los huecos en la mezcla, se encuentran dentro de las especificaciones para una carpeta de rodadura (Tabla 4.9).

### **5.3 PREPARACIÓN DE LA MEZCLA ADICIONANDO POLVO CAUCHO MEDIANTE PROCESO POR VIA SECA**

En este proceso se estudia el efecto del caucho al adicionarse como una parte de los agregados finos en la elaboración de las mezclas asfálticas. La tecnología de aplicación de la vía seca es la convencional, desarrollada en España, la cual usa porcentajes de adición de hasta el 2 % del peso total de los agregados.

En esta investigación, el caucho se adiciona en porcentajes de 0,5 %, 1,0 % y 1,5 % con respecto al peso de los agregados y se utiliza una granulometría Semidensa.

#### **5.3.1 CAUCHO UTILIZADO**

El caucho lo suministra la Empresa CAUCHO PERU SAC. Este caucho es importado y proviene de triturado de neumáticos usando el método ambiental, descrito anteriormente.

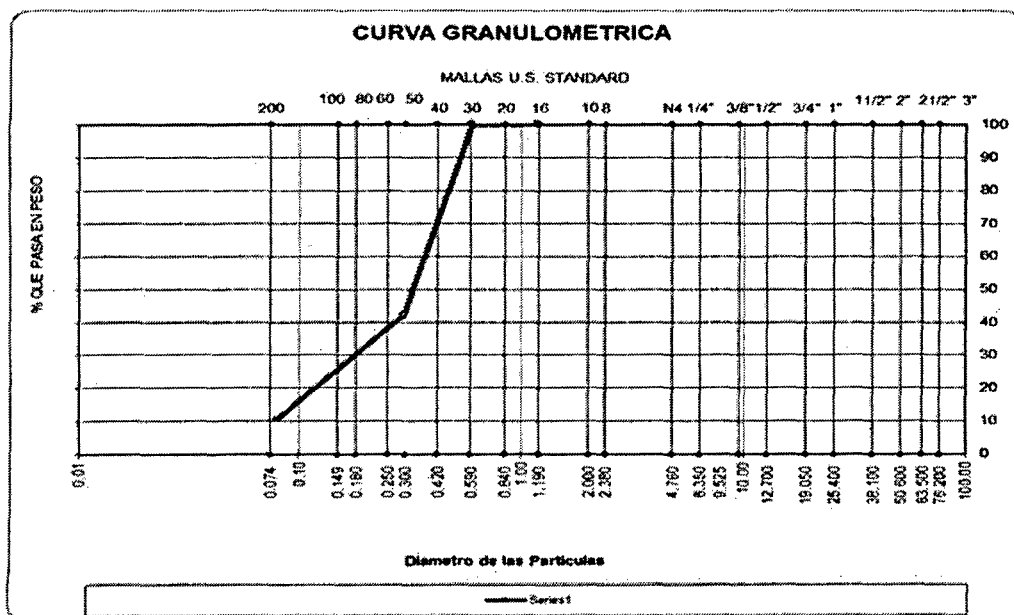
Se decide trabajar con tamaños inferiores al tamiz N° 30 (0,63 mm), para tener un polvo de caucho más homogéneo. Por tanto La granulometría del caucho usado para realizar esta experiencia se indica en la Tabla 4.12.

La densidad del caucho utilizado es de 1,165 kg/m<sup>3</sup>, y el de los agregados 2,587 kg/m<sup>3</sup>; se observa que la densidad del caucho es bastante baja con respecto de los agregados. Esto debe tenerse en cuenta pues al incorporar el caucho por peso, existe una modificación importante en términos de volumen de la mezcla.

**Tabla 5.12. Granulometría del caucho utilizado.**

TAMICES		PORCENTAJE QUE PASA, %
mm	ASTM	
0,63	N° 30	100
0,30	N° 50	42
0,16	N° 100	11
0,08	N° 200	1

Cabe destacar que la granulometría del caucho utilizado en este trabajo, es diferente a la usada en el método por vía húmeda.



**Figura 5.7. Curva distribución granulométrica caucho.**



### 5.3.2 GRANULOMETRÍA DE LA MEZCLA MEJORADA CON CAUCHO

La curva granulométrica de los agregados con el caucho incorporado, tiene una variación mínima y sólo en las mallas N° 8 y N° 30, cuando ésta se realiza en peso. En la tabla siguiente, se muestran la granulometría en peso de la mezcla para los distintos contenidos de caucho.

**Tabla 5.13. Distribución Granulométrica en peso de mezclas con caucho.**

mm	ASTM	Porcentaje de caucho que pasa
		Para 0; 0.5; 1; 1,5 %
20	3/4"	100
12,5	1/2"	88
10	3/8"	78
5	N° 4	51
2,5	N° 8	35
0,63	N° 30	13
0,30	N° 50	8
0,16	N° 100	6
0,08	N° 200	4

Nota: El porcentaje de pasante para todas las mallas debe cumplirse para todos los porcentajes de caucho adicionado.

### 5.3.3. DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE CAUCHO

La determinación del porcentaje óptimo de caucho se realiza mediante el ensayo de Inmersión-Compresión y los parámetros Marshall y para su verificación, se realizan los ensayos de tracción indirecta y Módulo Resiliente.

#### **5.3.4 METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL AGLOMERADO ASFALTICO MEJORADO CON CAUCHO**

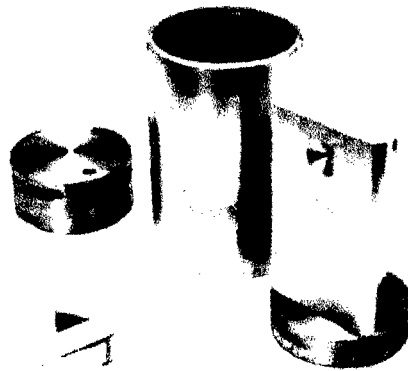
El método para la de elaboración del Aglomerado o mezcla con caucho en laboratorio, no es diferente al método convencional sin caucho, salvo la determinación previa del tiempo y temperatura de digestión, que requiere este tipo de mezcla asfáltica antes de la compactación. Los pasos son los siguientes:

1. Realizar la granulometría de los agregados a utilizar.
2. Calentar los agregados en horno a temperatura entre 160 y 210 °C.
3. Calcular la proporción de caucho a utilizar, relacionada con el peso de los áridos.
4. Mezclar los agregados calientes con la cantidad de caucho que corresponda, y colocarlos en horno hasta 170 °C por aproximadamente 5 min para que el caucho aumente su temperatura.
5. Adicionar el asfalto, previamente calentado a la temperatura de mezclado, a la mezcla de agregados con caucho y mezclar por 5 min.
6. Colocar la mezcla asfáltica por un periodo de digestión en horno, cuyo tiempo y temperatura se han definido con anterioridad mediante el ensayo de Inmersión-Compresión.
7. Retirar la mezcla del horno y remover el material.
8. Compactar la mezcla caliente en moldes Marshall. La compactación se lleva a cabo a una temperatura 10 °C más baja que la de digestión, con 75 golpes del martillo Marshall, por ambos lados de la probeta.
9. Dejar reposar por 24 horas antes de extraer la probeta del molde.
10. Remover la probeta a temperatura ambiente.

#### 5.4. DETERMINACIÓN DEL TIEMPO Y TEMPERATURA DE DIGESTIÓN

Este ensayo se toma de la norma NLT-162, (Norma Española) y se utiliza para evaluar el efecto del agua sobre la cohesión de las mezclas bituminosas compactadas.

Se preparan 10 probetas cilíndricas de 101,6 mm de diámetro y 101,6 mm de altura tal y como indica el ensayo de resistencia a compresión simple de las mezclas bituminosas (NLT-161). Estas probetas se dividen en dos grupos de 5, pasándose un grupo a un a una estufa regulado a 25 °C durante 4 días. El segundo grupo se introduce en un baño de agua regulado a 50 ó 60 °C, durante 4 días, dejándose en un baño de agua a 25 °C durante otras dos horas.



**Figura 5.8. Conjunto de compactación.**

Tras todo esto se calcula el valor medio de las resistencias a compresión simple de ambos grupos de probetas, y con estos valores se calcula el índice de resistencia conservada como:

$$\text{Índice de resistencia conservada, \%} = (R2/R1)100$$

Dónde:

R1= Resistencia a compresión de las probetas no sumergidas

R2= Resistencia a compresión de las probetas sumergidas

Para definir el tiempo y la temperatura de digestión, se preparan probetas a

diferentes temperaturas, 150°, 160° y 170° C, y a tiempos de 1 y 2 horas con distintos porcentajes de caucho y con un único porcentaje de ligante igual a 6 %, correspondiente al óptimo de la mezcla patrón.

Estas probetas son comparadas con la mezcla patrón.

Para la estimación del tiempo y la temperatura de digestión, se toma como parámetro de comparación entre mezclas, la resistencia conservada. Las mezclas se fabrican siguiendo el procedimiento anteriormente descrito en la sección 4.3.4. Se realizan tres probetas por cada grupo, R1 y R2, y se utiliza la misma prensa para compactarlas y para realizar el ensayo a compresión.

Las distintas mezclas realizadas se muestran en la siguiente tabla:

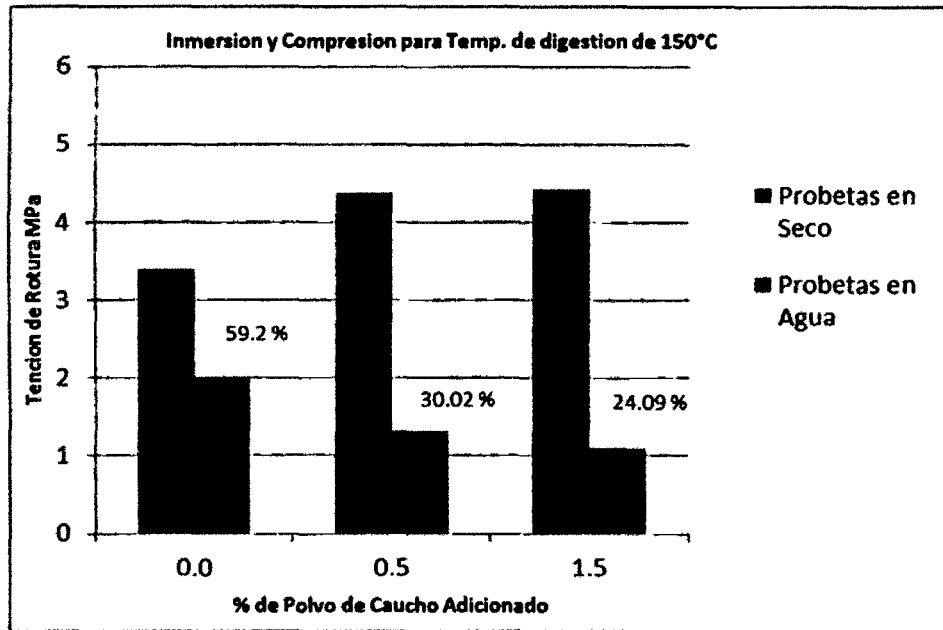
**Tabla 5.14. Índice de Resistencia conservada en % a tiempo y temperatura de digestión diferentes**

Mezcla	T de Digestión (°C)	Tiempo Digestión (h)	% caucho	R1	R2	R
				MPa	MPa	%
P1	0	0	0	3,39	2,02	59,2
C1	150	2	1	4,37	1,32	30,2
C2	150	2	1,5	4,42	1,1	24,9
C3	160	1	1	3,24	1,28	39,5
C4	160	2	1	4,11	1,78	43,3
C5	170	2	0,5	4,55	3,18	69,9
C6	170	2	1	4,02	2,68	66,7
C7	170	2	1,5	4,70	1,87	39,8

En este ensayo se pretende obtener la susceptibilidad de la mezcla cuando está sometida a la acción del agua, solo interesa saber la diferencia porcentual entre los dos grupos, no las magnitudes de sus resistencias.

#### **PARA T° DIGESTIÓN = 150 °C**

Para las mezclas fabricadas con temperatura de digestión de 150 °C por dos horas (mezclas C1 y C2), se varía el porcentaje de adición de caucho, con lo que puede obtenerse la evolución del parámetro resistencia conservada, con respecto a esta variable.



**Figura 5.9. Resultados mezclas C1 y C2 a 150 °C**

Se observa que la resistencia conservada disminuye al agregar caucho. La cohesión de la mezcla se ve perjudicada por efecto del agua cuando contiene caucho, esto se debe a que a esta temperatura, no está ocurriendo completamente el proceso de digestión, es decir, el caucho no está interactuando con el ligante.

Las resistencias conservadas en seco, son más altas que las de mezclas sin caucho, no así la resistencia conservada de probetas sumergidas en agua, que disminuyen al agregar caucho.

Por otro lado, se tiene que al agregar caucho, la densidad de las probetas disminuye, esto se puede deber a la falta de digestión y al dosificar el caucho en peso, resulta mayor volumen, pues este material es menos denso que los agregados.

#### **PARA T° DIGESTIÓN = 160°C**

Si se aumenta la temperatura de digestión a 160 °C, manteniendo el porcentaje de caucho en 1 % y se varía el tiempo de digestión, se obtienen los resultados para las mezclas C3 y C4, mostrados a continuación.

