



**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

**EFFECTO DE LA INCORPORACIÓN POR VÍA SECA,
DEL POLVO DE NEUMÁTICO RECICLADO,
COMO AGREGADO FINO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS**

PRESENTADA POR

**LUIS ENRIQUE FAJARDO CACHAY
DOUGLAS ALFONSO VERGARAY HUAMÁN**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

LIMA – PERÚ

2014



**Reconocimiento - No comercial - Sin obra derivada
CC BY-NC-ND**

El autor sólo permite que se pueda descargar esta obra y compartirla con otras personas, siempre que se reconozca su autoría, pero no se puede cambiar de ninguna manera ni se puede utilizar comercialmente.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



USMP
UNIVERSIDAD DE
SAN MARTÍN DE PORRES

**FACULTAD DE
INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

**EFFECTO DE LA INCORPORACIÓN POR VÍA SECA, DEL POLVO
DE NEUMÁTICO RECICLADO, COMO AGREGADO FINO EN
MEZCLAS ASFÁLTICAS**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

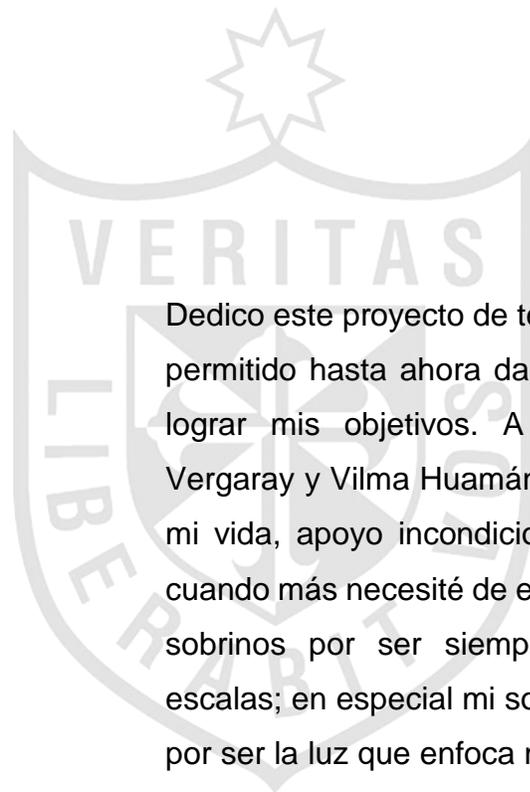
PRESENTADO POR

FAJARDO CACHAY, LUIS ENRIQUE

VERGARAY HUAMÁN, DOUGLAS ALFONSO

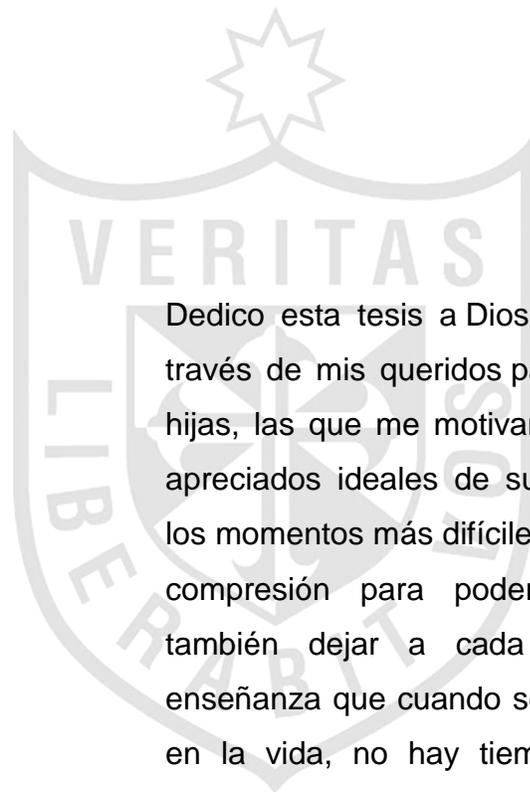
LIMA-PERÚ

2014



Dedico este proyecto de tesis a Dios, que me ha permitido hasta ahora darme vida y salud para lograr mis objetivos. A mis padres Alfonso Vergaray y Vilma Huamán por ser los pilares de mi vida, apoyo incondicional y grito de aliento cuando más necesité de ellos. A mis hermanas y sobrinos por ser siempre partícipes de mis escalas; en especial mi sobrina Taziana Begglo, por ser la luz que enfoca mi rumbo, y acompaña cada instante de mis días.

DOUGLAS ALFONSO VERGARAY HUAMÁN



Dedico esta tesis a Dios, por darme la vida a través de mis queridos padres. A mi esposa e hijas, las que me motivan a alcanzar mis más apreciados ideales de superación, quienes en los momentos más difíciles me dieron su amor y comprensión para poderlos superar. Quiero también dejar a cada uno de ellos una enseñanza que cuando se quiere alcanzar algo en la vida, no hay tiempo ni obstáculo que impida poderlo lograr.

LUIS ENRIQUE FAJARDO CACHAY



	Página
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCCIÓN	xi
CAPÍTULO I: MATERIALES QUE CONFORMAN UNA MEZCLA ASFÁLTICA	
1.1 Asfalto	1
1.2 Agregados	13
CAPÍTULO II: MEZCLAS ASFÁLTICAS	
2.1 Introducción	28
2.2 Características y comportamiento de la mezcla	29
2.3 Propiedades consideradas en el diseño de mezclas asfálticas	33

2.4 Método de diseño	43
2.5 Asfaltos modificados	46

CAPÍTULO III: MODIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS, MEDIANTE LA INCORPORACIÓN DE POLVO DE CAUCHO RECICLADO

3.1 El neumático	49
3.2 Características de los neumáticos	52
3.3 Neumáticos desechados	54
3.4 Aplicación de polvo de caucho de neumático en las mezclas asfálticas	58
3.5 Características de las mezclas asfálticas en caliente modificadas con caucho	65

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA

4.1 Material	67
4.2 Métodos	68

CAPÍTULO V: DESARROLLO EXPERIMENTAL

5.1 Características de los materiales pétreos	70
5.2 Características del cemento asfáltico	73
5.3 Mezcla de áridos	74
5.4 Diseño Marshall de la mezcla patrón	75
5.5 Preparación de la mezcla mediante proceso seco	80
5.6 Determinación del tiempo y temperatura de digestión	85
5.7 Diseño Final	86

CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN Y APLICACIONES

6.1	Generalidades	88
6.2	Comparación de resultados para mezclas asfálticas convencionales y con adición de polvo de neumático	89
6.3	Ventajas de las mezclas asfálticas con polvo de neumático respecto a las mezclas convencionales	91
6.4	Análisis de costos ejecución-mantenimiento de mezclas modificadas con polvo de neumático y mezclas convencionales	92
	CONCLUSIONES	96
	RECOMENDACIONES	99
	FUENTES DE INFORMACIÓN	100
	ANEXOS	102



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 01	Historia del Asfalto	3
Tabla 02	Clasificación de las rocas	16
Tabla 03	Ensayos de laboratorio para agregados de mezcla asfáltica	27
Tabla 04	Causas y efectos de inestabilidad en el pavimento	35
Tabla 05	Causas y efectos de una poca durabilidad en el pavimento	37
Tabla 06	Causas y efectos de la permeabilidad	38
Tabla 07	Causas y efectos de problemas en la trabajabilidad	40
Tabla 08	Causas y efectos de una mala resistencia a la fatiga	41
Tabla 09	Causas y efectos de poca resistencia al deslizamiento	42
Tabla 10	Análisis químico del neumático	50
Tabla 11	Composición y características entre automóviles y camiones	53
Tabla 12	Composición aproximada de un neumático de automóvil en cuanto su peso en %	54
Tabla 13	Parque Vehicular total de circulación al 2012 en el Perú	55
Tabla 14	Terminología asociada con el uso del caucho en mezclas asfálticas	59
Tabla 15	Requerimientos para los agregados gruesos	71
Tabla 16	Requerimientos para los agregados finos	72
Tabla 17	Granulometría de los agregados pétreos	73
Tabla 18	Certificación de cemento asfáltico, refinería la Pampilla	74
Tabla 19	Granulometría densa de la mezcla patrón	75
Tabla 20	Cuadro Resumen de ensayo Marshall	78
Tabla 21	Parámetros del Diseño Marshall	81
Tabla 22	Granulometría del caucho suministrada	82
Tabla 23	Granulometría del caucho a utilizar	83
Tabla 24	Cuadro Resumen ensayo Marshall de mezcla con caucho	87
Tabla 25	Parámetros del Diseño Marshall de mezcla con caucho	88
Tabla 26	Cuadro Comparativo de mezclas convencionales vs mezclas con caucho	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01	Estructura de una refinería	6
Figura 02	Esquematación de fracciones	7
Figura 03	Proceso de destilación del petróleo	8
Figura 04	Esquema coloidal del asfalto	10
Figura 05	Ilustración del VMA en una probeta de mezcla compactada	31
Figura 06	Equipos para laboratorio. Martillo Marshall	45
Figura 07	Viaje al interior del neumático	51
Figura 08	Esquema de fabricación de asfalto caucho por vía húmeda	61
Figura 09	Esquema de fabricación de asfalto caucho por vía seca	64
Figura 10	Curva de Análisis Granulométrico	73
Figura 11	Gradación de la mezcla	76
Figura 12	Probetas Marshall desmoldadas	77
Figura 13	Variación de la Densidad respecto al % de asfalto para mezcla patrón	78
Figura 14	Variación de la Estabilidad respecto al % de asfalto para mezcla patrón	79
Figura 15	Variación de la fluidez respecto al % de asfalto para mezcla patrón	79
Figura 16	Variación % vacíos en la mezcla respecto al % de asfalto para mezcla patrón	80
Figura 17	Variación de los vacíos en el agregado mineral respecto al % de asfalto para mezcla patrón	80
Figura 18	Curva granulométrica del caucho tal como fue suministrada por el supervisor	83
Figura 19	Curva granulométrico del caucho a ser incorporado	84
Figura 20	Gradación de la mezcla mejorada con caucho	85
Figura 21	Costo de mantenimiento de carreteras peruanas	95



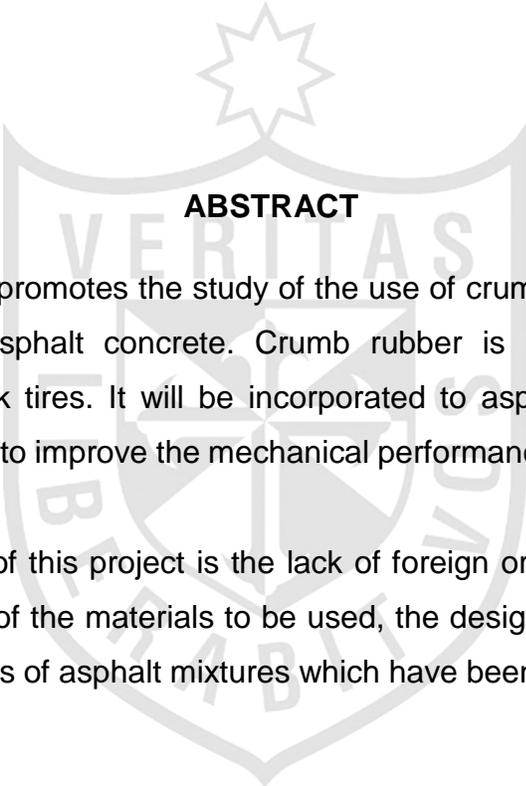
RESUMEN

Esta tesis promueve el estudio de la incorporación por vía seca, del polvo de neumático reciclado, como agregado fino en mezclas asfálticas, para darle uso a los neumáticos desechados con el fin de mejorar el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas.

La problemática de este proyecto está en la falta de antecedentes extranjeros o nacionales, la caracterización de los materiales a emplear, el diseño y el estudio de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas mejoradas con polvo de neumático.

El objetivo principal de este estudio es determinar la metodología a seguir para analizar y mejorar el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas, a las cuales se les está incorporando el polvo de neumático reciclado, como material granular fino mediante el proceso seco.

Adicionalmente, este proyecto contribuye con la solución del problema de contaminación ambiental que los neumáticos generan al finalizar su vida útil, pues se convierten de residuos difíciles de eliminar en componentes necesarios para mejorar las mezclas asfálticas.



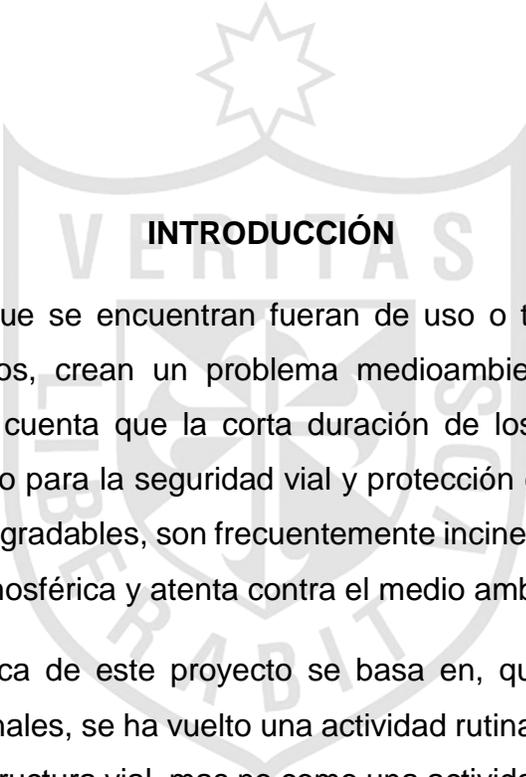
ABSTRACT

This thesis promotes the study of the use of crumb rubber in asphalt to obtain rubberized asphalt concrete. Crumb rubber is recycled rubber from automotive and truck tires. It will be incorporated to asphalt by using the dry process and in order to improve the mechanical performance of asphalt mixtures.

The problem of this project is the lack of foreign or national background, the characterization of the materials to be used, the design and the study of the mechanical properties of asphalt mixtures which have been improved with crumb rubber.

The main objective of this study is to determine the methodology to analyze and to improve the mechanical behavior of asphalt mixtures, which incorporate crumb rubber as fine granular material through dry process.

In addition, this project contributes to the solution of the environmental pollution problem that tires generate at the end of its useful life, because they become in waste difficult to eliminate. Then, by implementing this project, tires turn into components for improving asphalt mixtures.



INTRODUCCIÓN

Los neumáticos que se encuentran fuera de uso o también denominados neumáticos reciclados, crean un problema medioambiental en el Perú y el mundo. Se tuvo en cuenta que la corta duración de los neumáticos usados, constituyen un peligro para la seguridad vial y protección del medio ambiente; y que, por no ser biodegradables, son frecuentemente incineradas, lo que aumenta la contaminación atmosférica y atenta contra el medio ambiente.

La problemática de este proyecto se basa en, que el uso de mezclas asfálticas convencionales, se ha vuelto una actividad rutinaria para los diferentes proyectos de infraestructura vial, mas no como una actividad de solución ante los desgastes y/o deterioros constantes en dichas infraestructuras; por lo tanto, se justifica el estudio de la incorporación por vía seca, del polvo de neumático reciclado, como agregado fino en mezclas asfálticas, para darle uso a los neumáticos desechados con el fin de mejorar el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas.

Asimismo, es oportuno mencionar que el objetivo general de este es de proponer los neumáticos fuera de uso y motivar a investigar la valoración de estos

residuos; de esta manera los grandes tonelajes acumulados de neumáticos fuera de uso se vean reducidos en la actualidad.

Al caucho reciclado se le denomina generalmente, grano de caucho reciclado (GCR) en la mayoría de los países latinoamericanos en donde se los ha utilizado. En los neumáticos, los cauchos naturales proporcionan elasticidad, mientras que los sintéticos, estabilidad térmica. Se une a ellos un proceso de vulcanizado entrelazando las cadenas de polímeros con moléculas de azufre a alta presión y temperatura. El grano de caucho reciclado se puede obtener en procesos diferentes; siendo los principales la trituration a temperatura ambiente y trituration criogénica. El primer proceso, consiste en una trituration mecánica, en los que diversos tamaños de granos de caucho van a depender de las etapas a las que se haya sometido. En la trituration criogénica, los neumáticos son sometidos a bajas temperaturas, por lo que el caucho se vuelve frágil y fácil de destrozarse en pequeñas partículas.

En la actualidad, en nuestro país hay empresas que están en busca de socios peruanos, para invertir en plantas recicladoras de llantas, buscando oportunidades innovativas de negocios.

Las mezclas asfálticas que son utilizadas en pavimentos flexibles, pueden incorporar una parte importante del caucho que encontramos en los neumáticos desechados. La manera de incorporar vendría a ser una forma de reciclar tales desechos y poder mejorar las propiedades de los pavimentos; de tal manera que se logre aumentar la vida útil y reducir costos de mantenimiento.

Para la incorporación del polvo de neumáticos reciclados en las mezclas asfálticas, existen formas muy comunes, como lo son la vía húmeda y la vía seca. En la primera se mezcla el caucho directamente con el ligante, tal como normalmente se trabajan los asfaltos modificados, para que se pueda añadir posteriormente los agregados. En la vía seca, es añadir los granos de caucho como una fracción de áridos, sustituyendo parte de la fracción fina de la mezcla, antes de incorporarlo al ligante.

El nivel que va aportar el polvo de neumático en las mejoras de las mezclas asfálticas, va a depender de varios factores. El principal será el tipo de tecnología a emplear, ya sea vía seca o vía húmeda; la naturaleza del caucho, así como su granulometría y el tamaño de estas; porcentaje de polvo que se va añadir y el tiempo de reacción en el caso de la vía húmeda; asimismo, el tiempo de digestión en el caso de la vía seca.

Cabe mencionar que en varios países, como Brasil, España, USA, Canadá, han llegado a incorporar este tipo de mezclas en tareas de conservación y construcción de pavimentos. La Unión Europea ha publicado recientemente una legislación que impulsa al reciclado de los neumáticos. España, por su parte, cuenta ya con el Plan Nacional de neumáticos reciclados, que prohíbe la admisión en vertedero de neumáticos a partir de enero de 2007. En el Perú, se rigen congresos donde se fomenta a investigar con productos reciclados para la mejoras de mezclas asfálticas. Se escuchan pocos casos, donde se hayan realizado estudios de mejoras en mezclas asfálticas, al utilizar neumáticos reciclados.

Dentro de los objetivos específicos se encuentran: determinar los efectos que existen en las características de diseño de la mezcla asfáltica, con el polvo de neumático. Determinar los beneficios técnicos, sociales y económicos, que cumplen el incorporar el polvo de neumático en las mezclas asfálticas. Determinar la relación que existe entre el reaprovechamiento de los neumáticos en desuso y la mitigación de la contaminación ambiental.

En lo referente a la hipótesis se plantea el uso del polvo de neumático reciclado reaprovechando los neumáticos en desuso, para mitigar la contaminación ambiental.

El presente trabajo estudia el efecto de la incorporación por vía seca, del polvo de neumático reciclado, como agregado fino en mezclas asfálticas a través de ensayos en laboratorio y compararlo con mezclas asfálticas convencionales para su análisis de costo beneficio. Consta de VI capítulos. En el capítulo I: Materiales

que conforman una mezcla asfáltica, Capítulo II: Mezclas asfálticas, Capítulo III: Modificación de las mezclas asfálticas, mediante la incorporación del polvo de caucho reciclado, Capítulo IV: Metodología, Capítulo V: Desarrollo experimental y el Capítulo VI: Discusión y aplicaciones.





CAPÍTULO I

MATERIALES QUE CONFORMAN UNA MEZCLA ASFÁLTICA

1.1 Asfalto

Es un material altamente impermeable, cohesivo y adherente, capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes. Como aplicación de estas propiedades, el asfalto puede cumplir, en la construcción de pavimentos, las siguientes funciones:

- Impermeabilizar la estructura del pavimento, de tal manera que lo hace poco sensible a la humedad, siendo eficaz contra la penetración del agua, proveniente de las precipitaciones, según acorde a los cambios climáticos, donde se desarrolle la estructura.
- Proporcionar una unión íntima y cohesión entre los agregados pétreos, siendo capaz de resistir la acción mecánica de disgregación que va ser producida por las cargas de los vehículos. Igualmente, mejorar la capacidad portante de la estructura, lo que permite

disminuir su espesor de carpeta asfáltica en la estructura del pavimento.

1.1.1 Antecedentes

El asfalto es un componente natural que deriva, en su mayor parte, del petróleo. La palabra asfalto deriva de la lengua que se hablaba en las orillas del Tigris superior de Asia, entre los años 1400 y 600 AC. En esta zona se encuentra la palabra *sphalto*, que significa “durable”. Después el vocablo fue adoptado por el griego, pasó al latín y, más adelante al francés (*asphalte*), al español (*asfalto*) y al inglés (*asphalt*).

Los estudios arqueológicos indican que es uno de los materiales de construcción más antiguo que el hombre ha utilizado, ya que apreciaron rápidamente las excelentes propiedades impermeabilizantes, adhesivas y de preservación que tenía.

Tabla Nº 1. Historia del Asfalto

Año	Uso
6 000 a.C	En Sumeria (Oriente Medio – Mesopotamia), se utilizaba en la industria de navegación. La torre de Babel (Babilonia – Baja Mesopotamia) es una de las tantas construcciones en donde se utilizó como mortero.
3 200 – 2 600 a.C	Utilizado por los egipcios para impermeabilizar.
2 600 – 540 a.C	Excavaciones arqueológicas recientes, indican el amplio uso del asfalto en Mesopotamia y el Valle del Indo como aglomerante para albañilería y construcción de carreteras, así como capas de impermeabilización en estanques y depósitos de agua.
300 a.C	Se emplea ampliamente en Egipto para embalsamientos.
1 802 d.C	En Francia se emplea roca asfáltica para pavimentación de suelos, puentes y aceras.
1 838 d.C	En Filadelfia se emplea roca asfáltica importada en la construcción de aceras.
1 870 d.C	Construcción del primer pavimento asfáltico en Newark, Nueva Jersey por el profesor E. J. DeSmedt, químico belga.
1 876 d.C	Construcción del primer pavimento de tipo sheel asphalt en Washington D. C. con asfalto de lago importado.
1 902 d.C	En Estados Unidos, se obtienen de la destilación del petróleo aproximadamente 120,000 barriles al año

Fuente: PEMEX .Refinación. Ing. Jorge Rodríguez Villar. 2000 (México).
Elaboración: Los autores

En su evolución, se han logrado avances significativos al tratar el cemento asfáltico original (obtenido del petróleo crudo), con otras sustancias que permiten mejorar su comportamiento cuando es sometido a condiciones extremas; como climas muy fríos o calurosos, tránsito de vehículos muy pesados o ambientes agresivos.

Solo en Europa actualmente existen más de 4 000 plantas de mezcla asfáltica alrededor de 16 países. (España se encuentra entre los principales fabricantes); que producen aproximadamente 300 millones de toneladas al año. El asfalto es totalmente reciclable y su reutilización ha aumentado considerablemente en los últimos años, llegando hasta el 70%.

1.1.2 Definición

El asfalto es un material negro, cementante, que en su consistencia, varía ampliamente, entre sólido y semisólido (es decir, sólido blando), a temperaturas ambientales normales. Cuando este material se calienta lo suficiente, el asfalto se ablanda y se vuelve líquido, lo cual permite cubrir las partículas de agregado durante la producción de mezcla en caliente.

El asfalto es generalmente llamado cemento asfáltico, cuando se habla de pavimentación, con ello se define como un material viscoso y pegajoso. Si seguimos hablando de pavimentación, referimos, que este material se adhiere fácilmente a las partículas de agregado y, por lo tanto, es un excelente cemento para unir las partículas de agregado en un pavimento. El cemento asfáltico es un excelente material impermeabilizante, como se nombró en un comienzo, y no es afectado por los ácidos, los álcalis o sales. Esto quiere decir, que un pavimento de concreto asfáltico construido adecuadamente, es impermeable y resistente a muchos tipos de daños químicos.

El asfalto cuando es calentado o envejecido cambia. Tiende a volverse frágil y duro, así como perder parte de su capacidad de adherirse a

las partículas de agregado. Si se comprenden bien las propiedades del asfalto, estos cambios pueden ser minimizados, y, si durante la construcción del pavimento, se van tomando medidas necesarias para garantizar que este, cuando esté terminado, sea construido de tal manera que pueda retardarse el proceso de envejecimiento.

1.1.3 Origen y naturaleza del asfalto

Al tratar el origen del asfalto, crea mucha confusión; como refinado y cómo se clasifica en sus diferentes grados; esto se debe a que el asfalto es usado para diferentes propósitos. Existe una confusión general respecto a ciertos términos relacionados con las propiedades del asfalto.

Al mencionar este punto, se pretende informar respecto al origen y naturaleza del asfalto de pavimentación, para que de esta manera se entienda claramente los conceptos fundamentales.

1.1.3.1 Refinación del petróleo

El crudo de petróleo es refinado (proceso de purificación de una sustancia química obtenida muchas veces a partir de un recurso natural) por destilación; este es un proceso en el cual, las diferentes fracciones (productos) son separadas fuera del crudo por medio de un aumento en etapas de temperatura.

Las fracciones livianas se separan por destilación simple. Los destilados más pesados, usualmente llamados gasóleos, pueden ser separados solamente, mediante la combinación de calor y vacío, el asfalto puede ser producido si se utilizan destilación por vacío a una temperatura aproximada de 480 °C. Esta temperatura puede variar de acuerdo al crudo de petróleo que se está refinando o al grado de asfalto que se produzca.

