UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Reducción de la deformación permanente en pavimentos diseñados con
mezclas asfálticas en caliente a través de la incorporación de polvo de
caucho proveniente de neumáticos usados

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR(ES)

Contreras Martínez, Cesar Hernán (0000-0001-6332-7033)

Mamani Vilcatoma, Diego Paul (0000-0001-8196-9144)

ASESOR

Silvera Lima, Manuel Elias (0000-0002-8265-9495)

Lima, 20 de Setiembre de 2019

DEDICATORIA

*A mi familia y a Dios, por haber culminado esta etapa de mi vida profesional y por ser la
fuente de inspiración en mis metas presentes y futuras*

Contreras Martínez, Cesar Hernán

*A Dios y a mi familia, que gracias a su incondicional apoyo, permitieron que pueda
obtener este gran logro.*

Mamani Vilcatoma, Diego Paul

AGRADECIMIENTOS

A nuestro asesor el Ing. Manuel Silvera Lima, ya que sin su apoyo profesional y moral no hubiera sido posible la realización de este trabajo, al que consideramos un gran amigo y mentor.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo promover el uso del polvo de caucho reciclado como componente en el diseño de mezclas asfálticas con el propósito de disminuir la deformación permanente de la carpeta asfáltica y así mejorar su vida útil mediante el ensayo de la Rueda de Hamburgo.

La problemática del presente trabajo es la falta de información en cuanto a antecedentes del uso del polvo de caucho sobre todo en el medio local. Además en nuestro país no existe una industria dedicada a la elaboración del polvo de caucho. También se debe considerar que en el Perú no existe la cultura de utilizar materiales reciclados como componentes para el mejoramiento del asfalto en proyectos de pavimentos.

La finalidad de esta investigación consiste en dejar un antecedente para seguir con los trabajos de investigación del uso del polvo de caucho y mejorar el diseño de la mezcla asfáltica. Además de promover el uso de materiales reciclados para proyectos de infraestructura vial con el fin de cuidar el medio ambiente y mejorar la calidad de vida de los ciudadanos.

Palabras clave: Asfalto; Polvo de Caucho; Deformación Permanente; Rueda de Hamburgo

Reduction of permanent deformation in pavements designed with hot asphalt mixtures
through the incorporation of rubber powder from used tires

ABSTRACT

The purpose of this research work is to promote the use of recycled rubber powder as a component in the design of asphalt in order to reduce the permanent deformation of the asphalt binder and thus improve its useful life by using the Hamburg wheel.

The problem of the present work is the lack of information regarding the background of the use of rubber powder especially in the local environment. In addition in our country there is no industry dedicated to the production of rubber powder. It should also be considered that in Peru there is no culture of using recycled materials as components for the improvement of asphalt in pavement projects.

The purpose of this research is to leave a background to continue with the research work on the use of rubber dust and improve the design of the asphalt mix. In addition to promoting the use of recycled materials for road infrastructure projects in order to care for the environment and improve the quality of life of citizens.

Keywords: Asphalt; Rubber Powder; Permanent Deformation; Hamburg Wheel

TABLA DE CONTENIDOS

CAPITULO I – INTRODUCCION	1
1.1 REALIDAD PROBLEMÁTICA.....	1
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.3 ESTADO DEL ARTE	2
1.4 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	3
1.4.1 Hipótesis	3
1.4.2 Objetivo General	3
1.4.3 Objetivos Específicos.....	3
1.5 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	4
CAPITULO II – MARCO TEORICO	5
2.1 AGREGADOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS	5
2.1.1 Fuentes de Agregados.....	5
2.1.2 Propiedades del Agregado	6
2.2 CARACTERÍSTICAS DEL ASFALTO Y CAUCHO PARA MEZCLAS	
ASFÁLTICAS	12
2.2.1 Clasificación del Asfalto.....	12
2.2.2 Funciones y Características del Asfalto en la Construcción de Pavimentos	
Flexibles.....	13
2.2.3 Clasificación de Material Asfáltico	13
2.2.4 Propiedades de los Asfaltos.....	14
2.2.5 Clasificación del Asfalto en el Perú.....	14
2.3. PROPIEDADES Y APLICACIONES DEL CAUCHO.....	15
2.3.1 Propiedades y Aplicaciones del Caucho Natural	16
2.3.1.1 Propiedades Físicas del Caucho	16
2.3.1.2 Aplicaciones del Caucho	16
2.4 MÉTODO MARSHALL DE DISEÑO DE MEZCLAS.....	17
2.4.1 Preparación de Muestras	17
2.4.1.1 Selección de las Muestras de Material.....	17
2.4.1.2 Preparación del Agregado	17
2.4.1.3 Secado del Agregado	18
2.4.1.4 Preparación de las Muestras (Probetas) de Ensayo	18
2.4.2 Procedimiento de Ensayo Marshall	19
2.5. ENSAYO DE RUEDA HAMBURGO.....	22

2.5.1	Importancia y Aplicación.....	22
2.5.2	Espécimen de Ensayo	23
2.5.3	Resumen Procedimiento.....	23
2.5.4	Requerimientos para Solicitudes de Especímenes	23
CAPITULO III – METODOLOGIA Y ANALISIS DE LOS MATERIALES.....		25
3.1	REQUERIMIENTOS DE LOS AGREGADOS GRUESOS	29
3.1.1	Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	29
3.1.2	Abrasión los Ángeles	31
3.1.3	Partículas Chatas y Alargadas	36
3.1.4	Caras Fracturadas.....	37
3.1.5	Absorción y Peso Específico.....	39
3.1.6	Sales Solubles Totales.....	40
3.2	REQUERIMIENTOS DE LOS AGREGADOS FINOS	41
3.2.1	Equivalente de Arena	41
3.2.2	Azul de Metileno	42
3.2.3	Índice de Plasticidad (Malla n º40).....	42
3.2.4	Durabilidad al Sulfato de Magnesio.....	43
3.2.5	Índice de Plasticidad (Malla n º200).....	45
3.2.6	Absorción y Peso Específico.....	46
3.2.7	Sales Solubles Totales.....	47
3.3	GRANULOMETRIA DE LOS AGREGADOS GRUESOS Y FINOS	47
3.4	REQUERIMIENTOS DEL ASFALTO	48
3.5	REQUERIMIENTOS DEL CAUCHO	52
3.6	REQUISITOS DE ADHERENCIA.....	56
3.6.1	Requisitos de Adherencia del Agregado Grueso.....	56
3.6.2	Requisitos de Adherencia del Agregado Fino	60
3.7	DISEÑO DE MEZCLA	63
3.7.1	Diseño de Mezcla Convencional 120/150	64
3.7.2	Diseño de Mezcla Convencional 120/150 con 0.5% de caucho	66
3.7.3	Diseño de Mezcla Convencional 120/150 con 1% de caucho	66
3.7.4	Diseño de Mezcla Convencional 120/150 con 1.5% de Caucho	66
3.8	DISEÑOS MARSHALL	66
3.8.1	Diseño Marshall Convencional 120/150.....	70
3.8.2	Diseño Marshall Convencional 120/150 con 0.5% de caucho.....	71
3.8.3	Diseño Marshall Convencional 120/150 con 1% de caucho.....	71

3.8.4	Diseño Marshall Convencional 120/150 con 1.5% de caucho	72
3.9	ENSAYO DE RUEDA DE HAMBURGO	72
3.9.1	Ensayo de la Rueda de Hamburgo a la mezcla asfáltica convencional 120/150	72
3.9.2	Ensayo de la Rueda de Hamburgo a la mezcla asfáltica convencional 120/150 con 1% de caucho	72
CAPITULO IV – ANALISIS DE LOS RESULTADOS		72
4.1.	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LOS AGREGADOS GRUESOS Y FINOS	73
4.2.	RESULTADOS DEL ENSAYO AL ASFALTO	73
4.3.	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS MARSHALL	74
4.4.	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LA RUEDA DE HAMBURGO	75
CAPITULO V – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		77
5.1.	CONCLUSIONES	77
5.2.	RECOMENDACIONES	78
REFERENCIAS		80
ANEXOS		83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Requerimientos para los agregados gruesos.....	11
Tabla 2.2: Requerimientos para los agregados finos.....	11
Tabla 2.3: Selección del tipo de cemento asfáltico	14
Tabla 2.4: Especificaciones del cemento asfáltico clasificado por penetración.....	15
Tabla 2.5: Requisitos para mezcla de concreto bituminoso para el Ensayo Marshall.....	22
Tabla 3.1: Pesos retenidos de los agregados.....	28
Tabla 3.2: Requerimientos para los agregados gruesos.....	29
Tabla 3.3: Resultado del ensayo de durabilidad (del agregado uso 6/7 – (½” y 3/8”)).....	30
Tabla 3.4: Resultado del ensayo de durabilidad (agregado confitillo 1/4”)	30
Tabla 3.5: Para elección del número de esferas según granulometría de ensayo.....	33
Tabla 3.6: Para elección del método.....	33
Tabla 3.7: Elección del método “c” para el agregado grueso confitillo 1/4”	34
Tabla 3.8: Resultados del agregado grueso confitillo 1/4”	34
Tabla 3.9: Elección del método “b” para el agregado grueso uso 6/7 – (½” y 3/8”)	35
Tabla 3.10: Resultados del agregado grueso uso 6/7 – (½” y 3/8”)	35
Tabla 3.11: Resultados del ensayo de partículas chatas y alargadas	36
Tabla 3.12: Resultados del ensayo de partículas chatas y alargadas	37
Tabla 3.13: Resultados del ensayo de partículas chatas y alargadas	37
Tabla 3.14: Resultados del ensayo de partículas chatas y alargadas	38
Tabla 3.15: Resultados del ensayo de peso específico y absorción.....	39
Tabla 3.16: Resultados del ensayo de peso específico y absorción.....	39
Tabla 3.17: Resultados del ensayo de sales solubles.....	41
Tabla 3.18: Requerimientos para los agregados finos.....	41
Tabla 3.19: Resultado del equivalente de arena	42
Tabla 3.20: Resultado del ensayo de azul de metileno.....	42
Tabla 3.21: Resultados de índice de plasticidad malla n°40	43
Tabla 3.22: Resultados del ensayo de durabilidad	44
Tabla 3.23: Resultados de índice de plasticidad malla n°200	45
Tabla 3.24: Resultados del ensayo de peso específico y absorción.....	46
Tabla 3.25: Resultados del ensayo de sales solubles.....	47
Tabla 3.26: Granulometría de los agregados	47
Tabla 3.27: Selección del tipo de cemento asfáltico	48

Tabla 3.28: Especificaciones del cemento asfáltico clasificado por penetración.....	49
Tabla 3.29: Reporte de resultados de ensayos	50
Tabla 3.30: Reporte de resultados de ensayos con peso inicial de 200 gr.....	55
Tabla 3.31: Requisitos de adherencia	56
Tabla 3.32: Gradación para mezcla asfáltica en caliente (MAC).....	63
Tabla 3.33: Diseño de la mezcla bituminosa convencional 120/150	64
Tabla 3.34: Mezcla convencional con asfalto 120/150	65
Tabla 3.35: Requisitos para mezcla bituminosa	70
Tabla 3.36: Resultados del Marshall de la mezcla convencional con asfalto 120/150	70
Tabla 4.1: Resultados de los ensayos del agregado grueso	73
Tabla 4.2: Resultados de los ensayos del agregado fino	73
Tabla 4.3: Resultados de los ensayos al asfalto.....	73
Tabla 4.4: Resultados de los ensayos Marshall	75
Tabla 4.5: Resultados de los ensayos de Rueda de Hamburgo	75