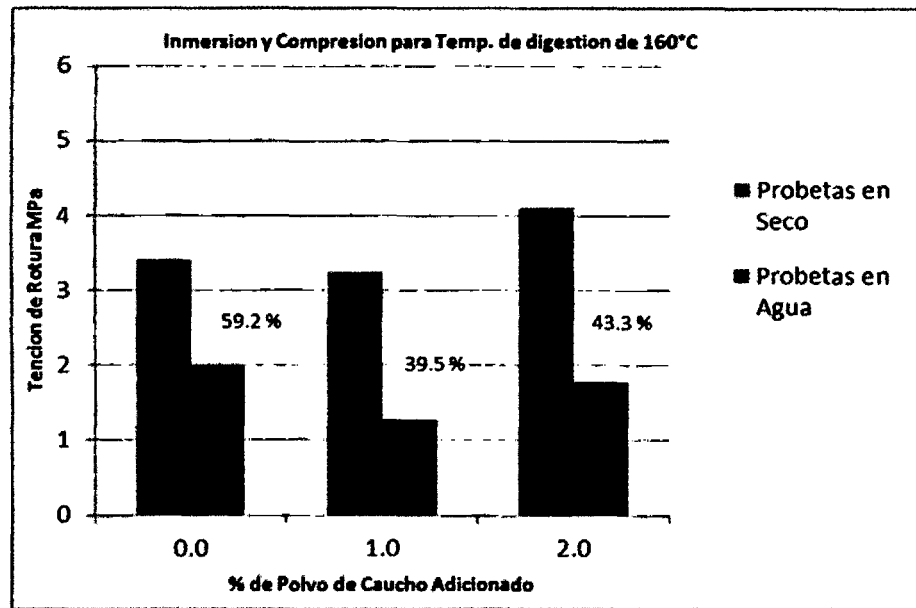


Figura 5.10. Resultados mezclas C1 y C2 a 160 °C

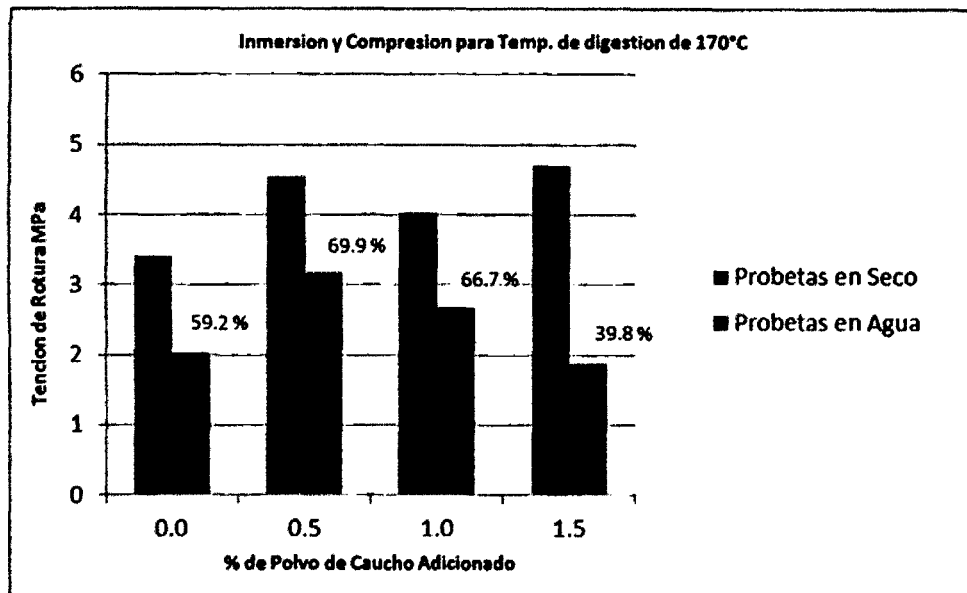
Al aumentar la temperatura de digestión a 160 °C, se obtienen mejores valores de la resistencia conservada, debido a que el caucho comienza a interactuar con el ligante y el efecto del agua está disminuyendo.

Mientras más tiempo se tenga la mezcla en el horno, aumenta la densidad de las probetas, al igual que R1 y R2, esto provoca un mayor valor de la resistencia conservada.

Por otro lado, se observa que los valores de resistencia conservada siguen estando por debajo del valor de la mezcla patrón.

#### PARA T° DIGESTIÓN = 170°C

Las mezclas C5, C6 y C7 se fabrican con temperatura de digestión de 170° C y un tiempo de digestión de 2 horas, variando el porcentaje de caucho desde 0,5 % hasta 1,5 %. Los resultados obtenidos para estas mezclas, se grafican a continuación.



**Figura 5.11. Resultados mezclas C5, C6 y C7 a 170 °C**

Con esta temperatura de digestión, se observa que al agregar caucho hasta en 1 % a las mezclas, es menor la pérdida de cohesión por efecto del agua, lo que se traduce en mayores valores de la resistencia conservada.

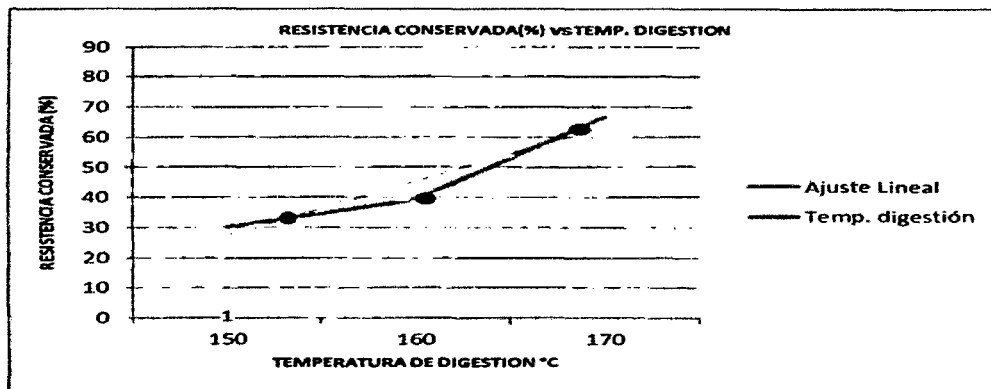
También se observa que la resistencia conservada para probetas sumergidas disminuye, pero no hay una clara tendencia para la resistencia conservada en seco.

Comparados con los resultados obtenidos con los ensayos anteriores a 150 y 160° C, se obtienen mejores valores de resistencia conservada con esta temperatura, salvo para el porcentaje de 1,5 % de caucho.

A modo de resumen, se presenta a continuación una tabla con los distintos valores de resistencia conservada para una mezcla con dotación de caucho de 1 %, aumentando la temperatura de digestión, y manteniendo el tiempo en dos horas en cada caso.

**Tabla 5.15. Resultados mezclas con 1 % de caucho con tiempo de digestión de dos horas.**

Mezcla	T de Digestión (°C)	Tiempo Digestión (h)	% caucho	R1	R2	R
				MPa	MPa	%
C1	150	2	1	4,37	1,32	30,2
C3	160	2	1	3,24	1,28	39,5
C6	170	2	1	4,02	2,68	66,7



**Figura 5.12. Resultados mezclas con 1 % de caucho con tiempo de digestión de dos horas.**

En este gráfico, se observa el comportamiento del indicador resistencia conservada al aumentar la temperatura de digestión de la mezcla.

Se observa que al aumentar la temperatura, mejora la eficacia del proceso de adición de caucho a la mezcla, facilitando la digestión del caucho, por parte del ligante,

El valor alcanzado para la resistencia conservada, después de dos horas de digestión a 170 °C, se encuentra sobre el valor correspondiente para mezclas sin caucho.

Como conclusión, se tiene que mientras más alta la temperatura de digestión y más largo el tiempo en horno, el proceso de digestión mejora. En este caso, los mejores valores de resistencia conservada para esta mezcla, se encuentran para la temperatura de 170 °C por dos horas, con contenidos de caucho de hasta el 1 %.

### **5.5 EFECTO DE LA TEMPERATURA Y TIEMPO DE DIGESTIÓN EN LOS PARÁMETROS MARSHALL**

Para obtener el aglomerado asfáltico mejoradas con caucho, con tres contenidos de cemento asfáltico, partiendo del porcentaje de ligante de la mezcla patrón sin caucho de 6 %.

A continuación, se comparan los valores de los parámetros Marshall de mezclas preparadas con tiempo de digestión de dos horas, para las diferentes temperaturas de digestión de 150, 160 y 170 °C y distintos porcentajes de adición de caucho.

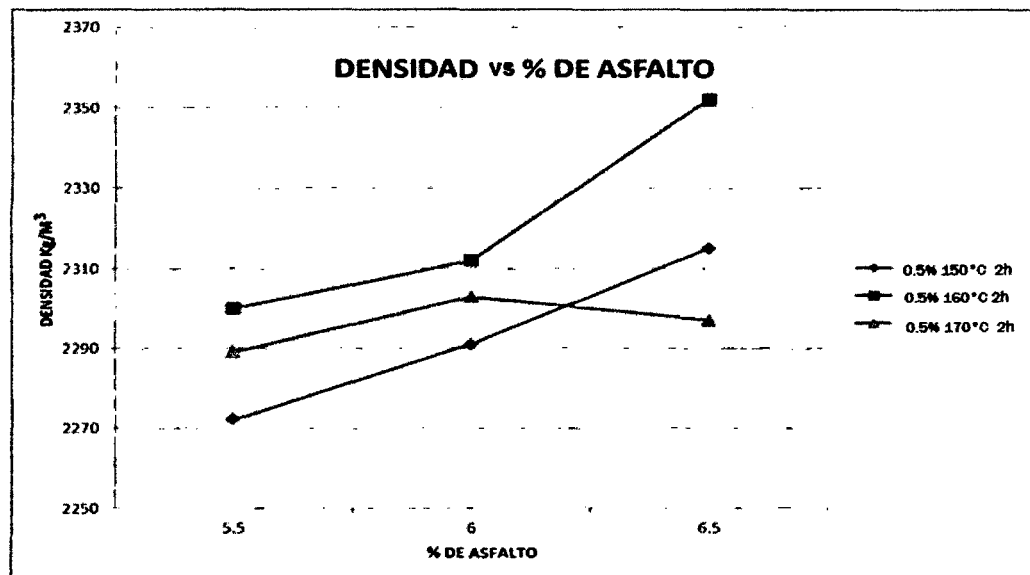


### 5.5.1 DENSIDAD

A continuación se muestran los resultados obtenidos de densidad para las mezclas asfálticas mejoradas con caucho.

**Tabla 5.16. Resultados de Densidad.**

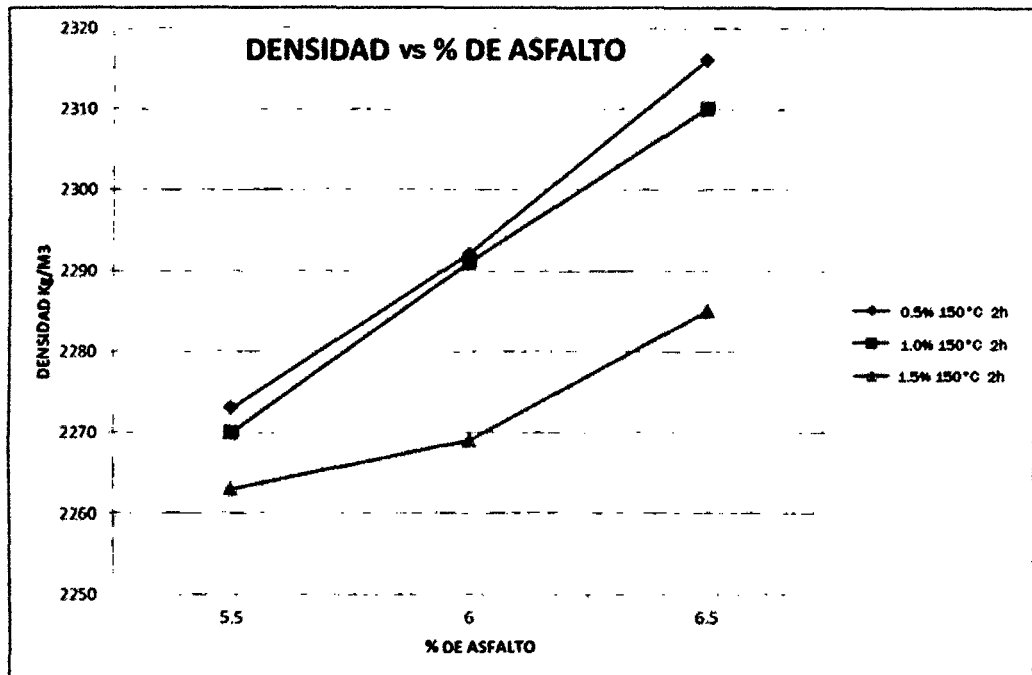
% asfalto	5,5	6,0	6,5
<b>Mezclas</b>			
<b>150 °C/ 2 h</b>			
0,5 %	2 272	2 291	2 315
1,0 %	2 269	2 290	2 309
1,5 %	2 262	2 268	2 284
<b>160 °C/ 2 h</b>			
0,5 %	2 300	2 312	2 352
<b>170 °C/ 2 h</b>			
0,5 %	2 289	2 303	2 297



**Figura 5.13. Variación de la densidad respecto al porcentaje de cemento asfáltico, para mezclas con 0,5% de caucho, tiempo de digestión de dos horas y diferentes temperaturas de digestión.**

Los valores de densidad obtenidos para las mezclas fabricadas a 160 °C por dos horas con 0,5 % de caucho, son ligeramente superiores a los conseguidos a 170 y a 150 °C.

La curva de las mezclas a 170 °C, tienen un máximo a diferencia de las otras temperaturas.



**Figura 5.14. Variación de la densidad respecto al porcentaje de cemento asfáltico, para mezclas con temperatura de digestión de 150 °C por dos horas.**

En la Figura 5.16. Se observa que para las mezclas realizadas con una temperatura de digestión de 150 °C por dos horas, la densidad disminuye a medida que la proporción de caucho se incrementa.

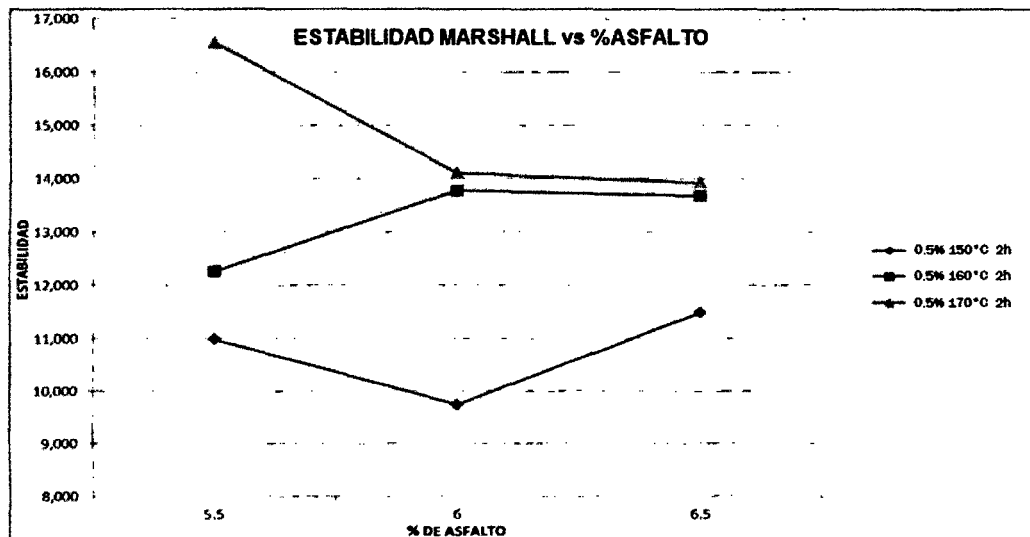
Esto se debe a que al no ocurrir la digestión y dosificar el caucho por peso, resulta mayor volumen respecto de la mezcla original, debido a que el caucho es menos denso que los agregados

### 5.5.2 ESTABILIDAD

A continuación se muestran los resultados obtenidos de estabilidad para aglomerados asfálticos mejoradas con caucho.