ESTRUCTURA DE UNA REFINERÍA

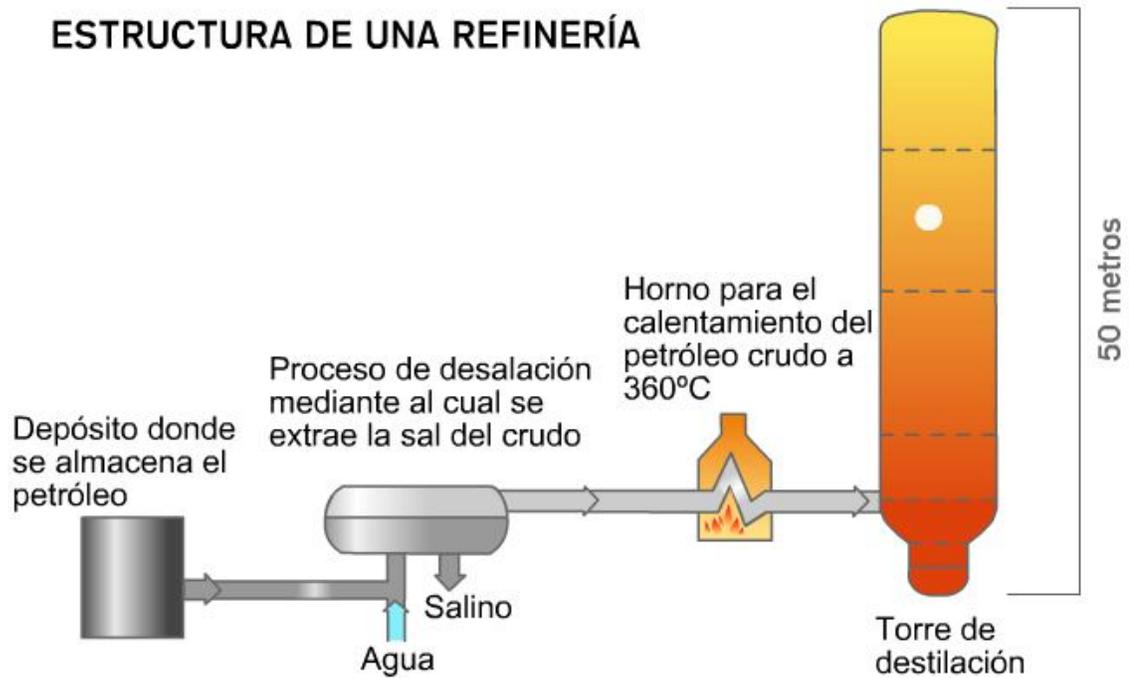


Figura N° 1: Estructura de una refinería

Fuente: Repsol

Según la figura N° 1, el crudo se calienta a 360 °C y se introduce en torres de destilación de hasta 50 metros de altura. Es en aquella torre, donde se separan las diferentes fracciones y los residuos que componen el petróleo según su temperatura de ebullición.

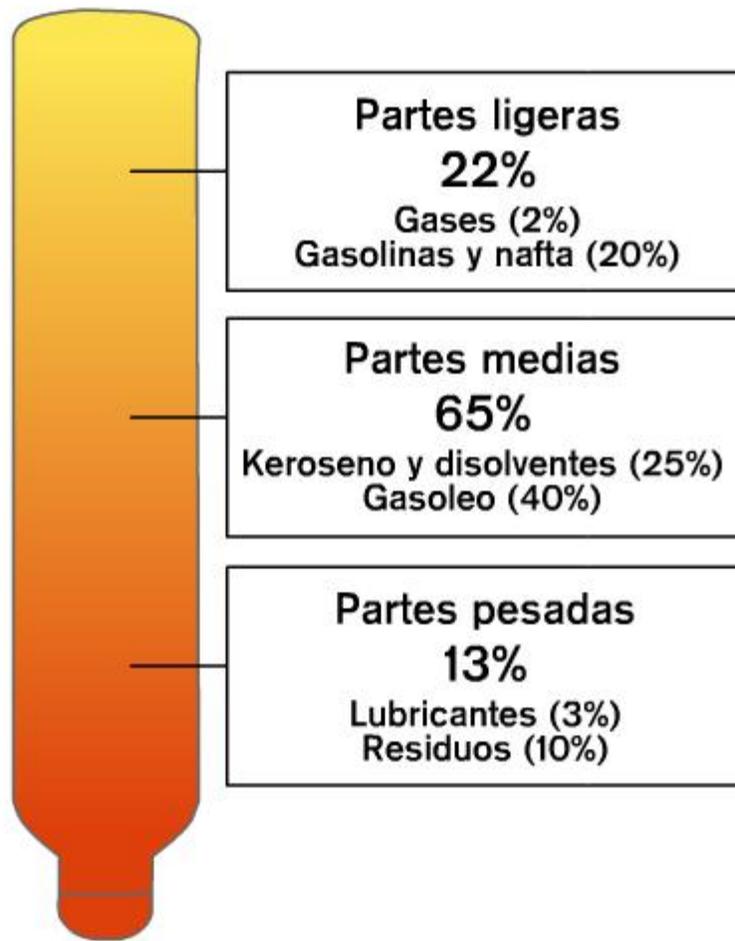


Figura N° 2: Esquematzación de fracciones

Fuente: Repsol

1.1.3.1.1 Refinación del Asfalto

Los refinadores de crudo deben tener maneras de controlar las propiedades de los asfaltos que producen para que estos cumplan ciertos requisitos. Esto se logra, mezclando varios tipos de crudos de petróleo antes de procesarlos. El hecho de poder mezclar, permite al refinador combinar crudos que contienen asfaltos de diferentes características, para que el producto final, posea las características solicitadas por el usuario.

Existen dos procesos por lo cual, puede ser producido un asfalto, después que se han combinado los crudos de petróleo: destilación por vacío y extracción con solventes. El primero, consiste en separar el asfalto del crudo, mediante la aplicación de calor y vacío. El segundo, se remueven más gasóleos del crudo, dejando de esta manera, un asfalto residual.

Una vez que los asfaltos han sido procesados, estos pueden ser mezclados entre sí en proporciones designadas; para así, producir grados intermedios de asfalto. Es así como un asfalto muy viscoso y otro menos viscoso, se combinan para producir un asfalto de viscosidad intermedia.



Figura N°3; Proceso de destilación del petróleo

Fuente: Repsol

1.1.4 Composición del asfalto

La composición química de los asfaltos es muy compleja, básicamente está constituida por cadenas de moléculas compuestas fundamentalmente por carbono, hidrógeno, azufre, oxígeno, nitrógeno y complejos de vanadio níquel, hierro, calcio y magnesio.

La composición específica de un asfalto en particular dependerá de la procedencia del petróleo crudo del cual procede.

El análisis químico del asfalto es muy laborioso, sin embargo, es posible distinguir dos grandes grupos que lo constituyen: los asfáltenos y máltenos.

El modelo adoptado para configurar la estructura del asfalto se denomina modelo micelar, donde existen dos fases; una discontinua (aromática) formada por dos asfáltenos y una continua que rodea y solubiliza a los asfáltenos, denominada máltenos. Las resinas contenidas en los máltenos son intermediarias en el asfalto, lo que cumple la misión de homogeneizar y compatibilizar a los de otra manera insolubles asfáltenos. Los máltenos y asfáltenos existen como islas flotando en el tercer componente del asfalto, los aceites.

Según el grado de aromaticidad de los máltenos y la naturaleza de la concentración de los asfáltenos, se pueden formar dos tipos de estructuras: Asfalto tipo sol y el Asfalto tipo gel. El primero en mención, tiene alta ductilidad, gran susceptibilidad a los cambios de temperatura, su elasticidad no puede medirse y tiene un elevado desarrollo de resistencia con el tiempo. Los asfaltos tipo gel tienen baja ductibilidad, baja susceptibilidad a los cambios de temperatura, su elasticidad no puede medirse y tiene un bajo desarrollo de resistencia con el tiempo. Hay un tipo de asfaltos llamados medianos que tiene una estructura intermedia entre sol y gel.

Con ello se obtiene información que el asfalto tipo sol, es típico asfalto de carreteras; y el asfalto tipo gel, es típico asfalto para impermeabilización.

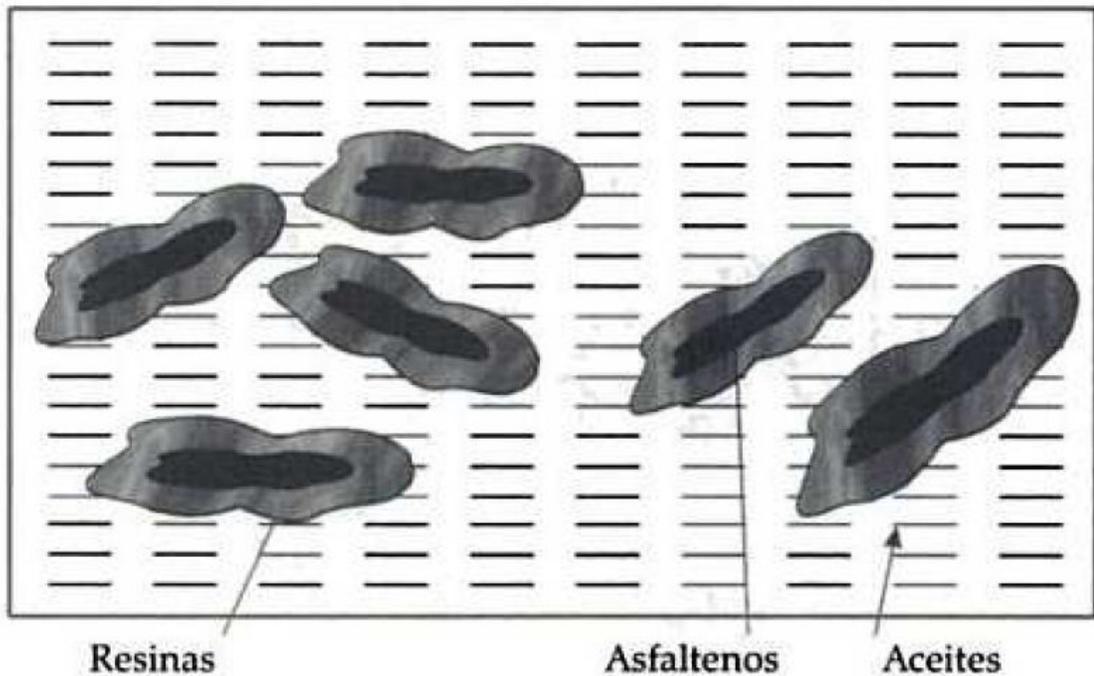


Figura Nº4: Tecnología del cemento asfáltico – Esquema coloidal

Fuente: Asfaltos modificados con polímeros. Monografias.com

1.1.5 Propiedades del asfalto

Las propiedades físicas más importantes del cemento asfáltico, que se deben tener en cuenta en el momento de diseño, construcción y mantenimiento de carreteras son:

a) **Durabilidad**

Indica qué tanto permanecen en un cemento asfáltico, sus características, cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento.

b) **Adhesión y Cohesión**

Adhesión es la capacidad del cemento asfáltico para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación.

Cohesión es la capacidad del cemento asfáltico de mantener firmemente, en su puesto, las partículas de agregado en el pavimento terminado.

c) **Susceptibilidad al endurecimiento y al envejecimiento**

El endurecimiento del asfalto es causado por la combinación con el oxígeno (oxidación) o por volatización (estado sólido al gaseoso). La oxidación y el endurecimiento más severo, ocurren durante el mezclado, debido que, el asfalto se encuentra a altas temperaturas y en películas delgadas.

d) **Susceptibilidad a la temperatura**

Esta es una de las propiedades más importantes del asfalto. Esta propiedad, varía entre asfaltos de diferente origen, sin importar que tengan el mismo grado de consistencia.

1.1.6 Tipos de asfalto utilizados en pavimentos

Los asfaltos de pavimentación pueden clasificarse bajo tres tipos generales:

1.1.6.1 Cementos asfálticos (AC)

Son los más utilizados en pavimentación. Se pueden sub-clasificar bajo tres sistemas diferentes:

- Viscosidad antes del envejecimiento
- Viscosidad después del envejecimiento
- Penetración

Se prepara comercialmente en grados o rangos de consistencia, con base en el ensayo de penetración, por ejemplo: AC 70-90, AC 60-80, AC 80-100. Los números indican la penetración en decimas de milímetro. El ensayo de penetración es uno de los ensayos de clasificación más comunes en la caracterización del asfalto.

1.1.6.2 Asfaltos líquidos

Son también llamados asfaltos rebajados. Son materiales asfálticos de consistencia blanda o fluida por lo que salen del campo en el que normalmente se aplica el ensayo de penetración, cuyo límite máximo es 300. Están compuestos por una fase asfáltica y un fluidificante volátil, que puede ser bencina, querosene o aceite. Los fluidificantes se evaporan (proceso de curado), quedando el residuo asfáltico el cual envuelve y cohesiona las partículas del agregado.

1.1.6.3 Emulsiones asfálticas

Las emulsiones asfálticas son una mezcla de asfalto con emulsificante, que con el agua forman una emulsión estable que permitirá tender las carpetas asfálticas “en frío”; es decir, a temperaturas que estarán por debajo de los 100 °C.

En conclusión, los asfaltos diluidos y los emulsificados son usados, casi por completo, en mezclas en frío y en riegos; mientras que, los cementos asfálticos (AC) son usados en mezclas en caliente, y no se discutirán más por no ser tema de estudio para la presente tesis.

1.2 Agregados

El agregado, también conocido como material granular o agregado mineral, es cualquier mineral duro e inerte que es usado en forma de partículas graduadas, como parte de un pavimento de mezcla asfáltica. Los agregados que son típicos incluyen arena, grava, piedra triturada, escoria y polvo de roca. Estos constituyen entre el 90 y 95% en peso, y entre el 75 y 85% en volumen, de la mayoría de las estructuras de pavimento. El comportamiento de un pavimento se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado, debido a que él mismo proporciona la mayoría de las características de la capacidad portante de la estructura de pavimento.

1.2.1 Clasificación de agregados

Las rocas se dividen en tres tipos generales: sedimentarias, ígneas y metamórficas. Esta clasificación está basada en el tipo de formación de cada roca.

1.2.1.1 Rocas sedimentarias

Este tipo de rocas, se forman por la acumulación de sedimentos (partículas finas) en el agua o a medida que el agua se deposita. El sedimento puede consistir de partículas minerales o fragmentos (como es el caso de la areniscas y la arcilla esquistosa); de residuos de productos animales (algunas calizas); de plantas (carbón); de los productos finales de una acción

química o una evaporación (sal, yeso), o de la combinación de cualquiera de estos tipos de materiales.

Dos términos que usualmente se aplican a rocas sedimentarias son silíceo y calcáreo. Rocas sedimentarias silíceas son aquellas que contienen un alto porcentaje de sílice. Aquellas rocas que contienen un alto porcentaje de carbonato de calcio (calizas) son las llamadas calcáreas.

Las rocas sedimentarias se encuentran, normalmente, en capas o estratos, dentro de la corteza terrestre. Esta estratificación es el resultado directo de la manera en que se formaron las rocas sedimentarias: a partir de depósitos de partículas finas, generalmente sedimentados sobre el fondo de lagos o mares antiguos.

1.2.1.2 Rocas ígneas

Las rocas ígneas constan de material fundido (magma) que se ha enfriado y solidificado. Existen dos tipos de rocas ígneas: extrusivas e intrusivas.

Las rocas ígneas extrusivas, son aquellas formadas a partir del material que se ha vertido afuera, sobre la superficie terrestre, durante una erupción volcánica o alguna actividad geológica similar. La roca resultante tiene una apariencia y estructura vidriosa, debido a que el material se enfría rápidamente al ser expuesto a la atmósfera. La riolita, la andesita y el basalto son ejemplos de rocas extrusivas.

Las rocas intrusivas, por otro lado, se forman a partir del magma, que queda atrapado en las profundidades de la corteza terrestre. Al ser atrapado en la corteza, el magma se enfría y endurece lentamente, lo que permite la formación de una estructura cristalina. En consecuencia, la roca ígnea intrusiva es cristalina en estructura y apariencia; como por ejemplo el granito, la diorita y el gabro. Los movimientos terrestres y

los procesos de erosión, traen rocas intrusivas a la superficie terrestre, donde pueden ser explotadas en canteras para ser posteriormente usadas.

1.2.1.3 Rocas metamórficas

Las rocas metamórficas son generalmente, rocas sedimentarias o ígneas que han sido transformadas por procesos de intensa presión y calor dentro de la tierra, y también por reacciones químicas. Es muy difícil determinar el origen exacto de una roca metamórfica en particular, debido a que los procesos de formación son muy complejos.

Muchos tipos de rocas metamórficas presentan un rasgo característico: los minerales están alineados en capas o planos paralelos. Partir la roca en el sentido de sus planos es mucho más fácil, que partirla en sus otras direcciones. Las rocas metamórficas que exhiben este tipo de estructura, se denominan foliadas. Ejemplos de rocas foliadas son los gneises, los esquistos (formado de rocas ígneas) y la pizarra (formada de la arcilla esquistosa; una roca sedimentaria).

No todas las rocas metamórficas son foliadas. El mármol (formado de calizas) y la cuarcita (formada de las areniscas) son tipos comunes de rocas metamórficas que no presentan foliación.

Tabla N°2: Clasificación de las rocas

CLASIFICACIONES GENERAL DE ROCAS		
Clase	Tipo	Familia
Sedimentarias	Calcáreas	Caliza Dolomita
	Silíceas	Arcilla esquistosa Arenisca Horsteno Conglomerado Breccia
Metamórficas	Foliadas	Gneis Esquisto Anfibolita Pizarra
	No foliadas	Cuarcita Mármol Serpentina
Ígneas	Intrusivas	Granito Sienita Diorita Gabbro Periodotila Piroxenita Hornablendita
	Extrusivas	Obsidiana Pómez Tufa Riolita Traquita Andesita Basalto Diabasa

Fuente: www.geovirtual.cl

Elaboración: los autores

1.2.2 Fuentes de agregados

Los agregados usados en el pavimento asfáltico se clasifican, generalmente, de acuerdo a su origen. Estos incluyen: agregados naturales, agregados procesados y agregados sintéticos o artificiales.

1.2.2.1 Agregados naturales

Los agregados naturales son aquellos que son usados en su forma natural, es decir con poco o ningún tipo de procesamiento. Estos agregados, están constituidos por partículas producidas mediante procesos naturales de erosión y degradación; tales como la acción del viento, el agua, el movimiento del hielo y los químicos. La forma de las partículas individuales es producto de los agentes que actúan sobre ellas. Los glaciares por ejemplo, usualmente producen rocas y guijarros redondeados, y las corrientes de agua producen partículas lisas y redondeadas.

Los principales tipos de agregado natural que son usados para la construcción de pavimentos, son la grava y arena. La grava usualmente, son partículas de un tamaño igual o mayor que $\frac{1}{4}$ de pulgada (6.35 mm). La arena usualmente, son partículas de un tamaño menor que 6.35 mm pero mayor que 0.075 mm (No. 200). Las partículas que tienen un tamaño menor a 0.075 mm, son conocidas como relleno minerales, el cual consiste principalmente de limo y arcilla.

Las gravas y las arenas son clasificadas, además, de acuerdo a su origen. Los materiales producidos en canteras abiertas y usados son ningún procesamiento adicional, son conocidos como materiales en bruto, y los materiales de la ribera de los ríos son conocidos como materiales de canteras de ríos.

1.2.2.2 Agregados procesados

Los agregados procesados son aquellos que han sido triturados y tamizados antes de ser usados. Existen dos fuentes principales

de agregados procesados: las gravas naturales que son trituradas para volverlas más apropiadas para pavimentos de mezcla asfáltica y los fragmentos de lecho de roca y de piedras grandes que deben ser reducidos en tamaño antes de ser usados en la pavimentación.

La roca es triturada por tres razones: para cambiar la textura superficial de las partículas de lisa a rugosa; para de esta manera, cambiar la forma de la partícula de redonda a angular y para reducir; así como, mejorar la distribución y la gradación de los tamaños de las partículas. El propósito principal de la trituración, en el caso de los fragmentos de lecho de roca y de piedras grandes, es reducir las piedras a un tamaño que sea manejable. Sin embargo, los cambios en la textura superficial y en la forma de las partículas, son también muy importantes.

El tamizado de los materiales, después de ser triturados da como resultado una granulometría con cierto rango de tamaño de partícula. Un factor importante en la construcción de pavimentos de buena calidad, consiste en mantener graduaciones específicas de agregados. Sin embargo, por razones económicas, el material triturado es usado tal y como sale del triturador, con muy poco o ningún tamizado. Para un control adecuado de las operaciones de triturado, es determinar si la graduación resultante del agregado cumple, o no, con los requisitos de la obra. El agregado triturado, sin tamizar, es conocido como agregado triturado sin cribar; y es usado satisfactoriamente en muchos proyectos de construcción de pavimentos. Sin embargo, es esencial garantizar que la operación de triturado sea continuamente supervisada para poder producir un agregado que cumpla con las especificaciones.

1.2.2.3 Agregados sintéticos

Los agregados sintéticos o artificiales no existen en la naturaleza. Ellos son el producto del procesamiento físico o químico de materiales. Algunos son subproductos de procesos industriales de producción como el refinamiento de metales. Otros son producidos mediante el procesamiento de materias primas, para ser usados específicamente como agregado.

El producto secundario más comúnmente usado, es la escoria de alto horno. Esta, es una sustancia no metálica que brota a la superficie del hierro fundido durante el proceso de reducción. Una vez que es removida de la superficie del hierro, la escoria es transformada en pequeñas partículas, templándola inmediatamente en agua, o triturándola una vez que se ha enfriado.

Los agregados sintéticos manufacturados son relativamente nuevos en la industria de la pavimentación. Ellos son producidos al quemar arcilla, arcilla esquistosa, tierra diatomácea procesada, vidrio volcánico, escoria y otros materiales. Los productos finales son típicamente livianos y tienen una resistencia muy alta al desgaste.

1.2.3 Propiedades del agregado

En un pavimento densamente graduado de mezcla asfáltica, el agregado conforma el 90 a 95 %, en peso, de la mezcla de pavimentación. Eso hace que la calidad del agregado usado, sea un factor crítico en el comportamiento del pavimento. Sin embargo, además de la calidad, se aplican otros criterios que forman parte de la selección de un agregado en una obra de pavimentación. Estos criterios incluyen el costo y la disponibilidad del agregado. Aún más, un agregado que cumple con los requisitos de costo y disponibilidad, deberá poseer también ciertas propiedades para poder ser considerado

apropiado para pavimento asfáltico de buena calidad. Las propiedades más importantes de los agregados que se usan para la construcción de pavimentación son:

- Tamaño y graduación de las partículas
- Dureza o resistencia al desgaste.
- Durabilidad o resistencia al intemperismo
- Limpieza
- Capacidad de absorción
- Forma de partícula y textura de la superficie
- Peso específico

1.2.3.1 Tamaño y graduación de las partículas

Una propiedad clave de los agregados que se usan en las bases y superficies de las pavimentaciones, es la distribución de los tamaños de las partículas al mezclarlos. La graduación de los agregados, esto es, la combinación de tamaños de partículas en la mezcla, la cual, afecta la densidad, la resistencia, y la economía de la estructura del pavimento.

Se usa un análisis granulométrico, para determinar las propiedades relativas de los diferentes tamaños de partículas en una mezcla de agregados minerales. Para llevarlo a cabo, se pasa una muestra pesada de agregado seco a través de un juego de mallas o tamices cuyo tamaño de abertura ha sido seleccionado previamente. Los tamices se agrupan colocando hasta arriba, los que tienen la abertura mayor, y debajo, aquellos con aberturas sucesivamente más pequeñas. La muestra de agregado se agita con un vibrador mecánico de mallas y se determina el peso del material retenido en cada tamiz, el cual se expresa como porcentaje de la muestra original. ***En el método T 27 de la AASHTO se dan los procedimientos detallados para ejecutar un análisis granulométrico de agregados y gruesos.***

Las mallas de prueba que se usan comúnmente para los proyectos de pavimentaciones son aquellas con aberturas de $2\frac{1}{2}$, 2, $1\frac{1}{2}$, 1, $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{8}$ de pulgada cuadrada para las fracciones grandes; y con 4, 10, 40, 80, 100, y 200 mallas por pulgada para las fracciones más pequeñas. Estas últimas mallas se designan como No. 4, No. 10, etc.

Ciertos términos son usados al hacer referencia a las fracciones de agregado, con el propósito de ayudar a la descripción de las mismas. Estos son:

- **Agregado grueso**, material retenido por el tamiz 2.36 mm (No 8)
- **Agregado fino**, material que pasa el tamiz de 2.36 mm (No 8)
- **Relleno mineral**, fracciones de agregado fino que pasan el tamiz de 0.60 mm (No 30)
- **Polvo mineral**, fracciones de agregado fino que pasan el tamiz de 0.075 mm (No 200).

El relleno mineral y el polvo mineral, están presentes en los agregados naturales y también son producidos, como subproducto, en la trituración de muchos tipos de roca. Ellos son esenciales para la producción de una mezcla densa, cohesiva, durable y resistente a la penetración del agua. Sin embargo, un pequeño porcentaje de más, o de menos, de relleno o polvo mineral, puede causar que la mezcla aparezca excesivamente seca o, excesivamente rica (es decir, la mezcla de pavimentación aparecerá como si tuviera muy poco asfalto o demasiado asfalto).

1.2.3.2 Dureza o resistencia al desgaste

Los materiales que se usan en las mezclas asfálticas deberán ser duros y resistir al desgaste debido al efecto pulido del tránsito y a los efectos abrasivos internos de las cargas repetidas. La estimación más comúnmente aceptada de la dureza de los agregados es la prueba de abrasión de Los Ángeles. La máquina que se usa en esta consta de un cilindro de acero hueco, cerrado en ambos extremos y montado en ejes, en posición horizontal.

Para ejecutar la prueba se coloca dentro del cilindro, una muestra limpia del agregado que se ha de probar junto con un peso estándar de esferas de acero como carga abrasiva. El tambor se hace girar 500 veces a una velocidad de 30 a 33 rpm, después de lo cual se retira la muestra de agregado y se agita en una malla del No. 12 (1.70 mm). El material retenido en el tamiz se lava, se seca hasta alcanzar una masa constante y se pesa. Se reporta como porcentaje de desgaste, la diferencia entre la masa original y la masa fina de la muestra expresada, como un porcentaje de la masa original. ***El método T 96 de AASHTO da un procedimiento detallado para esta prueba.***

1.2.3.3 Durabilidad o resistencia al intemperismo

Comúnmente, la durabilidad de los agregados se mide con una prueba de integridad, ***como se describe en el método T 104 de AASHTO.*** Esta prueba mide la resistencia de los agregados a la desintegración en una solución saturada de sulfato de sodio o magnesio. Simula el intemperismo de los agregados que existen en la naturaleza.