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 3.1a.</i> Cantera.....	25
<i>Figura 3.1b.</i> Planta de Producción	25
<i>Figura 3.1c.</i> Agregado grueso de la cantera.....	26
<i>Figura 3.1d.</i> Agregado fino de la cantera.....	26
<i>Figura 3.1e.</i> Laboratorio del MTC	27
<i>Figura 3.1f.</i> Muestras de agregado	27
<i>Figura 3.1g.</i> Pesado de muestras.....	27
<i>Figura 3.2a.</i> Ensayo de durabilidad	31
<i>Figura 3.2b.</i> Tarrones para el ensayo	31
<i>Figura 3.3a.</i> Agregado grueso para sumergirlo	40
<i>Figura 3.3b.</i> Secado de agregado grueso	40
<i>Figura 3.4a.</i> Químico para el ensayo	44
<i>Figura 3.4b.</i> Agregado fino con el químico	44
<i>Figura 3.5a.</i> Instrumento de ensayo o Fiola.....	46
<i>Figura 3.5b.</i> Absorción de oxígeno del contenido en la Fiola	47
<i>Figura 3.6 a.</i> Latas de asfalto 120 – 150	51
<i>Figura 3.6 b.</i> Muestras del asfalto.....	51
<i>Figura 3.7 a.</i> Máquina moladora de caucho.....	53
<i>Figura 3.7 b.</i> Retazos de caucho	53
<i>Figura 3.7 c.</i> Caucho molido.....	53
<i>Figura 3.7 d.</i> Moladora de caucho más fina.....	53
<i>Figura 3.7 e.</i> Tamices	54
<i>Figura 3.7 f.</i> Tamizando el caucho	54
<i>Figura 3.7 g.</i> Tamizando	55
<i>Figura 3.7 h.</i> Tamizando	55
<i>Figura 3.8 a.</i> Retenido de la malla ¼"	57
<i>Figura 3.8 b.</i> Pasante de la malla 3/8".....	57
<i>Figura 3.8 c.</i> Aditivo Quimibond.....	58
<i>Figura 3.8 d.</i> Asfalto con aditivo y sin aditivo.....	58
<i>Figura 3.8 e.</i> Añadiendo asfalto	59
<i>Figura 3.8 f.</i> Mezclando asfalto	59

<i>Figura 3.8 g.</i> Muestras mezcladas con asfalto 120/150 con aditivo y sin aditivo.....	59
<i>Figura 3.8 h.</i> Adherencia que tiene el agregado mezclado con asfalto respecto al agua	60
<i>Figura 3.9a.</i> Añadiendo el asfalto 120/150 con aditivo y sin aditivo a la muestra fina.....	60
<i>Figura 3.9 b.</i> Porciones en formas de esferas (9 porciones con aditivo y sin aditivo).....	61
<i>Figura 3.9 c.</i> Desprendimiento en la solución 2.....	62
<i>Figura 3.9 d.</i> Desprendimiento en la solución 6	63
<i>Figura 3.10.</i> Preparación de 20 tarros, según el diseño de mezcla para el ensayo Marshall	64
<i>Figura 3.11a.</i> Curva granulométrica (Porcentajes que pasa (%) vs Abertura de malla (mm))	65
<i>Figura 3.11 b.</i> Incorporación de Quimibond al asfalto	66
<i>Figura 3.11c.</i> Calentamiento de los tarros a 145 °c.....	67
<i>Figura 3.11 d.</i> Pesado de material	67
<i>Figura 3.11 e.</i> Preparación de la mezcla asfáltica	67
<i>Figura 3.11 f.</i> Realizando los golpes	68
<i>Figura 3.11g.</i> Baño María de las briquetas a 60 °c.....	68
<i>Figura 3.11 h.</i> Rompiendo las briquetas	69
<i>Figura 3.11 i.</i> Estabilidad y flujo	69

CAPITULO I – INTRODUCCION

1.1 REALIDAD PROBLEMÁTICA

El Perú ha impulsado una política en el rubro de la construcción de infraestructura vial en los últimos 17 años, habiéndose construido más de 15,000 kilómetros de carreteras de pavimento de asfalto, según documentos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (Huamán, 2011).

En el Perú debido a la variabilidad climática y el tránsito, existe la posibilidad que se presenten deterioros prematuros en los pavimentos por efecto del fisuramiento, por fatiga y las deformaciones. El agrietamiento por fatiga causa fallas estructurales que afectan a todo el paquete estructural del pavimento (carpeta asfáltica, base, sub base y sub rasante). En el caso de las deformaciones, cuando un material o cuerpo es sometido a cargas repetitivas y recupera su estado inicial se le denomina deformación resiliente y cuando no recupera su estado inicial se le denomina deformación permanente; esta última parte como principal causante en el deterioro de las mezclas asfálticas (Del Val, 2010).

La deformación permanente causa deterioros en las mezclas asfálticas que perjudican su vida útil y originan fallas por ahuellamiento y ondulación. Ambas fallas son funcionales y dependen fuertemente del tipo de ligante utilizado, así como en los componentes de la mezcla asfáltica, las características de las partículas (tamaño), aditivos y la calidad de los agregados.

Esto conduce a la necesidad de desarrollar especificaciones técnicas para mezclas asfálticas que puedan incluir el uso de modificadores como polvo de caucho y la aplicación de la tecnología Superpave para mejorar el desempeño de los pavimentos asfálticos, con el propósito de garantizar la vida útil del proyecto.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿La incorporación de polvo de caucho de neumáticos reciclados en el diseño de mezclas asfálticas en caliente contribuye a disminuir la deformación permanente de la carpeta asfáltica?

1.3 ESTADO DEL ARTE

En el artículo “Obtención de Asfalto Modificado con Polvo de Caucho Proveniente del Reciclaje de Neumáticos de Automotores”, los autores nos indican que al utilizar polvo de caucho, aumentan las propiedades de durabilidad, disminuyen los mantenimientos periódicos al pavimento flexible y aumenta un porcentaje pequeño el costo total de la mezcla asfáltica modificada. Los autores señalan que el proceso de mezcla asfáltica modificada con polvo de caucho es muy sensible en cuanto a las propiedades del asfalto modificado que depende de factores externos (temperatura y clima) e internos como la pureza del polvo de caucho (Campaña, Galeas & Guerrero, 2015).

También se refiere que los resultados obtenidos de las pruebas fueron mejores en cuanto a propiedades físicas y mecánicas. Se concluye en este artículo que al incorporar polvo de caucho se obtuvieron mejores resultados en cuanto a módulo de rigidez, resistencia a la fatiga y deformación dinámica para la mezcla (húmeda) con el 20 wt % de polvo de caucho incorporado. En consecuencia la adición de polvo de caucho en mezclas asfálticas disminuye la deformación dinámica mejorando las propiedades de la mezcla y contrarresta el defecto de depresión o lo que se conoce como ahuellamiento (Campaña et al., 2015).

En el siguiente artículo “La Deformación Permanente en las Mezclas Asfálticas y el Consecuente Deterioro de los Pavimentos Asfálticos en el Perú”, se hace referencia que existe deformación permanente en todas las capas de la estructura del pavimento. Este artículo nos menciona las principales fallas que son generadas por la deformación permanente, desde un punto de vista mecánico y la falla de fisuramiento por fatiga. Ellos, señalan que la deformación permanente se da cuando el pavimento es sometido a cargas constantes y este no recupera su estado inicial. Si estas cargas son constantes pueden generar hundimiento y ahuellamiento. La falla por ahuellamiento se da por un exceso de cargas constantes transmitidas a las capas inferiores, tanto en la base como sub base. La determinación del tipo de ligante asfáltico se debe realizar de acuerdo al lugar donde será instalada la mezcla asfáltica, previamente se realizara un estudio de las características de la zona; de esta manera minimizar la influencia de la temperatura y su deformabilidad (Huamán & Chang, 2018).

En la investigación de Fajardo & Vergaray (2014) se señala que utilizaron polvo de neumático reciclado para darle un mejor comportamiento a la mezcla asfáltica. La

problemática principal que tuvieron, fue la falta de información en cuanto a la utilización del componente del caucho en la preparación de la mezcla de asfalto. En esta tesis se desarrolló la metodología de Marshall con un agregado de caucho de polvo del 1%. La conclusión en este trabajo fue la disminución de los vacíos de aire y el contenido de vacíos en el agregado mineral mediante el uso del polvo de caucho en forma seca.

En el trabajo de investigación de Huamán (2011), nos comenta el uso de alternativas de aditivos para el mejoramiento de las mezclas asfálticas con el fin de alargar la vida útil del asfalto producido por el efecto de las deformaciones que generan ciertas fallas las cuales pueden ser por ondulación, abultamiento, hundimiento y ahuellamiento. La falla por ondulamiento (corrugación o rizado), es un daño que se caracteriza por la forma de ondas en la superficie del pavimento, frecuentemente son de forma perpendicular a la dirección del tránsito y con distancias menores a 1 m entre crestas. La falla por abultamiento se asigna a los “abombamientos” o prominencias que se presentan en la superficie del pavimento. Se presentan ocupando en áreas pequeñas o gradualmente en superficies más grandes y en algunos casos van acompañados por fisuras. La falla por hundimiento puede generar problemas de seguridad a los vehículos, especialmente cuando contienen agua pues se puede producir hidropneumático y la falla por ahuellamiento.

1.4 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

1.4.1 Hipótesis

La adición de polvo de caucho proveniente de neumáticos usados en el diseño de mezclas asfálticas en caliente disminuirá la deformación permanente en milímetros, mejorando así la vida útil de la carpeta asfáltica.

1.4.2 Objetivo General

Demostrar que el uso del polvo de caucho obtenido de la trituración de neumáticos usados disminuirá la falla por ahuellamiento en la carpeta asfáltica y la falla por ondulación producidas por la deformación permanente mejorando así su vida útil.

1.4.3 Objetivos Específicos

Verificar que los agregados gruesos, finos y el asfalto cumplan con los requerimientos establecidos en el manual de carreteras “especificaciones técnicas generales para construcción” Eg-2013, que cumplen con las normas ASTM y AASHTO.

Proponer tres diseños de mezclas asfálticas incorporando polvo de caucho (con 0.5%, 1% y 1.5%) y otro diseño sin incorporar polvo de caucho.

Evaluar los resultados de estabilidad y flujo obtenidos del ensayo Marshall para los diseños de mezcla asfáltica con polvo de caucho y sin polvo de caucho.

Evaluar los resultados con respecto a la deformación permanente obtenidos del ensayo de Rueda de Hamburgo para las briquetas de mezclas asfálticas con polvo de caucho y sin polvo de caucho.