**Tabla 5.17. Resultados de Estabilidad Marshall.**

% asfalto	5,5	6,0	6,5
<b>Mezclas</b>	<b>ESTABILIDAD (N)</b>		
<b>150 °C/ 2 h</b>			
<b>0,5 %</b>	<b>10 984</b>	<b>9 728</b>	<b>11 481</b>
<b>1,0 %</b>	<b>10 233</b>	<b>11 574</b>	<b>12 818</b>
<b>1,5 %</b>	<b>10 979</b>	<b>11 176</b>	<b>11 030</b>
<b>160 °C/ 2 h</b>			
<b>0,5 %</b>	<b>12 257</b>	<b>13 768</b>	<b>13 671</b>
<b>170 °C/ 2 h</b>			
<b>0,5 %</b>	<b>164 549</b>	<b>14 101</b>	<b>13 917</b>



**Figura 5.15. Variación de la Estabilidad respecto al porcentaje de cemento asfáltico, para mezclas con 0,5% de caucho, tiempo de digestión de dos horas y diferentes temperaturas de digestión.**

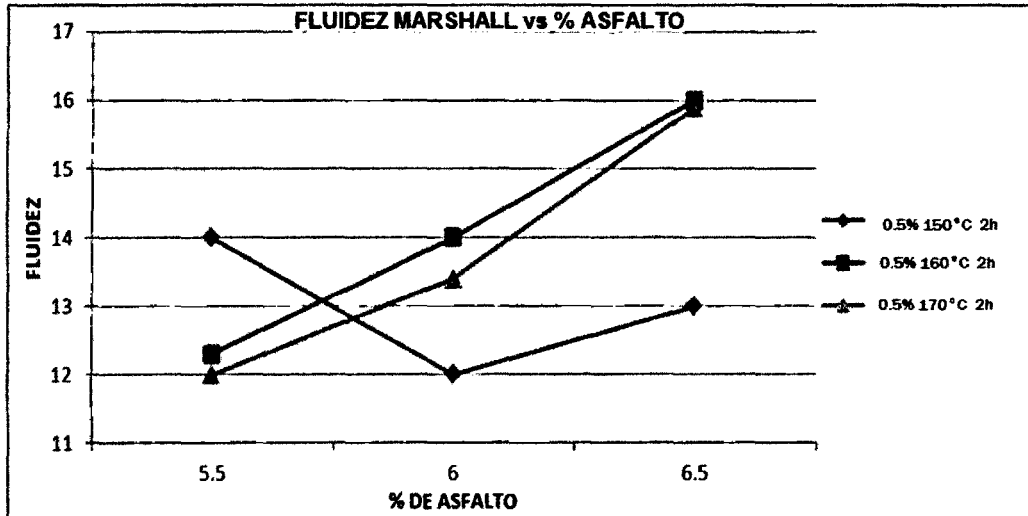
Los valores de Estabilidad más altos son los obtenidos para las mezclas fabricadas a 170 °C por dos horas con 0,5 % de caucho. Para las mezclas con temperatura de digestión de 150 °C, la curva de Estabilidad no tiene la forma esperada.

### 5.5.3 FLUIDEZ

A continuación se muestran los resultados obtenidos de fluidez para las mezclas asfálticas mejoradas con caucho.

**Tabla 5.18. Resultados de Fluidez Marshall.**

% asfalto	5,5	6,0	6,5
<b>Mezclas</b>	<b>FLUIDEZ 0,01"</b>		
<b>150 °C/ 2 h</b>			
0,5 %	14,0	12,9	13,0
1,0 %	13,3	13,6	14,0
1,5 %	13,2	13,0	14,4
<b>160 °C/ 2 h</b>			
0,5 %	12,3	14,0	16,0
<b>170 °C/ 2 h</b>			
0,5 %	12,0	13,4	15,9



**Figura 5.16. Variación de la fluidez respecto al porcentaje de cemento asfáltico, para mezclas con 0,5% de caucho, tiempo de digestión de dos horas y diferentes temperaturas de digestión.**

Los valores de fluidez obtenidos para las mezclas fabricadas a 160 °C por dos horas con 0,5 % de caucho también siguen la tendencia esperada, al igual que para las mezclas a 170 °C.

No ocurre lo mismo para la curva a 150 °C, donde los valores de fluidez inicialmente son altos para 5,5 % de ligante, y disminuye hasta un cierto contenido de asfalto a partir del cual vuelve a aumentar. Esto podría deberse a que bajos contenidos de ligante en una mezcla mejorada con caucho son insuficientes para proporcionar una buena cohesión, junto a esto hay que decir que el caucho a esta temperatura, posiblemente no interactúa con el ligante, por lo que es más relevante el comportamiento elástico del caucho.

#### 5.5.4 VACIOS EN LA MEZCLA TOTAL

A continuación se muestran los resultados obtenidos de vacíos en la mezcla total para las mezclas asfálticas mejoradas con caucho.

**Tabla 5.19. Resultados de vacíos en la mezcla total.**

% asfalto	5,5	6,0	6,5
Mezclas	% VACIOS EN LA MEZCLA		
<b>150 °C/ 2 h</b>			
0,5 %	6,13	4,69	3,1
1,0 %	5,64	4,15	2,7
1,5 %	5,5	4,61	3,3
<b>160 °C/ 2 h</b>			
0,5 %	5,1	3,79	1,58
<b>170 °C/ 2 h</b>			
0,5 %	5,43	4,24	3,78

En la Figura 5.19, se observa que a medida que aumenta el porcentaje de asfalto, los vacíos disminuyen para cualquier temperatura de digestión. Los valores de huecos más bajos obtenidos, se tienen en la mezcla con temperatura de digestión de 160 °C.

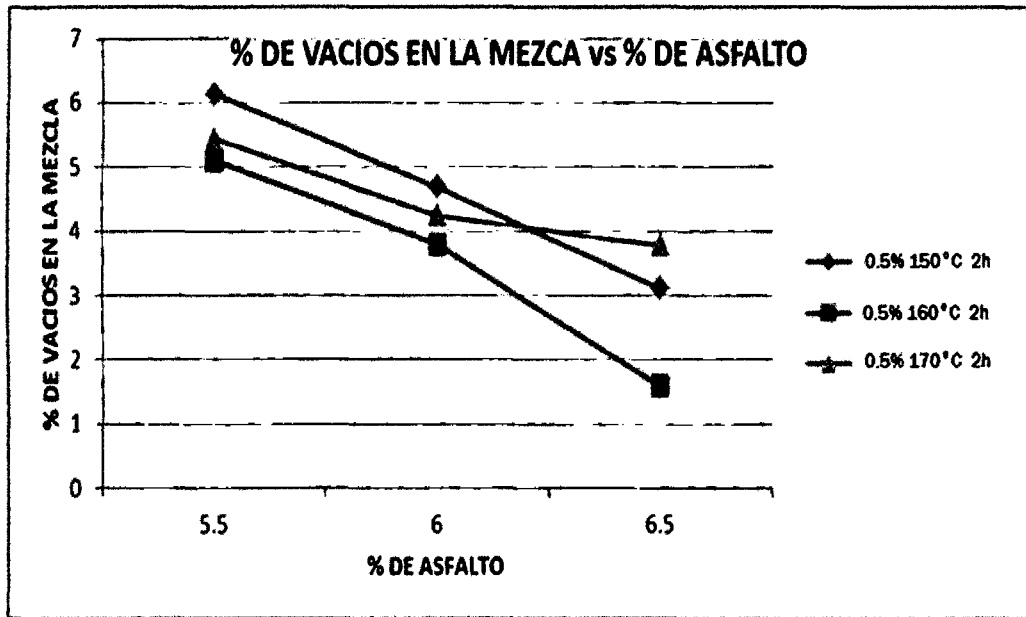


Figura 5.17. Variación de los vacíos en la mezcla respecto al porcentaje de cemento asfáltico, para mezclas con temperatura de digestión de 150 °C, 160 °C, 170 °C por dos horas.

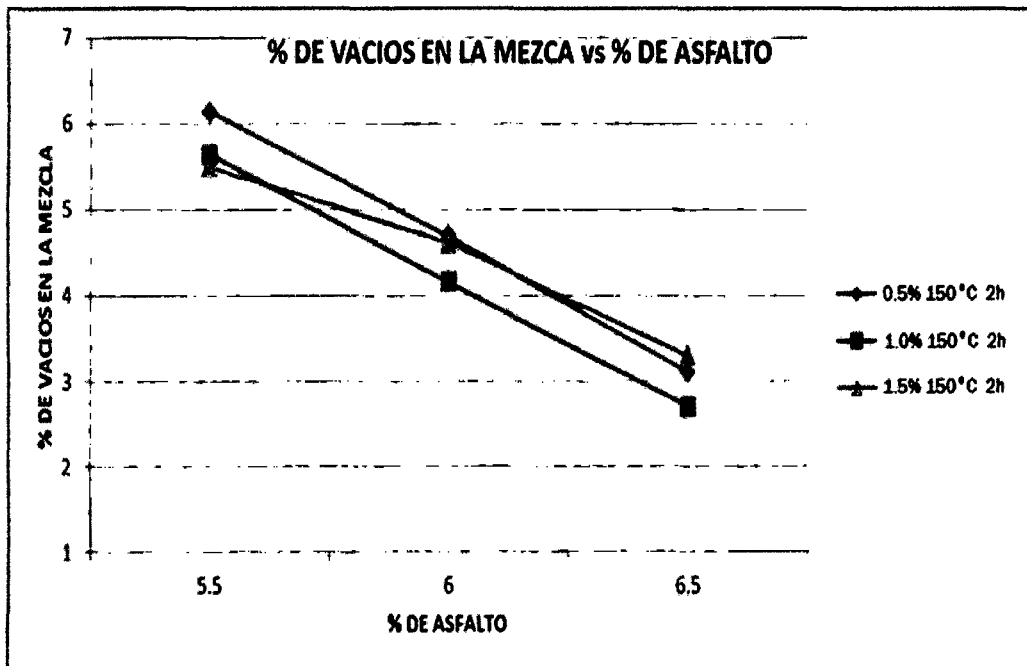


Figura 5.18. Variación de los vacíos en la mezcla respecto al porcentaje de cemento asfáltico, para mezclas con temperatura de digestión de 150 °C por dos horas.

Para los parámetros Marshall, puede decirse que la temperatura de digestión que otorga mejores resultados de las mezclas es 170 °C.

En las mezclas elaboradas a 150 °C, no ocurre completamente el proceso de digestión y los granos de caucho sin reaccionar, desmejoran las características de la mezcla.

Con temperatura de digestión de 160 °C, las características de la mezcla son buenas, salvo que tiene valores altos de densidad, lo que provoca que los porcentajes de vacíos en la mezcla sean bajos, los que podrían estar fuera de las especificaciones para una carpeta de tránsito bajo.

## **5.6 DISEÑO FINAL**

Se trabajara con la temperatura de digestión que otorga mejores resultados para las mezcla, en este caso a 170 °C.

Para esta etapa, se preparan mezclas con sólo tres porcentajes de cemento asfáltico (5,5 %; 6,0 % y 6,5 %), para observar las tendencias de los parámetros de estas mezclas.

### **5.6.1 PARÁMETROS MARSHALL**

A continuación, se muestran los parámetros Marshall obtenidos para las mezclas asfálticas mejoradas con caucho a la temperatura de digestión de 170 °C y al mismo tiempo, los valores de la mezcla patrón:

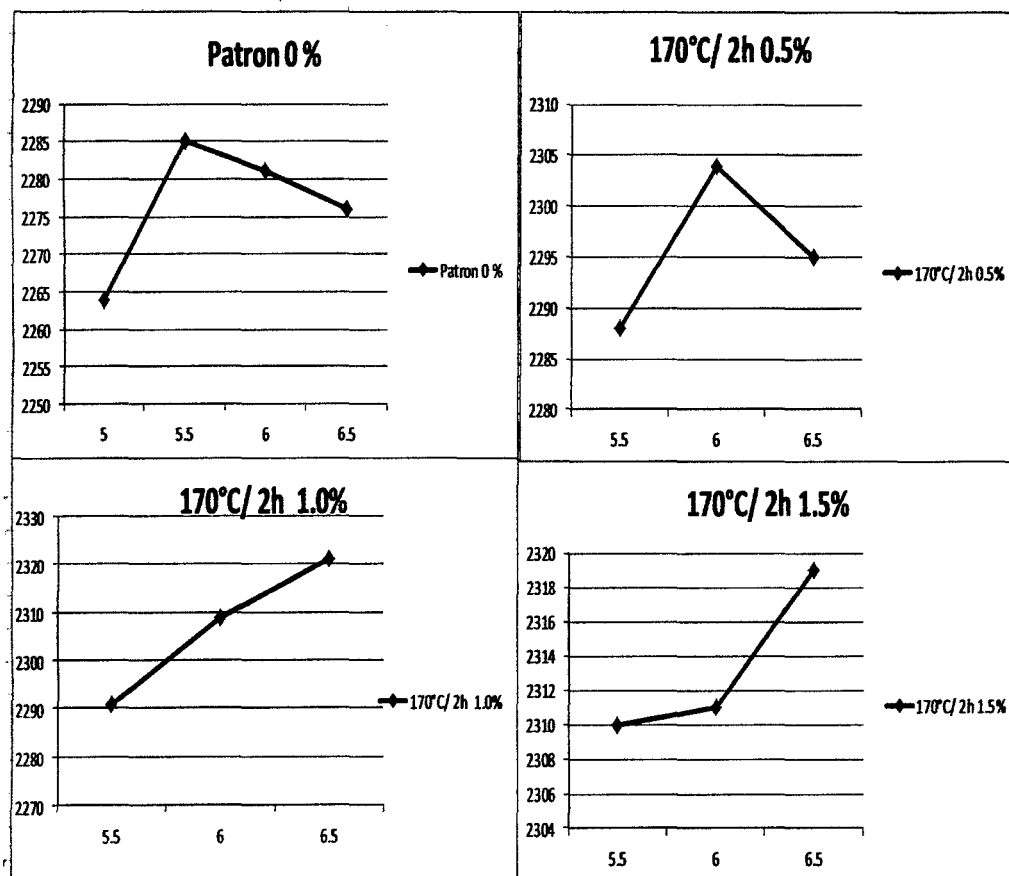
#### **5.6.1.1 Densidad.**

Los aglomerados mejorados con caucho, fabricados con una temperatura de digestión de 170 °C por dos horas, aumenta a medida que la proporción de caucho se incrementa. El aumento de la densidad puede deberse a que los granos de caucho al interactuar con el ligante, se hinchan, aumentando el volumen, por lo que existe mayor recubrimiento de los agregados, lo que lleva a que disminuya la cantidad de huecos.