Para la prueba, se sumergen fracciones conocidas de agregado que se ha de probar en una solución saturada de sulfato de sodio o magnesio. Luego, se retira el agregado, y se seca en un horno hasta que alcance una masa constante. Se repite este proceso para un número especificado de

ciclos, normalmente cinco. Después de los ciclos alternados de mojado y desecación, se divide al agregado en fracciones, haciéndolo pasar por las mallas, y se determina para cada fracción, el porcentaje de pérdida de peso. El porcentaje de pérdida, se expresa como un promedio pesado. Para un tamaño dado de malla, el porcentaje de pérdida promedio por peso, es el producto del porcentaje que pasa por esa malla, y el porcentaje que pasa por esa malla en el material original. El total de estos valores es el valor de prueba de pérdida en porcentaje.

1.2.3.4 Limpieza

Las especificaciones de obra, generalmente ponen un límite a los tipos y cantidades de materiales indeseables (vegetación, arcilla esquistosa, partículas blandas, terrones de arcilla, etc.) en el agregado. Las cantidades excesivas de estos materiales pueden afectar desfavorablemente el comportamiento del pavimento.

La limpieza del agregado puede determinarse mediante una inspección visual; pero un tamizado por lavado (donde el peso de la muestra de agregado, antes de ser lavado, es comparado con su peso después de ser lavada) proporciona una medida exacta del porcentaje de material indeseable más fino que 0.075 mm (No 200). El ensayo de arena equivalente **T 176 de AASHTO**, es un método que determina la proporción indeseable de polvo fino y arcilla en la fracción de agregado que pasa el tamiz de 4.75 mm (No 4).

1.2.3.5 Capacidad de absorción

Todos los agregados son porosos, algunos más que otros. La cantidad de líquido, que un agregado absorbe cuando es sumergido en un baño, determina su porosidad.

La capacidad de un agregado de absorber agua (o asfalto) es un elemento importante de información. Si un agregado es altamente absorbente, entonces continuará absorbiendo asfalto después del mezclado inicial, dejando así menos asfalto en su superficie para ligar las demás partículas de agregado. Debido a esto, un agregado poroso, requiere cantidades, mucho mayores de asfalto que las que requieren un agregado menos poroso.

Los agregados altamente porosos y absorbentes, no son normalmente usados, a menos de que posean otras características que los hagan deseables, a pesar de su alta capacidad de absorción. Algunos ejemplos de estos materiales son la escoria de alto horno y ciertos agregados sintéticos. Estos componentes o ingredientes son altamente porosos, pero también son livianos en peso y poseen alta resistencia al desgaste.

1.2.3.6 Forma de partícula y textura de la superficie

Por lo general, las especificaciones para agregados que se usan en la construcción de pavimentos, tienen requerimientos relacionados con la forma de la partícula, la textura de la superficie y la limpieza del agregado. Normalmente, las especificaciones para agregados que se usan en las mezclas asfálticas, requieren que los agregados sean resistentes, limpios, durables y libres de cantidades de exceso de piezas planas o alargadas; polvo, bolas de arcilla y otro material indeseable.

1.2.3.7 Peso específico

El peso específico de un agregado, es la proporción entre el peso de un volumen dado de agregado y el peso de un volumen igual de agua. El peso específico es una forma de expresar las características de peso y volumen de materiales. Estas características son especialmente importantes en la producción de mezclas asfálticas debido a que el agregado y el asfalto son proporcionados, en la mezcla, de acuerdo al peso.

Una tonelada de agregado de bajo peso específico, tiene un volumen mayor (ocupa más espacio en la mezcla), a diferencia de una tonelada de agregado con un peso específico más alto. Por tanto, para poder cubrir todas las partículas de agregado, debe adicionarse más asfalto a una tonelada de agregado con bajo peso específico (debido que tiene un volumen mayor); a diferencia de a una tonelada de agregado con un peso específico más alto (por tener menos volumen).

Una razón por la cual es importante conocer el peso específico de los agregados, es que permite calcular el porcentaje de vacíos de aire, de las mezclas asfálticas compactadas (espacios de aire). Estos espacios, desempeñan una labor importante en la estructura de pavimento terminado.

Todos los agregados son, hasta cierto punto, porosos. Se han desarrollado tres tipos de peso específico para tener en cuenta la porosidad del agregado, ya que esta propiedad de porosidad, afectará la cantidad de asfalto que se requiere para cubrir las partículas de agregado y también el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla final. Estos tres tipos son:

- Peso específico total
- Peso específico aparente y
- Peso específico efectivo

El peso específico total incluye todos los poros de la muestra, con ello, asume que los poros que absorben agua, no absorben asfalto; esto hace una suposición falsa (excepto en casos muy raros).

El peso específico aparente no incluye, como parte del volumen de la muestra, los poros y espacios capilares que se llenarían de agua al mojar la muestra; con ello, asume que todos los poros que son permeables al agua, absorberán asfalto, esto hace una suposición falsa (excepto en casos muy raros).

El peso específico efectivo excluye, del volumen de la muestra, todos los poros y espacios capilares que absorben asfalto; con ello, discrimina entre poros permeables al agua y poros permeables al asfalto, por lo cual hace que esta suposición se acerque al valor correcto, y que debería ser usado en los cálculos de mezclas asfálticas.

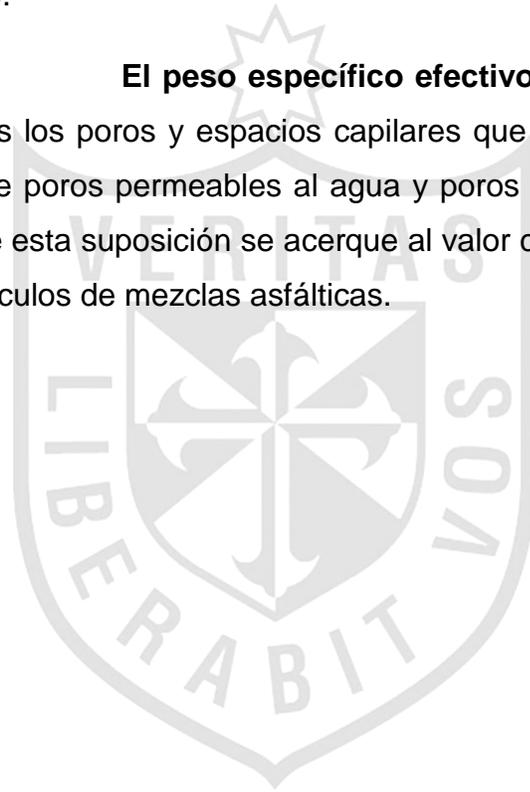


Tabla N°3: Ensayos de laboratorio para agregados de mezcla asfáltica

Ensayo de laboratorio para AGREGADOS	Norma	Propósito
Granulometría	AASHTO T 27	La determinación de la composición granulométrica de un material pétreo que se pretende emplear en la elaboración de la mezcla asfáltica es de primordial importancia, ya que en función de ellas, se conoce de ante mano qué clase de textura tendrá la capa.
Desgaste	AASHTO T 96	El objeto es conocer la calidad del material pétreo desde el punto de vista de su desgaste. Es la medida de dureza de los agregados y nos da una idea de la forma en la que se comportará los agregados, bajo los efectos de abrasión, causadas por el tráfico
Sanidad usando Sulfato de Sodio	AASHTO T 104	Permite obtener la información de estabilidad de un agregado, bajo la acción de agentes atmosféricos.
Equivalente de Arena	AASHTO T 176	Descubre el exceso de arcilla en los agregados, ya que es un medio rápido para separar las partículas más finas (arcillosas) de los granos más gruesos, o de la arena.
Gravedad específica y absorción de los agregados gruesos y finos	AASHTO T 84 AASHTO T 85	La gravedad específica es una forma de expresar las características de peso y volumen de materiales. El valor de absorción es usado para calcular el cambio en el peso de un agregado, provocado por el agua absorbida en los poros accesibles de las partículas que constituyen el material, comparado con la condición seca

Fuente: Tesis: Propuesta de elaboración de un manual práctico para el control de calidad en el mantenimiento de pavimentos asfálticos.

Elaborado por: Hernández Muñoz, Hugo Ernesto



CAPÍTULO II

MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.1 Introducción

En una mezcla asfáltica de estructura de pavimentación, el asfalto y el agregado son combinados en proporciones exactas. Los referentes de estos materiales, determinan las propiedades físicas de la mezcla asfáltica y eventualmente, el desempeño de la misma, como estructura de pavimento terminado. Existen dos métodos de diseño comúnmente utilizados para determinar las proporciones apropiadas de asfalto y agregado, en una mezcla asfáltica en caliente. Ellos son: el Método Marshall (AASHTO T 245 o ASTM D 15559) y el Método Hveen (AASHTO T 246 y T247 o ASTM D 1560 y D 1561). Cada método contiene características y ventajas singulares, cualquiera de ellos, puede ser usado con resultados satisfactorios. En nuestro país el método comúnmente utilizado es el Método Marshall

No existe un método de diseño universalmente aceptado para mezclas con asfaltos modificados con polvo de neumático; pero normalmente se emplean partes o modificaciones de los métodos arriba mencionados.

Las mezclas asfálticas, se fabrican en unas plantas fijas o móviles, se transportan después a la obra, donde se extienden y se compactan.

El objetivo de las mezclas asfálticas, será cubrir completamente las partículas de agregados con una cantidad mínima de producto asfáltico, para poder ser usados en pavimentos asfálticos.

La función de las mezclas asfálticas, será proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías de comunicación; así como transmitir suficientemente las cargas debidas al tráfico, al terreno base para que sean soportadas por esta.

2.2 Características y comportamiento de la mezcla

Una muestra de pavimentación, que es preparada en el laboratorio, puede ser analizada para determinar su posible desempeño en la estructura del pavimento. El análisis está enfocado hacia cuatro características de la mezcla, y la influencia que estas, puedan tener en el comportamiento de la mezcla asfáltica.

Las cuatro características son:

- Densidad de la mezcla
- Vacíos de aire, o simplemente vacíos
- Vacíos en el agregado mineral
- Contenido de asfalto

2.2.1 Densidad

La densidad de la mezcla compactada, está definida como su peso unitario (el peso de un volumen específico de la mezcla). La densidad es una característica muy importante, debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado, para tener un rendimiento duradero.

En las pruebas y el análisis de mezclas, la densidad de la muestra compactada se expresa, generalmente, en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) o también, libras por pie cúbico (lb/ft^3). La densidad es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua (1000 kg/m^3 o 62.416 lb/ft^3). La densidad obtenida en el laboratorio se convierte en la densidad patrón, y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es o no la adecuada. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad del laboratorio. Esto es, debido a que, muy rara vez la compactación in-situ, logra las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación de laboratorio.

2.2.2 Vacíos de aire (o simplemente vacíos)

Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas, contengan cierto porcentaje de vacíos, para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios a donde pueda fluir el asfalto, durante esta compactación adicional.

La durabilidad de un pavimento asfáltico está en función del contenido de vacíos. La razón de esto es que, cuando menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos, proporciona pasajes a través de la mezcla, por los cuales puede

entrar el agua y el aire y causar deterioro. Ahora bien, por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición en la que el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie.

La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad, menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa; entre más baja la densidad, mayor es el porcentaje de vacíos en la mezcla.

2.2.3 Vacíos en el agregado mineral

Los vacíos en el agregado mineral (VMA) son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

El VMA representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que se pierde, por absorción, en el agregado) y el volumen de vacíos necesario en la mezcla

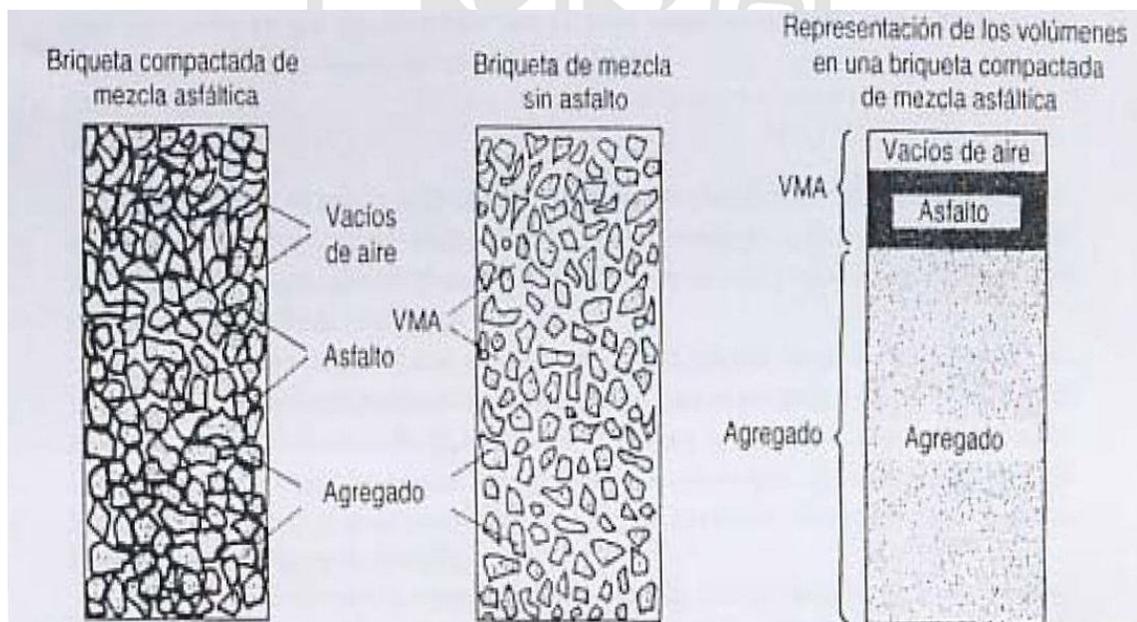


Figura Nº 5: Ilustración del VMA en una probeta de mezcla compactada.

Para que pueda lograrse un espesor durable de película de asfalto, se deben tener valores mínimos de VMA. Un aumento en la densidad de la graduación del agregado, hasta el punto donde se obtengan valores de VMA por debajo del mínimo especificado, puede resultar en películas delgadas de asfalto y en mezclas de baja durabilidad y apariencia seca. Por lo tanto, es contraproducente y perjudicial, para la calidad del pavimento, disminuir el VMA para tratar de economizar en el contenido de asfalto.

2.2.4 Contenido de asfalto

La proporción de asfalto en la mezcla es importante y debe ser determinada exactamente en el laboratorio, y luego controlada con precisión en la obra.

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado, tales como granulometría y la capacidad de absorción. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total y mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir uniformemente todas las partículas. Por otro lado, las mezclas más gruesas, es decir agregados más grandes, exigen menos asfalto debido a que, poseen menos área superficial total.

La relación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo de asfalto, es mayor, cuando hay relleno mineral (fracciones muy finas de agregado que pasan a través del tamiz No 200). Los pequeños incrementos en la cantidad de relleno mineral, pueden absorber, literalmente, gran parte del contenido de asfalto, resultando en una mezcla inestable y seca. Las pequeñas disminuciones (de relleno mineral), tienen el efecto contrario: poco relleno mineral resulta en una mezcla muy rica (húmeda). Cualquier variación en el contenido de relleno mineral causa cambios en las propiedades de la mezcla, haciéndola variar de seca a húmeda. Si una mezcla contiene poco o demasiado

relleno mineral, cualquier ajuste arbitrario para corregir la situación, probablemente la empeorará. En vez de hacer ajustes arbitrarios, se deberá efectuar un muestreo y unas pruebas apropiadas para determinar las causas de las variaciones y, si es necesario, establecer otro diseño de mezcla.

La capacidad de absorción (capacidad para absorber asfalto) del agregado usado en la mezcla asfáltica, es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Esto se debe a que, se tiene que agregar suficiente asfalto a la mezcla para permitir la absorción y para que además, se puedan cubrir las partículas con una película adecuada de asfalto. En general, se habla de dos tipos de asfalto, cuando se refieren al asfalto absorbido y al no absorbido: contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto.

El contenido total de asfalto, es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla, para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado; además, es la cantidad que forma una película ligante efectiva sobre las superficies de los agregados; y se obtiene al restar, la cantidad absorbida de asfalto, del contenido total.

2.3 Propiedades consideradas en el diseño de mezclas asfálticas

Una buena mezcla asfáltica trabaja bien, debido a que son diseñadas, producidas y colocadas en situ de obra, de tal manera que se logra obtener las propiedades deseadas. Hay varias propiedades que contribuyen a la buena calidad de pavimentos de mezclas asfálticas. Estas incluyen: la estabilidad, la durabilidad, la impermeabilidad, la trabajabilidad, la flexibilidad, la resistencia a la fatiga y la resistencia al deslizamiento.

El objetivo primordial del procedimiento de diseño de mezclas asfálticas, es el de garantizar, que la mezcla de pavimentación posea cada una de estas propiedades.

2.3.1 Estabilidad

La estabilidad de una mezcla asfáltica, es su capacidad para resistir desplazamientos y deformación bajo las cargas de tránsito. Un pavimento estable es capaz de mantener su forma bajo cargas repetidas; un pavimento inestable, desarrolla ahuellamientos (canales), ondulaciones (corrugación) y otras señas que indican cambios en la mezcla.

Los requisitos de estabilidad solo pueden establecerse después de un análisis completo del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad para un pavimento, dependen del tránsito esperado. Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficiente altas para acomodar adecuadamente el tránsito esperado, pero no más altas de lo que exijan las condiciones de tránsito. Valores muy altos de estabilidad, producen un pavimento demasiado rígido, y por lo tanto, menos durable que lo deseado.

La estabilidad de una mezcla, depende de la fricción y la cohesión interna. La fricción interna en las partículas de agregado (fricción entre partículas), está relacionada con características del agregado, tales como la forma y textura superficial. La cohesión resulta de la capacidad del ligante del asfalto. Un grado propio de fricción y cohesión interna, en la mezcla asfáltica, previene que las partículas de agregado se desplacen unas respecto a otras, debido a las fuerzas ejercidas por el tráfico.

En términos generales, entre más angular sea la forma de las partículas de agregado, y más áspera sea su textura superficial, más alta será la estabilidad de la mezcla asfáltica.

Cuando no hay agregados disponibles con características de alta fricción interna, se pueden usar mezclas más económicas, en lugares donde se espere tráfico liviano, utilizando agregados con valores menores de fricción interna.

La fuerza ligante de la cohesión aumenta, con aumentos en la frecuencia de carga del tráfico. La cohesión también aumenta, a medida que la viscosidad del asfalto aumenta, o a medida que la temperatura del pavimento disminuye. *Adicionalmente, y hasta cierto nivel, la cohesión aumenta con aumentos en el contenido de asfalto.* Cuando se sobrepasa este nivel, los aumentos en el contenido de asfalto producen una película demasiado gruesa sobre las partículas de agregado, lo cual resulta en pérdida de fricción entre partículas. Existen muchas causas y efectos asociados con una estabilidad insuficiente en el pavimento.

Tabla Nº4: Causas y efectos de inestabilidad en el pavimento

Causas	Efectos
Exceso de asfalto en la mezcla	Ondulaciones, ahuellamientos y afloramiento o exudación
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla	Baja resistencia durante la compactación y posteriormente, durante un cierto tiempo; dificultad para la compactación.
Agregado redondeado sin, o con pocas, superficies trituradas.	Ahuellamiento y canalización

Fuente: Tesis Ingeniería, Universidad de El Salvador
Elaboración: Los autores

2.3.2 Durabilidad

La durabilidad de un pavimento es su habilidad para resistir factores, tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades de asfalto (polimerización y oxidación), y separación de las películas de asfalto. Estos factores pueden ser el resultado de la acción del clima, el tránsito o una combinación de ambos.

Generalmente, la durabilidad de una mezcla puede ser mejorada en tres formas: usando la mayor cantidad posible de asfalto, usando

una graduación densa de agregado resistente a la separación, y diseñando y compactando la mezcla, para obtener la máxima impermeabilidad.

La mayor cantidad posible de asfalto aumenta la durabilidad, porque las películas gruesas de asfalto no envejecen o endurecen tan rápido, como lo hacen las películas delgadas. Por lo tanto, el asfalto retiene por más tiempo sus características originales. Además, el máximo contenido posible de asfalto sella eficazmente un gran porcentaje de vacíos interconectados en el pavimento, haciendo difícil la penetración del aire y del agua. Por supuesto, se debe dejar un cierto porcentaje de vacíos en el pavimento para permitir la expansión del asfalto en los tiempos cálidos.

Una graduación densa de agregado firme, duro, a la separación, contribuye de tres maneras a la durabilidad del pavimento. Una graduación densa proporciona un contacto más cercano entre las partículas del agregado, lo cual mejora la impermeabilidad de la mezcla. Un agregado firme y duro, resiste la desintegración bajo las cargas del tránsito. Un agregado resistente a la separación, resiste la acción del agua y el tránsito, las cuales tienden a separar la película de asfalto de las partículas de agregado, conduciendo a la desintegración del pavimento. La resistencia de una mezcla asfáltica a la separación puede ser mejorada, bajo ciertas condiciones, mediante el uso de compuestos adhesivos, o rellenos como la cal hidratada. Existen muchas causas y efectos con una poca durabilidad del pavimento.

Tabla N°5: Causas y efectos de una poca durabilidad en el pavimento

Causas	Efectos
Bajo contenido de asfaltos	Endurecimiento rápido del asfalto y desintegración por pérdida de agregado.
Alto contenido de vacíos debido al diseño o a la falta de compactación	Endurecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración

Fuente: Tesis Ingeniería, Universidad de El Salvador

Elaboración: Los autores

2.3.3 Impermeabilidad

La impermeabilidad de un pavimento es la resistencia al paso de aire y agua hacia su interior, o a través de él. *Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada*, y es así como gran parte de las discusiones sobre vacíos en las secciones de diseño de mezcla, se relaciona con la impermeabilidad. Aunque el contenido de vacíos es una indicación del paso potencial de aire y agua a través de un pavimento, la naturaleza de estos vacíos es muy importante que su cantidad.

El grado de impermeabilidad está determinado por el tamaño de los vacíos, sin importar si están o no conectados, y por el acceso que tienen a la superficie del pavimento.

Aunque la impermeabilidad es importante para la durabilidad de las mezclas compactadas, virtualmente todas las mezclas asfálticas, usadas en la construcción de carreteras, tienen cierto grado de impermeabilidad. Esto es aceptable, siempre y cuando la permeabilidad esté dentro de los límites especificados.

Tabla N°6 Causas y efectos de la permeabilidad

Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto	Las películas delgadas de asfalto causarán tempranamente, un envejecimiento y una desintegración de la mezcla
Alto contenido de vacíos	El agua y el aire pueden entrar fácilmente en el pavimento, causando oxidación y desintegración de la mezcla.
Compactación inadecuada	Resultará en vacíos altos en el pavimento, lo cual conducirá a la infiltración de agua y baja estabilidad.

Fuente: Tesis Ingeniería, Universidad de El Salvador

Elaboración: Los autores

2.3.4 Trabajabilidad

La trabajabilidad está descrita por la facilidad con que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar; aquella con mala trabajabilidad son difíciles de colocar y compactar. La trabajabilidad puede ser mejorada, modificando los parámetros de la mezcla, el tipo de agregado, y/o la granulometría.

Las mezclas gruesas (mezclas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso) tienen una tendencia a segregarse durante su manejo; y también pueden ser difíciles de compactar. A través de mezclas de prueba en el laboratorio puede ser posible adicionar agregado fino, y tal vez asfalto, a una mezcla gruesa, para volverla más trabajable. En tal caso se deberá tener cierto cuidado para garantizar que la mezcla modificada cumpla con los otros criterios de diseño, tales como contenido de vacíos y estabilidad.

Un contenido demasiado alto de relleno, también puede afectar la trabajabilidad. Puede ocasionar que la mezcla se vuelva muy viscosa, haciendo difícil su compactación.

La trabajabilidad es especialmente importante en sitios donde se requiere colocar y rastrillar a mano cantidades considerables de mezcla, como por ejemplo alrededor de tapas de alcantarillados, curvas pronunciadas y otros obstáculos similares. Es muy importante usar mezclas trabajables en dichos sitios.

Las mezclas que son fácilmente trabajables o deformables, se conocen como mezclas tiernas. Las mezclas tiernas son demasiado inestables para ser colocadas y compactadas apropiadamente. Usualmente son el producto de una falta de relleno mineral, demasiada arena de tamaño mediano, partículas y redondeadas de agregado, y/o demasiada humedad en la mezcla.

Aunque el asfalto no es la principal causa de los problemas de trabajabilidad, si tienen algún efecto sobre esta propiedad. Debido a que la temperatura de la mezcla afecta la viscosidad del asfalto, una temperatura demasiado baja hará que la mezcla sea poco trabajable, mientras que una temperatura demasiado alta, podrá hacer que la mezcla se vuelva tierna. El grado y el porcentaje de asfalto también pueden afectar la trabajabilidad de la mezcla.

Tabla N°7: Causas y efectos de problemas en la trabajabilidad

Causas	Efectos
Tamaño máximo de partícula: grande	Superficie áspera, difícil de colocar.
Demasiado agregado grueso	Puede ser difícil de compactar.
Temperatura muy baja de mezcla	Agregado sin revestir, mezcla poco durable, superficie áspera, difícil de compactar.
Demasiada arena de tamaño medio	La mezcla se desplaza bajo la compactadora y permanece tierna o blanda.
Bajo contenido de relleno mineral	Mezcla tierna, altamente permeable
Alto contenido de relleno mineral	Mezcla muy viscosa, difícil de manejar, poco durable

Fuente: Tesis Ingeniería, Universidad de El Salvador

Elaboración: Los autores

2.3.5 Flexibilidad

La flexibilidad es la capacidad de un pavimento asfáltico para acomodarse sin que se agriete, a movimiento y asentamientos graduales de la subrasante. La flexibilidad es una característica deseable en todo pavimento asfáltico, debido a que virtualmente todas las subrasantes se asientan (bajo cargas) o se expanden (por expansión del suelo).

Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto es generalmente, más flexible que una mezcla de bajo contenido de asfalto. Algunas veces los requerimientos de flexibilidad entran en conflicto con los requisitos de estabilidad, de tal manera que se debe buscar el equilibrio de los mismos.

2.3.6 Resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga de un pavimento es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Se ha demostrado, por medio de la investigación, que los vacíos (relacionados con el contenido de asfalto) y la viscosidad, tienen un efecto considerable sobre la resistencia a la fatiga. A medida que el porcentaje de vacíos en un pavimento aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento disminuye. Asimismo, un pavimento que contiene asfalto que se ha envejecido y endurecido considerablemente, tiene menor resistencia a la fatiga.

Tabla N°8 Causas y efectos de una mala resistencia a la fatiga

Causas	Efectos
Bajo contenido de asfalto	Agrietamiento por fatiga
Vacíos altos de diseño	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Falta de compactación	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga
Espesor inadecuado de pavimento	Demasiada flexión seguida por agrietamiento por fatiga

Fuente: Tesis Ingeniería, Universidad de El Salvador

Elaboración: Los autores

Las características de resistencia y espesor de un pavimento, y la capacidad de soporte de la subrasante, tienen mucho que ver con la vida del pavimento y con la prevención del agrietamiento asociado con cargas de tránsito. Los pavimentos de gran espesor sobre subrasantes resistentes no se flexionan tanto, bajo las cargas, como los pavimentos delgados o aquellos que se encuentran sobre subrasantes débiles.

2.3.7 Resistencia al deslizamiento

Resistencia al deslizamiento, es la habilidad de una superficie de pavimento de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie este mojada. Para obtener buena resistencia al deslizamiento, el neumático debe ser capaz de mantener contacto con las partículas de agregado en vez de rodar sobre una película de agua en la superficie del pavimento (hidroplaneo). La resistencia al deslizamiento se mide en terreno con una rueda normalizada bajo condiciones controladas de humedad en la superficie del pavimento, y a una velocidad de 65 km/hr (40 min/hr).

Tabla N°9: Causas y efectos de poca resistencia al deslizamiento

Causas	Efectos
Exceso de asfalto	Exudación, poca resistencia al deslizamiento
Agregado mal graduado o con mala textura	Pavimento liso, posibilidad de hidroplaneo
Agregado pulido en la mezcla	Poca resistencia al deslizamiento

Fuente: Tesis Ingeniería, Universidad de El Salvador

Una superficie áspera y rugosa de pavimento, tendrá mayor resistencia al deslizamiento que una superficie lisa. La mejor resistencia al deslizamiento se obtiene con un agregado de textura áspera, en una mezcla de gradación abierta y con tamaño máximo de 9.5 mm (3/8 pulgada) a 12.5 mm (1/2 pulgada). Además de tener una superficie áspera, los agregados deben resistir el pulimiento bajo el tránsito. Los agregados calcáreos son más susceptibles al pulimiento que los agregados silíceos. Las mezclas inestables que tienden a deformarse o a exudar (flujo de asfalto a la superficie) presentan problemas graves de resistencia al deslizamiento.

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

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

- Asfalto suficiente para asegurar un pavimento durable a través del total recubrimiento de los agregados de las partículas, bajo una adecuada compactación.
- Estabilidad suficiente de la mezcla para satisfacer los requerimientos de servicio y las demandas del tráfico sin deformación o desplazamiento.

- Porcentaje de huecos en la mezcla total compactada, suficiente para absorber la consolidación del amasado del tránsito.
- Adecuada trabajabilidad para permitir una operación de construcción eficiente en la colocación de la mezcla para pavimentación.

2.4 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 y países latinos, para mezclas en caliente es el *Método Marshall*; el cual está basado en el empleo de ensayos mecánicos.

El Método Marshall es aplicable a mezclas asfálticas 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 2 ½" 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 preparan 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 7/8" 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 N° 6: Equipos para laboratorio. Martillo Marshall

Fuente: JMR EQUIPOS

Las dos características principales de este método de diseño son el análisis de Densidad-Huecos y en ensayo de Fluidez y estabilidad de 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 ensayo Marshall, la misma que está diseñada para aplicar la carga a las probetas a través de unas mordazas semicirculares, y 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.

2.5 Asfaltos modificados

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 visco elástico, presenta cambios continuos en sus características según el rango de temperaturas de operación: es rígido a bajas temperaturas y fluido a altas temperaturas. El principal objetivo, al utilizar agentes modificadores en el cemento asfáltico, es lograr propiedades no obtenidas en los asfaltos producidos con técnicas convencionales, principalmente las que tienen que ver con la sensibilidad térmica.

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

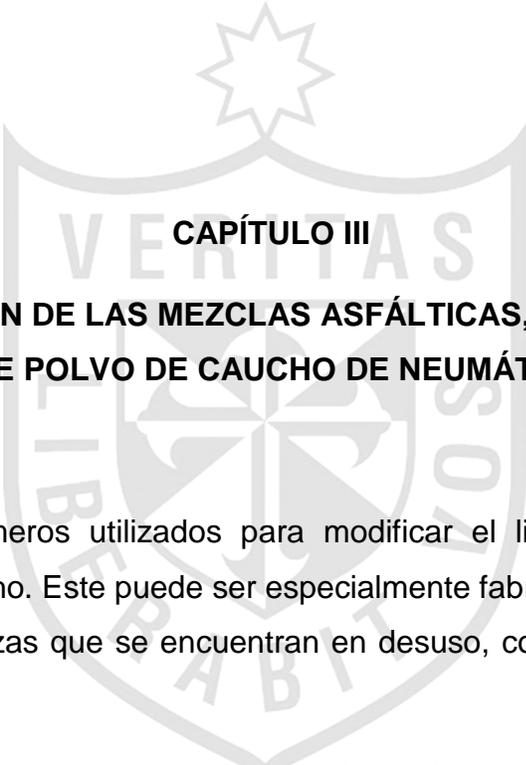
- Aumentar la durabilidad del pavimento
- Disminuir la susceptibilidad térmica, de modo que se aumente la rigidez a altas temperaturas de servicio, mejorando la resistencia de las mezclas a la deformación permanente y, por otro lado, se reduzca la fragilidad del asfalto expuesto a bajas temperaturas, previniendo la fisuración térmica.
- Aumentar la resistencia a la 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 ligante asfáltico.

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





CAPÍTULO III

MODIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS, MEDIANTE LA INCOPORACIÓN DE POLVO DE CAUCHO DE NEUMÁTICOS RECICLADOS

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 que se encuentran en desuso, como es el caso de los neumáticos.

Antes de centrarnos en la problemática, objeto de esta investigación, iremos al origen para conocer el producto de partida, “el neumático”.

3.1 El neumático

En el año 1880, el norteamericano Charles Goodyear, descubre en forma accidental el proceso de vulcanización, con el que se da al caucho la resistencia y solidez necesaria para fabricarlo. Esto consistió en mezclar el caucho con azufre y luego calentada, la goma endurecía y tomaba la calidad del cuero, y no se disolvía con tanta facilidad en petróleo y otras soluciones. A este proceso se le llamó vulcanización, que proviene de Vulcano, dios romano del fuego.

En el año 1887, el escocés, John Boyd Dunlop, desarrolló el primer neumático con cámara de aire. Dunlop infló unos tubos de goma con una bomba de aire. Después envolvió los tubos de goma con una lona para protegerlos y los pegó sobre las llantas de las ruedas de un triciclo. Hasta entonces, la mayoría de las ruedas tenían llantas con goma maciza, pero los neumáticos permitían una marcha notablemente más suave. El desarrollo del neumático con cámara de Dunlop, llegó en un momento crucial durante la expansión del transporte terrestre, con la construcción de nuevas bicicletas y automóviles.

En realidad, más allá de cauchos naturales y sintéticos, aquí se conjugan las cualidades de más de 200 materias distintas necesarias, para obtener el neumático que todos conocemos. Negros de carbono, sílices, azufres, plastificantes, vulcanizantes y también hilos metálicos o textiles como el poliéster, el rayón, el kevlar.

Tabla N°10: Análisis químico del neumático

Elemento	Porcentaje
Carbono (C)	70
Hidrógeno (H)	7
Azufre (S)	1 - 3
Cloro (Cl)	0.2 - 0.6
Fierro (Fe)	15
Óxido de Zinc (ZnO)	2
Dióxido de Silicio (SiO ₂)	5
Cromo (Cr)	97 ppm
Níquel (Ni)	77 ppm
Plomo (Pb)	60 – 760 ppm
Cadmio	5 – 10
Talio	0.2 – 0.3 ppm

Fuente: Combustibles alternativos, Holderbank 1997

Elaboración: Los autores

Estas diversas materias primas se convertirán en un sinnúmero de elementos, productos planos o perfilados, telas metálicas o textiles, aros. El conjunto de estos productos, darán al neumático sus propiedades de elasticidad, resistencia al desgaste, adherencia y longevidad

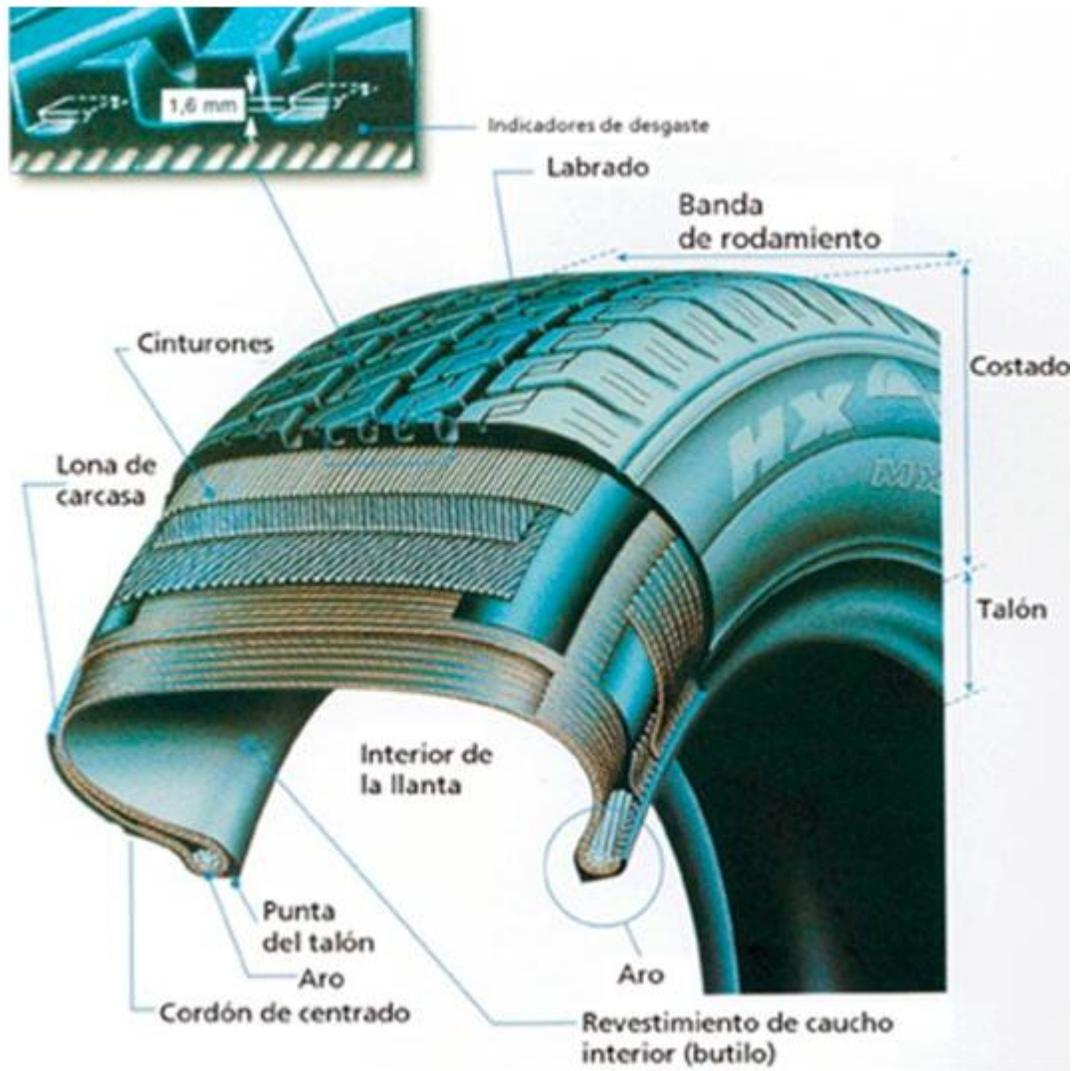


Figura N°7: Viaje al interior del neumático

Fuente: Goodyear

3.2 Características de los neumáticos

Los principales componentes de los neumáticos, son cauchos naturales y sintéticos (SBS, SBR) y negro de humo.

El caucho natural se elabora a partir de látex, que es una resina blanca lechosa que se da en el árbol Hevea, más conocido como árbol de 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 estos 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 este, como por ejemplo, mayor resistencia a la abrasión, alta adherencia al suelo y alta resistencia a la temperatura, más aún que el caucho natural.

Los tipos de caucho más empleados en la fabricación de los neumáticos son:

- Cauchos naturales (NR)
- Estireno – Butadieno (SBR)
- Polibutadienos (BR)
- 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 eso 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 necesitarán una gran cantidad de tiempo para su degradación.

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 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.

Tabla N°11: Composición y características entre automóviles y camiones

Composición y características	Autos camionetas	Camiones buses
Caucho natural	14 %	27 %
Caucho sintético	27 %	14 %
Negro de humo 28 %	28 %	28 %
Acero	14 – 15 %	14 – 15 %
Fibra textil, suavizantes, óxidos, antioxidantes	16 – 17 %	16 – 17 %
Peso promedio	8.6 kg	45.5 kg
volumen	0.06 m3	0.36 m3

Fuente: Rubber Manufacturers Association

Elaboración: Los autores

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

El negro 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.

Tabla N°12: Composición aproximada de un neumático de automóvil en cuanto a su peso en %

Caucho	62.0
Betún	3.0
Óxido de zinc	3.0
Negro de humo	25.0
Ácido esteartico	2.5
Alquitrán pino	1.3
Azufre	2.0
Antioxidante	0.6
Acelerador	0.6
total	100.0

Fuente: www.goodyear.pe

Elaborado por: Goodyear

3.3 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.

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

Tabla N°13: Parque Vehicular total de circulación al 2012 en el Perú

NFU: neumáticos fuera de uso

AÑO	Tipo de Neumático	Cantidad de Vehículos / und.	Peso del NFU(kg.)	Neumático por vehículo	Recambio anual medio	Unidades de NFU por año	Cant. De Ton. Por año
2012	CAMIONES	171,407.00	55	10	4	685,628.00	37,709.54
	PASAJEROS	377,572.00	10	4	1.33	502,170.76	5,021.71
	PARTICULARES	1,588,858.00	7	4	0.8	1,271,086.40	8,897.60
2012	TOTAL	2,137,837.00				2,458,885.16	51,628.85

Fuente: Ministerio de transportes 2012

En Perú, no existe un método específico de reciclaje para los neumáticos. Las soluciones que se dan a mayor escala en el Perú, movidas por la carencia y alentados por nuestra extraordinaria creatividad emprendedora, son convertir los mismos neumáticos en ojotas o en sandalias, para usarlas en los trabajos de campo. El asunto no queda allí, porque también, se usan en los parachoques de camiones y de tráileres, se ponen como topes para botes y puertos. Se convierten en depósitos para cervezas con hielo incluido, y se ponen como hitos para circuitos de karts o motocross. Las rellenas de cemento las usan como bases para postes o astas de banderas. Las utilizan para fabricar souvenirs y objetos, o las ponen en parques infantiles pintados de colores, para las actividades recreativas de las personas.

Actualmente, 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.

3.3.1 Proceso ambiental

La trituración ambiental puede ser lograda de dos modos: por granulación y por molienda. Este es un proceso puramente mecánico, donde el material entra en un molino o granulador, a temperatura ambiente, la cual aumenta considerablemente durante el proceso, debido a la fricción generada al ser desgarrado.

Los granuladores reducen el tamaño del caucho, mediante corte por la acción de cuchillas. El tamaño del producto es controlado por tamices ubicados dentro de la máquina, los cuales pueden ser cambiados para variar el tamaño del producto final.

Otra manera, es pasar el material por una serie de molinos, en los que los primarios, secundarios y finales son muy similares, y operan básicamente bajo el mismo principio. Estos usan dos rodillos grandes que van rodando, con dentaduras que cortan el material, ubicadas en uno o ambos rodillos. La diferencia está en la configuración que se les da; estos funcionan cara a cara, muy juntos y con distintas velocidades. El tamaño del producto es controlado por el espacio libre entre los rodillos. El caucho, por lo general, es pasado por 2 o 3 molinos para alcanzar varias reducciones de tamaño del grano, y de esta manera, poder separarlo de los otros componentes, como fibras y acero que se encuentran en los neumáticos. Las partículas de caucho producidas en molinos tienen formas típicas alargadas, angostas y con una alta superficie de área.

El caucho obtenido por el proceso ambiental, se clasifica según el tamaño de las partículas: en neumáticos cortados, neumáticos triturados en astillas, caucho en polvo y caucho en migas.

En líneas generales, los productos resultantes de este proceso son de alta calidad y limpio de todo tipo de impurezas, lo que facilita la utilización de este material, en nuevos procesos y aplicaciones.

3.3.2 Trituración criogénica

Este proceso se refiere al empleo de nitrógeno líquido u otros materiales o métodos para congelar trozos de neumáticos o trozos de caucho, antes de la reducción de tamaño; volviéndolo frágil y quebradizo como un cristal a temperaturas por debajo de $-62\text{ }^{\circ}\text{C}$.

El acero es separado mediante el empleo de imanes. La fibra textil es removida por medio de aspiración y selección. El material resultante presenta aspecto brillante y limpio, con superficies fracturadas y poco contenido de acero y fibra, debido a que la fragmentación ocurre por las uniones entre estos materiales y el caucho.

El empleo de temperaturas criogénicas puede ser aplicado en cualquier etapa, para la reducción de tamaño de los trozos de los neumáticos. Este método requiere instalaciones muy complejas, lo que hace que sea poco rentable económicamente.

Al comparar los granos obtenidos por la trituración criogénica y ambiental, se observa que las partículas para el primer método, son relativamente lisas y ovaladas, y para el proceso ambiental, son irregulares en cuanto a su forma y textura superficial. En relación a este aspecto, cabe destacar que la forma final obtenida de los granos de caucho, influye en la reacción con el cemento asfáltico; pues para partículas con alta superficie de área, como las obtenidas con el proceso ambiental, la reacción con el ligante es rápida; en

cambio, para las partículas obtenidas a través de la trituración criogénica, al tener superficie planas y limpias, se disminuye el nivel de reacción con el cemento asfáltico.

Este estudio concluye con cuatro posibles alternativas, que mejor se acomodan a nuestro medio para el uso de neumáticos reciclados. Las de mayor viabilidad son las dos últimas, ya que las dos primeras, generan emisión de compuestos orgánicos volátiles por la incineración de las mismas. Estas posibles alternativas son:

- Aprovechamiento energético y materia prima para hornos en la industria cementera, como fundamento en el uso de neumáticos reciclados y combustible alternativo al carbón en función de su potencial calorífico.
- Aprovechamiento energético en termoeléctricas, utilizando el poder calorífico de neumáticos reciclados, para generar energía eléctrica.
- Su utilización como materia prima, para la producción de pavimentos asfálticos, con base en la adición del polvo de caucho pulverizado, durante la fabricación del mismo.
- Suministro de materia prima, para productos de caucho, entre los cuales están los moldeados, las alfombras, entre otros.

3.4 Aplicación de polvo de caucho de neumático en las mezclas asfálticas

El caucho proveniente de los neumáticos desechados, puede ser incorporado en las mezclas asfálticas por medio de tres métodos diferentes denominados: Proceso por Vía Húmeda, Proceso por Vía Seca y Proceso en Refinería.

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. En el Proceso en Refinería, la mezcla del caucho con el

cemento asfáltico se realiza en la planta productora de asfalto, para luego transportarlo a obra en donde se combina con los áridos para producir la mezcla asfáltica. Cada proceso es utilizado, dependiente del producto que se quiera obtener.

A continuación, se muestra la terminología asociado al uso del polvo de caucho de neumático, en mezclas asfálticas:

Tabla N°14: Terminología asociada con el uso del caucho en mezclas asfálticas

Material	Vía	Producto
Granos de caucho	Húmeda	Asfalto modificado con caucho o Asfalto – Caucho
	Seca	Mezcla asfáltica mejorada con caucho

Fuente: Tesis Ingeniería, *Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desecho de llantas.*

3.4.1 Proceso vía húmeda

En este proceso, se unen los granos del polvo de caucho con el cemento asfáltico, para producir una mezcla modificada llamada asfalto – caucho, que es usada de la misma manera que un ligante modificado.

La fabricación de asfalto – caucho, consiste en la mezcla de los granos de caucho, usualmente de tamaño máximo 0.85 mm, con el cemento asfáltico en un estanque con agitación. Generalmente, el porcentaje de adición es entre 18 – 24% con respecto al peso del ligante.

Para promover la unión del asfalto y el caucho, es necesario establecer una temperatura y un tiempo de reacción dentro del estanque. Usualmente, la mezcla es formulada a temperaturas entre 180 – 210 °C por 1 a 4 horas.

Dentro de los requerimientos del proceso húmedo, se establece que el estanque agitador debe estar en terreno, ubicado junto a la planta asfáltica.

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.



Figura N °8: Esquema de fabricación de asfalto caucho por vía húmeda.

Fuente: www.rubberizedasphalt.org/how.htm

Terminado el mezclado del asfalto – caucho con los agregados pétreos, el concreto asfáltico obtenido se transporta al lugar de pavimentación y se coloca por medio de una finisher tradicional. Para la compactación, generalmente se utiliza un rodillo liso doble tambor.

El ligante asfáltico modificado con polvo de caucho mediante el proceso húmedo, también puede ser utilizado como riego. El más común es el llamado SAM (Stress Absorbing Membrane) que evita la reflexión de grietas. Cuando el riego SAM es puesto entre capas es llamado SAMI (Stress Absorbing Membrane Interlayer), este riego de liga, es recomendado cuando la mezcla asfalto – caucho se coloca sobre pavimento antiguo de hormigón.

3.4.1.1 Modificación del ligante

El polvo de caucho, al mezclarse con el cemento asfáltico, reacciona con este, 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 de 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 eso que debe ser chequeada a diferentes intervalos de tiempo durante el mezclado y el tiempo de reacción, hasta obtener la viscosidad requerida.

3.4.2 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 un 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 esta caliente durando 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 de 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 este 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 este 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 se puede hacer a través del ensayo de Inmersión – Compresión, que mide el efecto del agua sobre la cohesión de las mezclas asfálticas compactadas.



Figura Nº 9: Esquema de fabricación de asfalto caucho por vía seca

Fuente: www.rubberizedasphalt.org/how.htm

El polvo 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 y 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 extendedora tradicional.

3.4.2.1 Tecnologías para el uso del caucho reciclado mediante vía seca.

- **PlusRide.** Esta tecnología fue originalmente desarrollada en Suecia a finales de los años 1960, y registrada en los Estados Unidos bajo el nombre comercial PlusRide por la firma EnviroTire. El caucho reciclado es agregado a la mezcla en proporciones que van de 1 a 3 por ciento del peso total de los agregados. El polvo de caucho utilizado es grueso 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.
- **Genérica.** Este sistema fue desarrollado por el Dr. Barry Takalhou 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 PlusRide, la granulometría del caucho se divide en dos fracciones en la que la parte fina se encarga de interactuar con el cemento asfáltico mientras que la parte gruesa entra a comportarse como un agregado elástico en la mezcla asfáltica.

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

- **Convencional.** Esta tecnología fue desarrollada en España para usar el caucho reciclado en la mejora de las 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.

3.5 Características de las mezclas asfálticas en caliente modificadas con caucho

Existen distintas tecnologías de incorporación de polvo de neumáticos en la mezcla asfáltica, pero existen ciertas ventajas que son comunes para ambos casos. Entre estas ventajas, se encuentra la mejora en la resistencia a las deformaciones plásticas.

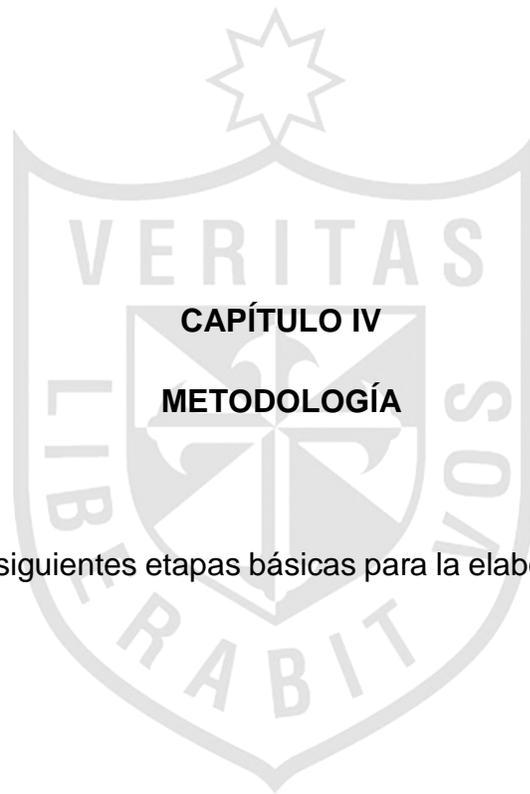
En términos generales, puede decirse que cuanto más caucho se incorpora, es mayor el contenido del ligante en la mezcla asfáltica y mayor es la resistencia a la fatiga y a la reflexión de grietas.