1.5 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

En la presente investigación se analiza el efecto de la deformación en la generación de fallas funcionales en la carpeta asfáltica como las de ahuellamiento y ondulación, mas no las fallas estructurales (agrietamiento por fatiga, hundimiento y “Piel de Cocodrilo”), ya que estos tipos de fallas afectan a todo el paquete estructural del pavimento (carpeta asfáltica, base, sub base y sub rasante).

Para mezclas asfálticas hay dos tipos de diseño, por vía seca y por húmeda, en el presente estudio se realiza el diseño de mezcla asfáltica por vía seca, ya que es más factible introducir el caucho como un agregado fino en la mezcla asfáltica, que a diferencia de la vía húmeda, se requiere de sistemas de alimentación del caucho, tanques de calentamiento y agitación, tanques de reacción y tanques de almacenamiento para lograr una mezcla homogénea entre el asfalto y el caucho.

CAPITULO II – MARCO TEORICO

2.1 AGREGADOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.1.1 Fuentes de Agregados

Para el diseño de pavimentos asfáltico generalmente se utilizan agregados de acuerdo a su origen. Estos están clasificados en agregados naturales, procesados y sintéticos (artificiales).

Agregados Naturales

Se entiende por agregados naturales en aquellos que son usados en su forma natural, es decir con poco o ningún tipo de procesamiento. Están conformados por partículas producidas mediante procesos naturales como erosión y degradación; como la acción del viento, agua de lluvia, y procesos químicos. La forma de las partículas individuales es producto de agentes que actúan sobre ellas. Por ejemplo, los glaciares producen rocas y guijarros redondeados, y las corrientes de agua producen partículas lisas y redondeadas. Los agregados más usados son la arena y la grava. La grava más usada es del tamaño igual o mayor que $\frac{1}{4}$ de pulgada o 6.35 mm. La arena usualmente, son partículas de un tamaño menor que 6.35 mm pero mayor que 0.075 mm (malla 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. Los agregados producidos en canteras abiertas y usados con ningún procesamiento adicional, son conocidos como materiales en bruto, y los agregados sacados de la ribera de ríos son conocidos como cantera de ríos (Fajardo & Vergaray, 2014).

Agregados Procesados

Son materiales que han sido procesados mediante procesos de trituración y tamizado. Existen dos fuentes principales de agregados procesados: El proceso para obtener las gravas se realiza mediante la trituración y luego se tamiza, esto con el fin de obtener material para el pavimento. La roca se tritura por las siguientes tres razones: para cambiar la textura superficial de las partículas de lisa a rugosa; para cambiar la forma de la partícula de redonda a angular y para reducir y mejorar la distribución y la gradación de los tamaños de las partículas. Se debe obtener partículas más pequeñas y manejables por ellos se debe de triturar hasta obtener el tamaño adecuado. No obstante estos cambios en la textura superficial y forma de partículas, son también de mucha importancia. Para el tamizado de los materiales,

después del proceso de trituración se obtiene una granulometría con diferente tipo de tamaños. Otro factor importante es la calidad de los pavimentos y esto consiste en mantener graduaciones específicas de agregados. Sin embargo, se debe utilizar el material obtenido de la trituradora, ya que sería más costoso realizar un tamizado adicional. Para un control adecuado del proceso de trituración, se debe determinar la graduación resultante del agregado y verificar si esto cumple o no con lo requerido en obra. Para el agregado triturado sin tamizar, se debe realizar de forma más controlada y supervisada en la utilización de estas en los proyectos de pavimentos (Fajardo & Vergaray, 2014).

2.1.2 Propiedades del Agregado

De acuerdo a lo indicado en lo siguiente se puede entender que en un pavimento, la composición de la mezcla asfáltica, esta generalmente conformado por el 90 a 95 % del agregado, en peso de la mezcla de pavimentación. Eso hace que la calidad del agregado, sea un factor importante en el comportamiento del pavimento asfáltico flexible. Sin embargo, se debe considerar otros criterios para la selección del agregado en el diseño del pavimento, uno de estos criterios principales es la calidad de los materiales. Estos criterios incluyen el costo y la disponibilidad del agregado, sin embargo, un agregado que cumple con los requisitos de costo y disponibilidad, deberá tener ciertas propiedades para poder ser considerado adecuado para pavimento asfáltico de buena calidad.

Las propiedades más importantes de los agregados que se usan para la construcción de pavimentación son los siguientes:

- 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

Tamaño y Graduación de las Partículas

Las dimensiones y gradación de las partículas es un punto muy importante al momento de usar en los pavimentos, tal como se describe en el siguiente fragmento.

Una propiedad importante y clave de los agregados que se usan en las bases y superficies de las pavimentaciones, es la granulometría o distribución de los tamaños de las partículas al mezclarlos. La combinación de las partículas de los agregados en la mezcla, afecta la densidad, la resistencia, y la economía de la estructura del pavimento. Se utiliza un análisis de granulometría y se determina las propiedades relativas y tamaños de los 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. Para la agrupación de los tamices se debe realizar de arriba hacia abajo, es decir, los que tienen mayor abertura en la parte superior y debajo los de aberturas más pequeñas sucesivamente. 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 (Fajardo & Vergaray, 2014).

Las mallas que se utilizan frecuentemente para proyectos de pavimentaciones son: de 2½, 2, 1½, 1, ¾, ½, 3/8 de pulgada cuadrada para mallas más grandes; y con 4, 10, 40, 80, 100, y 200 mallas por pulgada para mallas más pequeñas. Estas últimas se refiere como No. 4, No. 10, etc.

Los términos más usados al hacer referencia al agregado fraccionado y con el propósito la descripción de las mismas y se resumen en lo siguiente:

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

De acuerdo a indicado por Fajardo & Vergaray (2014), tanto el polvo mineral como el relleno se encuentran en los agregados naturales y que están considerados como subproductos en el proceso de la trituración de la roca. Esto es esencial para la elaboración de una mezcla con buenas características (buena cohesión y durabilidad) capaz de resistir 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 (la mezcla asfáltica aparecerá con poco o demasiado asfalto).

Dureza o Resistencia al Desgaste

Los materiales que se usaran en los proyectos de pavimentos tienen que ser altamente resistentes tanto a los impactos de las cargas como a los efectos de abrasión, clima, etc. La estimación de la dureza de los agregados, comúnmente aceptada, es la prueba de abrasión de Los Ángeles (NORMA MTC E 207). Para este ensayo se utiliza una máquina en forma de cilindro de acero hueco montado en los ejes, cerrado en ambos extremos, y 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. Se hace girar el tambor 500 veces con una velocidad constante de 30 a 33 rpm, después de retirar la muestra se procede a agitar en una malla del No. 12 (1.70 mm) (Fajardo & Vergaray, 2014).

Durabilidad o Resistencia al Intemperismo

La durabilidad de los agregados se mide con la prueba de Integridad según la norma MTC E.209.

En Esta prueba se realiza la medición de la resistencia de los agregados mediante la obtención de los agregados desintegrados en una solución saturada de sulfato de sodio o magnesio. Esta acción simula intemperismo en los agregados. En esta prueba se sumergen fracciones del agregado en dicha solución, luego se retira el agregado de la solución y se seca en un horno hasta que alcance una masa deseable (constante). Este proceso se repite con frecuencia de 23 ciclos (normalmente cinco). Luego de realizar los ciclos alternados de mojado y desecación, el agregado se divide en fracciones, se hace pasar por las mallas, se obtiene las fracciones requeridas y el porcentaje de la pérdida de peso. Para el porcentaje de pérdida, se expresa como un promedio pesado de la muestra. Para determinar un tamaño dado de malla, la pérdida promedio por peso (porcentaje), 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 (Fajardo & Vergaray, 2014).

Limpieza

Según a lo indicado por Fajardo & Vergaray (2014), las especificaciones de obra, generalmente ponen un límite a los tipos y cantidades de materiales indeseables (vegetación, arcilla esquistosa, partículas blandas, etc.) en el agregado. Si se excede con los materiales, esto podría afectar desfavorablemente las propiedades del pavimento. La limpieza del material (agregado) se puede realizar mediante una inspección visual. Sin embargo se realiza un lavado al tamizado (se debe pesar la muestra antes y después del lavado) esto nos da una medida más exacta del porcentaje del material más fino que 0.075 mm (No 200). El ensayo de arena equivalente (MTC E 14), 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).

Capacidad de Absorción

Los agregados en su mayoría tienen porosidades. En un agregado se puede determinar la cantidad de líquido cuando este se sumerge en un baño y se determina su porosidad. La capacidad de absorción de agua o asfalto en un agregado es importante en cuanto a información para el diseño del pavimento. Por ello, si un agregado es muy absorbente, entonces este continuara absorbiendo asfalto durante y después del mezclado inicial dejando menos asfalto en su superficie para adherir los demás materiales (partículas de agregado). Debido a esto, para un agregado poroso, se requiere cantidades 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 de estos materiales son la escoria de alto horno y algunos agregados sintéticos, ya que estos componentes son altamente porosos pero también son livianos en peso y tienen alta resistencia al desgaste (Fajardo & Vergaray, 2014).

Forma de Partícula y Textura de la Superficie

Las especificaciones para agregados más usados en el diseño de pavimentos, por lo general, tienen características relacionados con la forma y textura de la partícula, y la limpieza del agregado. Usualmente en las especificaciones para agregados más usados en el diseño de las mezclas asfálticas requieren que los agregados sean durables, resistentes, libres de impurezas, polvo, bola de arcilla y de formas planas o alargadas (exceso).

Peso Específico

El peso específico de un determinado material es una forma para expresar las características en peso y volumen. Estas características son importantes en el diseño y producción de las mezclas asfálticas debido a que el asfalto y agregado con proporcionales tanto en la mezcla y peso. Una tonelada de agregado de bajo peso específico tiene un volumen mayor, a diferencia de una tonelada de agregado con un peso específico más alto. En consecuencia, se debe cubrir con más asfalto a una tonelada de agregado con bajo peso específico, esto porque tiene un mayor volumen; a diferencia del agregado con un peso específico más alto que tiene menor volumen. Una de las razones por la que se debe conocer el peso específico de los agregados es que permite realizar el cálculo del porcentaje de vacíos de aire de las mezclas asfálticas. Estos vacíos o espacios de aire tienen una importante labor en la configuración estructural del pavimento culminado. 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 afectará en la cantidad de asfalto requerida para cubrir las partículas de agregado y el porcentaje de vacíos de aire en el diseño de la mezcla final, estos tipos se describen a continuación (Fajardo & Vergaray, 2014).

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

El peso específico total de una muestra incluye todos los poros de los materiales, con esto se está asumiendo que los poros que absorben agua ya no absorben asfalto; lo cual es una suposición falsa.

El peso específico aparente no incluye, como parte del volumen de la muestra, los poros y espacios capilares que llenos de agua al momento de mojar la muestra; con ello se asume que todos los poros del agregado que permiten el ingreso del agua (poros permeables) absorberán asfalto, esto es una suposición falsa (hay casos raros que son excepciones).