**Tabla 5.20. Resultados de Densidad para mezclas con temperatura de digestión de 170 °C.**

% Asfalto	5	5,5	6,0	6,5
<b>Mezclas</b>				
<b>Patrón</b>	2 264	2 285	2 281	2 276
<b>170 °C / 2 h</b>				
<b>0,50 %</b>	-	2 288	2 302	2 295
<b>1,00 %</b>	-	2 291	2 309	2 321
<b>1,50 %</b>	-	2 310	2 311	2 319

**DENSIDAD vs PORCENTAJE DE ASFALTO**



**Figura 5.19. Variación de la densidad respecto al porcentaje de cemento asfáltico, para mezclas sin caucho y a 170 °C por dos horas.**



**5.6.1.2. Estabilidad.** Las estabildades obtenidas en la mezcla patrón, cumplen con las especificaciones de la Tabla 4.9. Con porcentajes menores a 5,8 % de cemento asfáltico (Estabilidad de 9 000 N).

Para la mezcla a 170 °C con 0,5 % de caucho, se obtienen los valores más altos de Estabildades de todos los diseños realizados.

Esto se debe a la modificación del asfalto con caucho, pero al aumentar la cantidad de caucho, la estabilidad disminuye.

Para porcentajes de caucho de 1,0 % y 1,5 %, los valores de estabilidad que cumplen con las exigencias de carpeta de rodado según Tabla 4.9, se obtienen para mezclas con valores cercanos al 6,0 % de cemento asfáltico.

**Tabla 5.21. Resultados de Estabilidad Marshall para mezclas con temperatura de digestión de 170 °C.**

<b>% Asfalto</b>	<b>5</b>	<b>5,5</b>	<b>6,0</b>	<b>6,5</b>
<b>Mezclas</b>	<b>ESTABILIDAD</b>			
<b>Sin caucho</b>	<b>9 019</b>	<b>10 927</b>	<b>9 409</b>	<b>8 268</b>
<b>170 °C / 2 h</b>				
<b>0,50 %</b>	-	<b>16 348</b>	<b>1 403</b>	<b>13 915</b>
<b>1,00 %</b>	-	<b>8 749</b>	<b>9 580</b>	<b>8 297</b>
<b>1,50 %</b>	-	<b>8 948</b>	<b>9 093</b>	<b>6 320</b>

ESTABILIDAD MARSHALL vs % DE ASFALTO

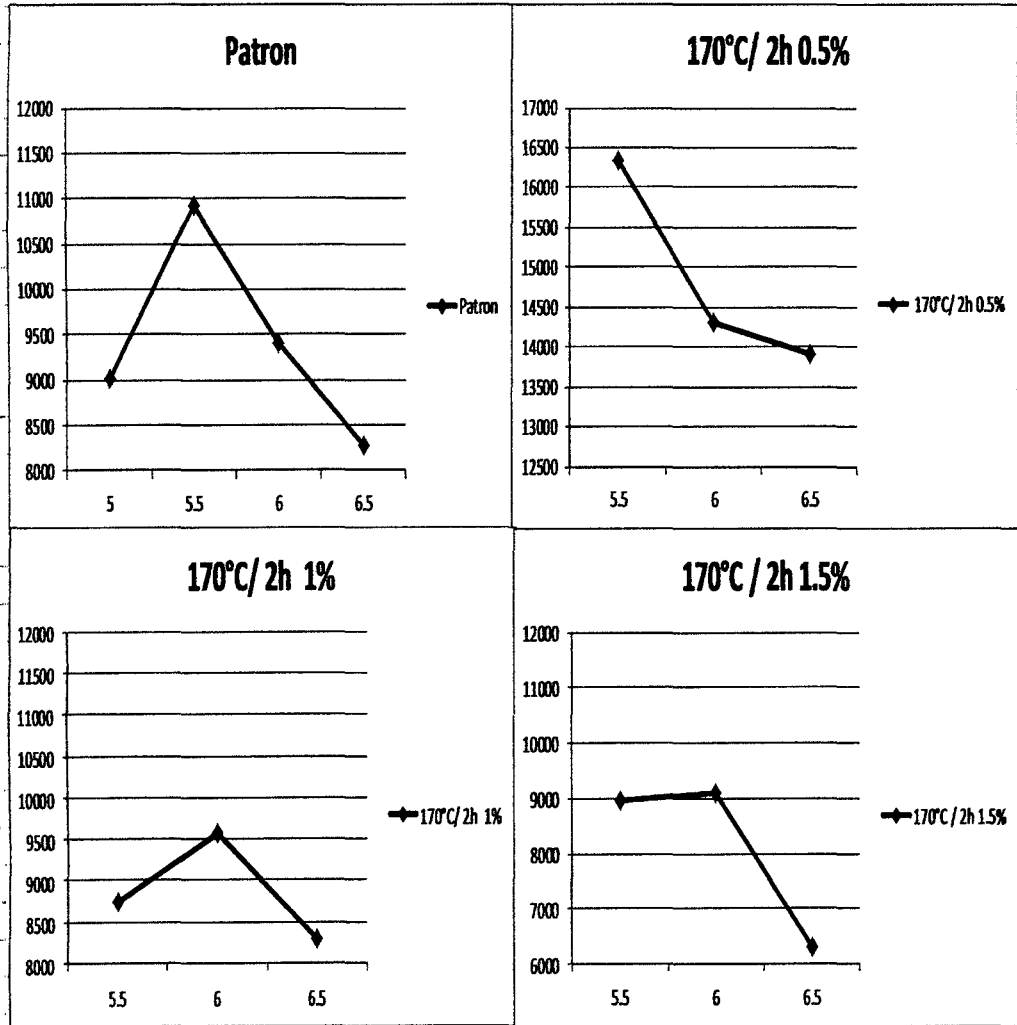
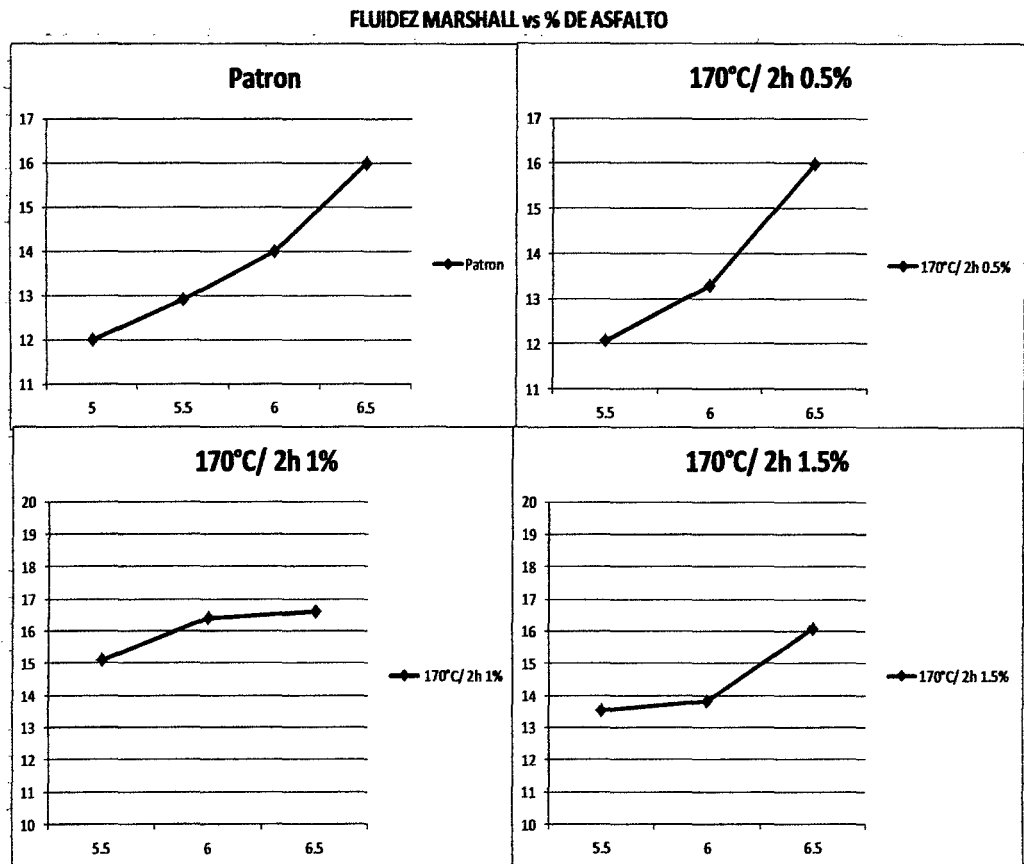


Figura 5.20. Variación de la estabilidad respecto al porcentaje de cemento asfáltico, para mezclas sin caucho y a 170 °C por dos horas.

**5.6.1.3 Fluidiez.** Los valores de fluidiez obtenidos se encuentran en el intervalo permitido para carpeta de transito bajo, con excepción de la curva con 1 % de caucho, que sobrepasa el límite superior especificado a partir de 5,8 % de cemento asfáltico.

**Tabla 5.22. Resultados de Fluidez Marshall para mezclas con temperatura de digestión de 170 °C**

% Asfalto	5	5,5	6,0	6,5
<b>Mezclas</b>	<b>FLUIDEZ (g/min)</b>			
<b>Sin caucho</b>	<b>11,98</b>	<b>12,9</b>	<b>14</b>	<b>15,98</b>
<b>170 °C / 2 h</b>				
<b>0,50 %</b>	-	<b>12,08</b>	<b>13,29</b>	<b>15,98</b>
<b>1,00 %</b>	-	<b>15,1</b>	<b>16,41</b>	<b>16,6</b>
<b>1,50 %</b>	-	<b>13,54</b>	<b>13,81</b>	<b>16,08</b>



**Figura 5.21. Variación de la fluidez respecto al porcentaje de cemento asfáltico, para mezclas sin caucho y a 170 °C por dos horas.**

**5.6.1.4. Vacíos en la mezcla total.** La mezcla convencional, patrón, presenta valores para los huecos bastante altos, esto se debe a la granulometría, a partir del tamiz N° 30.

La exigencia del porcentaje de huecos en la carpeta de tránsito bajo está entre 4 % y 6 %. La mezcla patrón cumple con este rango.

A medida que aumenta el contenido de caucho, disminuyen los huecos en la mezcla, lo cual también sucede a medida que el contenido de cemento asfáltico se incrementa.

Esto se debe a que el ligante y el caucho que ha interactuado con él, van ocupando los espacios vacíos de la mezcla.

Para la mezcla fabricada a 170 °C con 1,5 % de caucho, se tiene que los valores obtenidos se encuentran fuera del intervalo permitido.

Faltaría realizar mezclas disminuyendo la cantidad de cemento asfáltico, para ver si se alcanzan los valores de huecos exigidos, pero se sabe que esto afectaría el mezclado. (12)

**Tabla 5.23. Resultados de vacíos en la mezcla total para mezclas con temperatura de digestión de 170 °C.**

<b>% Asfalto</b>	<b>5</b>	<b>5,5</b>	<b>6,0</b>	<b>6,5</b>
<b>Mezclas</b>	<b>% VACIOS EN LA MEZCLA</b>			
<b>Sin caucho</b>	<b>7,5</b>	<b>6,0</b>	<b>5,9</b>	<b>5,2</b>
<b>170 °C / 2 h</b>				
<b>0,50 %</b>	<b>-</b>	<b>5,46</b>	<b>4,21</b>	<b>3,83</b>
<b>1,00 %</b>	<b>-</b>	<b>4,8</b>	<b>3,34</b>	<b>2,15</b>
<b>1,50 %</b>	<b>-</b>	<b>3,59</b>	<b>2,91</b>	<b>1,82</b>

PORCENTAJE DE VACIOS EN LA MEZCLA VS% DE ASFALTO

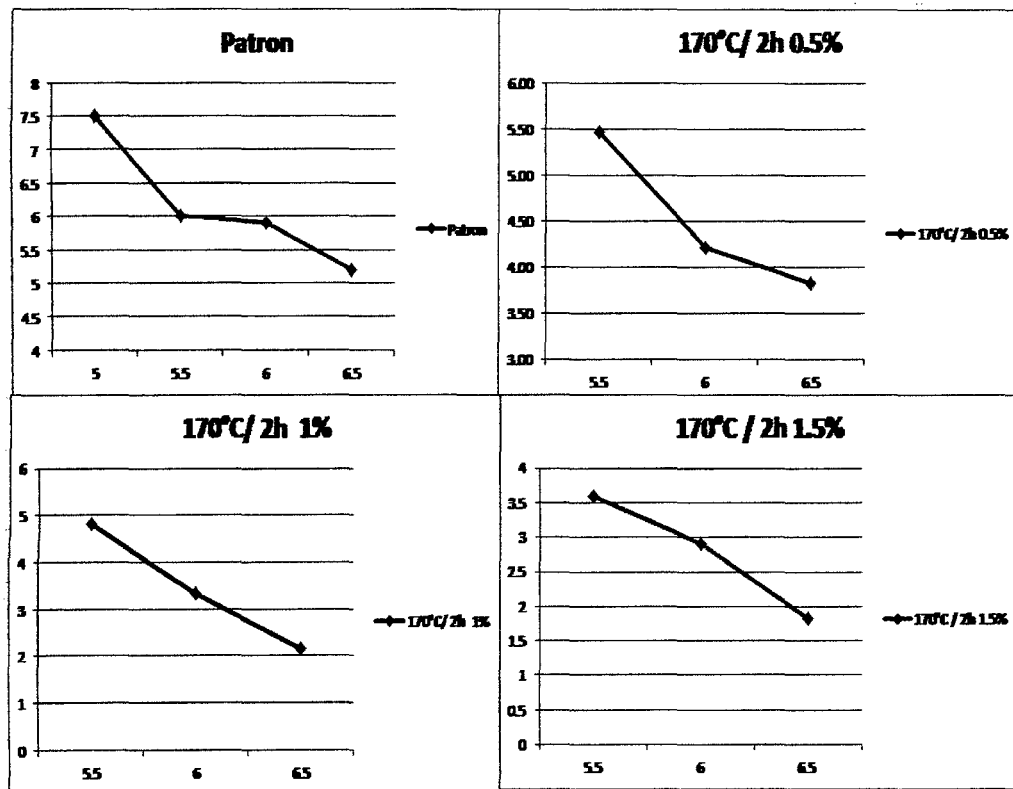


Figura 5.22. Variación de los vacíos en la mezcla respecto al porcentaje de cemento asfáltico, para mezclas sin caucho y a 170 °C por dos horas.