Entre los principales beneficios que se obtienen usando asfalto – caucho como ligante modificado mediante Vía Húmeda, está la reducción de la susceptibilidad térmica, además de mejorar el comportamiento a fatiga y al envejecimiento debido a los altos contenidos de ligante asfalto – caucho (entre 6.5 y 7.5 % con respecto a los agregados), sin que se vea perjudicada la resistencia a las deformaciones plásticas. Cabe destacar que al usar caucho como modificador del ligante, aumenta la viscosidad, lo que permite mayor flexibilidad a bajas temperaturas y mejor estabilidad a altas temperaturas.

Dentro de las desventajas del método por Vía Húmeda, se tiene que poseer un alto costo inicial, debido a que es necesario incorporar equipos especiales en el proceso de producción y de mezclado del ligante con el caucho. Por otro lado, el aumento de la viscosidad produce dificultades en la manipulación y en la aplicación, junto con esto se requieren mayores temperaturas de mezclado y de compactación.

Aunque en el proceso por Vía Seca, la reacción entre el caucho y el cemento asfáltico es mejor que para el ligante asfalto – caucho obtenido por Vía Húmeda, si se encuentra la temperatura y tiempo de digestión adecuada, se obtendrán propiedades similares en ambas mezclas.

Según la literatura, el uso de partículas gruesas de caucho como un agregado en la mezcla asfáltica puede mejorar el desempeño de la misma. Las partículas de caucho que quedan expuestas en las superficie del pavimento tienen una función importante al impedir que los neumáticos de los vehículos se deslicen sobre el pavimento, al ofrecer un mejor agarre, y las que quedan dentro del cuerpo de la mezcla, ayudan a retardar el fisuramiento de esta, por absorción de los esfuerzos y obstaculizar la propagación de la fisura.



Se presentan las siguientes etapas básicas para la elaboración de este trabajo de grado.

4.1 Material

- Asfalto : Obtenido de la Refinería La Pampilla (REPSOL YPF)
- Agregados: Proveniente de la cantera Birrack N°2, procesado en la planta chancadora, de la Zona Industrial del km 09+010 lado izquierdo – Av. Néstor Gambetta, así como del cerro Esperanza.
- Polvo de caucho: Comprado por los autores de la tesis, proveniente del triturado de neumáticos, con fines de uso para grass sintético.

4.2 Métodos

- Recopilar información disponible sobre mezclas asfálticas con adición de caucho para una gradación MAC-2 o HUSO D5 y temas similares que nos puedan ayudar en la elaboración del proyecto.
- Investigar con mayor profundidad las bondades del caucho y sus beneficios ingenieriles.
- Evaluar el efecto de la adición del polvo de caucho en el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas en caliente.
- Para el estudio de la mezcla patrón se acogió granulometría tipo MAC-2 según la EG 2013, en la cual se reemplazará el contenido de finos por polvo de caucho.
- Elaboración de briquetas para desarrollar el método Marshall y obtener las conclusiones del trabajo.
- La adición del polvo de caucho se realizará solo con el porcentaje de 1 %



CAPÍTULO V

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Lo que se presenta a continuación, son todos los ensayos realizados para una correcta comparación entre mezclas asfálticas convencionales y con polvo de neumático, así como también la metodología seguida, donde se especifican las características de los materiales utilizados, y los criterios de selección de las mezclas asfálticas.

Para el estudio de la incorporación de caucho mediante vía seca, partiremos con una mezcla patrón, para comparar las variaciones de sus propiedades, si se incorpora los porcentajes establecidos. La mezcla patrón corresponderá a una mezcla trabajada para climas cálidos, con un cemento asfáltico 60-70 otorgado por la refinería Repsol, para trabajarla como una mezcla convencional MAC -2 , y como alternativa las gradaciones especificadas en la ASTM D 3515, según la EG 2013, Tabla 423 – 03.

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

5.1 Características de los materiales pétreos

5.1.1 Requerimientos de calidad de los agregados pétreos

Según la EG 2013 415.02, se denominará agregado grueso a la porción de agregado retenido en el tamiz de 4,75 m (N° 4); agregado fino a la porción comprendida entre los tamices de 4,75 mm y 75 µm (N° 4 y N° 200) y polvo mineral o llenante la que pase el tamiz de 75 µm (N° 200).

Los agregados provienen de la cantera Birrack N°2, procesado en la planta chancadora, de la Zona Industrial del km 09+010 lado izquierdo – Av. Néstor Gambetta, así como del cerro Esperanza.

A los materiales, se les realizaron los ensayos que busquen cumplir con los requerimientos para los agregados según la EG 2013, Tabla 423-01 y Tabla 423 – 02

Tabla N°15: Requerimientos para los Agregados Gruesos

Ensayos	Norma	Requerimiento	Resultado
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	MTC E 209	18% máx.	1.27 %
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	40% máx.	13.0%
Índice de Durabilidad	MTC E 214	35% mín.	51.0%
Partículas chatas y alargadas	MTC E 221	10% máx.	7.0%
Sales Solubles - Grueso	MTC E 219	0.5%	0.116%
Caras fracturadas: 1 cara fracturada 2 caras fracturadas	MTC E 210	Mín. 85% Mín. 50%	99.7% 96.4%

Elaboración: Los autores

Tabla N°16: Requerimientos para los Agregados finos

Ensayos	Norma	Requerimiento	Resultado
Equivalente de arena	MTC E 114	50% mín.	66.0%
Angularidad del agregado fino	MTC E 222	40% mín.	47.3%
Índice de plasticidad (Malla N° 40)	MTC E 111	NP	NP
Índice de plasticidad (Malla N°200)	MTC E 111	4 % Max.	1.82
Índice de durabilidad	MTC E 214	35% mín.	80.0%
Contenido de sales	MTC E 219	0.50 %	0.107%

Elaboración: Los autores

5.1.2 Análisis granulométrico de los agregados pétreos

La granulometría está definida como la distribución porcentual en masa de los distintos tamaños de partículas que constituyen el agregado pétreo. Este será determinado mediante el análisis granulométrico, el cual consiste en separar una muestra de agregado en fracciones de igual tamaño. A continuación, se presenta el resultado del análisis granulométrico, ensayo realizado de acuerdo a lo descrito en el MTC E 107 – 2000.

Tabla N°17: Granulometría de los agregados pétreos

Tamices		% que pasa		
ASTM	mm	Grava chancada de ¾ "	Arena chancada de 3/8 "	Arena Natural de 3/8 "
¾ "	20	100		
½ "	12.5	93.3	100	
3/8 "	10	59.9	100	100.0
¼ "	6.35	11.1	97.6	98.4
N°4	4.75	2.3	85.2	95.3
N°8	2.36	0.9	49.3	84.4
N°16	1.19		29.1	66.8
N°30	0.6		18.7	48.1
N°50	0.3		12.7	34.9
N°100	0.15		9.4	23.4
N°200	0.075		6.3	14.0

Elaboración: Los autores

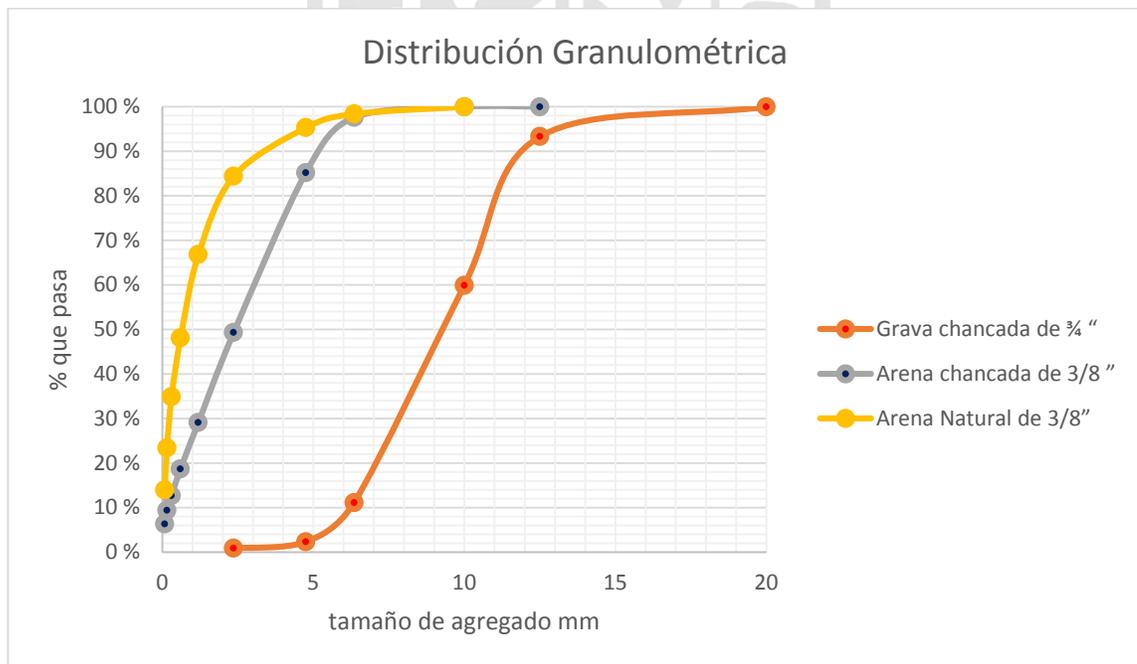


Figura N° 10: Curva de Análisis Granulométrico

Elaboración: Los autores

5.2 Características del cemento asfáltico

Para esta investigación se decidió trabajar con un cemento asfáltico 60 – 70. Este tipo es de uso convencional en la ciudad de Lima; muy usados en diferentes tipos de tránsito, ya sean livianos o pesados; así como para climas con temperaturas de entre 15 °C a más, según la EG 2013, Tabla 415-01

El cemento asfáltico fue otorgado por la Refinería La Pampilla (REPSOL), donde el producto es certificado cumpliendo las normas ASTM, AASHTO Y LA NTP, según la EG 2013, Tabla 415-02

La certificación del cemento asfáltico 60-70, tiene los siguientes resultados.

Tabla Nº 18: Certificación de cemento asfáltico

Propiedades	Resultados	Estado
PENETRACIÓN Penetración a 25 °C, 100 g, 5s, 1/10 mm	65	Cumple
DUCTILIDAD Ductilidad a 25°C, 5 cm/min, cm	>105	Cumple
VOLATILIDAD Punto de inflamación, °C	291.0	Cumple
SOLUBILIDAD Solubilidad en tricloroetileno, % m	99.83	Cumple
OTROS Índice de penetración Ensayo de la Mancha	-1.0 35% xileno, negativo	Cumple Cumple
ENSAYO DE PELICULA DELGADA Pérdida por calentamiento Penetración retenida Ductilidad del residuo	0.10 64.6 52.8	Cumple Cumple Cumple

Fuente: refinería La Pampilla

Elaboración: Los autores

5.3 Mezcla de áridos

Para la proporción de agregados se determinó a partir de los requisitos de graduación dados por el MTC, EG 2013, Tabla 423 – 03, cumpliendo alternativamente las gradaciones especificadas en la ASTM D 3515 e Instituto de Asfalto.

La granulometría será del tipo densa, lo que comúnmente es usada en carpetas de rodaduras. La granulometría guía según la EG 2013, será un MAC-2, cumpliendo alternativamente con el HUSO D5, de la ASTM nombrada.

Tabla N° 19: Granulometría densa de la mezcla patrón

Tamices		% que pasa			Mezcla	Tolerancia		Cumple
ASTM	mm	Grava chancada de ¾ “	Arena chancada de 3/8 ”	Arena Natural de 3/8”	100%	Min	Max	
¾”	20	100	100	100	100	100	100	SI
½ “	12.5	93.3	100	100	97.5	90	100	SI
3/8”	10	59.9	100	100.0	84.8	78.8	90.8	SI
¼”	6.35	11.1	97.6	98.4	64.9	58.9	70.9	SI
N°4	4.75	2.3	85.2	95.3	56.1	50.1	62.1	SI
N°8	2.36	0.9	49.3	84.4	39.3	34.3	44.3	SI
N°16	1.19	0.5	29.1	66.8	27.3	23.3	31.3	SI
N°30	0.6	0.5	18.7	48.1	18.8	15.8	21.8	SI
N°50	0.3	0.5	12.7	34.9	13.4	10.4	16.4	SI
N°100	0.15	0.4	9.4	23.4	9.1	6.1	12.1	SI
N°200	0.075	0.3	6.3	14.0	5.9	3.9	7.9	SI
Tipo de agregado		Grava chancada de ¾ “	Arena chancada de 3/8 ”		Arena Natural de 3/8”			
% de mezcla		38	38		24			

Fuente: refinería La Pampilla

Elaborado: Los autores

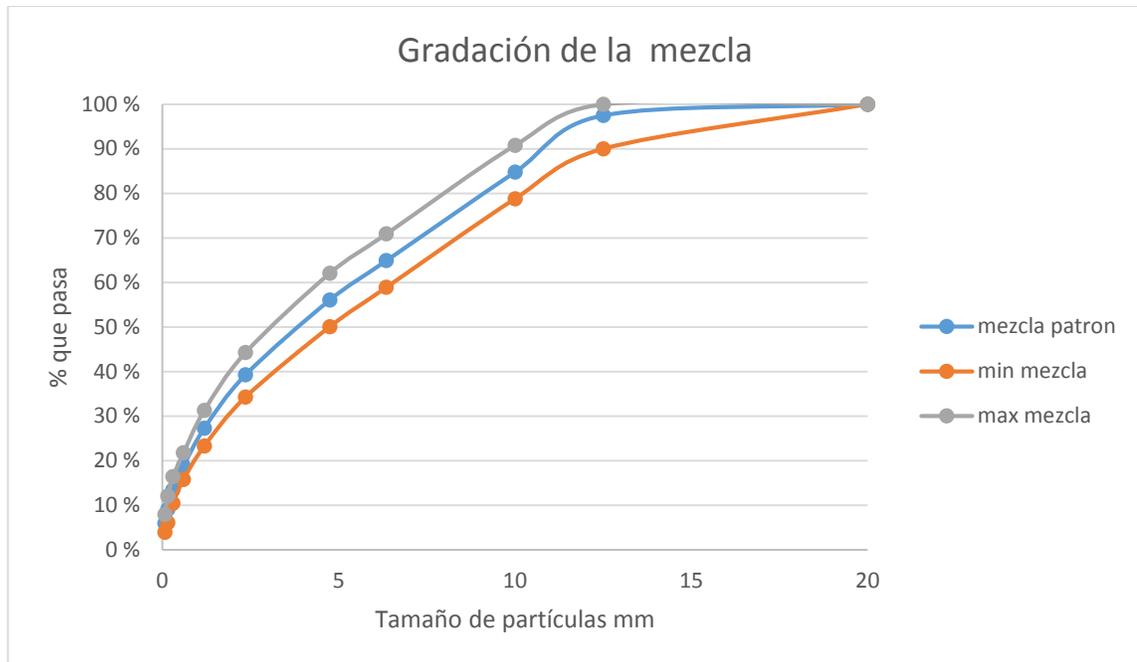


Figura Nº 11: Gradación de la mezcla

Elaborado: Los autores

En resumen, las proporciones para cada agregado son:

- Grava chancada de $\frac{3}{4}$ = 38 %
- Arena chancada de $\frac{3}{8}$ = 38 %
- Arena natural de $\frac{3}{8}$ = 24 %

5.4 Diseño Marshall de la mezcla patrón

Una vez determinada la proporción exacta de los agregados, el paso siguiente es encontrar el contenido óptimo de asfalto en la mezcla asfáltica. 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 determinarán el porcentaje óptimo de ligante en la mezcla.

Para la determinación del contenido óptimo de ligante en la mezcla patrón, se elaboraron mezclas con 06 diferentes contenidos de ligante. Los porcentajes utilizados fueron de 5.0 %, 5.5 %, 6.0 %, 6.5 %, 7.0 %, 7.5 %.

Las diferentes probetas Marshall se preparan según la norma ASTM D 1559, se realizarán con una energía de compactación de 75 golpes por cada cara de molde. Normalmente se aplican 50 golpes por cara en la compactación de la mezcla proyectada para tráfico medio y 75 golpes para tráfico pesado. En esta tesis la mezcla será diseñada para un tráfico pesado, ya que se ha visto conveniente diseñar mezclas modificadas para un tráfico pesado por ser una condición más exigente.

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



Figura N° 12: Probetas Marshall desmoldadas

Fuente: Los autores

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

Tabla N° 20: Cuadro Resumen de ensayo Marshall

Asfalto 60-70	Densidad	Vacíos de mezcla	V.M.A	Vacíos llenos de asfalto	Estabilidad	Flujo	Índice de rigidez
%	Gr/cc	%	%	%	kg	mm	Kg/cm
5.0	2.343	6.9	17.2	60.0	1693	4.4	3810
5.5	2.384	4.4	16.2	73.0	1871	4.1	4513
6.0	2.401	3.2	16.1	80.4	1859	4.3	4298
6.5	2.416	1.5	16.0	90.8	1871	5.1	3682
7.0	2.398	1.0	17.0	94.1	1634	5.2	3140
7.5	2.384	1.2	18.0	93.6	1451	6.3	2318

Elaboración: Los autores

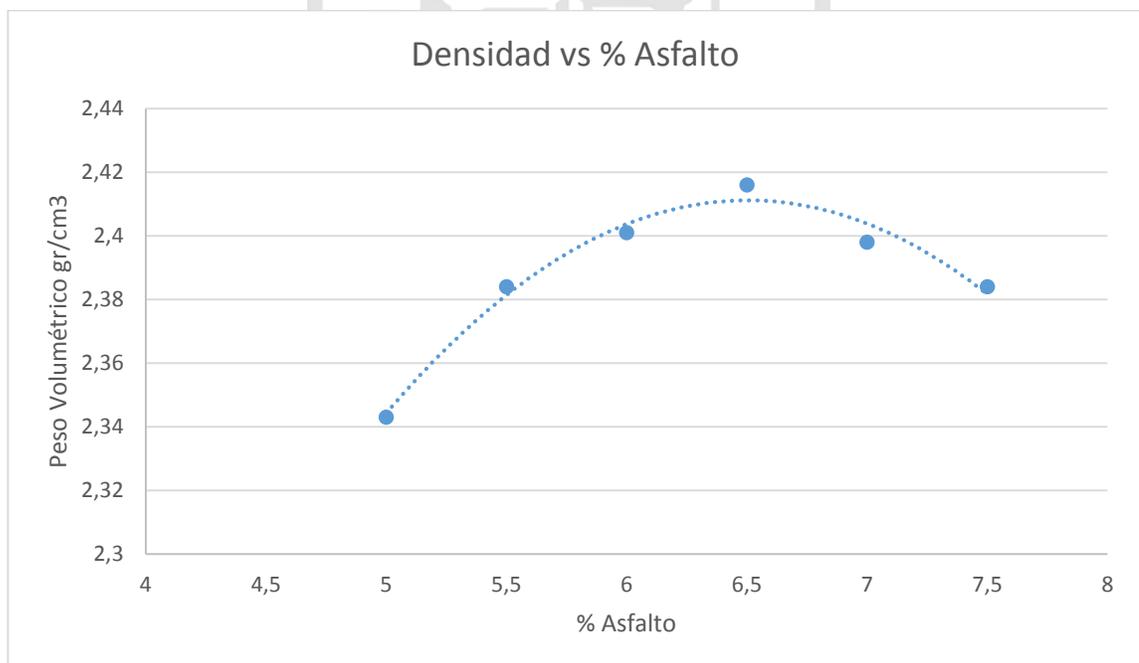


Figura N° 13: Variación de la Densidad respecto al % de asfalto para mezcla patrón

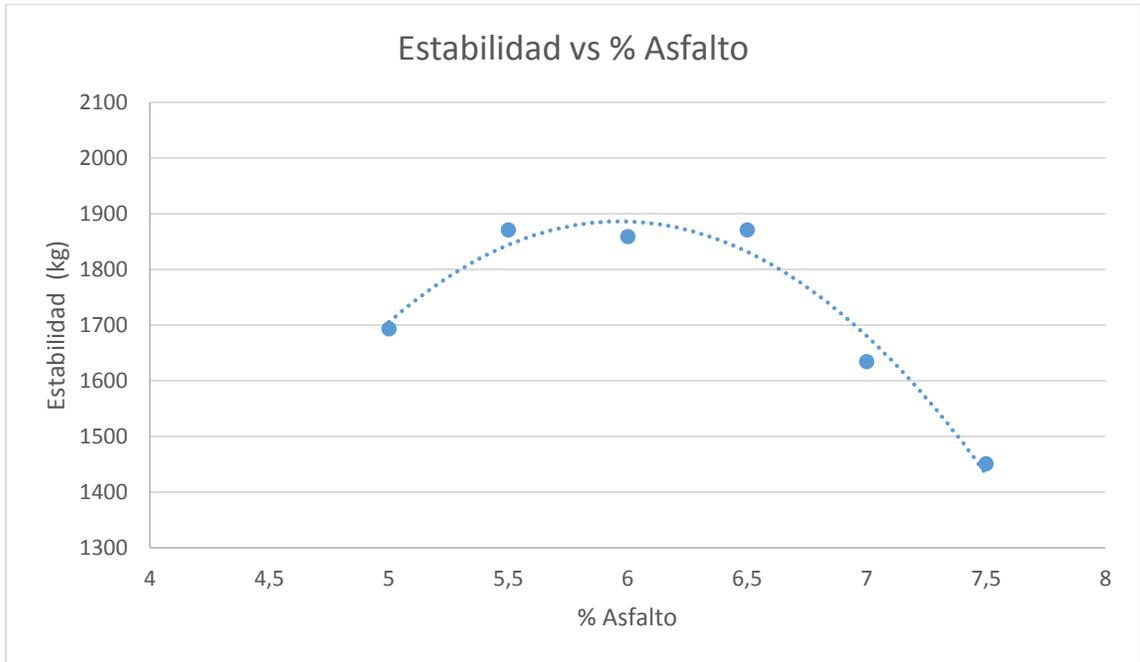


Figura N° 14: Variación de la Estabilidad respecto al % de asfalto para mezcla patrón

Elaboración: Los autores

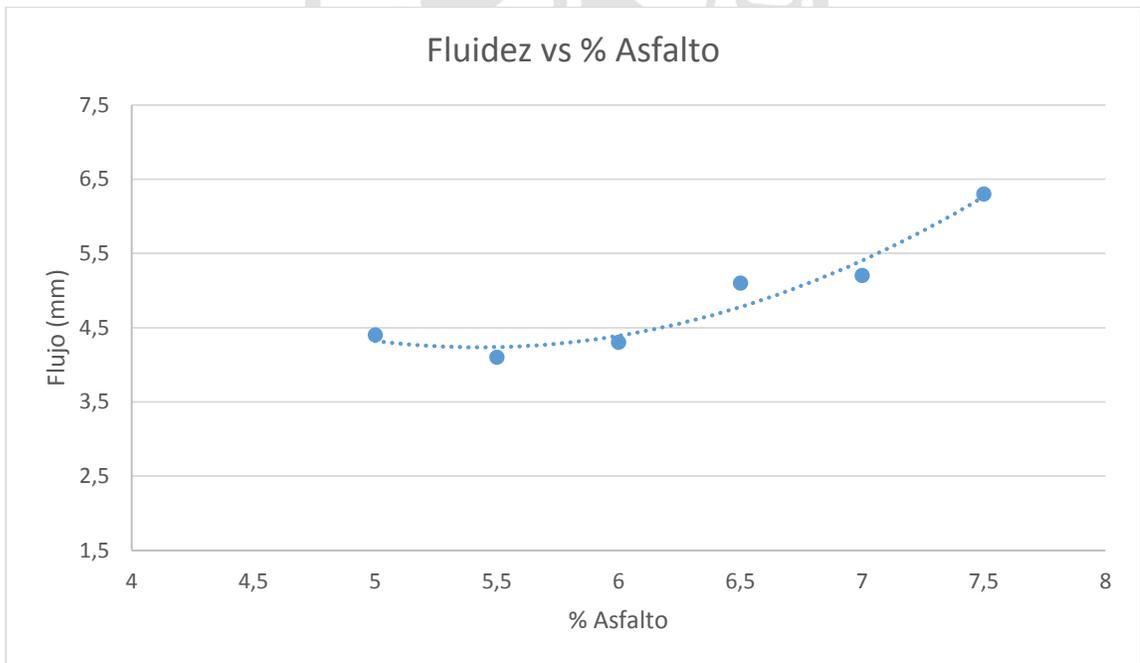


Figura N° 15: Variación de la fluidez respecto al % de asfalto para mezcla patrón

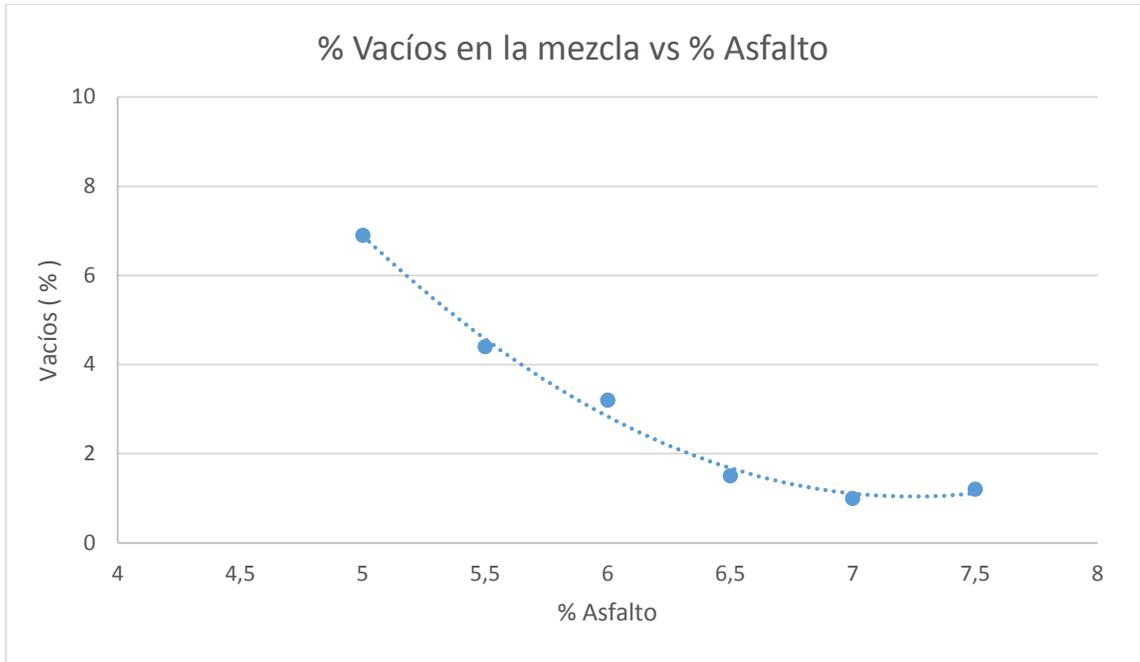


Figura N° 16: Variación % vacíos en la mezcla respecto al % de asfalto para mezcla patrón

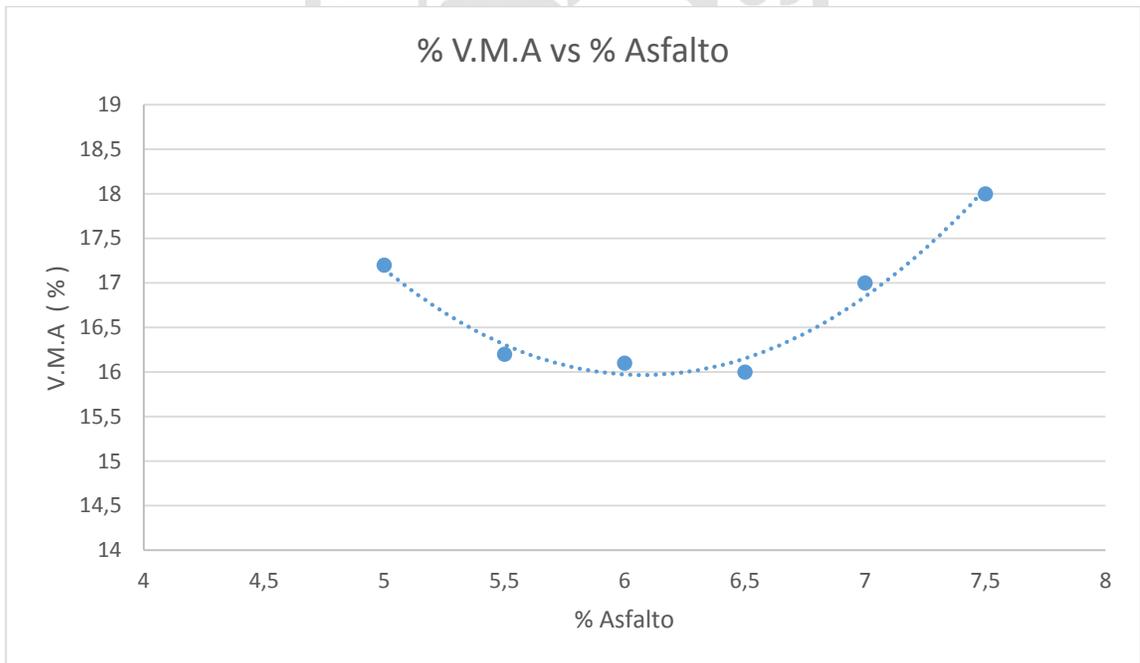


Figura N° 17: Variación de los vacíos en el agregado mineral respecto al % de asfalto para mezcla patrón

Elaboración: Los autores

Para obtener el resultado del % óptimo de asfalto, bastará con obtener el % promedio de todos los óptimos de cada gráfica.