Respecto al peso específico efectivo (este excluye del volumen de la muestra), debido a que todos los poros y espacios capilares absorben asfalto; entonces esto supone la separación entre poros permeables y poros impermeables al agua; y al asfalto, por lo que esta suposición

se aproxime más al valor requerido, y como consecuencia debería usarse más en los cálculos de mezclas asfálticas (Fajardo & Vergaray, 2014).

Requisitos de los Agregados Gruesos y Finos

Tabla 2.1: Requerimientos para los agregados gruesos

ENSAYOS	NORMA	REQUERIMIENTO	
		ALTITUD (msnm)	
		≤ 3000	> 3000
DURABILIDA (al sulfato de magnesio)	MTC E 209	18% MAX	15% MAX
ABRASION LOS ANGELES	MTC E 207	40% MAX	35% MAX
PARTICULAS CHATAS Y ALARGADAS	ASTM 4791	10% MAX	10% MAX
CARAS FRACTURADAS	MTC E 210	85 / 50	90 / 70
SALES SOLUBLES TOTALES	MTC E 219	0.5% MAX	0.5% MAX
ABSORCION Y PESO ESPECIFICO	MTC E 206	1% MAX	1% MAX

Fuente: Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2013)

Tabla 2.2: Requerimientos para los agregados finos

ENSAYOS	NORMA	REQUERIMIENTO	
		ALTITUD (msnm)	
		≤ 3000	> 3000
EQUIVALENTE DE ARENA	MTC E 114	60	70
AZUL DE METILENO	AASTHO TP 57	8 MAX	8 MAX
INDICE DE PLASTICIDAD (MALLA N° 40)	MTC E 111	NP	NP
DURABILIDA (AL SULFATO DE MAGNESIO)	MTC E 209	-	18% MAX
INDICE DE PLASTICIDAD (MALLA N° 200)	MTC E 111	4 MAX	NP
SALES SOLUBLES TOTALES	MTC E 219	0.5% MAX	0.5% MAX
ABSORCION Y PESO ESPECIFICO	MTC E 205	0.5% MAX	0.5% MAX

Fuente: Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2013)

2.2 CARACTERÍSTICAS DEL ASFALTO Y CAUCHO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS

El asfalto es un material aglomerante sólido o semisólido de color negro que se licuan o diluyen fácilmente al calentarse (ASTM), cuyos constituyentes predominantes son BETUNES que se encuentran en la naturaleza ya sea de forma sólida o semisólida y se obtienen a partir del petróleo (Aranguri & Valverde, 2018).

El asfalto usado en trabajos de pavimentación proviene de la destilación del petróleo. Debido a la versatilidad de los materiales bituminosos, hacen que sean los más utilizados para la construcción de estructuras de pavimentos y su mantenimiento posterior. Los principales tipos de ligantes bituminosos más usados en la actualidad para la elaboración del diseño de mezclas asfálticas son los cementos asfálticos o de penetración, asfaltos líquidos (rebajados), las de emulsiones asfálticas, los naturales y los crudos de petróleo (Muñoz, 2013).

2.2.1 Clasificación del Asfalto

Asfalto Natural

En la naturaleza existen formaciones de depósitos naturales de asfalto debido a procesos análogos, estos depósitos son libres de materiales o sustancias raras (algunos casos) y otros contienen cantidades de minerales distintos, agua y demás sustancias. Los depósitos naturales del asfalto yacen dentro de los poros de las rocas (estructura porosa) y se pueden ver en distintas formas como los manantiales, las exudaciones y los lagos (Moreno, 2016).

Asfalto Derivado del Petróleo

La producción del asfalto del mundo proviene de la refinación del petróleo. A este derivado del petróleo se le conoce como asfalto residual, ya que proviene de la destilación del petróleo, de esta manera se distingue de los asfaltos naturales. Existen implicancias que se atribuyen a la denominación “residual” y que han llevado a la industria del asfalto a utilizar la expresión “Destilación Directa”, sin embargo es también inexacta, ya que se producen asfalto del petróleo por destilación simple (pocas veces) y no se realiza ningún tratamiento posterior a este proceso (Moreno, 2016).

2.2.2 Funciones y Características del Asfalto en la Construcción de Pavimentos Flexibles

Según Moreno (2016), el asfalto tiene la capacidad de resistir grandes esfuerzos y fluir por acciones de cargas permanentes. Además, de ser un material cohesivo, adherente y muy permeable, es muy utilizado en la construcción de pavimentos, ya que puede cumplir con las siguientes funciones y aplicarlas según sus características.

Impermeabilizar la estructura del pavimento, es decir, el pavimento debe tener una buena resistencia a la humedad y a la acción del agua que proviene de las precipitaciones.

Proporcionar una adecuada cohesión y unión entre los materiales (agregados) con el propósito de resistir las acciones mecánicas producidas por los vehículos (cargas permanentes) y de esta manera mejora la capacidad portante del pavimento disminuyendo el espesor de este.

2.2.3 Clasificación de Material Asfáltico

Asfalto Sólidos (Duros)

Estos asfaltos tienen como propiedades ser impermeabilizantes y aglutinantes. También, poseen durabilidad y una alta resistencia a la acción de ácidos, alcoholes y sales. Son aquellos cuya penetración es menor que 10 (temperatura ambiente) (Moreno, 2016).

Asfaltos Líquidos

Moreno (2016) también indica que los asfaltos líquidos son de consistencia blanda, son conocidos como rebajadores (Cutbacks), ya que al realizar el ensayo de penetración debe hacerse como máximo en 300 (límite). Estos asfaltos se pueden clasificar en 3 partes:

Asfalto de curado rápido: Cuando se utiliza gasolina o nafta como disolvente se obtiene los asfaltos de rápido curado RC (Rapid Curing), donde además se asigna una numeración (Viscosidad Cinemática) medida en centistokes.

Asfalto de curado medio: Se usa el queroseno como disolvente, a este asfalto se denomina MC (Medium Curing), donde además se asigna una numeración (Viscosidad Cinemática) medida en centistokes.

Asfalto de curado lento: Se disuelve en aceite liviano (poco volátil) y su denominación es SC (Slow Curing), donde además se asigna una numeración (Viscosidad Cinemática) medida en centiestokes.

2.2.4 Propiedades de los Asfaltos

De acuerdo a lo que indica Moreno (2016), una propiedad muy importante en los asfaltos es la Reología, se refiere a las fluctuaciones de las propiedades del flujo a través del tiempo donde también se incluye a la viscosidad.

La viscosidad del asfalto cambia dependiendo a la temperatura (mayor o menor grado), a esto se le conoce como susceptibilidad térmica y se debe estudiar a detalle porque en todas sus aplicaciones existe variación de la viscosidad por los cambios de temperatura (calentamiento), (Moreno, 2016).

El asfalto se considera viscoso cuando es sometido a temperaturas altas, mientras que en condiciones donde la temperatura es baja se vuelve solido con propiedades elásticas. Se utilizan curvas o monogramas para conocer las características del flujo del asfalto para distintos cambios de temperatura, que están relacionados principalmente con las propiedades del asfalto (Moreno, 2016).

2.2.5 Clasificación del Asfalto en el Perú

Según Moreno (2016), existen clasificaciones del asfalto de acuerdo a su viscosidad, a su grado de penetración, y por su performance grade (PG), en el Perú se optó por clasificarlo de acuerdo al grado de penetración.

Tipo de Cemento Asfáltico Clasificado según Penetración:

Tabla 2.3: Selección del tipo de cemento asfáltico

TEMPERATURA MEDIA ANUAL			
24° C o MAS	24° C o 15° C	15° C o 5° C	MENOS DE 5° C
40 -50 o 60-70 o modificado	60-70	85-100 120-150	Asfalto Modificado

Fuente: Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2013)

El cemento asfáltico fue otorgado por el Laboratorio del Ministerio de Transporte y Comunicaciones, donde el producto es certificado cumpliendo las normas ASTM (American Society for Testing), AASHTO (American Association of State Highway and Transportation) y La NTP (Norma Técnica Peruana), establecidos en la Tabla 415-02, del Manual de Carreteras Especificaciones técnicas generales para construcción Eg-2013, (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2013).

Tabla 2.4: Especificaciones del cemento asfaltico clasificado por penetración

TIPO		GRADO DE PENETRACION									
GRADO	ENSAYO	PEN 40-50		PEN 60-70		PEN 85-100		PEN 120-150		PEN 200-300	
		MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
PRUEBAS SOBRE EL MATERIAL BITUMINOSO											
PENETRACION A 25°C, 100 G, 5S, 0.1 MM	MTC E 304	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
PUNTO DE INFLAMACION °C	MTC E 312	232		232		232		218		177	
DUCTILIDAD, 25°C, 5 CM/MIN, CM	MTC E 306	100		100		100		100		100	
SOLUBILIDAD EN TRICLORO - ETILENO %	MTC E 302	99.0		99.0		99.0		99.0		99.0	
INDICE DE PENETRACION (SUSCEPTIBILIDAD TERMICA)	MTC E 304	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
ENSAYO DE LA MANCHA											
SOLVENTE NAFTA - ESTANDAR	AASHTO M20	NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO	
SOLVENTE NAFTA - XILENO %		NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO	
SOLVENTE HEPTANO - XILENO %		NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO	
PRUEBAS SOBRE LA PELICULA DELGADA A 163 °C, 3.2 MM, 5 H											
PERDIDA DE MASA, %	ASTM D 1754		0.8		0.8		1.0		1.3		1.5
PENETRACION RETENIDA DESPUES DEL ENSAYO DE PELICULA FINA, %	MTC E 304	55+		52+		47+		42+		37+	

Fuente: Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2013)

2.3. PROPIEDADES Y APLICACIONES DEL CAUCHO

Según Correa (2016), el caucho es un producto natural de formidables cualidades elasto-plásticas. Se obtiene a partir del látex, un fluido lechoso y con aspecto gomorresinoso que se encuentra en las células de numerosas especies de arbustos y árboles: La hevea brasilienses del Amazonas, el castillo elástica o árbol de hule de México y muchas otras especies de Indonesia, Malasia, Tailandia, la china y la India países en donde se produce el 90% del caucho que se usa en el mundos.

En el mercado mundial se utilizan dos tipos de caucho, el sintético y el natural. El primero, se obtiene mediante distintos polímeros y sirve para la producción de muchas variedades de productos. En cuanto al caucho natural, este se produce en el continente asiático (sudeste), mientras que el caucho sintético proviene principalmente de países industrializados como Japón, Europa Oriental y Occidental y Estados Unidos. En Centro y Sudamérica, solo Brasil posee una industria a gran escala de caucho sintético. Cabe mencionar que el 75 % del caucho natural y el 60% del sintético se destinan a la industria de los neumáticos y afines, ya que estos productos generan empleo a más de medio millón de personas en el mundo (Correa, 2016).

2.3.1 Propiedades y Aplicaciones del Caucho Natural

El caucho en su estado natural posee propiedades como una buena resistencia a la abrasión, poca resistencia al calor, a los aceites y al ozono, ya que tiene un comportamiento elastómero. Por lo general, la característica del comportamiento mecánico del material es su dependencia a los cambios de temperatura y el tiempo, a este factor se le conoce como un comportamiento visco elástico. Este comportamiento dependerá de la temperatura, del tiempo de ejecución de la carga (carácter visco elástico) y de la magnitud de la carga aplicada (Moreno, 2016).