### 5.6.2 DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE ASFALTO PARA EL DISEÑO

Con los parámetros Marshall obtenidos para la temperatura de digestión de 170 °C y el tiempo de digestión de dos horas, se determina el valor del porcentaje de asfalto que cumpla las exigencias de diseño.

**Tabla 5.24. Parámetros Marshall para evaluar el porcentaje de asfalto.**

Mezclas	Máximo de densidad	Máximo de estabilidad	% huecos	% asfalto estimado
	% asfalto	% asfalto	% asfalto	
Sin caucho	5	5	7,5	6,0
<b>170 °C / 2 h</b>				
0,50 %	6	5	5	5,7
1,00 %	6	6	5,5	6,0
1,50 %	6	5	5,5	6,0

Analizando la Tabla 5.23 y los gráficos de cada parámetro, se observa que:

- A medida que aumenta el contenido de caucho, se necesita más ligante.
- No es posible estimar el porcentaje de cemento asfáltico para 5 % de vacíos en la mezcla con 1,5 % de caucho, además el valor óptimo de ligante no puede ser menor a 5,6 % por Estabilidad, pues con menor valor, tendría Estabilidad menor a 9 000 N. Por otro lado, con 5,6 % de cemento tendría vacíos de 3,6 %, lo que estaría fuera de la exigencia para carpeta de tránsito bajo.

Para realizar los ensayos de caracterización de las mezclas, se usa un contenido constante de cemento asfáltico de 6,0 %, para el cual las mezclas con caucho tenían valores lo más cercanos a 5 % de huecos.

A modo de resumen en la Tabla 4.28, se muestran los parámetros de densidad, estabilidad y de huecos con 6,0 % de asfalto, para las mezclas tradicionales sin caucho, y las fabricadas con un proceso de digestión a temperatura de 170 °C por dos horas, variando el porcentaje de adición de caucho.

**Tabla 5.25. Resultados de las mezclas con 5,5% de cemento asfáltico.**

Mezclas	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Estabilidad (N)	% huecos en la mezcla
Sin caucho	2 288	9 415	5,9
<b>170 °C / 2 h</b>			
0,5 %	2 290	16 459	5,4
1,0 %	2 293	8 751	4,7
1,5 %	2 307	8 948	3,6

Se observa que con esta cantidad de cemento asfáltico, las mezclas con 1 % de caucho, no cumplen con la estabilidad exigida para una carpeta de bajo tránsito y las mezclas con 1,5 % de caucho, no cumplen ni estabilidad ni huecos.

## 5.7 VERIFICACIÓN DEL PORCENTAJE DE CAUCHO DE DISEÑO

Para verificar el porcentaje de caucho óptimo para la mezcla de este estudio compuesta por 6,0 % de asfalto, se realizan los siguientes ensayos:

- Resistencia a compresión diametral a 25 °C.
- Módulo resiliente.
- Resistencia a la fatiga.

### 5.7.1 RESISTENCIA A COMPRESION DIAMETRAL

Para determinar la resistencia a compresión diametral, tracción indirecta, de mezclas asfálticas, se siguen los procedimientos indicados en la norma española NLT-346/90. “Resistencia a Compresión Diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas.”

Este método consiste en imponer una deformación por compresión diametral a una probeta cilíndrica situada horizontalmente entre los platos de una prensa, de forma que los esfuerzos aplicados a la probeta sean sobre dos generatrices opuestas. El parámetro a medir es la carga de rotura.

La resistencia a compresión diametral, tracción indirecta, de una probeta se calcula con la siguiente formula:

$$R_T = \frac{2.P}{\pi h d}$$

Donde:

$R_T$  = Resistencia a compresión diametral. MPa

P = Carga máxima de rotura, KN.

h = Altura de la probeta, mm.

d = Diametro de la probeta, mm

Con este ensayo se obtiene una forma de medir la cohesión de la mezcla, pues la mayor oposición a la falla la presenta la unión del asfalto con los agregados pétreos.

El ensayo se realiza en el Equipo Marshall, el cual permite aplicar una velocidad de

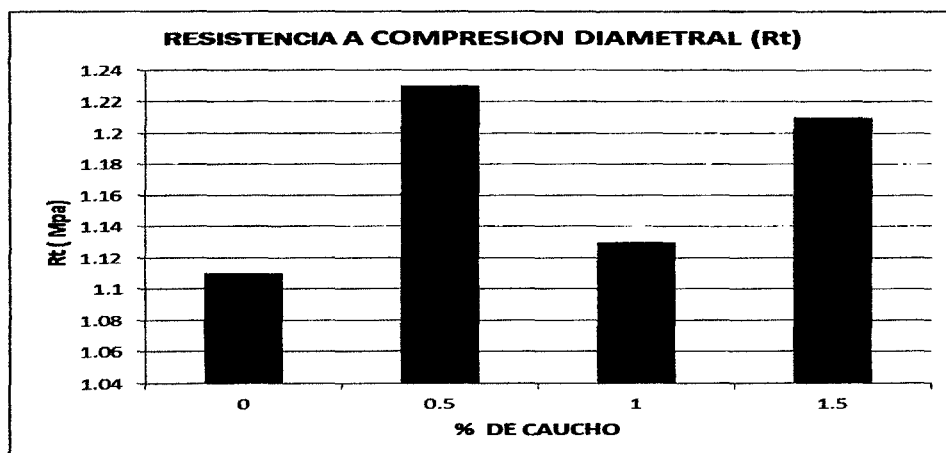
deformación de 50,8 mm/min., que permite disponer la probeta de manera horizontal para la aplicación de la carga.

Este ensayo se realiza usando probetas Marshall, cuyas dimensiones son 63,5 mm de altura y 101,6 mm de diámetro. Se confeccionan mezclas de referencia, sin caucho, y con caucho, fabricadas con proceso de digestión a 170 °C por dos horas. Estas probetas son medidas y pesadas, para luego acondicionarse a 25 °C antes de ensayarlas. Como se dijo antes, se usa un contenido constante de cemento asfáltico del 6 %.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para este ensayo. La mezcla con 0% de caucho, es la mezcla tradicional patrón.

**Tabla 5.26. Resultados mezclas con distinto porcentaje de caucho.**

% Porcentaje Caucho	Carga de rotura	R $\tau$
	(kN)	(MPa)
0	10,98	1,11
0,5	12,32	1,23
1	11,10	1,13
1,5	12,21	1,21



**Figura 5.23. Variación de la resistencia a la compresión diametral respecto al porcentaje de caucho.**



Las mezclas con adición de caucho presentan valores de resistencia a la compresión diametral mayores a la mezcla tradicional.

Al comparar los resultados para los diferentes porcentajes de caucho, se obtiene que el mayor valor de resistencia a la compresión diametral, se logra para 0,5 % de caucho, resultado igualmente obtenido para la Estabilidad.

### **5.7.2 MÓDULO RESILIENTE**

En este ensayo sólo se hará una breve descripción del procedimiento debido a que no se cuenta con el equipo en el laboratorio.

Es bien sabido que la mayoría de los materiales de pavimento no son elásticos, si no que experimentan alguna deformación permanente después de cada aplicación de carga. Sin embargo, si la carga es pequeña, comparada con la resistencia del material y se repite un gran número de veces, la deformación bajo cada repetición de carga es casi completamente recuperable y proporcional a la carga y se puede considerar elástica.

El módulo elástico basado en la deformación recuperable bajo carga repetida se llama Módulo Resiliente.

El Módulo Resiliente en laboratorio, puede ser medido en ensayo triaxial, o uniaxial. En terreno, puede determinarse con deflectometría de impacto (FWD).

### **5.7.3 RESISTENCIA A LA FATIGA**

De igual manera, en este ensayo sólo se hará una breve descripción del procedimiento debido a que no se cuenta con el equipo en el laboratorio.

La fatiga puede definirse como el fenómeno de fractura debido a cargas repetidas o fluctuantes, las cuales tienen un valor máximo generalmente menor que el límite de resistencia a tracción del material. En el pavimento, el proceso de fatiga está relacionado con las repetidas pasadas de las cargas de las ruedas, las cuales producen esfuerzos en las capas asfálticas que varían entre compresión y tracción. Debido al tráfico continuo, estas reiteradas repeticiones de deformaciones por tracción eventualmente provocarán la iniciación de una grieta, la que con las siguientes pasadas de ruedas, se propagará por la capa y eventualmente el pavimento fallará.

La resistencia a fatiga expresa la capacidad de la mezcla asfáltica a deformarse repetidamente sin fracturarse.

El objetivo de este ensayo es determinar la vida de fatiga usando el método de tracción indirecta con probetas Marshall preparadas en laboratorio, a las cuales se les aplica una carga vertical repetida en un plano diametral que tiene como resultado aplicaciones repetidas de un esfuerzo de tracción indirecta sobre el diámetro horizontal. Este proceso usualmente terminará por producir una grieta a lo largo del diámetro vertical y, si continúa, la probeta se partirá en dos partes.

#### **5.7.4 RESULTADOS FINALES**

Después de analizar los resultados de los ensayos, se concluye que:

- El mayor valor para resistencia diametral se logra para 0,5 % de caucho.
- El porcentaje de cemento asfáltico a incorporar en el aglomerado es de 6 %.
- La temperatura de digestión es de 170 °C
- El tiempo de digestión es de 2 Horas,

Estos resultados se dan de acuerdo a las propiedades físicas y químicas de los agregados para las condiciones climáticas de Ayacucho

## CONCLUSIONES

- El polvo de caucho obtenido del reciclado de los neumáticos fuera de uso, puede ser utilizado con garantía para mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas usándolo como un agregado mediante el proceso por vía seca.
- Para las mezclas mejoradas con caucho, el contenido óptimo de caucho con el cual se obtuvieron los mejores valores de tracción indirecta, es de alrededor al 0,5 %, al igual que para los parámetros Marshall.
- La dosificación de aglomerado por la vía seca, no difiere en gran parte del diseño de una mezcla tradicional, salvo en un parámetro básico que es la determinación del tiempo (2 horas) y temperatura de digestión mínima (170 °C) para alcanzar el grado de modificación suficiente.
- Luego de haber efectuado la parte experimental de la mezcla asfáltica y de acuerdo a los resultados obtenidos podemos inferir de que es factible la obtención de un aglomerado asfáltico a nivel de laboratorio, debido a las siguientes razones:
  - Cuanto menor sea el tamaño máximo de los granos de caucho que se utilicen para la obtención del aglomerado asfáltico, los resultados obtenidos serán mejores
  - El proceso de adición de caucho, demanda mayores cantidades de cemento asfáltico, pero mejora las propiedades relacionadas con la durabilidad.
  - Los parámetros más críticos de la adición de caucho por la vía seca, son el tiempo y temperatura de digestión.
  - Para el ensayo de inmersión - compresión, los valores mejores de resistencia conservada se logra con contenidos de caucho hasta el 1 %.Al aumentar la temperatura de digestión, con el mismo tiempo, se obtienen mejores resultados de las mezclas asfálticas con caucho, mediante vía seca.

## RECOMENDACIONES

- Dado que en el país, no existen plantas recicladoras de caucho, esto implica de que el precio del caucho reciclado sea muy elevado. Del mismo modo si se desea contar con este material hay que importar de otros países. Por lo que es necesario recomendar, al gobierno para que ponga más énfasis en apoyar a aquellas empresas que tengan interés en invertir en este tipo de tecnología, siguiendo la línea de otros países.
- Es necesario incorporar en el manual de carreteras del MTC, los parámetros límites para los ensayos de Inmersión - Compresión, estableciendo el procedimiento de uso y los valores exigidos para cada tipo de mezcla.
- Es preciso recomendar la realización de ensayos para la determinación del Módulo Resilente, en el laboratorio, el cual puede ser medido mediante el ensayo triaxial, o uniaxial.
- Se recomienda continuar la investigación en el tema de reciclado de neumáticos fuera de uso, por el amplio campo de acción que ofrece.

## **BIBLIOGRAFÍA**

1. [www.madrimasd.org/.../vt10\\_valorizacion-energetica-neumaticos.pdf](http://www.madrimasd.org/.../vt10_valorizacion-energetica-neumaticos.pdf).
2. [www.samaraez.com/archivos/KnowHow.Reciclaje\\_Neumaticos\\_.E\\_I\\_](http://www.samaraez.com/archivos/KnowHow.Reciclaje_Neumaticos_.E_I_)
3. Segura, A. y otros. Utilización de asfalto modificado con neumáticos fuera de uso (NFU) en micro concreto discontinuo en caliente. UTN. 2012. Córdoba. Argentina
4. Witoszek, B. y otros. Diseño y desarrollo de un aglomerado Asfáltico con polvo de caucho Procedente del reciclado de los neumáticos usados incorporado por vía seca. 2004. Madrid. España.<http://www.busde.paho.org/bvsdcd/cd24/diseño.pdf>
5. Injante, E. El Asfalto. Curso: Pavimentos. FIC.UNI. 2012. Lima. Perú.
6. [www.campus.fi.uba.ar/.../Materiales\\_y\\_Compuestos\\_para\\_la\\_Industria\\_del\\_Ne](http://www.campus.fi.uba.ar/.../Materiales_y_Compuestos_para_la_Industria_del_Ne).
7. Garnica, P. y otros Aspectos del diseño volumétrico de Mezclas Asfálticas. Instituto mexicano del transporte. 2004. Safandila. México.
8. [www.ingenews.cl/web/download/publicaciones/118.pdf](http://www.ingenews.cl/web/download/publicaciones/118.pdf).
9. Minaya, S. y otros. Manual de laboratorio ensayos para pavimento Vol 1. 2001. Lima. Perú.
10. Pardavé, V. y otros Mecánica de suelos aplicada. Editorial El Estudiante SAC Primera edición. 2011. Lima. Perú.
11. Manual de Carreteras. “Especificaciones Técnicas Generales para construcción” EG-2013-MTC. Lima. Perú.
12. Instituto Mexicano del Transporte, Manual de Calidad de los Materiales en Secciones Estructurales de Pavimentos Carreteros, Documento Técnico, No 1 (1990).