Al porcentaje de asfalto óptimo se le aplica una tolerancia de $\pm 0.3\%$

Para esta mezcla patrón, el porcentaje óptimo de asfalto, estaría cercano al 5.6% , lo cual haciendo su respectivo análisis, cumplirá con los requisitos para mezcla de concreto asfáltico según la EG 2013, Tabla 423-06

Tabla N° 21: Parámetros del Diseño Marshall

Parámetros	Diseño 5.6 %	Observaciones
Marshall (MTC E 504)	1860	Cumple
1. Estabilidad (Mín)		
2. Flujo 0.25 mm	4.3	Cumple
3. Porcentajes de vacíos con aire (MTC E 505)	4.2	Cumple
4. Vacíos en el agregado mineral	16.2	Cumple
5. Compactación, números de golpes en cada capa de testigo	75	Cumple
Relación polvo-asfalto	1.3	Cumple
Relación estabilidad / flujo	4276	Cumple
Relación asfalto - vacíos	74.8	cumple

Elaboración: Los autores

5.5 Preparación de la mezcla mediante proceso seco

Este proceso se desarrolla para estudiar 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. Para su mezclado se utilizará el mismo Huso granulométrico que el convencional MAC -2, rigiéndose como alternativa Huso D5, según la ASTM, ya explicadas anteriormente. Las granulometrías se

modificaron con un porcentaje de caucho, el 1% del peso total de los agregados. En los ensayos el caucho adicionado será reemplazado por la misma fracción y cantidad de los agregados, con el fin de mantener la misma granulometría densa, especificada en la mezcla convencional.

5.5.1 Caucho utilizado

El caucho fue comprado por los autores de la tesis, lo cual proviene del triturado de neumáticos, con fines de uso para grass sintético. Se pidió al proveedor que suministre material de polvo muy fino con tamaños inferiores al tamiz N° 10 (2.00 mm), ya que la forma de las partículas superiores a este tamaño son alargadas. El porcentaje de caucho utilizado en la vía seca es relativamente bajo, por lo general menos del 5%, y está relacionado con el peso de los agregados. El porcentaje con el cual se trabajó fue de 1 %

Tabla N° 22: Granulometría del caucho suministrada

Tamices		Peso retenido	Porcentaje retenido	Retenido acumulado	Porcentaje que pasa
ASTM	mm				
N° 8	2.360		0.0	0.0	100.0
N° 10	2.000		0.0	0.0	100.0
N° 16	1.190	88.2	13.4	13.4	86.6
N° 20	0.840	76.3	11.6	24.9	75.1
N° 30	0.600	127.3	19.3	44.2	55.8
N° 40	0.425	189.5	28.7	72.9	27.1
N° 50	0.300	103.6	15.7	88.6	11.4
N° 80	0.177	69.4	10.5	99.1	0.9
N° 100	0.150	5.1	0.8	99.9	0.1
N° 200	0.075	0.4	0.1	100.0	0.0

Peso de la muestra = 660 gr

Elaboración: Los autores

Tabla N° 23: Granulometría del caucho a utilizar

Tamices		Peso retenido	Porcentaje retenido	Retenido acumulado	Porcentaje que pasa
ASTM	mm				
N° 20	0.840		0.0	0.0	100.0
N° 30	0.600	127.3	25.7	25.7	74.3
N° 40	0.425	189.5	38.2	63.9	36.1
N° 50	0.300	103.6	20.9	84.8	15.2
N° 80	0.177	69.4	14.0	98.8	1.2
N° 100	0.150	5.1	1.0	99.9	0.1
N° 200	0.075	0.4	0.1	100.0	0.0

Peso de la muestra = 495.5 gr

Elaboración: Los autores

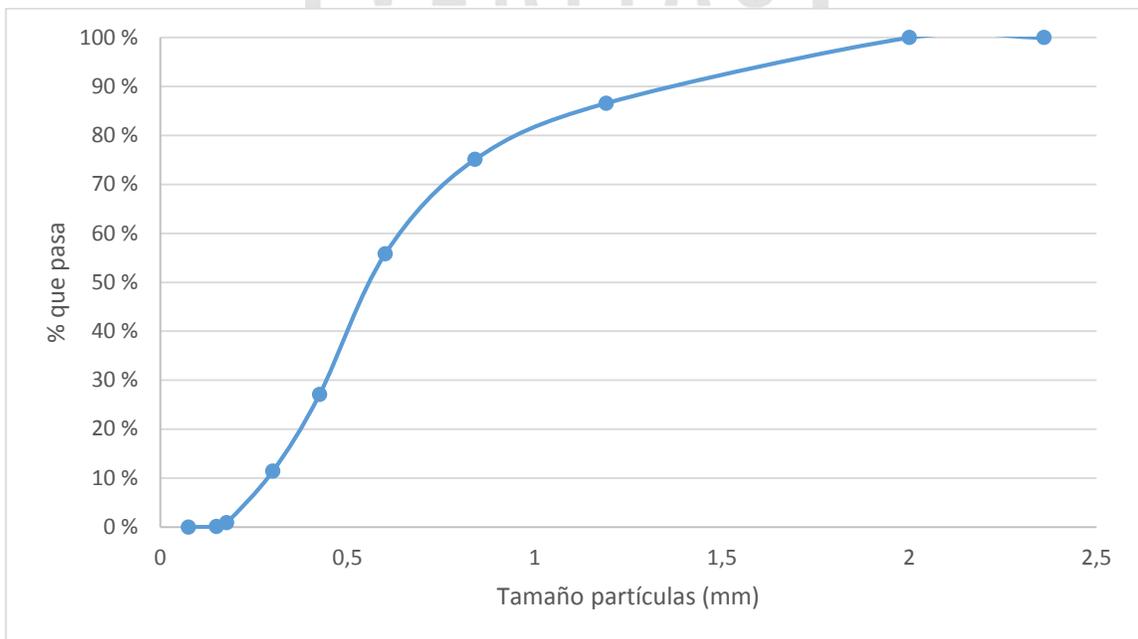


Figura N° 18: Curva granulométrica del caucho tal como fue suministrada por el Proveedor

Elaboración: Los autores

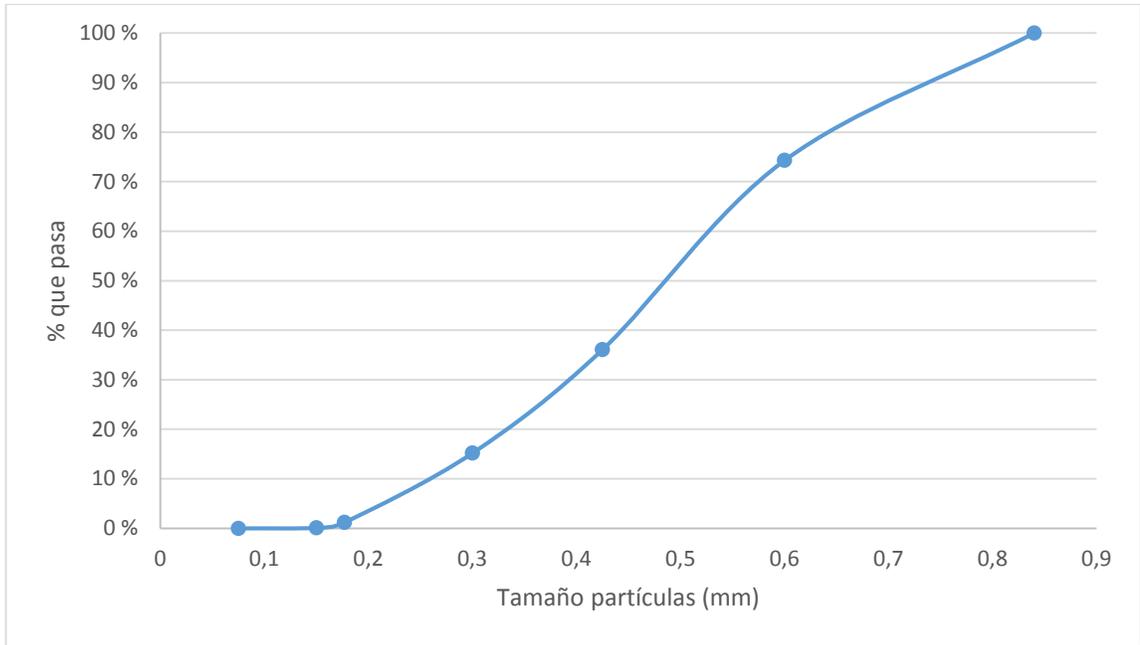


Figura N° 19: Curva granulométrica del caucho a ser incorporado

Elaboración: Los autores

5.5.2 Granulometría de la mezcla mejorada con caucho

Para las mezclas asfálticas mejoradas con caucho, se decidió reemplazar el porcentaje de caucho adicionado por la porción fina correspondiente de los agregados, con el fin de no alterar la gradación MAC-2, HUSO D5, establecida para la muestra patrón. Por lo tanto la distribución granulométrica de los diseños con caucho no se alteró o cambió, ya sea incorporando 1% de caucho, respecto a la granulometría inicial optada para la mezcla convencional.

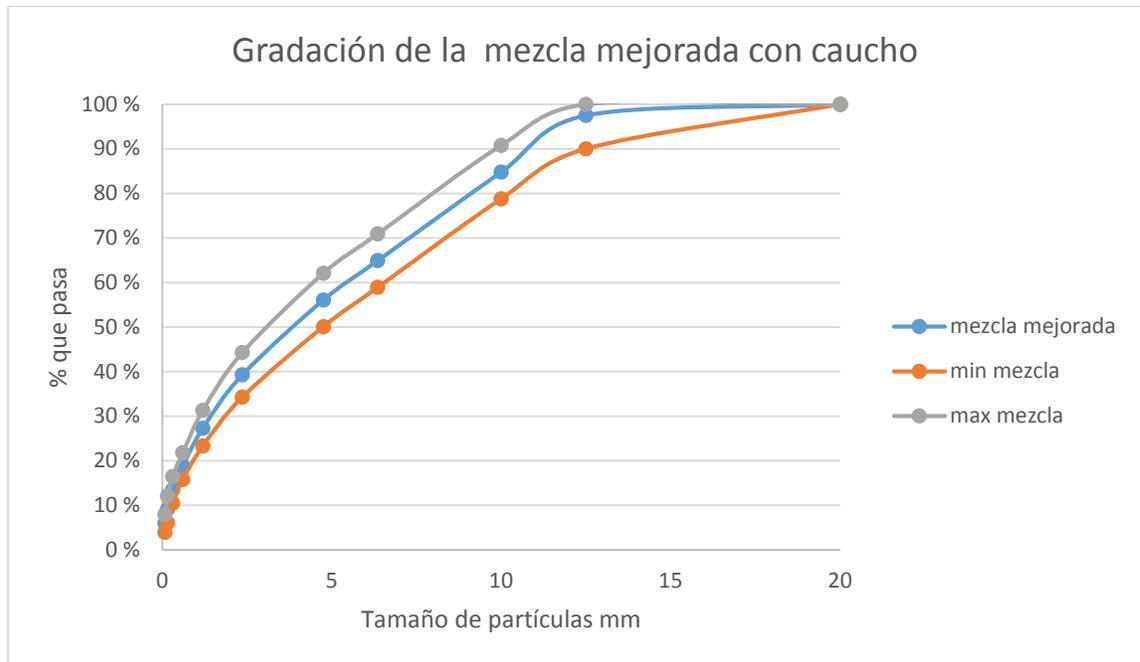


Figura Nº 20: Gradación de la mezcla mejorada con caucho

Elaboración: Los autores

5.5.3 Metodología para la confección de la mezcla mejorada con caucho

El procedimiento para la confección de la mezcla con caucho en laboratorio, no difiere en gran medida del método empleado para una mezcla 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:

- Preparar la granulometría de los agregados pétreos
- Calentar los agregados en horno a temperatura entre 170 °C y 210 °C.
- Establecer la proporción de caucho a utilizar, relacionada con el peso de los áridos.

- Mezclar los agregados calientes con la cantidad de caucho que corresponda, y colocarlos en horno entre 150 y 190 °C por aproximadamente 2 min para que el caucho aumente su temperatura.
- Adicionar el asfalto, previamente calentado a la temperatura de mezclado, a la mezcla de agregados con caucho y mezclar por 2 a 3 min.
- 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.
- Retirar la mezcla del horno y remover el material
- Compactar la mezcla del horno y remover el material
- Compactar la mezcla caliente en moldes Marshall precalentados. 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.
- Dejar reposar por 24 horas antes de extraer la probeta del molde.
- Remover la probeta a temperatura ambiente.

5.6 Determinación del tiempo y temperatura de digestión

Para las mezclas asfálticas mejoradas con caucho, se requiere en primer lugar, determinar la temperatura y el tiempo de digestión, mediante el ensayo de Inmersión – Compresión.

Según las experiencias extranjeras, la temperatura ideal es de 170 °C y un tiempo de 2 horas, para los cuales se trabajará con estos valores óptimos. Lo cual se concluye que mientras más alta la temperatura de digestión y más largo el tiempo en horno, el proceso de digestión mejora. Según las experiencias trabajadas, los mejores valores de resistencia conservada para

esta mezcla, se encuentran para la temperatura de 170 °C por dos horas, con contenidos de hasta 1 %.

5.7 Diseño Final

En esta etapa, se preparan mezclas con cuatro porcentajes de cemento asfáltico (5.0 %, 5.5 %, 6.0 % y 6.5 %), para observar las tendencias de los parámetros de estas mezclas.

5.7.1 Parámetros Marshall

A continuación, se entregan los parámetros Marshall obtenidos para las mezclas asfálticas mejoradas con caucho a la temperatura de digestión de 170 °C y al tiempo de 2 horas.

Tabla N° 24: Cuadro Resumen ensayo Marshall de mezcla con caucho

Asfalto 60-70	Densidad	Vacíos de mezcla	V.M.A	Vacíos llenos de asfalto	Estabilidad	Flujo	Índice de rigidez
%	Gr/cc	%	%	%	kg	mm	Kg/cm
5.0	2.372	4.9	16.3	69.9	2240	3.4	6567
5.5	2.391	3.3	16.0	79.7	2183	4.1	5259
6.0	2.398	2.3	16.2	86.1	2040	4.3	4752
6.5	2.402	1.2	16.5	92.7	1920	4.9	3926

Elaboración: Los autores

5.7.2 Determinación del porcentaje de asfalto para el diseño con mezcla con caucho

Para esta mezcla patrón, el porcentaje óptimo de asfalto, estaría cercano al 5.3 %, lo cual haciendo su respectivo análisis, cumplirá con los requisitos para mezcla de concreto asfáltico según la EG 2013, Tabla 423-06.

Tabla N° 25: Parámetros del Diseño Marshall de mezcla con caucho

Parámetros	Diseño 5.3 %	Observaciones
Marshall (MTC E 504)	2274	Cumple
1. Estabilidad (mín)		
2. Flujo 0.25 mm	3.9	Cumple
3. Porcentajes de vacíos con aire (MTC E 505)	4.1	Cumple
4. Vacíos en el agregado mineral	16.1	Cumple
5. Compactación, números de golpes en cada capa de testigo	75	Cumple
Relación polvo-asfalto	1.1	Cumple
Relación estabilidad / flujo	5849	Cumple
Relación asfalto - vacíos	74.4	cumple

Elaboración: Los autores



CAPÍTULO VI

DISCUSIÓN Y APLICACIONES

6.1 Generalidades

La discusión y análisis de resultados se desarrollará a partir de los resultados obtenidos en el diseño de mezclas asfálticas. Además también se presentarán las ventajas que ofrecen las mezclas asfálticas con caucho adicionado frente a las mezclas asfálticas convencionales. Finalmente, como un dato adicional, se hará un pequeño análisis económico para ambas mezclas.

Para el diseño de mezclas, las curvas gráficas vistas en el Capítulo V varían de acuerdo a las características de diseño, donde existen curvas típicas cuyas tendencias generales son las siguientes:

- Los gráficos de estabilidad y densidad tiene forma de parábola donde tienen un valor máximo al cual le corresponde un determinado porcentaje de asfalto.
- El porcentaje de vacíos disminuye con el aumento del contenido de asfalto.

- El gráfico de VMA tiene forma de parábola, con un valor mínimo al cual le corresponde un determinado porcentaje de asfalto.
- El flujo aumenta con el incremento de cemento asfáltico.

También debe tenerse en cuenta que las mezclas asfálticas fueron diseñadas para soportar un tráfico pesado.

6.2 Comparación de resultados para mezclas asfálticas convencionales y con adición de polvo de neumático

La comparación se hará a partir de los datos de porcentaje de vacíos, densidad, estabilidad, flujo y VMA, tal como se muestran en la tabla siguiente.

Tabla N° 26: Cuadro Comparativo de mezclas convencionales vs mezclas con caucho

% de Asfalto		5.0	5.5	6.0	6.5
Vacíos con aire (%)	Mezcla patrón	6.9	4.4	3.2	1.5
	Con caucho	4.9	3.3	2.3	1.2
Estabilidad	Mezcla patrón	1693	1871	1859	1871
	Con caucho	2240	2183	2040	1920
Flujo	Mezcla patrón	4.4	4.1	4.3	5.1
	Con caucho	3.4	4.1	4.3	4.9
Densidad	Mezcla patrón	2.343	2.384	2.401	2.416
	Con caucho	2.372	2.391	2.398	2.402
V.M.A	Mezcla patrón	17.2	16.2	16.1	16.0
	Con caucho	16.3	16.0	16.2	16.5

Elaboración: Los autores

- 1) Con base a los ensayos de laboratorio realizados a los agregados pétreos extraídos de la cantera Birrack, se deduce que son aptos para la elaboración de la mezcla asfáltica en caliente, debido a que cumplen con todos los requerimientos de calidad exigidos por la EG 2013.

- 2) Según las especificaciones técnicas, la exigencia de vacíos con aire están entre 3 y 5 %; la mezcla patrón cumple con este rango.

Para la mezcla fabricada a 170 °C con 1% de caucho, se tiene que solo los porcentajes entre 5.0 % y 5.5 % de asfalto, cumple con las especificaciones técnicas.

- 3) Se observa que para el 1% de caucho, se obtienen valores altos de estabildades, esto se debe a la modificación del asfalto en presencia de caucho.
- 4) Según las especificaciones técnicas, la exigencia de fluidez está entre 2 y 4 mm. Observamos que para la mezcla patrón, el rango permitido está entre los 5.5 y 6 % de asfalto, mientras que para la mezcla con caucho, el rango permitido se encuentra entre el 5.0 y 5.5 % de asfalto.
- 5) Se observa que las mezclas con caucho, con un % de asfalto entre 5.0 y 5.5 % aumenta, respecto a la mezcla convencional, 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, y por tanto no se necesitará mayores % de asfalto para que cumpla el recubrimiento.
- 6) Para el análisis de vacíos en los agregados minerales, se observa que la mezcla con caucho cumple con las especificaciones técnicas requeridas: 13.0 mín.
- 7) Según los parámetros analizados anteriormente, se llega a una conclusión que el valor óptimo de asfalto que cumpla con las especificaciones de los parámetros Marshall, se encuentran entre el 5.0 y 5.5 %, a lo que reduce el porcentaje respecto a la mezcla convencional (5.6 %).
- 8) La mezcla con porcentaje de caucho reduce los vacíos de aire, lo cual da la característica que entre menor sea este, menor será la permeabilidad de la mezcla, lo que aumentará la durabilidad del pavimento respecto a una mezcla convencional.
- 9) La mezcla con porcentaje de caucho, aumenta la estabilidad, lo cual dará la característica de poder acomodarse adecuadamente para el tránsito

esperado referente a una mezcla convencional, debido a que tiene mejor capacidad de resistir desplazamientos y deformaciones bajo cargas de tránsito.

- 10) La mezcla con porcentaje de caucho, disminuye el flujo, lo cual da la característica de disminuir su deformación, ello va de la mano con la característica de la estabilidad.
- 11) La mezcla con porcentaje de caucho para el porcentaje óptimo de asfalto (5.3%), aumenta su densidad, lo cual da la característica esencial de tener un rendimiento duradero.
- 12) La mezcla con porcentaje de caucho, para el porcentaje óptimo de asfalto (5.3 %), disminuye el V.M.A, por lo que la película de asfalto cubrirá mejor los agregados, haciendo más durable la mezcla

6.3 Ventajas de las mezclas asfálticas con polvo de neumático respecto a las mezclas convencionales

Con lo analizado y discutido en el contenido de la tesis, se podrán reafirmar las ventajas de la mezcla con caucho frente a una mezcla convencional. Las ventajas podemos agruparlas de la manera siguiente:

- **Técnicas:** aumenta la resistencia al envejecimiento y oxidación del ligante asfáltico; aumenta la resistencia de la mezcla al agrietamiento; aumenta la resistencia frente al calor del ligante asfáltico; disminuye el ruido de rodadura.
- **Económicas:** debido a que son mezclas más durables, existe una menor necesidad de mantenimiento, el cual puede disminuirse en un 20% y 50 %.
- **De protección ambiental:** ayuda a disminuir el impacto ambiental negativo que producen las llantas usadas.
- **Social:** genera trabajo, debido a que podrán formarse pequeñas empresas de recolección de neumáticos usados.