2.3.1.1 Propiedades Físicas del Caucho

De acuerdo a lo que indicado por Moreno (2016), el caucho a temperaturas bajas, su estado cambia a rígido y cuando se aproxima a su congelamiento adquiere una estructura fibrosa. Cuando sobrepasa los 100°C comienza a tener alteraciones y llega a su estado plástico. Si el caucho es sometido a fuertes deformaciones y estiramientos no recupera su estado original (por un lapso de tiempo).

2.3.1.2 Aplicaciones del Caucho

La producción del caucho natural comienza a crecer de nuevo debido al impulso de las nuevas tecnologías en el campo de la explotación de los recursos naturales (materia prima), ya que se está utilizando nuevos procedimientos para la transformación del producto. El caucho natural y los sintéticos se elaboran para distintos productos como revestimientos de pisos con calidades muy altas, la utilización del caucho en temas de respuestas acústicas, en apariencias estéticas y de seguridad. También es usado en soluciones de acondicionamientos

termoacústicos, soluciones en temas de transmisión de vibraciones, absorción de desplazamientos y rotaciones, y soluciones en disipación de energía (Moreno, 2016).

2.4 MÉTODO MARSHALL DE DISEÑO DE MEZCLAS

Según Carrizales (2015) en donde señala que este método es aplicable solo para mezclas asfálticas en caliente en pavimentos cuyo tamaño máximo de los agregados debe ser igual o menor que 25 mm o 1 pulgada. Para la descripción general de procedimientos del método Marshall se presentan a continuación. Estos procedimientos debe ser seguido a detalle y según lo estipula la norma AASHTO T 245 o (ASTM D1559).

2.4.1 Preparación de Muestras

El método del diseño consiste en determinar las cualidades (durabilidad, trabajabilidad, resistencia al deslizamiento, estabilidad, etc.) que debe tener la mezcla de pavimentación. Así mismo, se debe seleccionar un tipo de agregado y otro compatible de asfalto que al momento de mezclarse se obtenga un producto de buenas cualidades. Al término de este proceso se comienza con la preparación de estos ensayos (Carrizales, 2015).

2.4.1.1 Selección de las Muestras de Material

Primero se reúnen las muestras del asfalto y el agregado que serán usados en la mezcla de la pavimentación. Las muestras del asfalto deberán tener las mismas características a las utilizadas en la mezcla final, este es muy importante. De igual modo debe ser para las muestras de los agregados. Una vez realizados estos procesos, se deberán extraer los datos de dichos procedimientos del diseño de mezcla con el fin de determinar la formula (receta) para la mezcla final de la pavimentación. La receta deberá ser exacta siempre y cuando los ingredientes ensayados en laboratorio cumplen con las características (idénticos) de los ingredientes usados en el producto final. Se debe considerar que pueden ocurrir problemas que van desde una falla prematura del pavimento por problemas de mala trabajabilidad de la mezcla y a los resultados históricos en las variaciones de materiales ocurridas en los ensayos de laboratorio y los usados en la obra (Carrizales, 2015).

2.4.1.2 Preparación del Agregado

Carrizales (2015) nos indica que es necesario conocer la relación viscosidad-temperatura del cemento asfáltico a utilizarse con el fin de establecer la temperatura de la mezcla y su compactación obtenida en el laboratorio. Por ello, los procesos preliminares se centran en el

agregado con el propósito de obtener las características exactas de los materiales a ser usados. Estos procedimientos constan en secar y determinar el peso específico del agregado y realizar un análisis de granulometría por un proceso de lavado.

2.4.1.3 Secado del Agregado

Para el Método Marshall es importante que de los agregados se requiere que estén libres de humedad al momento de realizar los ensayos en los laboratorios. Con esto se evita que se afecte los resultados de los ensayos. Para cada muestra de agregado debe estar separado y colocado sobre una bandeja, posteriormente llevado al horno y calentado a una temperatura de 110°C (230°F), luego la muestra se pesa en ciertos intervalos de tiempo y se toma registro de su valor. Debe ser conocida la relación viscosidad-temperatura (cemento asfáltico) de esta manera establecer la temperatura del mezclado de la muestra (Carrizales, 2015).

2.4.1.4 Preparación de las Muestras (Probetas) de Ensayo

Cada probeta de ensayo son preparados con ligeras cantidades diferente de asfalto. El margen de asfalto utilizado en cada briqueta del ensayo está basado en la experiencia previa de los agregados de la mezcla previa. Este dato se obtiene en el laboratorio como punto de inicio para determinar la medida exacta del asfalto en el diseño de la mezcla final. Las proporciones de los agregados están establecidas de acuerdo al resultado de análisis de granulometría (Carrizales, 2015).

De acuerdo a lo indicado por Carrizales las muestras se preparan de acuerdo al siguiente proceso:

El asfalto y el agregado se deben calentar hasta que todas las partículas (agregados) estén totalmente revestidas. Con esto se simula los procesos de mezclado y calentamiento ocurridos en planta.

Se colocan en los moldes (pre-calentado Marshall) las mezclas asfálticas, como parte de la preparación se usara el martillo Marshall para la compactación, que además será calentado en el proceso para que no pueda enfriar la mezcla (superficie) al momento de golpearla.

Las briquetas se compactan mediante golpes con el martillo Marshall. La cantidad de golpes con el martillo será de 35,50 o 75 veces y que dependerá de la cantidad de pasadas (tránsito) según el diseño específico. En ambas caras de las briquetas se da el mismo número de golpes, por lo que una probeta Marshall de 35 golpes, recibe 70 impactos o golpes y una probeta de

50 recibe 100 golpes. Luego de completar este proceso de compactación las briquetas se enfrían y se extraen de sus moldes.

2.4.2 Procedimiento de Ensayo Marshall

Para el ensayo de Marshall existen 3 procedimientos. Los cuales se indican a continuación: determinación del peso específico total, ensayo de la estabilidad y fluencia Marshall, y análisis de la densidad y vacíos de las probetas (Carrizales, 2015).

Determinación del Peso Específico-Total

Según Carrizales (2015), el peso específico total de cada briketa (probeta) se realiza una vez que las probetas se hayan enfriado a una temperatura igual al del ambiente. Esta medida del peso específico es fundamental para un análisis de densidad-vacíos. Según la norma AASHTO T 166 se puede determinar el peso específico total de los materiales (probetas).

Ensayo de Estabilidad y Fluencia

Carrizales (2015) también nos indica que el ensayo de Estabilidad se encarga de medir la resistencia a la deformación de la mezcla. En cuanto al ensayo de fluencia, este se encarga de medir las deformaciones bajo cargas que ocurren la mezcla.

El procedimiento de estos ensayos según Carrizales, se indica a continuación:

Las muestras (probetas) se calientan en baño de agua a una temperatura de 60°C (140°F). Esto representa a la temperatura más caliente en la que un pavimento (en servicio) va experimentar.

La probeta es retirada del baño, luego se seca la muestra y se coloca enseguida en el aparato Marshall. Este aparato es un dispositivo que aplica una carga sobre la muestra y al de unos indicadores de la deformación (fluencia) y la carga.

Se aplica a la probeta una carga de ensayo a una velocidad constante de 51 mm o 2 pulgadas por minuto hasta que la probeta falle. Esta falla se define como la carga máxima que la muestra puede resistir.

Se registra la carga de falla como el valor de estabilidad de Marshall, por lo que, en la lectura del medidor de fluencia se considera como la fluencia.

Valor de Estabilidad de Marshall

Este valor es una medida de carga aplicado a una probeta hasta que ceda o falle en su totalidad. Durante la prueba, la carga aplicable debe ser lenta, cuando los cabezales inferiores y superiores del aparato se juntan la carga que se ejerce sobre la briqueta aumenta, esto se observa en la lectura del indicador del aparato (cuadrante). Posteriormente, se suspende la carga cuando se tiene el valor de la carga máxima. Esta carga es el valor de la Estabilidad Marshall. Existe la tendencia a pensar que si el valor de estabilidad es bueno, entonces un resultado más alto será en consecuencia mucho mejor (resistencia a la deformación en una mezcla). Muchos materiales usados, con frecuencia se relacionan la resistencia con su calidad. Sin embargo, para las mezclas asfálticas (caliente) no necesariamente cumple este caso debido a que las estabilidades altas se generan a costa de la durabilidad (Carrizales, 2015).

Valor de Fluencia Marshall

La fluencia Marshall representa la deformación de la briqueta, esta expresada en centésimas de pulgada. La deformación se obtiene por la disminución vertical del diámetro de la briqueta ensayada. Los resultados bajos de fluencia valores altos de estabilidad (Marshall) son consideradas frágiles y rígidas respectivamente para el diseño de un pavimento en servicio. En cambio, cuando los valores de fluencia son altos se considera muy plásticas y tienen la tendencia a deformarse bajo las cargas permanente o de diseño (transito) (Carrizales, 2015).

Análisis de Densidad y Vacíos

Al termino de los ensayos de fluencia y estabilidad se realiza un análisis de densidad y vacíos para cada probeta. A lo indicado por Carrizales (2015), la finalidad de este análisis es para determinar el porcentaje de vacíos que existe en la mezcla compactada.

Análisis de Vacíos

Entre las partículas de agregado (revestidas de asfalto) se encuentran pequeñas bolsas de aire que se denominan vacíos, la cantidad de vacíos (porcentaje) se calcula a partir del peso específico de cada muestra compactada y del peso específico teórico de mezcla de asfalto del pavimento (sin vacíos). Este dato (peso específico teórico) se puede calcular del peso específico del asfalto y agregado de la muestra (mezcla) se debe tener en cuenta el margen correcto de la cantidad de asfalto absorbido por el agregado o también mediante un ensayo

normalizado (AASHTO T2091) efectuado sobre la mezcla sin compactar. Para hallar el peso específico total de las briquetas compactadas se pesa las probetas en agua y aire (Carrizales, 2015).

Análisis de Peso Unitario

Este peso se determina para cada muestra multiplicando el peso específico total de la mezcla por 1000 kg/m³ o 62.4 lb/ft³.

Análisis de VMA

El trabajo de investigación realizado por Carrizales (2015), indica que los vacíos de agregado mineral o VMA, están definido por el espacio (intergranular) de vacíos que tienen las partículas del agregado de la mezcla del pavimento compactado, se incluye el contenido efectivo del asfalto y los vacíos de aire, y se expresan como el porcentaje del volumen total de la muestra (mezcla). El VMA se calcula en base al peso específico total del agregado expresado con un porcentaje de volumen total de la mezcla (compacta). Luego, el VMA se halla restando el volumen del agregado, calculado mediante el peso específico total del agregado, del total del volumen de la mezcla compacta.