# ANEXOS

## ANEXO 1

### ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO C 33 - 83

TESIS "DESARROLLO DE UN AGLOMERADO ASFÁLTICO CON POLVO DE CAUCHO EN LA CIUDAD DE HUANTA -AYACUCHO

REALIZADO JOSE MARIA SALVATIERRA CERDA

CANTERA CHILICO-COMPAÑIA

MATERIAL AGREGADO MEZCLA DE TRABAJO

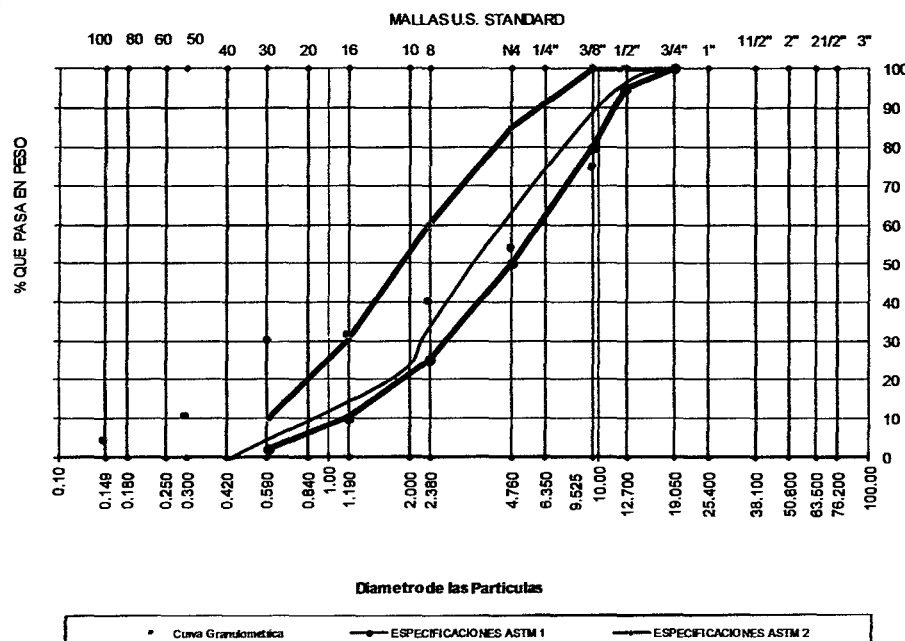
jul-14

PESO INICIAL SECO (gr) 1439.80

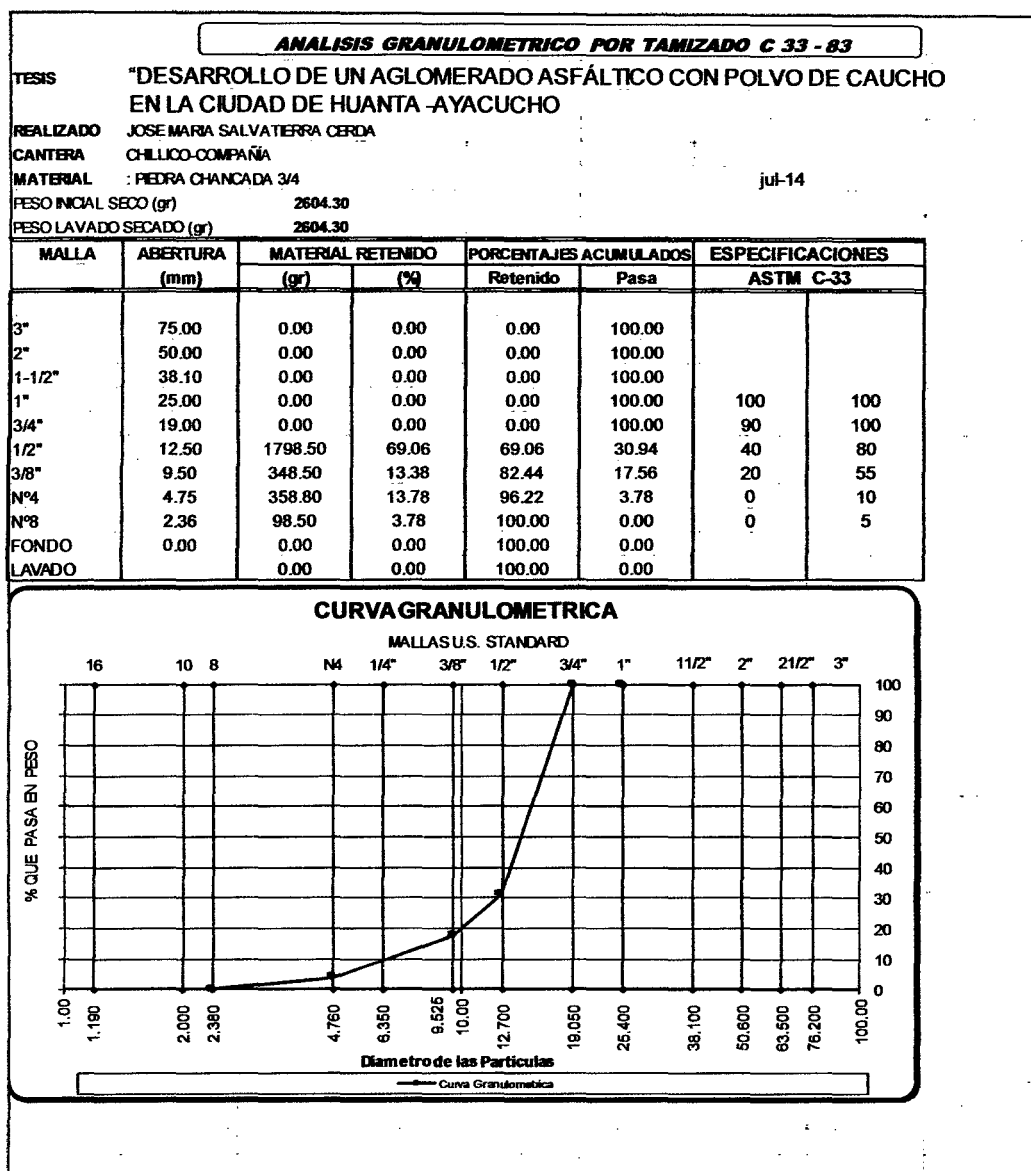
PESO LAVADO SECADO (gr) 1410.70

MALLA	ABERTURA (mm)	MATERIAL RETENIDO		PUNTAJES ACUMULADOS		ESPECIFICACIONES	
		(gr)	(%)	Retenido	Pasa	ASTM C-33	
3"	75.00	0.00	0.00	0.00	100.00		
2"	50.00	0.00	0.00	0.00	100.00		
1-1/2"	38.10	0.00	0.00	0.00	100.00		
1"	25.00	0.00	0.00	0.00	100.00		
3/4"	19.00	0.00	0.00	0.00	100.00		
1/2"	12.50	156.80	10.89	10.89	89.11		
3/8"	9.50	365.20	25.36	25.36	74.64	100	100
Nº4	4.75	298.50	20.73	46.10	53.90	95	100
Nº8	2.34	198.80	13.81	59.90	40.10	80	100
Nº16	1.18	125.20	8.70	68.60	31.40	50	85
Nº30	0.60	20.20	1.40	70.00	30.00	25	60
Nº50	0.30	285.00	19.79	89.80	10.20	10	30
Nº100	0.15	90.10	6.26	96.06	3.94	2	10
Nº200	0.08	27.70	1.92	97.98	2.02	0	0
LAVADO		29.10	2.02	100.00	0.00		

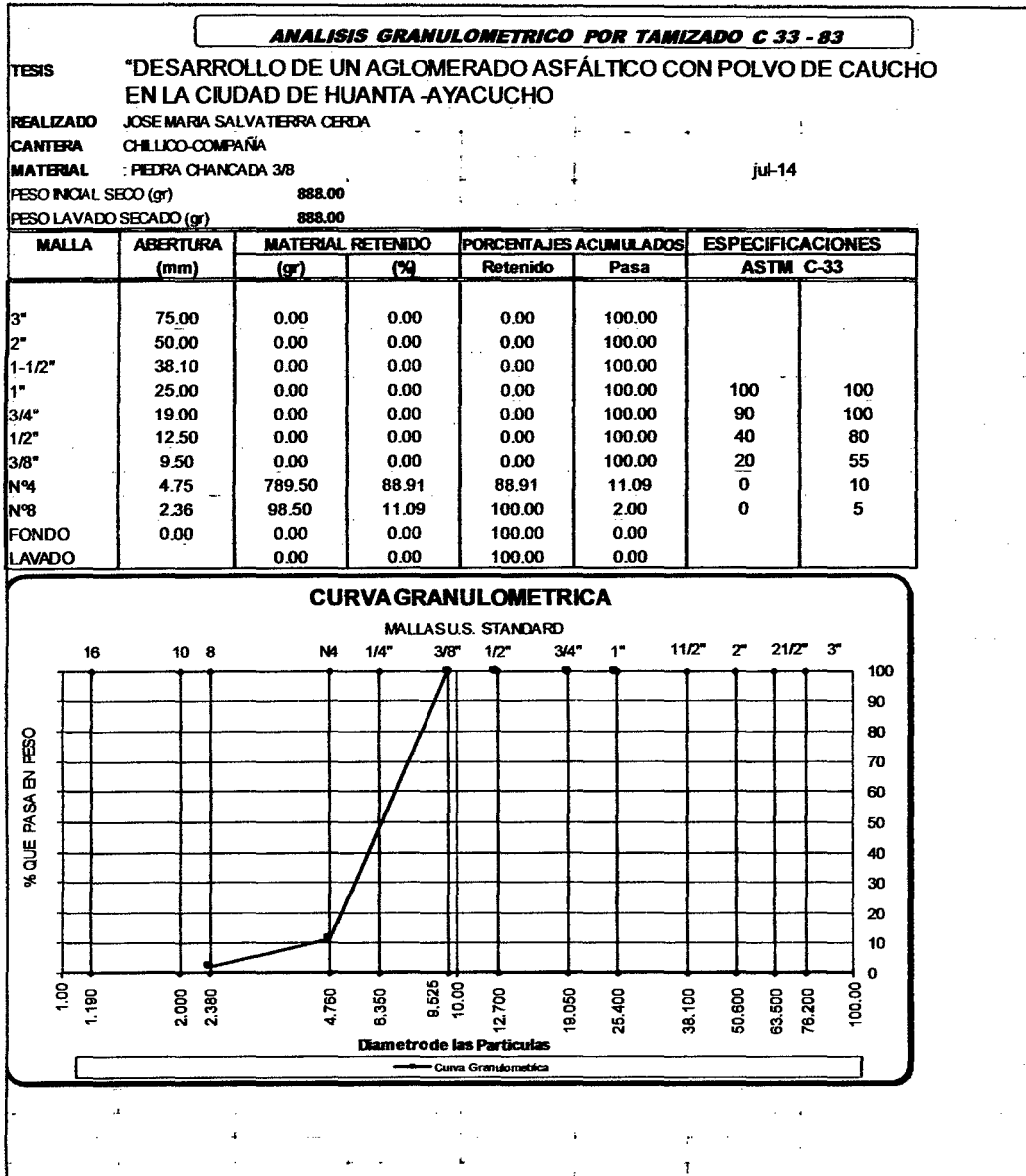
### CURVA GRANULOMETRICA



## ANEXO 2



### ANEXO 3





## ANEXO 4

### ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO C 33 - 83

**TESIS** "DESARROLLO DE UN AGLOMERADO ASFÁLTICO CON POLVO DE CAUCHO EN LA CIUDAD DE HUANTA -AYACUCHO"

**REALIZADO** JOSE MARIA SALVATIERRA CERDA

**CANTERA** CHILICO-COMPAÑIA

**MATERIAL** AGREGADO MEZCLA DE TRABAJO

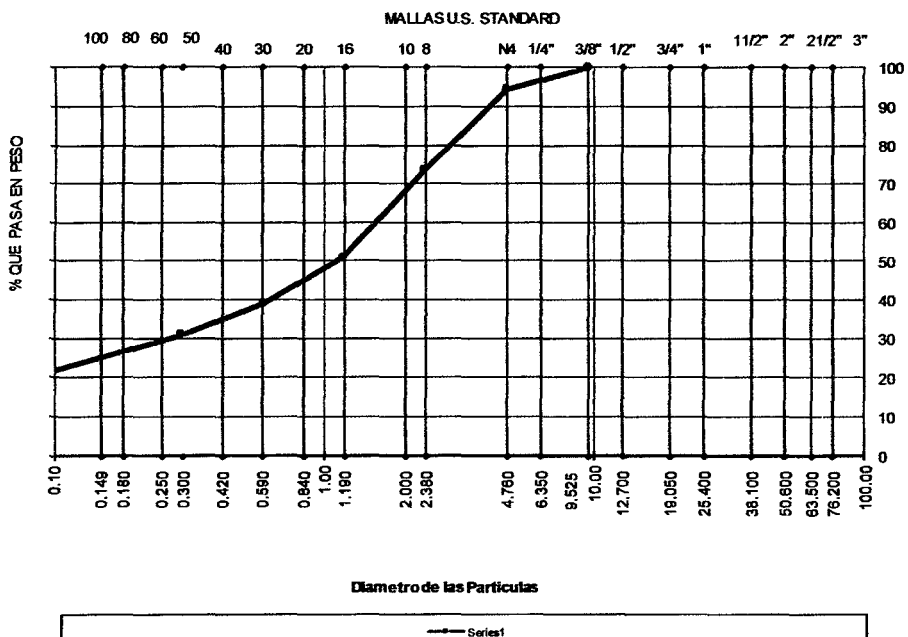
jul-14

**PESO INICIAL SECO (gr)** 1839.89

**PESO LAVADO SECAO (gr)** 1743.76

MALLA	ABERTURA (mm)	MATERIAL RETENIDO		PORCENTAJES ACUMULADOS		ESPECIFICACIONES	
		(gr)	(%)	Retenido	Pasa	ASTM C-33	
3"	75.00	0.00	0.00	0.00	100.00		
2"	50.00	0.00	0.00	0.00	100.00		
1-1/2"	38.10	0.00	0.00	0.00	100.00		
1"	25.00	0.00	0.00	0.00	100.00		
3/4"	19.00	0.00	0.00	0.00	100.00		
1/2"	12.50	0.00	0.00	0.00	100.00		
3/8"	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
Nº4	4.75	101.20	5.50	5.50	94.50	95	100
Nº8	2.34	386.00	20.98	26.48	73.52	80	100
Nº16	1.18	415.30	22.57	49.05	50.95	50	85
Nº30	0.60	218.60	11.88	60.94	39.06	25	60
Nº50	0.30	152.30	8.28	69.21	30.79	10	30
Nº100	0.08	201.80	10.97	80.18	19.82	2	10
Nº200		268.50	14.59	94.78	5.22	0	0
LAVADO		96.10	5.22	100.00	0.00		