6.4 Análisis de costos ejecución-mantenimiento de mezclas modificadas con polvo de neumático y mezclas convencionales.

6.4.1 Análisis de costo unitario de carpeta asfáltica para mezcla convencional

Partida	CARPETA ASFÁLTICA 2 "					
m2/día					costo unitario por m2	32.68
Descripción del Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de Obra						
Capataz	hh	0.2000	0.0016	17.28	0.03	
Operario	hh	2.0000	0.0160	17.28	0.28	
Oficial	hh	2.0000	0.0160	14.66	0.23	
Peón	hh	8.0000	0.0640	13.20	0.84	
					1.38	
Materiales						
Piedra Chancada	m3		0.0550	55.00	3.03	
Arena Gruesa	m3		0.0250	35.00	0.88	
Asfalto	gln		1.7500	8.50	14.88	
					18.78	
Equipos						
Herramientas Manuales	% M.O		3.000%	1.38	0.04	
Camión Volquete 15 m3	h-m	4.0000	0.0320	180.00	5.76	
Rodillo Tandem						
Vibratorio	h-m	1.0000	0.0080	180.00	1.44	
Compactador Vibratorio	h-m	2.0000	0.0160	18.00	0.29	
Rodillo Neumático	h-m	1.0000	0.0080	180.00	1.44	
Planta de Asfalto	h-m	1.0000	0.0080	234.00	1.87	
Cargador Frontal	h-m	1.0000	0.0080	210.00	1.68	
					12.52	

6.4.2 Análisis de costo unitario de carpeta asfáltica para mezcla con polvo de caucho

Partida	CARPETA ASFÁLTICA 2"					
					costo unitario por m2	35.39
Descripción del Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de Obra						
Capataz	hh	0.2000	0.0016	17.28	0.03	
Operario	hh	2.0000	0.0160	17.28	0.28	

Oficial	hh	2.0000	0.0160	14.66	0.23
Peón	hh	8.0000	0.0640	13.20	0.84
					1.38
Materiales					
Piedra Chancada	m3		0.0546	55.00	3.01
Arena Gruesa	m3		0.0248	35.00	0.87
Polvo Caucho	kg		1.0600	3.33	3.53
Asfalto	gln		1.6562	8.50	14.08
					21.48
Equipos					
Herramientas Manuales	% M.O		3.000%	1.38	0.04
Camión Volquete 15 m3	h-m	4.0000	0.0320	180.00	5.76
Rodillo Tandem					
Vibratorio	h-m	1.0000	0.0080	180.00	1.44
Compactador Vibratorio	h-m	2.0000	0.0160	18.00	0.29
Rodillo Neumático	h-m	1.0000	0.0080	180.00	1.44
Planta de Asfalto	h-m	1.0000	0.0080	234.00	1.87
Cargador Frontal	h-m	1.0000	0.0080	210.00	1.68
					12.52

6.4.3 Costo para realizar un tramo de carpeta asfáltica de 1 km con ancho de calzada 3.40 m

Longitud = 1 000 metros

Ancho calzada = 3.40 metros

Precio de carpeta asfáltica convencional = S/. 111,111.98 por kilómetro

Precio de carpeta asfáltica con caucho = S/. 120,317.62 por kilómetro

COSTO DE MANTENIMIENTO DE CARRETERAS PERUANAS					
VIAS ASFALTADAS			VIAS AFIRMADAS		
12,000 Km			18,500 Km		
COSTA	6,500	Km	1,000 Km		
SIERRA	4,500	Km	12,000 Km		
SELVA	1,000	Km	5,500 Km		
	MANT. PERIODICO	MANT. RUTINARIO	REHABILITACION	RECONSTRUCCION	MANTENIMIENTO
US\$/Km	(Cada 4 años)	(Cada año)	(1° año)	(1° año)	(1° año)
COSTA	14,000	2,700	140,000	300,000	3,200
SIERRA	18,000	3,400	180,000	700,000	4,000
SELVA	25,000	4,200	250,000	800,000	5,500
U\$S					
COSTA	91,000,000	17,550,000	910,000,000	1,950,000,000	3,200,000
SIERRA	81,000,000	15,300,000	810,000,000	3,150,000,000	48,000,000
SELVA	25,000,000	4,200,000	250,000,000	800,000,000	30,250,000
TOTAL	197,000,000	37,050,000	1,970,000,000	5,900,000,000	81,450,000

Información Asociación Peruana de Caminos)

Figura N° 21: Costo de mantenimiento de carreteras peruanas

Fuente: Asociación Peruana de Caminos

6.4.4 Costo de mantenimiento periódico de carpetas asfálticas en el tramo de prueba

Mantenimiento periódico carpeta asfáltica convencional = cada 4 años

Mantenimiento periódico carpeta asfáltica con caucho = cada 7 años

Costo mantenimiento anual para carpeta asfáltica convencional (tramo 1 km) = S/. 9,800.00 por año

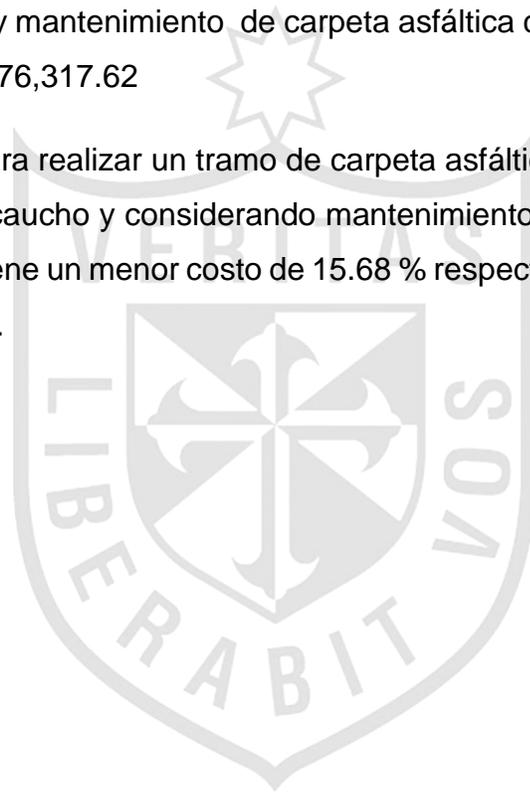
Costo mantenimiento anual para carpeta asfáltica con caucho (tramo 1 km)=
S/. 5,600.00 por año

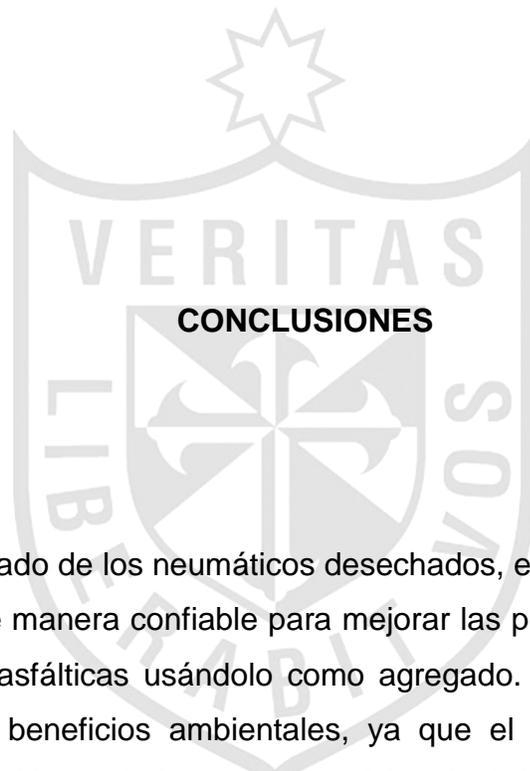
En consecuencia:

Costo de ejecución y mantenimiento de carpeta asfáltica convencional en 10 años (tramo 1 km) = S/. 209,111.98

Costo de ejecución y mantenimiento de carpeta asfáltica con caucho en 10 años (tramo 1 km) = S/. 176,317.62

- Por tanto, para realizar un tramo de carpeta asfáltica de 1 km y ancho de 3.40 m. con caucho y considerando mantenimiento, en un periodo de 10 años, se obtiene un menor costo de 15.68 % respecto a la carpeta asfáltica convencional.





CONCLUSIONES

GENERALES

1. El material reciclado de los neumáticos desechados, en este caso el caucho, puede usarse de manera confiable para mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas usándolo como agregado. La utilización de este reciclado traerá beneficios ambientales, ya que el residuo se valoriza y solucionará el problema de la mala disposición final de ellos, reduciendo así la contaminación.
2. Existen mejoras técnicas, sociales, ambientales y económicas, si se piensa utilizar los neumáticos en desuso con fines de beneficio.

ESPECÍFICAS

1. Las mezclas asfálticas mejoradas con caucho, se diseñaron mediante el procedimiento Marshall para determinar el contenido óptimo de ligante, en el que se evaluó el contenido de vacíos de aire, densidad y estabilidad y el óptimo contenido de caucho. Se estudia analizando los parámetros Marshall por lo que se obtiene mejores resultados que en una mezcla convencional, mejorando así sus características de diseño.
2. En la mezcla con caucho mediante vía seca, disminuye el contenido de vacíos de aire y el contenido de vacíos en el agregado mineral.
3. Para un MAC-2 y HUSO D5 (granulometría de la mezcla), se obtuvieron valores de contenido de asfalto menor a un convencional, incorporando el 1 % de polvo de caucho, respecto al peso total de los agregados pétreos.
4. El proceso húmedo requiere equipos sofisticados en planta. Por otro lado, el proceso seco no requiere de grandes cambios en la planta asfáltica, solo manejar el asfalto como un agregado fino.
5. Los costos unitarios de una mezcla asfáltica mejorada con polvo de neumático, son mayores que los de una mezcla asfáltica convencional, aproximadamente un 9 %, cuando se utiliza 1 % de polvo de neumático por vía seca.
6. La relación costo-mantenimiento es beneficiosa al utilizar mezclas con polvo de neumático, ya que en un plazo de 10 años, los costos se reducen en 16 % aproximadamente respecto al pavimento de carpeta asfáltica convencional.
7. No deberá descartarse ninguno de los procesos de incorporación de caucho, sino que en cada estudio de proyecto, se deba seleccionar la mejor tecnología; esto dependerá si la solución es de mantenimiento o construcción, y además de los costos que cada proceso tenga para ese caso particular.

8. El polvo obtenido del reciclaje de los neumáticos será de alta aplicabilidad en el sector de la construcción, ya que servirá para asfaltar vías, lo que significa que para una tonelada de mezcla asfáltica con caucho, ayudará a reciclar tres neumáticos usados de autos.





VERITAS

RECOMENDACIONES

1. Desarrollar ensayos a la mezcla asfáltica en cuanto a su comportamiento se refiere, tales como determinación del comportamiento a fatiga, deformación permanente y resistencia a la compresión.
2. Seguir estudiando granulometrías tradicionales, así como con porcentajes de caucho diferentes.
3. Realizar tramos de prueba, para estudiar el comportamiento como pavimento terminado.



Hemerográficas

Ministerio de Salud de Perú. Decreto Supremo N° 003-2001-SA. Precisan que la suspensión dispuesta por el D.S. N° 003-97-SA comprende las importaciones de neumáticos usados con o sin aros. 2001.

Electrónicas

Ing. Guillermo Castro. “Materiales y Compuestos para la Industria del Neumático”. Argentina: Universidad de Buenos Aires-Facultad de Ingeniería, 2008. [Consulta: Mayo 2014]. Disponible en: http://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Materiales_y_Compuestos_para_la_Industria_del_Neumatico.pdf.

Gerardo Botasso; Adrián Cuattrocchio. “Estado de la Utilización de Caucho reciclado en obras Viales en Lationamérica.Aplicaciones”. Argentina: Universidad Tecnológica Nacional-Facultad Regional de la Plata, 2007. [Consulta: Mayo

2014]. Disponible en: http://lemac.frlp.utn.edu.ar/wp-content/uploads/2011/12/2007_Estado-de-Utilizacion-Cacho-Latinoamerica_5%C2%BAPROCQMA.pdf.

http://www.elprisma.com/apuntes/ingenieria_civil/asfalto

http://www.e-asphalt.com/orig_asf/historia_del_asfalto.htm

<http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt171.pdf>

http://roble.pntic.mec.es/jprp0006/tecnologia/3eso_recursos/unidad12_fuentes_energia/animaciones/refinado_petroleo.swf

http://www.repsol.com/pe_es/productos_y_servicios/productos/peasfaltos/fisicoquimica/composicion/

<http://www.andina.com.pe/espanol/noticia-cientifico-peruano-desarrolla-nanotecnologia-para-tratar-aguas-contaminadas-394082.aspx#.U3eRutJ5M50>

<http://peru21.pe/imprensa/expertos-reciclado-2114365>

Tesis de referencia

Aplicación del método Marshall y granulometría superlave en el diseño de mezclas asfálticas en caliente con asfalto clasificación grado de desempeño. Universidad de El Salvador, año 2006 (www.ues.edu.sv)

Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco. Universidad de Chile; año 2011 (www.uchile.cl)

Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas. Universidad de los Andes-Bogotá; año 2012 (www.uniandes.edu.co)

ANEXOS

	Página
Nº 01 Composición de mezcla de materiales para asfalto	104
Nº 02 Ensayo de durabilidad para Agregado grueso	106
Nº 03 Ensayo de abrasión en Agregados gruesos	107
Nº 04 Ensayo de Índice de durabilidad para Agregado grueso	108
Nº 05 Ensayo de Partículas chatas y alargadas para Agregado grueso	109
Nº 06. Ensayo Sales solubles Agregado grueso	110
Nº 07 Ensayo de Caras fracturadas Agregado grueso	111
Nº 08 Ensayo de Equivalente de Arena para Agregado fino	113
Nº 09 Ensayo Angularidad del Agregado fino	114
Nº 10 Ensayo Límite de plasticidad	116
Nº 11 Ensayo de Índice de durabilidad para Agregado fino	117
Nº 12 Ensayo de Contenido de sales para Agregado fino	118
Nº 13 Certificación de Cemento Asfáltico REPSOL	119
Nº 14 Procedimiento para el diseño Marshall	120
Nº 15 Cuadro resumen de ensayo Marshall en mezcla convencional	128
Nº 16 Cuadro resumen de ensayo Marshall en mezcla con 1% de caucho	130

ANEXOS

Anexo N° 1. Composición de mezcla de materiales para asfalto

LABORATORIO MECÁNICA DE SUELOS CONCRETO Y PAVIMENTOS			
OBRA	TESIS DE MEZCLA CON CAUCHO		
TRAMO			JEFE LAB. Mario Gamarra
MATERIAL	MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL		TECNICO Percy Saldaña P.
GRADACION	DISEÑO - NORMA ASTM D3515 - HUSO "D5"		FECHA 19/05 /14
UBICACIÓN			

DISEÑO PEN 60-70
CONVENCIONAL

COMPOSICIÓN DE MEZCLA DE MATERIALES PARA ASFALTO

TAMICES	ABERTURAS (mm)	GRAVA < 1"	GRAVA < 3/4"	ARENA CHANCADA	ARENA NATURAL ESPERANZA N°2	CAL. HIDRATADA	ESPECIFICACIONES		MEZCLA	TOLERANCIAS +/-	TOLERANCIAS		OBSERVACIONES
			PEN -60-70 CONVENCIONAL	CANT. BIRRAK N°2			ASTM D 3515 HUSO D5				MIN.	MAX.	
			38%	38%			24%	MIN			MAX	100%	
3/4"	19.050		100.0	100.0	100.0		100	100	100.0	6.0	100.0	100.0	CUMPL E
1/2"	12.700		93.3	100.0	100.0		90	100	97.5	6.0	90.0	100.0	CUMPL E
3/8"	9.525		59.9	100.0	100.0				84.8	6.0	78.8	90.8	CUMPL E
1/4"	6.350		11.1	97.6	98.4				64.9	6.0	58.9	70.9	

N° 4	4.750		2.3	85.2	95.3			44	74	56.1	6.0	50.1	62.1	CUMPL E
N° 8	2.360		0.9	49.3	84.4			28	58	39.3	5.0	34.3	44.3	
N° 10	2.000		0.6	40.4	75.9					33.8	4.0	29.8	37.8	CUMPL E
N° 16	1.190		0.5	29.1	66.8					27.3	4.0	23.3	31.3	
N° 30	0.600		0.5	18.7	48.1					18.8	3.0	15.8	21.8	
N° 40	0.420		0.5	15.5	41.4					16.0	3.0	13.0	19.0	CUMPL E
N° 50	0.300		0.5	12.7	34.9			5	21	13.4	3.0	10.4	16.4	
N° 80	0.180		0.4	9.4	25.4					9.8	3.0	6.8	12.8	CUMPL E
N° 100	0.150		0.4	8.8	23.4					9.1	3.0	6.1	12.1	
N° 200	0.075		0.3	6.3	14.0			2	10	5.9	2.0	3.9	7.9	CUMPL E

Elaboración: Los autores

Anexo 02. Ensayo de durabilidad para agregado grueso

ENSAYO DE DURABILIDAD

MTC - E-209 (NORM ASTM C - 88)

LABORATORIO MECÁNICA DE SUELOS CONCRETOS Y PAVIMENTOS							
OBRA	:	TESIS MEZCLA CON CAUCHO	-	-	-		
TRAMO	:		-	-	-		
MATERIA L	:	MUESTRA DE FAJA EN FRIO	-	-	-	JEFE LAB	MARIO GAMARRA
GRADACION	:	ASTM - D3515 HUSO D5	-	-	-	TECNICO	PERCY SALDAÑA P.
UBICACIÓN	:		-	-	-	FECHA	19/5/04

AGREGADO GRUESO

TAMIZ			PESO REQUERIDO (gr)	PESO INICIAL (gr)	PESO FINAL (gr.)	PERDIDA		GRADACION ORIGINAL DE LA MUESTRA	PERDIDA CORREGIDA
PASANTE	RET.					PESO	%		
2 1/2"	2"	2 1/2" - 1 1/2"	3000 +/- 100						
2"	1 1/2"		2000 +/- 100						
1 1/2"	1"	1 1/2" - 3/4"	1000 +/- 50						
1"	3/4"		500 +/- 30						
3/4"	1/2"	3/4" - 3/8"	670 +/- 10	1000.0	994.3	5.70	0.57	34.5	0.197
1/2"	3/8"		330 +/- 5						
3/8"	N°4	N° 4	300 +/- 5	300.0	295.1	4.90	1.63	65.5	1.070
TOTAL									1.27%
									ESPECIFICACIÓN TÉCNICA 18%

Elaboración: Los autores

Anexo 03. Ensayo de abrasión en agregados gruesos

ENSAYO DE ABRASIÓN (MÁQUINA DE LOS ANGELES)

(ESPECIFICACIÓN ASTM C 131)

LABORATORIO MECÁNICA DE SUELOS CONCRETOS Y PAVIMENTOS			
OBRA	:	TESIS DE MEZCLA CON CAUCHO	:
TRAMO	:		JEFE LAB : MARIO GAMARRA
MATERIAL	:	MUESTRA DE FAJA EN FRIO	TECNICO : PERCY SALDAÑA P.
GRADACION	:	ASTM - D3515 HUSO D5	-

TAMIZ		GRADACIÓN			
Pasante	Retenido	A	B	C	D
1 1/2"	1"				
1"	3/4"				
3/4"	1/2"		2501.6		
1/2"	3/8"		2502.8		
3/8"	1/4"				
1/4"	Nº 4				
Nº 4	Nº 8				
(1) Peso Total (gr)			5004.4		
(2) Peso retenido en el tamiz Nº 12 (gr)			650		
(3) Peso que pasa en el tamiz Nº 12 (gr) (1-2)			4354.4		
Nº de esferas			11		
Numero de revoluciones			500		
Tiempo de rotación (minutes)			15		
Peso de las esferas (gr)			4584 +/- 25		
Porcentaje de abrasión			13.0%		

Elaboración: Los autores

Anexo 04. Ensayo de Índice de Durabilidad para agregado grueso

LABORATORIO MECÁNICA DE SUELOS CONCRETOS Y PAVIMENTOS			
OBRA	TESIS MEZCLA CON CAUCHO		
TRAMO		JEFE LAB.	MARIO GAMARRA
MATERIAL	MUESTRA DE FAJA EN FRIO	TECNICO:	PERCY SALDAÑA P.
GRADACION	ASTM - D3515 HUSO D5	FECHA	19/05/2014

ÍNDICE DE DURABILIDAD AGREGADO GRUESO (NORMA AASHTO T-210, MTC E214-99)

COMBINACIÓN DE AGREGADOS		IDENTIFICACIÓN			Promedio
		1	2	3	
Tamaño máximo (pasa malla N° 200)	mm	0.075	0.075	0.075	
Hora de entrada agitación		13:20	13:22	13:24	
Hora de salida de agitación (mas 10')		13:40	13:42	13:44	
Hora de entrada a decantación		14:05	14:08	14:10	
Hora de salida de decantación (mas 20')		14:25	14:27	14:29	
Altura de sedimentación	Pulg.	3.40	3.40	3.30	
Indice de durabilidad	%	51.0	51.0	51.0	51.0

**ESPECIFICACIONES
TÉCNICAS**

**35
Min.**

Elaboración: Los autores

Anexo 05. Ensayo de Partículas chatas y alargadas para agregado grueso

ÍNDICE DE APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO DE AGREGADOS												
(ASTM D-4791)												
LABORATORIO MECANICA DE SUELOS CONCRETOS Y PAVIMENTOS												
OBRA				TESIS MEZCLA CON CAUCHO				JEFE				
TRAMO								LAB. MARIO GAMARRA				
MATERIAL				MUESTRA DE FAJA EN FRIO				TECNIC PERCY				
GRADACION				ASTM - D3515 HUSO D5				O: SALDAÑA P.				
GRADACION				ASTM - D3515 HUSO D5				FECHA 19/05/2014				
TAMICES				Granul. % retenido (RI)	Fracción Analizada (PI)grms	CALIBRACIÓN		INDICE DE FRACCIÓN		ÍNDICE PONDERADO		
PASA		RETIENE				PLANAS	ALARGADAS	APLAN.	ALARG.] AP x RI] AL x RI	
Pulg.	mm.	Pulg.	mm.			(PII)gr.	(PIII)gr.	(IAP=PII x 100 / PI)	(IAL=PIII x 100 / PI)			
2 1/2"	63.00	2"	50.00									
2"	50.00	1 1/2"	37.50									
1 1/2"	37.50	1"	25.00									
1"	25.00	3/4"	19.00									
3/4"	19.00	1/2"	12.50	5.6	932.5	25.4	2.4	2.72	0.26	15.27	1.44	
1/2"	12.50	3/8"	9.50	28.9	230.6	13.7	3.2	5.94	1.39	171.59	40.08	
3/8"	9.50	1/4"	6.30	43.3	89.8	4.9	1.6	5.46	1.78	236.17	77.12	
				77.8							423.04	118.64
<p>ÍNDICE TOTAL : = 7.0</p> <p>ÍNDICE DE APLANAMIENTO $\frac{\sum IAP}{\sum RI}$ = 5.4</p> <p>ÍNDICE DE ALARGAMIENTO $\frac{\sum IAL}{\sum RI}$ = 1.5</p>												

Elaboración: Los autores

Anexo 06. Ensayo sales solubles agregado grueso

CONTENIDO DE SALES SOLUBLES EN AGREGADOS

(NORMA MTC E - 219)

LABORATORIO MECÁNICA DE SUELOS CONCRETOS Y PAVIMENTOS		
OBRA	TESIS MEZCLA CON CAUCHO	
TRAMO		JEFE LAB. MARIO GAMARRA
MATERIAL	MUESTRA DE FAJA EN FRIO	TECNICO: PERCY SALDAÑA P.
GRADACION	ASTM - D3515 HUSO D5	FECHA 19/05/2014

AGREGADO GRUESO

N° DE ENSAYOS	IDENTIFICACIÓN		
	1	2	3
(1) Peso Tarro (Biker 100 ml)	52.30	53.10	52.39
(2) Peso de Tarro + Agua + Sal	93.20	95.40	90.25
(3) Peso de Tarro seco + Sal	52.35	53.15	52.43
(4) Peso de Sal (3 - 1)	0.05	0.05	0.04
(5) Peso del Agua (2 - 3)	40.85	42.25	37.82
(6) Porcentaje de sales (%)	0.122	0.118	0.106
(7) Porcentaje de Sal	0.116%		

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

0.50%

Elaboración: Los autores

Anexo 07. Ensayo de caras fracturadas agregado grueso (1 y 2 caras)

ENSAYO DE CARAS FRACTURAS DE LOS AGREGADOS

(NORMA MTC E - 210)

LABORATORIO MECÁNICA DE SUELOS CONCRETOS Y PAVIMENTOS					
OBRA	TESIS MEZCLA CON CAUCHO				
TRAMO		JEFE LAB.	MARIO GAMARRA PERCY SALDAÑA		
MATERIAL	MUESTRA DE FAJA EN FRIO	TECNICO:	P.		
GRADACION	ASTM - D3515 HUSO D5	FECHA	19/05/2014		

A.- CON UNA CARA FRACTURADA

TAMAÑO DEL AGREGADO		A	B	C	D	E
PASA TAMIZ	RETENIDO EN TAMIZ	Peso muestra (g)	Peso material con caras fracturadas (g)	% de caras fracturadas ((B/A)*100)	Retenido gradación original (%)	Promedio de caras fracturadas C*D
1 1/2"	1"					
1"	3/4"					
3/4"	1/2"	1202.6	1201.9	99.9	5.6	560.4
1/2"	3/8"	301.2	300.1	99.6	28.9	2877.7
TOTAL		1503.8	1502.0	199.6	34.5	3438.1

PORCENTAJE CON UNA CARA FRACTURADA =

TOTAL E = 99.7%

TOTAL D

**ESPECIFICACIONES
TÉCNICAS**

**100 %
MIN.**

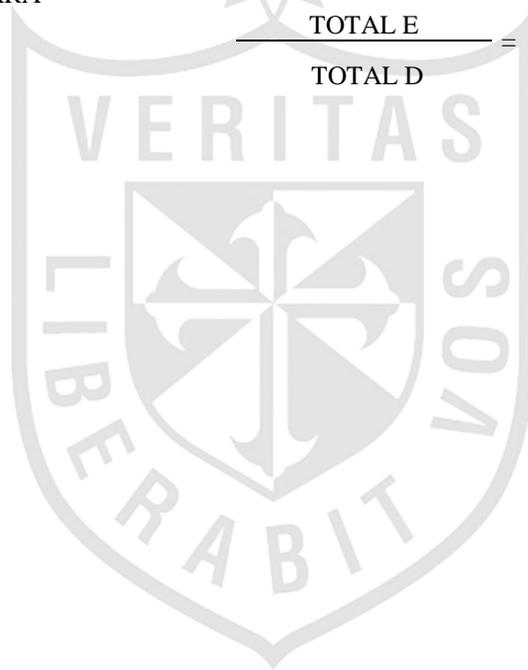
B.- CON DOS O MÁS CARAS

TAMAÑO DEL AGREGADO		A	B	C	D	E
PASA TAMIZ	RETENIDO EN TAMIZ	Peso muestra (g)	Peso material con caras fracturadas (g)	% de caras fracturadas ((B/A)*100)	Retenido gradación original (%)	Promedio de caras fracturadas C*D
1 1/2"	1"					
1"	3/4"					
3/4"	1/2"	1202.6	1190.5	99.0	5.6	555.1
1/2"	3/8"	301.2	288.7	95.8	28.9	2768.3
TOTAL		1503.8	1489.5	194.8	34.5	3323.5

PORCENTAJE CON UNA CARA
FRACTURADA =

TOTAL E = 96.4%

TOTAL D



**ESPECIFICACIONES
TÉCNICAS**

80 % MIN.