Análisis de VLLA o VFA

EL VLLA o los vacíos llenos de asfalto, son el porcentaje de vacíos (intergranulares) entre partículas del agregado (VMA) que se encuentran en su totalidad llenos de asfalto. El VMA también abarca aire y asfalto. Entonces se puede decir que el VLLA se halla al restar los vacíos de aire del VMA, luego se divide por el VMA, este valor final se expresa en porcentaje (Carrizales, 2015).

Tabla 2.5: Requisitos para mezcla de concreto bituminoso para el Ensayo Marshall

PARAMETRO DE DISEÑO	CLASE DE MEZCLA		
	A	B	C
MARSHALL MTC E 504			
1. COMPACTACION, NUMERO DE GOLPES POR LADO	75	50	35
2. ESTABILIDAD (MINIMO)	8.15 KN	5.44 KN	4.53 KN
3. FLUJO 0.01" (10 ⁻² Pulg) (0.25 MM)	0.08 pulg - 0.14 pulg 2mm - 3.6 mm	0.08 pulg - 0.16 pulg 2mm - 4.1 mm	0.08 pulg - 0.20 pulg 2mm - 5.1 mm
4. PORCENTAJE DE VACIOS CON AIRE (1) (MTC E 505)	3 - 5	3 - 5	3 - 5
5. VACIOS EN EL AGREGADO MINERAL	VER TABLA 423 -10 (MTC, 2013)		
INMERSION - COMPRESION (MTC E 518) 1. RESISTENCIA A LA COMPRESION MPA MIN 2. RESISTENCIA RETENIDA % (MIN)	2.1 75	2.1 75	1.4 75
RELACION POLVO - ASFALTO (2)	0.6 - 1.3	0.6 - 1.3	0.6 - 1.3
RELACION ESTABILIDAD / FLUJO (KG/CM) (3)	1700 - 4000		
RESISTENCIA CONSERVADA EN LA PRUEBA DE TRACCION INDIRECTA AASHTO T 283	80 MIN		

Fuente: Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2013)

2.5. ENSAYO DE RUEDA HAMBURGO

El ensayo de la Rueda de Hamburgo según la normativa AASHTO T 324 describe los procesos para determinar las ocurrencias a la deformación permanente y por los daños ocasionados por la humedad en las mezclas de asfalto (en caliente) usando muestras que se sumergen bajo las acciones de la rueda (oscilante) en el equipo de Rueda de Hamburgo. Este proceso es aplicable para muestras cilíndricas previamente compactadas en laboratorio con un compactador giratorio o Superpave (CGS). Las dimensiones de los especímenes son de 62 mm de altura y 150 mm de diámetro (Quezada, 2018).

2.5.1 Importancia y Aplicación

Este método se usa para obtener la susceptibilidad a la falla prematura de la MAC, este procedimiento (“Método de ensayo para probar mezclas asfálticas en caliente (MAC) en el equipo Rueda de Hamburgo”, s.f.), refiere que, debido a la poca consistencia estructural del

agregado, una inadecuada rigidez del ligante del asfalto y daño por condiciones de humedad con causantes a la falla mencionada. Este ensayo mide el número de pasadas a la falla y la profundidad de la huella a consecuencia de las pasadas. Los efectos ocasionados por la humedad son determinados debido a que los ensayos se realizan sumergidos en agua y a una temperatura que es monitoreada durante el proceso de carga.

2.5.2 Espécimen de Ensayo

Para realizar el ensayo se necesitan 4 cilindros de mezcla asfáltica (briquetas) en caliente, cuyas dimensiones son 150 mm de diámetro y una altura de (62 ± 2) mm.

2.5.3 Resumen Procedimiento

Una muestra de MAC (compactado en laboratorio), un pedazo de bloque extraído del sitio o pavimento, se carga de forma repetida usando una rueda de acero oscilatoria. En el siguiente método (“Método de ensayo para probar mezclas asfálticas en caliente (MAC) en el equipo Rueda de Hamburgo”, s.f.) también se indica que la muestra es sumergida en agua y se controla la temperatura (de 40°C a 50°C) o una determinada temperatura que será de acuerdo al ligante asfáltico usado. Luego se determina la deformación de la muestra ocasionada por la carga de la rueda. La grafica está en función del número de pasadas de la rueda (llanta). Al incrementarse abruptamente en la deformación (tasa de deformación) coincide con el desgarro de la película del ligante asfáltico ocurrido en el agregado del MAC.

2.5.4 Requerimientos para Solicitudes de Especímenes

Para el uso de especímenes el (“Método de ensayo para probar mezclas asfálticas en caliente (MAC) en el equipo Rueda de Hamburgo”, s.f.), refiere a usar 4 muestras o especímenes de forma cilíndrica cuya altura es de 62 ± 2 mm y un diámetro de 150 mm, que a su vez están compactados por una aparato compactador giratorio Superpave (CGS). Para ello, se compactan 3 muestras de prueba para llenar los vacíos y la altura. Se puede realizar el ensayo también con 2 bloques (mezcla asfáltica) con tamaños de 320 mm de alto por 260 mm de diámetro. Es recomendable para las muestras que se compactan en el laboratorio, tengan un contenido de vacíos de (7 ± 2) %. Para las muestras que se pueden ensayar en sitio el contenido de vacíos serán el cual fueron obtenidos. Para el método de ensayo mencionado con anterioridad se debe considerar dos tipos de mezclas las cuales son:

- Mezcla de Laboratorio

- Mezcla Remoldeada

Mezcla de Laboratorio:

Se debe tener los datos de diseño de la mezcla, con la finalidad de calcular las cantidades (mínimas) de asfalto, agregado y aditivos (si así requiera la mezcla). También se debe tener el material de cada apilamiento con los que estará conformado la fórmula de elaboración del trabajo, se recomienda como mínimo 5 sacos de cada uno. La cantidad del asfalto se aportara 5 galones como mínimo.

Mezcla Remoldeada:

Se debe aportar 24 kg de mezcla asfáltica como mínimo. Con ello, se puede obtener 3 muestras de prueba de 3 kg cada uno, 4 muestras para los ensayos de 3 kg cada uno y 3 para el ensayo de gravedad máxima teórica de 2 kg cada uno. Para realizar ensayos se debe obtener un aporte de 68 kg de mezcla en bloques de: 2 bloques de prueba, 1 bloque para realizar el ensayo y para el ensayo de gravedad máxima teórica se necesitaran 3 bloques.

CAPITULO III – METODOLOGIA Y ANALISIS DE LOS MATERIALES.

Nuestra investigación parte de los ensayos que se hacen a los agregados gruesos y finos que se realiza en el laboratorio del Ministerio de Transporte y Comunicaciones.

Los agregados gruesos y finos fueron traídos de la cantera que se ubica en el Km 14.8 Ate donde se encuentra la planta de producción de la empresa T y R Construcciones y Servicios S.A.C. Esta cantera fue elegida debido a sus características iniciales como el tamaño del agregado grueso, la textura del agregado fino y por ser proveedores de varias empresas que se dedican al rubro del transporte.

Figura 3.1a. Cantera

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.1b. Planta de Producción

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.1c. Agregado grueso de la cantera

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.1d. Agregado fino de la cantera

Fuente: Elaboración propia

Luego se procede a llevar los agregados al Laboratorio de la dirección de Estudios Especiales del Ministerio de Transporte y Comunicaciones para realizar los ensayos establecidos en el Manual de Carreteras, Especificaciones técnicas generales para construcción Eg-2013, (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2013).

Figura 3.1e. Laboratorio del MTC

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.1f. Muestras de agregado

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.1g. Pesado de muestras

Fuente: Elaboración propia

Las muestras de agregados gruesos y finos que llevamos al Ministerio de Transporte y Comunicaciones son:

Agregado Confitillo (1/4") = 4588.8 g

Agregado Uso 6/7 – (1/2" y 3/8") = 4867.1 g

Agregado Procesada = 350.4 g

Tabla 3.1: Pesos retenidos de los agregados

MALLA SERIE AMERICANA	CONFITILLO 1/4"	PIEDRA USO 6/7 - 1/2" y 3/8"	ARENA PROCESADA
PROFUNDIDAD	PESO RET	PESO RET	PESO RET
3"			
2"			
1 1/2"			
1"			
3/4"			
1/2"		2531.4	
3/8"	694.9	2122.1	
1/4"	3083.9	213.6	
Nº4	810		
Nº6			23.8
Nº8			28.3
Nº10			14.3
Nº16			52.4
Nº20			34.8
#30			40.3
#40			40.4
#50			30.1
#80			40.1
#100			13.6
#200			32.3
-200			28.6

Fuente: Elaboración propia

3.1 REQUERIMIENTOS DE LOS AGREGADOS GRUESOS

Los agregados gruesos deben cumplir con los requerimientos establecidos en la tabla 423-01, del Manual de Carreteras Especificaciones técnicas generales para construcción Eg-2013, (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2013).

Tabla 3.2: Requerimientos para los agregados gruesos

ENSAYOS	NORMA	REQUERIMIENTO	
		ALTITUD (msnm)	
		≤ 3000	> 3000
DURABILIDA (AL SULFATO DE MAGNESIO)	MTC E 209	18% MAX	15% MAX
ABRASION LOS ANGELES	MTC E 207	40% MAX	35% MAX
PARTICULAS CHATAS Y ALARGADAS	ASTM 4791	10% MAX	10% MAX
CARAS FRACTURADAS	MTC E 210	85 / 50	90 / 70
SALES SOLUBLES TOTALES	MTC E 219	0.5% MAX	0.5% MAX
ABSORCION Y PESO ESPECIFICO	MTC E 206	1% MAX	1% MAX

Fuente: Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2013)

3.1.1 Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)

De acuerdo al Ministerio de Transporte y Comunicaciones, la norma MTC E 209, que a su vez está basado en las normas AASHTO T 104 y la ASTM C 88. Estas normas se han adecuado a condiciones que existen en nuestra realidad. Es preciso recalcar que este Modo Operativo es revisado y actualizado continuamente.

La durabilidad se describe según los procedimientos que deberá seguir, en ese contexto para hallar la resistencia de los agregados por efectos de la desintegración de las mismas, se deberá estudiar la acción de soluciones (saturadas) de sulfato de magnesio o de sodio.

Este ensayo brinda importante información para determinar la calidad de los agregados que estarán sometidos a los efectos de agentes atmosféricos, más aún cuando se desconoce la disponibilidad de datos del comportamiento de materiales a ser usados en el pavimento y en las condiciones climatológicas del lugar de obra.

Se toma una muestra cuarteada de los Pesos Retenidos de 3/4", 1/2", 3/8" y del Peso Retenido del N 4 (del agregado grueso uso 6/7 – (1/2" y 3/8")).

Tabla 3.3: Resultado del ensayo de durabilidad (del agregado uso 6/7 – (1/2" y 3/8"))

PASA	RETENIDO	Nº RECIPIENTE	PESO ANTES DE ENSAYO	PESO DESPUES DE ENSAYO	% PERD. DESP. DE ENSAYO	ESCALONADA ORIGINAL	% PERDIDAS CORREGIDAS
2"	1 1/2"						
1 1/2"	1"						
1"	3/4"						
3/4"	1/2"	J-13	670.0	667.10	0.43	52.00	0.23
1/2"	3/8"	USA - 091	330.4	325.40	1.51	44.00	0.67
3/8"	Nº 4	USA - 081	257.9	254.3	1.40	4.00	0.06
							0.95

Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de durabilidad es de 0.95% el cual cumple con los requerimientos (según reglamento debe tener 15% máx.).