### CURVA GRANULOMÉTRICA



## ANEXO 5

FORMATO																
DETERMINACION DE PARTICULAS CHATAS Y ALARGADAS MTC E 221 - 2000																
Nombre del Proyecto		"DESARROLLO DE UN AGLOMERADO ASFÁLTICO CON POLVO DE CAUCHO EN LA CIUDAD DE HUANTA -AYACUCHO"														
TRAMO		JR ZARUMILLA 2DA CUADRA -HUANTA-AYACUCHO							N° ENSAYO		1					
REALIZADO		JOSE M.SALVATIERRA CERDA				FECHA		jun-13		N° DE TAMIZ		3/4				
MATERIAL		Grava Chancada para Asfalto				CANTERA		CHILCO-COMPAÑA		MUESTREO		PIE DE OBRA				
MATERIAL		AGREGADO GRIOSO			CHATAS			ALARGADAS			NI CHATA , NI ALARGADA					
TAMIZ	ABERTURA	PESO. RET.	% RET.	% PASA	PESO	% RET.	% CORREG.	PESO	% RET.	% CORREG.	PESO	% RET.	% CORREG.			
PULG	(mm)															
2"	50.000															
1 1/2"	37.500															
1"	25.000															
3/4"	19.000			100.0												
1/2"	12.500	3,211	68.5	31.5	93	2.9	2.0	115	3.6	2.5	3,003	93.5	64.0			
3/8"	9.500	1,475	31.5	0.0	79	5.4	1.7	80	5.4	1.7	1,316	89.2	28.1			
		4,686					3.7			4.2			92.1			
PESO TOTAL DE LA MUESTRA					gr.	4,686		Ensayo			Límites					
PARTICULA CHATAS Y ALARGADAS					%	7.9		Aceptado <input checked="" type="checkbox"/>			Especificación T.					
								Rechazado <input type="checkbox"/>			% Mín.		% Máx.			
													10			

## ANEXO 6

FORMATO

DETERMINACION DE PARTICULAS CHATAS Y ALARGADAS  
MTC E 221 - 2000

Nombre del Proyecto		"DESARROLLO DE UN AGLOMERADO ASFÁLTICO CON POLVO DE CAUCHO EN LA CIUDAD DE HUANTA AYACUCHO"											
TRAMO		JR. ZARUMILLA 2DA CUADRA - HUANTA AYACUCHO								N° ENSAYO		1	
REALIZADO		JOSE M. SALVATIERRA CERDA				FECHA		jun-13		N° DE TAMIZ		3 / 8	
MATERIAL		Grava Chancada para Asfalto				CANTERA		CHILCO-COMPAÑA		MUESTREO		PIE DE OBRA	
MATERIAL		AGREGADO GRUESO			CHATAS			ALARGADAS			NI CHATA, NI ALARGADA		
TAMIZ	ABERTURA	PESO. RET.	% RET.	% PASA	PESO	% RET.	% CORREG.	PESO	% RET.	% CORREG.	PESO	% RET.	% CORREG.
PULG	(mm)												
2"	50.000												
1 1/2"	37.500												
1"	25.000												
3/8"	19.000			100.0									
N°4	12.500	3.586	64.7	35.3	98	2.7	1.7	118	3.3	2.1	3.370	94.0	60.8
N°8	9.500	1.956	35.3	0.0	86	4.4	1.6	112	5.7	2.0	1.758	89.9	31.7
		5.542					3.3			4.1			92.5
PESO TOTAL DE LA MUESTRA					gr.	5.542		Ensayo			Límites Especificación T.		
PARTICULA CHATAS Y ALARGADAS					%	7.4		Aceptado <input checked="" type="checkbox"/>			% Min.    % Máx.		
								Rechazado <input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 10		

## ANEXO 7

### **LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES**

#### **RESISTENCIA AL DESGASTE POR ABRASION ASTM C-131**

**(Máquina de los Angeles)**

**PROYECTO** : "DESARROLLO DE UN AGLOMERADO ASFÁLTICO CON POLVO DE CAUCHO  
EN LA CIUDAD DE HUANTA -AYACUCHO"  
**REALIZADO POR** : JOSE M SALVATIERRA CERDA  
**CANTERA** : CHILICO-COMPAÑÍA  
**ACCESO** : CARRETERA ASFALTADA-TROCHA  
**MATERIAL** : GRAVILLA 3/4

**ENSAYO** : PIEDRA CHANCADA  
**FECHA** : JULIO - 2014

Pasa el Tamiz	Retenido en el Tamiz	Peso Retenido
2"	1 1/2"	-
1 1/2"	1"	-
1"	3/4"	1250
3/4"	1/2"	1250
1/2"	3/8"	1250
3/8"	1/4"	1250
Platillo		-

#### **PORCENTAJE DE DESGASTE**

1 Tipo de gradación	:	Gradación "A" (500 Rev, 12 Esferas)
2 Peso de la muestra al comenzar el ensayo (gr)	:	5000
3 Peso del material retenido en tamiz N° 12 (gr)	:	4256
4 Peso del material que pasa el tamiz N°12 (2)-(3)	:	1470
5 Porcentaje de desgaste $((2)-(3))/2*100$ (%)	:	14.88

**Observaciones:** El ensayo de resistencia al desgaste por abrasión, arroja un resultado que se encuentra por debajo del límite de la Especificación Técnica, es decir inferior al 25% como máximo.

## ANEXO 8

### LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES

#### RESISTENCIA AL DESGASTE POR ABRASION ASTM C-131

(Máquina de los Angeles)

PROYECTO : DESARROLLO DE UN AGLOMERADO ASFÁLTICO CON POLVO DE CAUCHO PROCEDENTE DEL RECICLADO DE LOS NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFUs), EN LA CIUDAD DE AYACUCHO

REALIZADO POR : JOSE M SALVATIERRA CERDA

CANTERA : CHILICO-COMPAÑÍA

ACCESO : CARRETERA ASFALTADA-TROCHA

MATERIAL : GRAVILLA 3/8

ENSAYO : PIEDRA CHANCADA

FECHA : JULIO - 2014

Pasa el Tamiz	Retenido en el Tamiz	Peso Retenido
2"	1 1/2"	-
1 1/2"	1"	
1"	3/4"	
3/4"	1/2"	
1/2"	3/8"	2500
3/8"	1/4"	1250
Platillo		1250

#### PORCENTAJE DE DESGASTE

1 Tipo de gradación : Gradación "A" (500 Rev, 12 Esferas)

2 Peso de la muestra al comenzar el ensayo (gr) : 5000

3 Peso del material retenido en tamiz N° 12 (gr) : 4176

4 Peso del material que pasa el tamiz N°12 (2)-(3) : 1470

5 Porcentaje de desgaste ((2)-(3))/2\*100 (%) : 16.48

Observaciones: El ensayo de resistencia al desgaste por abrasión, arroja un resultado que se encuentra por debajo del límite de la Especificación Técnica, es decir inferior al 25% como máximo.

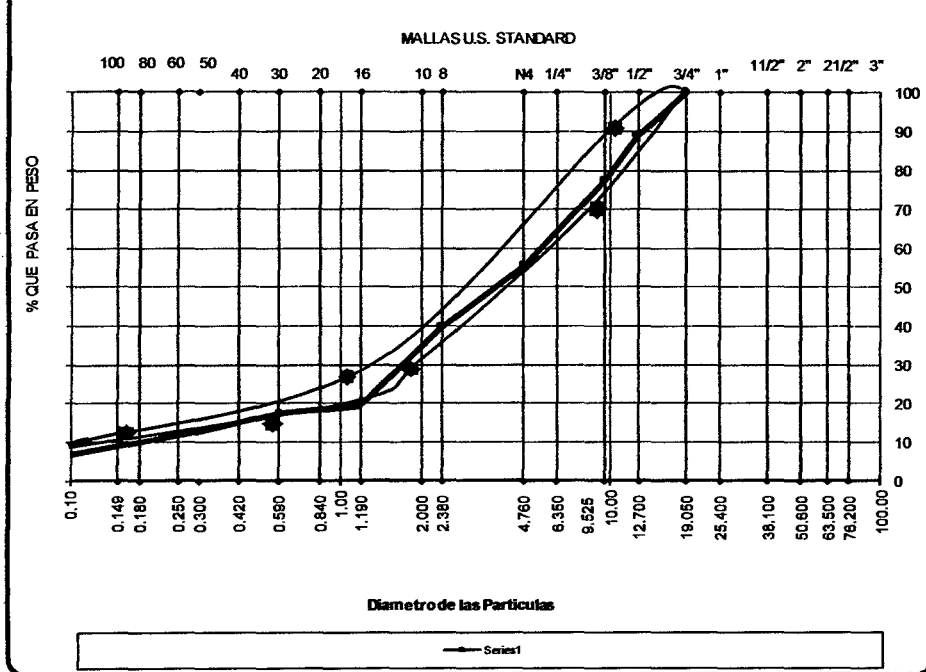
## ANEXO 9

### ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO C 33 - 83

**TESIS** "DESARROLLO DE UN AGLOMERADO ASFÁLTICO CON POLVO DE CAUCHO EN LA CIUDAD DE HUANTA -AYACUCHO"  
**REALIZADO** JOSE MARIA SALVATIERRA CERDA  
**CANTERA** CHILICO-COMPAÑIA  
**MATERIAL** AGREGADO MEZCLA DE TRABAJO jul-14  
**PESO INICIAL SECO (gr)** 1809.20  
**PESO LAVADO SECAO (gr)** 1793.70

MALLA	ABERTURA (mm)	MATERIAL RETENIDO		PORCENTAJES ACUMULADOS		ESPECIFICACIONES	
		(gr)	(%)	Retenido	Pasa	ASTM C-33	
3"	75.00	0.00	0.00	0.00	100.00		
2"	50.00	0.00	0.00	0.00	100.00		
1-1/2"	38.10	0.00	0.00	0.00	100.00		
1"	25.00	0.00	0.00	0.00	100.00		
3/4"	19.00	0.00	0.00	0.00	100.00		
1/2"	12.50	201.50	11.14	11.14	88.86		
3/8"	9.50	410.20	22.67	22.67	77.33	100	100
Nº4	4.75	396.80	21.93	44.61	55.39	100	100
Nº8	2.34	286.80	15.85	60.46	39.54	100	100
Nº16	1.18	365.70	20.21	80.67	19.33	100	85
Nº30	0.60	35.60	1.97	82.64	17.36	100	60
Nº50	0.30	86.50	4.78	87.42	12.58	100	30
Nº100	0.08	126.50	6.99	94.41	5.59	100	10
Nº200		85.60	4.73	99.14	0.86	100	0
LAVADO		15.50	0.86	100.00	0.00		

### CURVA GRANULOMÉTRICA



## ANEXO 10

### ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO C 33 - 83

TESIS "DESARROLLO DE UN AGLOMERADO ASFÁLTICO CON POLVO DE CAUCHO EN LA CIUDAD DE HUANTA -AYACUCHO"

REALIZADO JOSE MARIA SALVATIERRA CERDA

CANTERA CHILICO-COMPAÑIA

MATERIAL POLVO DE CAUCHO

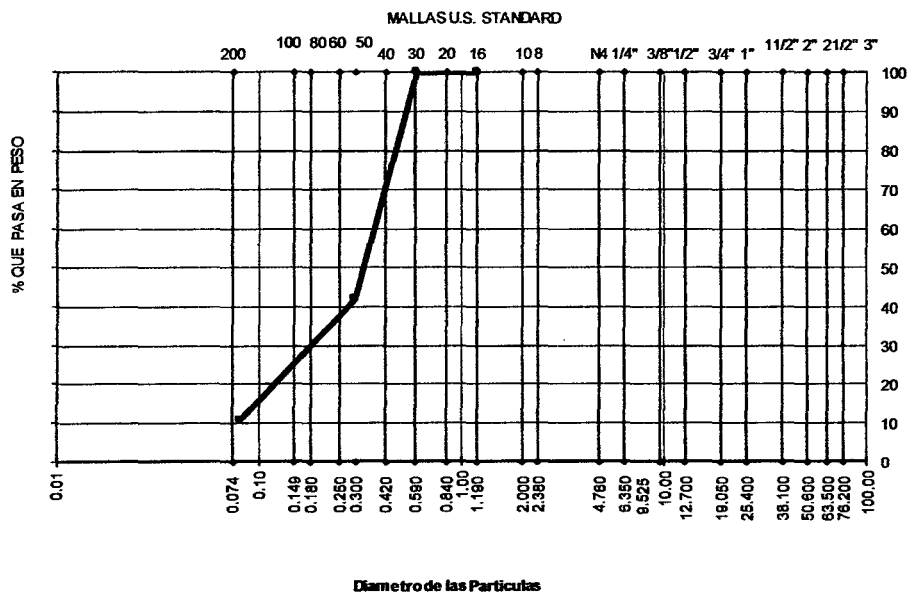
jul-14

PESO INICIAL SECO (gr) 809.20

PESO LAVADO SECAO (gr) 809.00

MALLA	ABERTURA (mm)	MATERIAL RETENIDO		PORCENTAJES ACUMULADOS		ESPECIFICACIONES	
		(gr)	(%)	Retenido	Pasa	ASTM C-33	
3"	75.00	0.00	0.00	0.00	100.00		
2"	50.00	0.00	0.00	0.00	100.00		
1-1/2"	38.10	0.00	0.00	0.00	100.00		
1"	25.00	0.00	0.00	0.00	100.00		
3/4"	19.00	0.00	0.00	0.00	100.00		
1/2"	12.50	0.00	0.00	0.00	100.00		
3/8"	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00		
Nº4	4.75	0.00	0.00	0.00	100.00		
Nº8	2.34	0.00	0.00	0.00	100.00		
Nº16	1.18	0.00	0.00	0.00	100.00		
Nº30	0.60	0.00	0.00	0.00	100.00	100	
Nº50	0.30	468.20	57.86	57.86	42.14	40	
Nº100	0.08	255.60	31.59	89.45	10.55	10	
Nº200		76.80	9.49	98.94	1.06	1	
LAVADO		0.20	0.02	100.00	0.00		

### CURVA GRANULOMÉTRICA



## ANEXO 11

### GLOSARIO DE TERMINOS

**Absorción:** Fenómeno en el que un cuerpo penetra en el ámbito de otro.

**Adherencia:** Acción y efecto de adherir o pegarse una cosa a otra. Atracción existente entre las superficies en contacto de dos cuerpos diferentes.

**Adsorción:** Adhesión o concentración de sustancias disueltas en la superficie de un líquido o alrededor de cuerpos pulverulentos.