Elaboración: Los autores

Anexo 08. Ensayo de Equivalente de Arena para agregado fino

EQUIVALENTE DE ARENA

(NORMA MTC E - 114)

LABORATORIO MECÁNICA DE SUELOS CONCRETOS Y PAVIMENTOS			
OBRA	TESIS MEZCLA CON CAUCHO		
TRAMO		JEFE LAB.	MARIO GAMARRA
MATERIAL	MUESTRA DE FAJA EN FRIO	TECNICO:	PERCY SALDAÑA P.
GRADACIÓN	ASTM - D3515 HUSO D5	FECHA	19/05/2014

DETALLE	IDENTIFICACIÓN			Promedio	
	1	2	3	%	
Tamaño máximo (pasa tamiz N°4)	mm	4.76	4.76	4.76	
Hora de entrada a saturación		11:20	11:22	11:24	
Hora de salida de saturación (mas 10')		11:30	11:32	11:34	
Hora de entrada a decantación		11:32	11:34	11:36	
Hora de salida de decantación (mas 20')		11:52	11:54	11:56	
Altura máxima de material fino	mm	4.90	5.00	5.10	
Altura máxima de la arena	mm	3.30	3.30	3.30	
Equivalente de Arena	%	67.3	66.0	64.7	66.0

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

50 % MIN

Elaboración: Los autores

Anexo 09. Ensayo angularidad del agregado fino

ANGULARIDAD DE LA ARENA

MTC E 222

LABORATORIO MECÁNICA DE SUELOS CONCRETOS Y PAVIMENTOS			
OBRA	TESIS MEZCLA CON CAUCHO		
TRAMO		JEFE LAB.	MARIO GAMARRA
MATERIAL	MUESTRA DE FAJA EN FRIO	TECNICO:	PERCY SALDAÑA P.
GRADACION	ASTM - D3515 HUSO D5	FECHA	19/05/2014

N°	Ensayo	1	2	3	PROMEDIO
1	Peso Material + Molde (grs)	231.2	230.4		
2	Peso Del Molde (grs)	90.1	90.1		
3	Peso Neto Del Material (grs)	140.5	141.6		
4	Volumen Del Molde (cc)	98.8	98.8		
5	Peso Unitario (gr/cc)	1.422	1.433		1.428
N°	Ensayo	4	5	6	PROMEDIO
A	Peso Mat. Sat. Sup. Seco (en Aire)	301.2	301.0		
B	Peso Frasco + agua	1197.0	1180.0		
C	Peso Frasco + agua + A	1498.2	1481.0		
D	Peso del Mat. + agua en el frasco	1388.0	1371.0		
E	Vol de masa + vol de vacío = C-D	110.2	110.0		
F	Pe. De Mat. Seco en estufa (105°C)	298.4	298.5		
G	Vol de masa = E - (A - F)	107.4	107.5		
	Pe bulk (Base seca) = F/E	2.708	2.714		2.711
	Pe bulk (Base saturada) = A/E	2.733	2.736		2.735
	Pe aparente (Base Seca) = F/G	2.778	2.777		2.778
	Absorción = ((A - F)/F)*100	0.938	0.838		0.888

N°	Ensayo	1	2	3	PROMEDIO
1	Peso Especifico Seco (Gsb)	2.711	2.711		
2	Volumen de Molde(V)	98.8	98.8		
3	Peso de material en el molde (w)	140.5	141.6		
4	Angularidad de agregado fino %	47.5	47.1		47.3

ANGULARIDAD = $(V-(W/Gsb)/V)*100$ = **47.3%**

Observaciones

ESPECIFICACION TÉCNICA 40 % Mínimo

Elaboración: Los autores



Anexo 10. Ensayo límite de Plasticidad (Malla N° 200)

LÍMITES CONSISTENCIA (ESPECIFICACIÓN ASTM - D 423 / D 424)

LABORATORIO MECÁNICA DE SUELOS CONCRETOS Y PAVIMENTOS			
OBRA	TESIS MEZCLA CON CAUCHO		
TRAMO		JEFE LAB.	MARIO GAMARRA
MATERIAL	MUESTRA DE FAJA EN FRIO	TECNICO:	PERCY SALDAÑA P.
GRADACION	ASTM - D3515 HUSO D5	FECHA	19/05/2014

LÍMITE LÍQUIDO (LL)				
N° TARRO	8	6	3	
PESO TARRO + SUELO HUMEDO	30.70	28.00	26.90	
PESO TARRO + SUELO SECO	26.80	24.30	23.20	
PESO DE AGUA	3.90	3.70	3.70	
PESO DEL TARRO	6.75	6.75	6.76	
PESO DEL SUELO SECO	20.05	17.55	16.44	
CONTENIDO DE HUMEDAD	19.45	21.08	22.51	
NÚMERO DE GOLPES	27	22	15	

LÍMITE PLÁSTICO (LP)				
N° TARRO	1	4		
PESO TARRO + SUELO HUMEDO	10.60	11.35		
PESO TARRO + SUELO SECO	9.95	10.60		
PESO DE AGUA	0.65	0.75		
PESO DEL TARRO	6.40	6.50		
PESO DEL SUELO SECO	3.55	4.10		
CONTENIDO DE DE HUMEDAD	18.31	18.29		

L.L. =	20.12
P.L. =	18.30
I.P. =	1.82

ESPECIFICACIÓN TÉCNICA

4 % Max.

Anexo 11. Ensayo de Índice de Durabilidad para agregado fino

ÍNDICE DE DURABILIDAD AGREGADO FINO (NORMA AASHTO T-210, MTC E214-99)

LABORATORIO MECÁNICA DE SUELOS CONCRETOS Y PAVIMENTOS			
OBRA	TESIS MEZCLA CON CAUCHO		
TRAMO		JEFE LAB.	MARIO GAMARRA
MATERIAL	MUESTRA DE FAJA EN FRIO	TÉCNICO:	PERCY SALDAÑA P.
GRADACIÓN	ASTM - D3515 HUSO D5	FECHA	19/05/2014

COMBINACIÓN DE AGREGADOS		IDENTIFICACIÓN			Promedio
		1	2	3	
Tamaño máximo (pasa malla N° 4)	mm	4.75	4.75	4.75	
Hora de entrada a saturación		10:25	10:27	10:29	
Hora de salida de saturación (mas 10")		10:35	10:37	10:39	
Hora de entrada a decantación		10:45	10:47	10:49	
Hora de salida de decantación (mas 20")		11:05	11:07	11:09	
Altura máxima de material fino	mm	3.50	3.50	3.40	
Altura máxima de la arena	mm	2.80	2.80	2.70	
Equivalente de Arena	%	80.0	80.0	79.0	80.0

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS 35 Min.

Elaboración: Los autores

Anexo 12. Ensayo de contenido de sales agregado fino

CONTENIDO DE SALES SOLUBLES EN AGREGADOS

(NORMA MTC E - 219)

LABORATORIO MECÁNICA DE SUELOS CONCRETOS Y PAVIMENTOS			
OBRA	TESIS MEZCLA CON CAUCHO		
TRAMO		JEFE LAB.	MARIO GAMARRA
MATERIAL	MUESTRA DE FAJA EN FRIO	TÉCNICO:	PERCY SALDAÑA P.
GRADACIÓN	ASTM - D3515 HUSO D5	FECHA	19/05/2014

AGREGADO FINO

N° DE ENSAYOS	IDENTIFICACIÓN		
	1	2	3
(1) Peso Tarro (Biker 100 ml)	53.20	54.24	53.41
(2) Peso de Tarro + Agua + Sal	93.20	94.12	95.30
(3) Peso de Tarro seco + Sal	53.25	54.28	53.45
(4) Peso de Sal (3 - 1)	0.05	0.04	0.04
(5) Peso del Agua (2 - 3)	39.95	39.84	41.85
(6) Porcentaje de sales (%) $(100/((3) \times (1)/(4) \times (2)))$	0.125	0.100	0.096
(7) Porcentaje de Sal	0.107%		

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

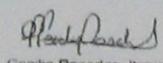
0.50%

Elaboración: Los autores

Anexo 13. Certificación de cemento asfáltico REPSOL

REPSOL
YPF

CERTIFICACIÓN DE CEMENTO ASFALTICO LOTE No. 60/70-001-06-2012

REFINERÍA LA PAMPILLA	RECEPCIÓN DE LA MUESTRA	FECHA DE CERTIFICACIÓN
	06/06/2012 04:02:05	06/06/2012 16:40:08
PRODUCTO Cemento Asfáltico 60/70	TANQUE 332A	DESTINO DEL PRODUCTO Operaciones de Despacho
PROCEDENCIA Almacenamiento	VOLUMEN CERTIFICADO, m³ 680	BUQUE TANQUE
PROPIEDADES	MÉTODOS	RESULTADOS
	ASTM/OTROS	
PENETRACIÓN		
Penetración a 25 °C, 100 g, 5 s, 1/10 mm	D 5 / AASHTO T 49	65
DUCTILIDAD		
Ductilidad a 25 °C, 5 cm/min, cm	D 113 / AASHTO T 51	> 105
VOLATILIDAD		
Gravedad Específica a 15°C	D 70 / AASHTO T 228	1.0240
Punto de Inflamación, °C	D 92 / AASHTO T 48	291.0
Gravedad API	D 70 / AASHTO T 228	6.7
FLUIDEZ		
Punto de Ablandamiento, °C	D 36	48.2
Viscosidad cinemática a 100°C, cSt	D 445	3250
Viscosidad cinemática a 135°C, cSt	D 2170 / AASHTO T 201	383
ENSAYOS DE PELÍCULA FINA		
Pérdida por Calentamiento, %m	D 1754 / AASHTO T 179	0.10
Penetración retenida, 100g, 5s, 1/10 mm, % del original	D 5 / AASHTO T 49	64.6
Ductilidad del residuo a 25°C, 5 cm/min, cm	D 113 / AASHTO T 51	52.8
SOLUBILIDAD		
Solubilidad en tricloroetileno, % m	D 2042 / AASHTO T 44	99.83
OTROS		
Índice de Penetración	UNE 104-281 / 1-5	-1.0
Ensayo de la Mancha Spot Test	AASHTO T102	35% xileno, negativo
OBSERVACIONES: PRODUCTO CUMPLE CON LAS NORMAS: ASTM, AASHTO Y NTP		
DISTRIBUCIÓN : Original : Operaciones de despacho Copia 1: Movimiento de Productos Copia 2: Laboratorio	FECHA EMISIÓN: 07/06/2012	LABORATORIO:  Cecilia Posadas Jheng Supervisora de Laboratorio

REPSOL COMERCIAL S.A.C.

PROHIBIDA SU REPRODUCCION PARCIAL

Anexo 14. PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO MARSHALL

A continuación se presenta una descripción general de los procedimientos seguidos en el Diseño Marshall de Mezclas. El procedimiento completo y detallado que debe ser seguido se encuentra en la norma AASHTO T 245 (o ASTM D1559).

Preparación para efectuar los procedimientos Marshall

El primer paso en el método de diseño, entonces, es determinar las cualidades (estabilidad, durabilidad, trabajabilidad, resistencia al deslizamiento, etc.) que debe tener la mezcla de pavimentación y seleccionar un tipo de agregado y un tipo compatible de asfalto que puedan combinarse para producir esas cualidades. Una vez hecho esto, se puede empezar con la preparación de los ensayos.

- **Selección de la muestras de material**

La primera preparación para los ensayos consta de reunir muestras del asfalto y del agregado que va a ser usados en la mezcla de pavimentación. Es importante que las muestras de asfalto tengan características idénticas a las el asfalto que va a ser usado en la mezcla final. Lo mismo debe ocurrir con las muestras de agregado. La razón es simple: los datos extraídos de los procedimientos de diseño de mezclas determinar la fórmula o “receta” para la mezcla de pavimentación. La receta será exacta, solamente si los ingredientes ensayados en el laboratorio tienen características idénticas a los ingredientes usados en el producto final.

Una amplia variedad de problemas graves, que van desde una mala trabajabilidad de la mezcla hasta una falla prematura del pavimento, son el resultado histórico de variaciones ocurridas entre los materiales

- **Preparación del agregado**

La relación viscosidad-temperatura del cemento asfáltico que va a ser usado debe ser ya conocida para establecer las temperaturas de mezclado y compactación en el laboratorio.

En consecuencia, los procedimientos preliminares se enfocan hacia el agregado, con el propósito de identificar exactamente sus características. Estos procedimientos incluyen secar el agregado, determinar su peso específico, y efectuar un análisis granulométrico por lavado.

Secando el agregado

El Método Marshall requiere que los agregados ensayados estén libres de humedad, tan práctico como sea posible. Esto evita que la humedad afecte los resultados de los ensayos.

Una muestra de cada agregado a ser ensayado se coloca en una bandeja, por separado, y se calienta en un horno a una temperatura de 110° C (230°F).

Después de cierto tiempo, la muestra caliente se pesa y, se registra su valor.

La muestra se calienta completamente una segunda vez, y se vuelve a pesar y a registrar su valor. Este procedimiento se repite hasta que el peso de la muestra permanezca constante después de dos calentamientos consecutivos, lo cual indica que la mayor cantidad posible de humedad se ha evaporado de la muestra.

Análisis granulométrico por vía húmeda

El análisis granulométrico por vía húmeda es un procedimiento para identificar las proporciones de partículas de tamaño diferente en las muestras del agregado. Esta información es importante porque las especificaciones de la mezcla deben estipular las proporciones necesarias de partículas de agregado de tamaño diferente, para producir una mezcla en caliente final con las características deseadas.

El análisis granulométrico por vía húmeda consta de los siguientes pasos:

1. Cada muestra de agregado es secada y pesada.
2. Luego de cada muestra es lavada a través de un tamiz de 0.075 mm (Nº 200), para remover cualquier polvo mineral que esté cubriendo el agregado.
3. Las muestras lavadas son secadas siguiendo el procedimiento de calentado y pesado descrito anteriormente.
4. El peso seco de cada muestra es registrado. La cantidad de polvo mineral puede ser determinada si se comparan los pesos registrados de las muestras antes y después del lavado.
5. Para obtener pasos detallados del procedimiento referirse a la norma AASHTO T 11.

Determinación del peso específico

El peso específico de una sustancia es la proporción peso - volumen de una unidad de esa sustancia comparada con la proporción peso - volumen de una unidad igual de agua. El peso específico de una muestra de agregado es determinado al comparar el peso de un volumen dado de agregado con el peso de un volumen igual de agua, a la misma temperatura. El peso específico del agregado se expresa en múltiplos del peso específico del agua (la cual siempre tiene un valor de 1). Por ejemplo, una muestra de agregado que pese dos y media veces más que un volumen igual de agua tiene un peso específico de 2.5.

El cálculo del peso específico de la muestra seca del agregado establece un punto de referencia para medir los pesos específicos necesarios en la determinación de las proporciones de agregado, asfalto, y vacíos que van a usarse en los métodos de diseño.

- **Preparación de las muestras (probetas) de ensayo**

Las probetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimentación son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto. El margen de contenidos de asfalto usado en las briquetas de ensayo está determinado con base en experiencia previa con los agregados de la mezcla. Este margen le da al laboratorio un punto de partida para determinar el contenido exacto de asfalto en la mezcla final. La proporción de agregado en las mezclas está formulada por los resultados del análisis granulométrico.

Las muestras son preparadas de la siguiente manera:

1. El asfalto y el agregado se calientan completamente hasta que todas las partículas del agregado estén revestidas. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
2. Las mezclas asfálticas calientes se colocan en los moldes pre-calentados Marshall como preparación para la compactación, en donde se usa el martillo Marshall de compactación, el cual también es calentado para que no enfríe la superficie de la mezcla al golpearla.
3. Las briquetas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall de compactación.

El número de golpes del martillo (35, 50 o 75) depende de la cantidad de tránsito para la cual está siendo diseñada. Ambas caras de cada biqueta reciben el mismo número de golpes. Así, una probeta Marshall de 35 golpes recibe, realmente un total de 70 golpes.

Una probeta de 50 golpes recibe 100 impactos. Después de completar la compactación las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes.

Procedimiento de ensayo Marshall

Existen tres procedimientos de ensayo en el método del ensayo Marshall. Estos son: determinación del peso específico total, medición de la estabilidad Marshall, y análisis de la densidad y el contenido de vacíos de las probetas.

- **Determinación del peso específico - total**

El peso específico total de cada probeta se determina tan pronto como las probetas recién compactadas se hayan enfriado a la temperatura ambiente. Esta medición de peso específico es esencial para un análisis preciso de densidad-vacíos. El peso específico total se determina usando el procedimiento descrito en la norma AASHTO T 166.

- **Ensayo de estabilidad y fluencia**

El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla. La fluencia mide la deformación, bajo carga que ocurre en la mezcla.

El procedimiento de los ensayos es el siguiente:

1. Las probetas son calentadas en el baño de agua a 60° C (140° F). Esta temperatura representa, normalmente, la temperatura más caliente que un pavimento en servicio va a experimentar.
2. La probeta es removida del baño, secada, y colocada rápidamente en el aparato Marshall. El aparato consiste de un dispositivo que aplica a una carga sobre la probeta y de unos medidores de carga y deformación (fluencia).
3. La carga del ensayo es aplicada a la probeta a una velocidad constante de 51 mm (2 pulgadas) por minuto hasta que la muestra falle. La falla está definida como la carga máxima que la briqueta puede resistir.

4. La carga de falla se registra como el valor de estabilidad Marshall y la lectura del medidor de fluencia se registra como la fluencia.

- **Valor de estabilidad Marshall**

El valor de estabilidad Marshall es una medida de la carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente. Durante un ensayo, cuando la carga es aplicada lentamente, los cabezales superior e inferior del aparato se acercan, y la carga sobre la briqueta aumenta al igual que la lectura en el indicador del cuadrante. Luego se suspende la carga una vez se obtiene la carga máxima. La carga máxima indicada por el medidor es el valor de Estabilidad Marshall.

Debido a que la estabilidad Marshall indica la resistencia de una mezcla a la deformación existe una tendencia a pensar que si un valor de estabilidad es bueno, entonces un valor más alto será mucho mejor.

Para muchos materiales de ingeniería, la resistencia del material es, frecuentemente, una medida de su calidad; sin embargo, este no es necesariamente el caso de las mezclas asfálticas en caliente. Las estabilidades extremadamente altas se obtienen a costa de durabilidad.

- **Valor de fluencia Marshall**

La fluencia Marshall, medida en centésimas de pulgada, representa la deformación de la briqueta, que está indicada por la disminución en su diámetro vertical.

Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad Marshall son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio.

Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tiene tendencia a deformarse bajo las cargas del tránsito.

- **Análisis de densidad y vacíos**

Una vez que se completan los ensayos de estabilidad y fluencia, se procede a efectuar un análisis de densidad y vacíos para cada serie de Probetas de prueba. El propósito del análisis es determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla compactada.

- **Análisis de vacíos**

Los vacíos son las pequeñas bolsas de aire que se encuentran entre las partículas de agregado revestidas de asfalto. El porcentaje de vacíos se calcula a partir del peso específico total de cada probeta compactada y del peso específico teórico de la mezcla de pavimentación (sin vacíos). Este último puede ser calculado a partir de los pesos específicos del asfalto y el agregado de la mezcla, con un margen apropiado para tener en cuenta la cantidad de asfalto absorbido por el agregado, o directamente mediante un ensayo normalizado (AASHTO T 2091) efectuado sobre la muestra de mezcla sin compactar. El peso específico total de las probetas compactadas se determina pesando las probetas en aire y en agua.

- 1. Análisis de Peso Unitario**

El peso unitario promedio para cada muestra se determina multiplicando el peso específico total de la mezcla por 1000 Kg/m³ (62.4 lb/ft³).

- 2. Análisis de VMA**

Los vacíos en el agregado mineral, VMA, están definidos por el espacio inter granular de vacíos que se encuentran entre las partículas de agregado de la mezcla de pavimentación compactada, incluyendo los vacíos de aire y el contenido efectivo de asfalto, y se expresan como un porcentaje del volumen total de la mezcla. El VMA es calculado con base en el peso específico total del agregado y se expresa como un porcentaje del volumen total de la mezcla compactada. Por lo tanto, el VMA puede ser calculado al restar el volumen de agregado (determinado mediante el peso específico total del agregado) del volumen total de la mezcla compactada.

- 3. Análisis de VFA**

Los vacíos llenos de asfalto, VFA, son el porcentaje de vacíos inter granulares entre las partículas de agregado (VMA) que se encuentran llenos de asfalto. El VMA abarca asfalto y aire, y por lo tanto, el VFA se calcula al restar los vacíos de aire de VMA, luego dividiendo por el VMA, y expresando el valor final como un porcentaje.

ANEXO 15. CUADRO RESUMEN ENSAYO MARSHALL MEZCLA CONVENCIONAL

LABORATORIO MECÁNICA DE SUELOS CONCRETO Y PAVIMENTOS

OBRA	TESIS MEZCLA CON CAUCHO		
TRAMO		JEFE LAB.	Mario Gamarra
MATERIAL	MEZCLA ASFÁLTICA	TÉCNICO	Percy Saldaña P.
GRADACION	DISEÑO - NORMA ASTM D3515 - HUSO "D5"	FECHA	26-may-14
UBICACIÓN			

CUADRO RESUMEN DE ENSAYO MARSHALL

ITEM	*A. C.	DENSIDAD	RICE ASTM D-2041	% VACÍOS DE MEZCLA	V.M.A	% VACÍOS LLENOS DE ASFALTO	ESTABILIDAD	FLUJO	ÍNDICE DE RIGIDEZ
	%	gr/cc		%	%	%	Kg.	mm	Kg/cm
1	5.0	2.343	2.517	6.9	17.2	60.0	1693	4.4	3810
2	5.5	2.384	2.493	4.4	16.2	73.0	1871	4.1	4513
3	6.0	2.401	2.479	3.2	16.1	80.4	1859	4.3	4298
4	6.5	2.416	2.453	1.5	16.0	90.8	1871	5.1	3682
5	7.0	2.398	2.423	1.0	17.0	94.1	1634	5.2	3140

6	7.5	2.384	2.412	1.2	18.0	93.6	1451	6.3	2318
----------	------------	-------	-------	-----	------	------	------	-----	------

RESULTADOS DE DISEÑO

7	5.6	2.386		4.2	16.2	74.8	1860	4.3	4276
----------	------------	-------	--	-----	------	------	------	-----	------

COMPROBACIÓN DE DISEÑO

8	5.3	2.379	2.508	5.1	16.2	68.3	1773	4.8	3683
9	5.6	2.385	2.501	4.7	16.3	71.4	1475	3.7	3960
10	5.9	2.392	2.489	3.9	16.3	76.0	1599	3.9	4106

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

				3` - 5	13,0 MIN	65 - 75	815 Kg, MIN	2` - 4	2500 - 3500
--	--	--	--	---------------	-----------------	----------------	--------------------	---------------	--------------------

Observaciones:

De acuerdo a los resultados se propone realizar una comprobación con 5.6%, para establecer una mayor aproximación a lo propuesto en las Especificaciones Técnicas

Elaboración: Los autores

ANEXO 16. CUADRO RESUMEN ENSAYO MARSHALL MEZCLA CON 1% CAUCHO

LABORATORIO MECÁNICA DE SUELOS CONCRETO Y PAVIMENTOS

OBRA	TESIS MEZCLA CON CAUCHO		
TRAMO		JEFE LAB.	Mario Gamarra
MATERIAL	MEZCLA ASFÁLTICA 1 % CAUCHO	TÉCNICO	Percy Saldaña P.
GRADACIÓ	DISEÑO - NORMA ASTM D3515 - HUSO "D5"	FECHA	26-may-14
UBICACIÓ			
N			

CUADRO RESUMEN DE ENSAYO MARSHALL

ITEM	* A. C.	DENSIDA D	RICE ASTM D-2041	% VACIOS DE MEZCL A	V.M.A	% VACIOS LLENOS DE ASFALT O	ESTABILIDA D	FLUJ O	INDICE DE RIGIDEZ
	%	gr/cc		%	%	%	Kg.	mm	Kg/cm
1	4.0	2.325	2.584	10.0	17.03	41.3	1795	3.0	6068
2	4.5	2.350	2.540	7.5	16.61	54.9	2088	3.2	6502
3	5.0	2.372	2.494	4.9	16.3	69.9	2240	3.4	6567
4	5.5	2.391	2.472	3.3	16.0	79.7	2183	4.1	5259
5	6.0	2.398	2.454	2.3	16.2	86.1	2040	4.3	4752
6	6.5	2.402	2.432	1.2	16.5	92.7	1920	4.9	3926

RESULTADOS DE DISEÑO

7	5.3	2.384		4.0	16.1	74.1	2214	3.8	5909
---	-----	-------	--	-----	------	------	------	-----	------

COMPROBACION DE DISEÑO

8	5.0	2.365	2.492	5.1	16.5	69.0	1977	3.6	5579
9	5.3	2.384	2.486	4.1	16.1	74.4	2274	3.9	5849
10	5.6	2.386	2.479	3.7	16.3	77.0	2068	4.0	5198

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

				3 - 5	13,0 MIN	65 - 75	815 Kg, MIN	2 - 4	2500 - 3500
--	--	--	--	-------	----------	---------	-------------	-------	-------------

Observaciones

:

De acuerdo a los resultados se propone utilizar la proporción de 5.3%, para establecer una mayor aproximación a lo propuesto en las Especificaciones Técnicas

Elaboración: Los autores