Se toma una muestra cuarteada del Peso Retenido 3/8" y del Peso Retenido del N 4 (del agregado grueso confitillo 1/4").

Tabla 3.4: Resultado del ensayo de durabilidad (agregado confitillo 1/4")

PASA	RETENIDO	Nº RECIPIENTE	PESO ANTES DE ENSAYO	PESO DESPUES DE ENSAYO	% PERD. DESP. DE ENSAYO	ESCALONADA ORIGINAL	% PERDIDAS CORREGIDAS
2"	1 1/2"						
1 1/2"	1"						
1"	3/4"						
3/4"	1/2"						
1/2"	3/8"	USA - 730	331.0	325.20	1.75	15.00	0.26
3/8"	Nº 4	USA - 080	300.1	292.8	2.43	85.00	2.07
							2.33

Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de durabilidad es de 2.33% el cual cumple con los requerimientos (según reglamento debe tener 15% máx.).

Figura 3.2a. Ensayo de durabilidad

Fuente: elaboración propia

Figura 3.2b. Tarrones para el ensayo

Fuente: elaboración propia

3.1.2 Abrasión los Ángeles

De acuerdo al Ministerio de Transporte y Comunicaciones, la norma MTC E 207, que a su vez está basado en las normas AASHTO T 96, ASTM C 131 y la ASTM C 535. Estas normas se han adecuado a condiciones que existen en nuestra realidad. Es preciso recalcar que este Modo Operativo es revisado y actualizado continuamente.

Este método se utiliza para hallar la resistencia al desgaste de los agregados que han sido triturados, mediante el uso de una máquina de carga abrasiva.

La Máquina de Los Ángeles, consiste en un cilindro de acero (hueco), cuyas longitudes son, $508 \pm 5 \text{ mm}$ ($20 \pm 0.2''$), en su interior y $711 \pm 5 \text{ mm}$ ($28 \pm 0.2''$), en su diámetro interior. Este cilindro tiene sus extremos cerrados y un eje en el centro de cada extremo, que no ingresa a su interior, de esta manera el cilindro queda montado y pueda girar en una posición horizontal sobre su eje. El cilindro tiene una abertura para introducir muestras que se ensayaran para la obtención de resultados, y un accesorio (entrepañó) para realizar la rotación de la carga abrasiva y de la mezcla. Esta abertura se podrá cerrar por una tapa (sellada) que pueda impedir la salida de polvo o partículas, será fijado con pernos. La tapa del cilindro está diseñada que manera que mantenga el entorno del cilindro interior. En dispositivo (entrepañó) se instala para que la carga no caiga durante el ensayo o se pegue con ella. Se podrá desmontar el entrepañó de acero, de modo que será ocupado de forma longitudinal en toda una generatriz del cilindro y se proyecta radialmente, hacia el centro de la parte circular con una longitud igual a $89 \pm 2 \text{ mm}$ ($3.5 \pm 0.1''$). El espesor será el apropiado de modo que nos permita montarlo usando unos pernos apropiados, con el fin de que quede firme y rígido al momento de su instalación. La distancia del entrepañó y la abertura será mayor que 1.27 m (50''), medida a lo largo de la circunferencia del cilindro y la rotación (sentido). La superficie del entrepañó está afectado por el constante desgaste e impacto de las esferas, por lo que se origina un relieve con distancia de 32 mm o 1 1/4" aproximadamente, desde la superficie interior del cilindro y la unión del entrepañó (Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC), 2000).

Si el entrepañó fue elaborado en una forma angular, este no podrá formarse el relieve, por el contrario, puede doblarse de forma transversal o longitudinalmente y no estar en su posición correcta, por ello se debe revisar constantemente. Cuando se detecten estos defectos, el dispositivo (entrepañó) debe ser reemplazado o reparado antes de cualquier otro ensayo. No se conoce los resultados de estos factores; sin embargo se debe informar y recomendar eliminar el formado de relieve con alturas superiores a 2 mm o 0.1''. La será puesta en marcha y contrabalanceada de forma que debe mantener la velocidad constante. La pérdida de velocidad y la bajada (deslizamiento) del mecanismo de transmisión son causas conocidas de que los resultados obtenidos de los ensayos no coincidan con los de máquina de desgaste con velocidad periférica uniforme o constante. La carga de abrasión se hará con esferas de acero (o de fundición) con medidas de, 46.38 mm o 1 13/16" y 47.63 mm o 1 7/8'', de diámetro y un peso de 390 g y 445 g (MTC, 2000).

La carga (abrasiva) va depender de la granulometría en el ensayo, A, B, C o D, de acuerdo con la Tabla siguiente:

Tabla 3.5: Para elección del número de esferas según granulometría de ensayo

Granulometría de ensayo	Número de esferas	Peso Total g
A	12	5000 $\pm$ 25
B	11	4584 $\pm$ 25
C	8	3330 $\pm$ 20
D	6	2500 $\pm$ 15

Fuente: Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2000)

Se deberá elegir el método (Granulometría de ensayo) a utilizar antes de poner la muestra en la máquina de Los Ángeles, en el siguiente cuadro se tienen los métodos:

Tabla 3.6: Para elección del método

PASA	RETENIDO	GRADO "A" (12)	GRADO "B" (11)	GRADO "C" (08)	GRADO "D" (06)	GRADO "1" (12)	GRADO "2" (12)	GRADO "3" (12)
3"	2 1/2"					2500 g		
2 1/2"	2"					2500 g		
2"	1 1/2"					5000 g	5000 g	
1 1/2"	1"	1250 g					5000 g	5000 g
1"	3/4"	1250 g						5000 g
3/4"	1/2"	1250 g	2500 g					
1/2"	3/8"	1250 g	2500 g					
3/8"	N 3			2500 g				
N 3	N 4			2500 g				
N 4	N 8				5000 g			

Fuente: Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2000)

Procedimiento para el agregado confitillo 1/4"

El agregado se tamizo en las mallas respectivas, donde hubieron pesos retenidos en las mallas: Tamiz 3/4", Tamiz 1/2", Tamiz 3/8", Tamiz 1/4", Tamiz N 4. Se toma el tamaño nominal máximo que en este caso es del peso retenido en el Tamiz 3/8", por eso eligió el método "C".

Tabla 3.7: Elección del método “c” para el agregado grueso confitillo 1/4"

PASA	RETENIDO	GRADO "A" (12)	GRADO "B" (11)	GRADO "C" (08)	GRADO "D" (06)	GRADO "1" (12)	GRADO "2" (12)	GRADO "3" (12)
3"	2 1/2"					2500 g		
2 1/2"	2"					2500 g		
2"	1 1/2"					5000 g	5000 g	
1 1/2"	1"	1250 g					5000 g	5000 g
1"	3/4"	1250 g						5000 g
3/4"	1/2"	1250 g	2500 g					
1/2"	3/8"	1250 g	2500 g					
3/8"	N° 3			2500 g				
N° 3	N° 4			2500 g				
N° 4	N° 8				5000 g			

Fuente: Elaboración propia

Para proceder con el ensayo debemos de tomar una cantidad de 5 kg del Retenido del Tamiz 3/4", como muestra, la que debe estar libre de polvo o partículas, por lo que se debe limpiar mediante lavado y secado en horno a temperatura de 105° C (221°f) y 110°C (230°F).

Posteriormente la muestra de 5 kg y la carga de abrasión se colocan en la Máquina de Los Ángeles, y se procede con girar el cilindro a velocidad que va desde 30 a 33 rpm, la cantidad total de vueltas será de 500. La máquina debe girar de forma constante para mantener una velocidad periférica uniforme. Cuando se cumple con el número de vueltas establecidos, una vez finalizado el proceso se descarga la muestra del cilindro y se hace pasar lo el tamiz # 12 y se pesa el retenido.

Peso retenido del tamiz # 12 = 4155.6 kg

Tabla 3.8: Resultados del agregado grueso confitillo 1/4"

CODIGO	TESIS
PESO INICIAL	5000.1
GRADACION	B
PESO MATERIAL RET. EN LA MALLA N° 12	4155.6
PESO MATERIAL PASA EN LA MALLA N° 12	844.5
PORCENTAJE DE DESGASTE	16.89

Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de desgaste es de 16.89% el cual cumple con los requerimientos (según reglamento tiene que tener 35% máx. de desgaste).

Procedimiento para el agregado uso 6/7 – (1/2” y 3/8”)

El agregado se tamizo en las mallas respectivas, donde hubieron pesos retenidos: Tamiz 3/4”, Tamiz 1/2”, Tamiz 3/8”, Tamiz 1/4”, Tamiz N 4. Se toma el tamaño nominal máximo que en este caso es del peso retenido en el Tamiz 1/2”, por eso eligió el método “B”.

Tabla 3.9: Elección del método “b” para el agregado grueso uso 6/7 – (1/2” y 3/8”)

PASA	RETENIDO	GRADO "A" (12)	GRADO "B" (11)	GRADO "C" (08)	GRADO "D" (06)	GRADO "1" (12)	GRADO "2" (12)	GRADO "3" (12)
3"	2 1/2"					2500 g		
2 1/2"	2"					2500 g		
2"	1 1/2"					5000 g	5000 g	
1 1/2"	1"	1250 g					5000 g	5000 g
1"	3/4"	1250 g						5000 g
3/4"	1/2"	1250 g	2500 g					
1/2"	3/8"	1250 g	2500 g					
3/8"	N°3			2500 g				
N°3	N°4			2500 g				
N°4	N°8				5000 g			

Fuente: Elaboración propia

Para proceder con el ensayo debemos de tomar una cantidad de 5 kg del Retenido del Tamiz 3/8”, y se procede como en el paso anterior para obtener el peso, el cual se obtuvo lo siguiente:

Peso retenido del tamiz # 12 = 4253.6 kg

Tabla 3.10: Resultados del agregado grueso uso 6/7 – (1/2” y 3/8”)

CODIGO	TESIS
PESO INICIAL	5000.5
GRADACION	B
PESO MATERIAL RET. EN LA MALLA N° 12	4253.6
PESO MATERIAL PASA EN LA MALLA N° 12	746.9
PORCENTAJE DE DESGASTE	14.94

Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de desgaste es de 14.94% el cual cumple con los requerimientos (según reglamento tiene que tener 35% máx. de desgaste).

3.1.3 Partículas Chatas y Alargadas

De acuerdo a lo establecido por el Ministerio de Transporte y Comunicaciones según la norma ASTM 4791, la que se han adaptado e implementado de acuerdo a la condiciones de la realidad de nuestro país. Es preciso indicar que el Modo Operativo está en constante actualización y revisión. Para los agregados con contenidos altos en partículas achatadas o planas son más propensos a fallar al momento de aplicar una carga mínima, ya que su forma (delgada) no es la apropiada. Por ello, es importante hallar la cantidad de estas partículas en el agregado grueso, debido a que este le da la resistencia requerida a la mezcla asfáltica. Por eso, es mejor utilizar partículas de formas irregulares y con una área superficial que pueda garantizar la buena adherencia con las demás partículas y el asfalto (cemento asfáltico), y obtener una mezcla altamente resistente.