**Aglomerante:** Cuerpo que se encuentra integrado en la reunión de otro o más cuerpos o sustancias.

**Aglutinante asfáltico:** Es el cemento a base de asfalto que se produce a partir de residuo de petróleo con o sin la adición de modificadores orgánicos no particulados y no fibrosos.

**Anillos aromáticos:** Es la fracción de los asfaltos, característico por ser la solución en que se encuentran los asfaltenos y los maltenos.

**Aromáticos:** Fracción de los asfaltos, están incluidos en los maltenos. El porcentaje de estos define la capacidad de solubilidad del asfalto, e influye en la facilidad del asfalto para admitir una modificación con polímeros.

**Asentamiento:** Deformaciones verticales producidas por incrementos de carga (en general carga vertical) en un espesor de suelo determinado. Se conocen también como asientos.

**Asfalto:** Material negro, cementante, que varía ampliamente en consistencia, entre sólido y semisólido (sólido blando), a temperaturas ambientales normales.

**Asfaltenos:** Los asfaltenos son moléculas grandes, inertes, tienen valor como componentes del asfalto y como combustibles. Los asfaltenos no son solubles en aceites pero las resinas los mantienen en suspensión coloidal.

**Asfaltitas:** Componentes del asfalto de la presencia de las cuales depende la dureza del asfalto.

**Asfalto "Cutback" o asfalto rebajado:** Es el residuo de petróleo (asfalto) el cual se ha mezclado con destilados del petróleo. Los asfaltos "Cutback" pueden ser de curado rápido ("Rapid Curing: RC"), de curado medio ("Medium Curing: MC") y de curado lento ("Slow Curing: SC"). Los materiales de curado rápido ("Rapid Curing: RC") se pueden producir directamente de la destilación y a menudo se refieren a ellos como aceites de carretera.



**Betún:** Es una clase de sustancia cementítica negra o de color oscuro (sólida, semisólida o viscosa), natural o fabricada, compuesta principalmente de hidrocarburos de alto peso molecular, en la cual son típicos los asfaltos, alquitranes, breas y asfaltitas.

**Capilaridad:** Elevación o depresión de la superficie de un líquido en la zona de contacto con un sólido, por ejemplo, en las paredes de un tubo.

**Carga axial:** Fuerza aplicada a un elemento exactamente en coincidencia con su centroide o eje principal.

**Cemento asfáltico:** Es el asfalto fundido o no, especialmente preparado con la calidad y consistencia para utilizarse directamente en la fabricación de pavimentos bituminosos y teniendo una penetración a 25°C entre 5 y 300 (0,10 mm), bajo una carga de 100 g aplicada por 5 s.

**Compresibilidad:** Propiedad que presentan los cuerpos de disminuir su volumen cuando se aumenta la presión ejercida sobre ellos, manteniendo constantes otros parámetros.

**Compresión confinada:** Prueba de compresión en donde la muestra de suelo no puede deformarse lateralmente.

**Contenido de asfalto:** Cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla.

**Criogénico:** Se le llama así al proceso de congelación al que se someten algunos cuerpos por medio de hidrógeno líquido.

**Curado:** Es la técnica empleada para la preparación de asfaltos rebajados, donde la velocidad de la evaporación del solvente determina directamente el endurecimiento del asfalto resultante de la mezcla con el solvente.

**Deformímetro:** Instrumento para medir desplazamientos lineales. La medida se lee en una carátula que contiene una aguja principal que recorre 100 unidades para completar una vuelta y una aguja pequeña que recorre 10 unidades.

**Deleznable:** Susceptible al desgaste por abrasión, que se rompe, disgrega o deshace con facilidad.

**Destilación:** Operación que consiste en separar varios cuerpos líquidos, en solución los unos en los otros o dos cuerpos sólidos, aprovechando la diferencia de los puntos de ebullición.

**Disolvente:** Que tiene la capacidad de disolver, es decir de separar o desunir las partículas de un cuerpo sólido por medio de un líquido con el cual se incorpora.

**Elastómero:** Es un polímero de cualidades particulares. Presenta una resistencia grande a la tensión deformándose, de forma proporcional al esfuerzo que genera dicho esfuerzo.

**Emulsión asfáltica:** Es una suspensión de glóbulos diminutos de asfalto en agua o en una solución acuosa. También se define como una suspensión de glóbulos diminutos de agua o de una solución acuosa en asfalto.

**Emulsión asfáltica aniónica:** Es un tipo de emulsión en la cual el agente emulsionado establece una predominancia de cargas eléctricas negativas sobre la fase discontinua.

**Emulsión asfáltica catiónica:** Es un tipo de emulsión en la cual el agente emulsionado establece una predominancia de cargas eléctricas positivas sobre la fase discontinua.

**Estabilidad:** Capacidad del asfalto para resistir desplazamientos y deformación bajo las cargas del tránsito.

**Expansión:** Proceso en que la masa de suelo tiende a aumentar su volumen manteniendo su forma. Todo sucede como si estuviera cambiando la escala del espacio tridimensional.

**Extensómetro:** Aparato que se utiliza para monitorear desplazamientos relativos entre uno o más puntos de monitoreo y la cabeza de medición o punto de referencia, y permite determinar las deformaciones axiales del suelo.

**Fluencia:** Deformación en centésimas de pulgada ( $10^{-2}$  plg) de la briqueta, bajo la carga de estabilidad *Marshall*.

**Fluido:** Sustancia que se deforma continuamente cuando se somete a un esfuerzo cortante.

**Fluido intersticial:** Fluido existente en los vacíos del esqueleto del suelo y que ejerce una presión llamada intersticial.

**Gradiente hidráulico:** Razón entre la variación del valor de la altura piezométrica entre dos puntos de una masa de suelo y la distancia que los separa.

**Hidrocarburos:** Compuestos orgánicos constituidos por carbono e hidrógeno. Se subdividen en varias series según las estructuras o cadenas de átomos de carbono. Se utilizan como combustibles.

**Hidrofilico:** Que presenta afinidad química con el agua.

**Hidrofóbico:** Material o materia que no presenta afinidad química con el agua.

**Intersticios:** Espacios vacíos que se presentan en algunos cuerpos.

**Loes:** Depósito o sedimento de grano fino, de tonos amarillos u ocre, transportado por el viento generalmente en zonas de cierta altitud.

**Maltenos:** Su contenido define las propiedades mecánicas del asfalto, su naturaleza química mantiene a los asfaltenos en solución coloidal.

**Menisco:** Superficie libre, cóncava o convexa, del líquido contenido en un tubo estrecho. El menisco es cóncavo si el líquido moja las paredes del tubo, y convexo si no las moja.

**Micela:** Partícula de gran tamaño en las soluciones coloidales.

**Micrómetro:** Instrumento de medición cuyo funcionamiento está basado en el tornillo micrométrico y que sirve para medir las dimensiones de un objeto con alta precisión, del orden de centésimas de milímetros (0,01 mm) y de milésimas de milímetros (0,001mm).

**Miscible:** Que tiene las características adecuadas para mezclarse.

**Muestra inalterada:** Estructura de contención rígida, destinada a contener algún material, generalmente masas de suelo o tierras.

**Nivel freático:** Lugar geométrico de los puntos donde la presión del agua es la atmosférica. Por debajo de él las presiones son positivas (agua freática) y por encima negativas (agua capilar, si está en comunicación con el agua freático, o agua de contacto si no lo está).

**Penetración:** Es la consistencia de un material bituminoso expresado como la distancia en décimas de milímetro (0,10 mm) que una aguja estándar penetra verticalmente en una muestra de material bajo condiciones especificadas de carga, tiempo y temperatura.

**Picnómetro:** Material de vidrio que se utiliza para determinar las densidades de distintas sustancias.

**Polímero:** Molécula larga creada por una reacción química de muchas pequeñas moléculas, que una con otra forman largas cadenas.

**Porosidad:** Relación del volumen de vacíos entre el volumen de la muestra de suelo.

**Plastómero:** Polímero el cual por sus características químicas presenta una resistencia considerable a la tensión.

**Precipitación:** Acción por la cual en una disolución se produce una materia sólida que se deposita en el fondo del recipiente.

**Presión hidrostática:** Es la parte de la presión debida a la masa de un líquido externo en reposo.

**Presión intersticial:** Presión producida por el fluido existente en el esqueleto del suelo.

**Reología:** Parte de la hidráulica encargada del estudio del comportamiento de líquidos que presentan un comportamiento no Newtoniano.

**Resiliencia:** En este caso se refiere a la recuperación mejorada que logra un asfalto después de aplicarle un esfuerzo.

**Sedimentación:** Proceso por el cual el suelo, transportado por una corriente de agua, se deposita en el fondo del río, embalse, canal artificial, o dispositivo construido especialmente para ese fin.

**Suelo isótropo:** Suelo que presenta las mismas propiedades físicas en todas las direcciones a partir del punto de análisis.

**Suelo homogéneo:** Suelo en el que sus propiedades no varían de un punto a otro.

**Suelo saturado:** Suelo que se caracteriza por tener todos sus vacíos ocupados por agua.

**Tensión superficial:** Fuerza atractiva ejercida en la superficie de separación entre materiales en diferentes estados físicos (sólido/líquido, líquido/gas).

**Termofijo:** Plástico resistente a la temperatura.

**Tixotropía:** Es la propiedad de un material que le permite endurecerse en un tiempo relativamente corto al estar en reposo, pero, por manipulación o agitación, cambian a una consistencia muy blanda o a un líquido de elevada viscosidad, siendo el proceso completamente reversible.

**VMA:** Vacíos en el agregado mineral, son los espacios de aire que existen entre las partículas en una mezcla compactada de pavimentación, incluyéndolos espacios que están llenos de asfalto.

**Vacíos de aire:** O simplemente vacíos, son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los granos de la masa de suelo.

**Viscosidad:** Propiedad del fluido, mediante la cual éste ofrece resistencia al esfuerzo cortante.

**Volatilidad:** Transformación de un cuerpo líquido en un cuerpo gaseoso.

**Vulcanizar:** Proceso por el cual los anillos del azufre se abren y se combinan con los dobles enlaces de las moléculas del caucho, formando puentes de cadenas de azufre de una molécula de caucho a otra y dando lugar a una trama total. El caucho así obtenido es más tenaz y duradero.

**ANEXO 12**  
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA Y METALURGIA**  
**“DESARROLLO DE UN AGLOMERADO ASFALTICO CON POLVO DE CAUCHO EN LA CIUDAD DE HUANTA – AYACUCHO”**  
**BACHILLER: JOSE MARIA SALVATIERRA CERDA**

PROBLEMA	OBJETIVOS	JUSTIFICACION	HIPOTESIS	VARIABLES	DISEÑO METODOLOGICO
<p><b>PROBLEMA PRINCIPAL</b>            ¿Será posible la obtención de un conglomerado asfáltico con polvo de caucho procedente del reciclado de neumáticos fuera de uso; para emplearlo en capas asfálticas de carreteras?</p> <p><b>Problemas específicos</b>            1. ¿Cuál será el % en peso del polvo de caucho para obtener un aglomerado asfáltico óptimo?            2. ¿Cuáles serán los parámetros adecuados para obtener una mezcla óptima de un aglomerado asfáltico?            3. ¿Será posible obtener un aglomerado asfáltico a nivel de laboratorio?</p>	<p><b>Objetivo general</b>            Obtener un conglomerado asfáltico, empleando polvo de caucho procedente del reciclado de neumáticos fuera de uso, para su empleo en capas asfálticas de carreteras.</p> <p><b>Objetivos específicos</b>            1. Determinar experimentalmente el porcentaje en peso de polvo de caucho para la obtención de un aglomerado asfáltico óptimo.            2. Determinar los parámetros bajo los cuales se obtiene una mezcla óptima con el agregado de polvo de caucho de neumáticos fuera de uso.            3. Desarrollar técnicas en el laboratorio que sean fácilmente adaptables a plantas asfálticas o a cualquier tipo de planta de producción de productos asfálticos.</p>	<p>En la actualidad hay pocas empresas en el país y ninguna en nuestra ciudad que reciclan el caucho de los neumáticos, dado el gran parque automotor con que se cuenta, y por ende la gran cantidad de neumáticos desechados, se hace imprescindible reutilizar los desechos de este material.            La masiva fabricación de neumáticos y las dificultades para su disposición final una vez usados, constituye uno de los más grave problemas ambientales de los últimos años en todo el mundo por lo que el trabajo de investigación a desarrollarse pretende dar solución en parte a esta problemática.            El sistema formado al incluir el material desechado al aglomerado asfáltico, será valorado claramente desde lo químico, lo físico y lo ambiental a efectos de incluir estos parámetros en los controles de calidad de las obras civiles y viales.</p>	<p><b>Hipótesis general</b>            Si se emplea polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso, es posible la obtención de un conglomerado asfáltico para que pueda ser empleado en capas asfálticas de carreteras.</p> <p><b>Hipótesis secundarias</b>            1. La determinación del porcentaje óptimo de adición del polvo de caucho, facilitaría la obtención del conglomerado asfáltico adecuado.            2. La determinación de parámetros adecuados del proceso posibilitaría la obtención de una mezcla óptima de aglomerado asfáltico.            3. El desarrollo de pruebas experimentales a nivel de laboratorio posibilitaría la obtención del aglomerado asfáltico.</p>	<p><b>X. Independiente:</b>            (X): Polvo de caucho procedente del reciclado de NFUs.  <b>Indicadores:</b>            X<sub>1</sub>: Clasificación            X<sub>2</sub>: Troceado            X<sub>3</sub>: Triturado            X<sub>4</sub>: Micronizado</p> <p><b>Y. Dependiente:</b>            (Y): Diseño y desarrollo de un aglomerado asfáltico.  <b>Indicadores:</b>            Y<sub>1</sub>: Caracterización de materiales: Áridos, Betún, Caucho.            Y<sub>2</sub>: Ajuste granulométrico y diseño por el método Marshall.            Y<sub>3</sub>: Susceptibilidad al agua (inmersión, compresión)</p>	<p><b>Tipo de investigación:</b>            Explicativa  <b>Nivel de investigación:</b>            Experimental  <b>Método:</b>            Analítico  <b>Muestra:</b>            Polvo de caucho importado.  <b>Técnicas:</b>            Experimentales  <b>Instrumentos:</b>            Métodos y análisis de control adecuados.  <b>Infraestructura:</b>            -Los ensayos se realizaron en los laboratorios de: Geotecsa EIRL y MTC-Huayllapampa.            - El lugar de prueba fue el Jr. Zarumilla- Huanta- Ayacucho</p>