El objetivo es identificar el porcentaje de partículas plantares y alargadas que se encuentran en una muestra de agregado.

Para el agregado confitillo 1/4"

Se toma una muestra cuarteada de los Pesos Retenidos de 3/8 y 1/4" y del Peso Retenido del N 4.

Tabla 3.11: Resultados del ensayo de partículas chatas y alargadas

DESCRIPCION MALLAS SERIE AMERICANA	PESO TOTAL RETENIDO EN MALLAS	PESO MUESTRA CHATAS Y ALARGADAS	PORCENTAJE DE CHATAS Y ALARGADAS	ESCALA ORIGINAL	PORCENTALE PARCIALES DE CHATAS Y ALARGADAS
2" - 1 1/2"					
1 1/2" - 1"					
1" - 3/4"					
3/4" - 1/2"					
1/2" - 3/8"	405.2	32.8	8.1	15	121.42
				15	121.42
% DE CHATAS Y ALARGADAS:		8.1 %			

Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de chatas y alargadas es de 8.1 % el cual cumple con los requerimientos (según reglamento tiene que tener 10% máx. de desgaste).

Para el agregado uso 6/7 – (1/2" y 3/8")

Para el otro agregado grueso se toma una muestra cuarteada del Peso Retenido de 1/2", del Peso Retenido de 3/8" y del Peso Retenido de 1/4".

Tabla 3.12: Resultados del ensayo de partículas chatas y alargadas

DESCRIPCION MALLAS SERIE AMERICANA	PESO TOTAL RETENIDO EN MALLAS	PESO MUESTRA CHATAS Y ALARGADAS	PORCENTAJE DE CHATAS Y ALARGADAS	ESCALA ORIGINAL	PORCENTALE PARCIALES DE CHATAS Y ALARGADAS
2" - 1 1/2"					
1 1/2" - 1"					
1" - 3/4"					
3/4" - 1/2"	1470.9	47.7	3.2	52	166.40
1/2" - 3/8"	970.4	35.6	3.7	44	162.80
				96	329.20

% DE CHATAS Y ALARGADAS :	8.1 %
---------------------------	-------

Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de chatas y alargadas es de 8.1% el cual cumple con los requerimientos (de acuerdo a lo reglamentado debe tener 10% máx. de desgaste).

3.1.4 Caras Fracturadas

De acuerdo al Ministerio de Transporte y Comunicaciones, la norma MTC E 210, que a su vez está basado en la norma ASTM D 5821. Estas normas se han adecuado a condiciones que existen en nuestra realidad. Este Modo Operativo es actualizado continuamente.

Para el agregado confitillo 1/4"

Se toma una muestra cuarteada de los Pesos Retenidos de 1/2", 3/8" y del N° 4.

Tabla 3.13: Resultados del ensayo de partículas chatas y alargadas

DESCRIPCION MALLAS SERIE AMERICANA	PESO TOTAL RETENIDO EN MALLAS	PESO MUESTRA		% CARAS DE FRACTURA		ESCALA ORIGINAL	% CARAS DE FRACTURA	
		1 A MAS	2 A MAS	1 A MAS	2 A MAS		1 A MAS	2 A MAS
2" - 1 1/2"								
1 1/2" - 1"								
1" - 3/4"								

3/4" - 1/2"								
1/2" - 3/8"	405.6	227.9	245	56.2	60.4	15	842.8	906.1
						15	842.8	906.1

Fuente: Elaboración propia

% CARAS FRACTURA 1 A MAS :	56.19 %
-----------------------------------	---------

% CARAS FRACTURA 2 A MAS :	60.40 %
-----------------------------------	---------

El porcentaje de caras de fractura de 2 a mas es de 60.40% el cual cumple con los requerimientos (según reglamento tiene que tener 90% máx.).

El porcentaje de caras de fractura de 1 a mas es de 56.19% el cual cumple con los requerimientos (según reglamento tiene que tener 70% máx.).

Para el agregado uso 6/7 – (1/2" y 3/8")

Para el otro agregado grueso se toma una muestra cuarteada de los Pesos Retenidos de 1/2", 3/8" y 1/4".

Tabla 3.14: Resultados del ensayo de partículas chatas y alargadas

DESCRIPCION MALLAS SERIE AMERICANA	PESO TOTAL RETENIDO EN MALLAS	PESO MUESTRA		% CARAS DE FRACTURA		ESCALA ORIGINAL	% CARAS DE FRACTURA	
		1 A MAS	2 A MAS	1 A MAS	2 A MAS		1 A MAS	2 A MAS
2" - 1 1/2"								
1 1/2" - 1"								
1" - 3/4"								
3/4" - 1/2"	1470.9	1464.5	1089.5	99.6	74.1	520	51773.7	38516.6
1/2" - 3/8"	970.4	220	872.1	22.7	89.9	440	9975.3	39542.9
						960	61749.0	78059.4

Fuente: Elaboración propia

% CARAS FRACTURA 1 A MAS :	64.32 %
-----------------------------------	---------

% CARAS FRACTURA 2 A MAS :	81.31 %
-----------------------------------	---------

El porcentaje de caras de fractura de 2 a mas es de 81.31% el cual cumple con los requerimientos (según reglamento tiene que tener 90% máx.).

El porcentaje de caras de fractura de 1 a mas es de 64.32% el cual cumple con los requerimientos (según reglamento tiene que tener 70% máx.).

3.1.5 Absorción y Peso Específico

De acuerdo al Ministerio de Transporte y Comunicaciones, la norma MTC E 206, que a su vez está basado en las normas ASTM C 127 y AASHTO T 85. Estas normas se han adecuando a condiciones que existen en nuestra realidad. Es preciso recalcar que este Modo Operativo es revisado y actualizado continuamente.

Para el agregado confitillo 1/4"

Se toma una muestra de 300 g del Retenido de la N 4 que fue puesto en un Tarro llevado al horno de un día al otro.

Tabla 3.15: Resultados del ensayo de peso específico y absorción

PESO MAT. SATURADO Y SUPERFICIALMENTE SECO (EN AIRE)	1687.7
PESO MAT. SATURADO Y SUPERFICIALMENTE SECO (SUMERGIDO)	1059.5
VOLUMEN DE LA MASA + VOLUMEN DE VACIOS	628.2
PESO DE MATEARIAL SECO	1676.9
VOLUMEN DE LA MASA	617.4
PESO ESPECIFICO BULK (BASE SECA)	2.67
PESO ESPECIFICO BULK (BASE SATURADA)	2.69
PESO APARENTE (BASE SECA)	2.72
ABSORCION	0.64

Fuente: Elaboración propia

El peso específico Bulk es de 2.67 ml/cm², por lo que cumple con los requerimientos.

La absorción es de 0.64% cumple con los requerimientos (según reglamento tiene que tener 1% máx.).

Para el agregado uso 6/7 – (½" y 3/8")

Se toma una muestra de 300 g del Retenido del Tamiz N° 4, que fue puesto en un Tarro llevado al horno de un día al otro.

Tabla 3.16: Resultados del ensayo de peso específico y absorción

PESO MAT. SATURADO Y SUPERFICIALMENTE SECO (EN AIRE)	1409.3
PESO MAT. SATURADO Y SUPERFICIALMENTE SECO (SUMERGIDO)	888.5
VOLUMEN DE LA MASA + VOLUMEN DE VACIOS	520.8

PESO DE MATEARIAL SECO	1396.2
VOLUMEN DE LA MASA	507.7
PESO ESPECIFICO BULK (BASE SECA)	2.681
PESO ESPECIFICO BULK (BASE SATURADA)	2.706
PESO APARENTE (BASE SECA)	2.75
ABSORCION	0.94

Fuente: Elaboración propia

El peso específico Bulk es de 2.681 ml/cm³ cumple con los requerimientos.

La absorción es de 0.94% cumple con los requerimientos (según reglamento tiene que tener 1% máx.).

Figura 3.3a. Agregado grueso para sumergirlo

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.3b. Secado de agregado grueso

Fuente: Elaboración propia

3.1.6 Sales Solubles Totales

Tabla 3.17: Resultados del ensayo de sales solubles

	AGREGADO GRUESO - CONFITILLO 1/4"	AGREGADO GRUESO - PIEDRA USO 6/7 (GRAVA 3/8")
SALES SOLUBLES	0.012%	0.014%

Fuente: Elaboración propia

3.2 REQUERIMIENTOS DE LOS AGREGADOS FINOS

Los agregados gruesos deben cumplir con los requerimientos establecidos en la tabla 423-02, del Manual de Carreteras Especificaciones técnicas generales para construcción Eg-2013, (MTC, 2013).

Tabla 3.18: Requerimientos para los agregados finos

ENSAYOS	NORMA	REQUERIMIENTO	
		ALTITUD (msnm)	
		≤ 3000	> 3000
EQUIVALENTE DE ARENA	MTC E 114	60	70
AZUL DE METILENO	AASTHO TP 57	8 MAX	8 MAX
INDICE DE PLASTICIDAD (MALLA N° 40)	MTC E 111	NP	NP
DURABILIDA (AL SULFATO DE MAGNESIO)	MTC E 209	-	18% MAX
INDICE DE PLASTICIDAD (MALLA N° 200)	MTC E 111	4 MAX	NP
SALES SOLUBLES TOTALES	MTC E 219	0.5% MAX	0.5% MAX
ABSORCION Y PESO ESPECIFICO	MTC E 205	0.5% MAX	0.5% MAX

Fuente: Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2013)

3.2.1 Equivalente de Arena

De acuerdo al Ministerio de Transporte y Comunicaciones, la norma MTC E 114, que a su vez está basado en las normas ASTM D 2419 y AASHTO T 176.

Según el manual de ensayos de materiales del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2000), donde se determina la cantidad relativa del polvo fino nocivo o del material (arcilla) en los agregados finos (suelos). Este proceso es relativamente más rápido en campo.

Para el agregado fino – arena procesada

Se toma una muestra cuarteada de la Pasante del Tamiz N° 4.

Tabla 3.19: Resultado del equivalente de arena

HORA ENTRADA DE SATURACION	09:40	09:42	09:44
SALIDA SATURACION	09:50	09:52	09:54
HORA ENTRADA A DECANTACION	09:52	09:53	09:56
SALIDA DECANTACION	10:11	10:13	10:15
ALTURA MATERIAL FINO	5.3	5.2	5.6
ALTURA ARENA (Pulg)	3.8	3.7	3.9
EQUIVALENTE ARENA (Pulg)	71.70	71.15	69.64
PROMEDIO DE EQUIV. ARENA %	71		

Fuente: Elaboración propia

El promedio de equivalente de arena es de 71% cumple con los requerimientos (según reglamento tiene que tener mayor o igual de 70%).

3.2.2 Azul de Metileno

Tabla 3.20: Resultado del ensayo de azul de metileno

	AGREGADO FINO - ARENA PROCESADA
AZUL DE METILENO	7.3 mg/g

Fuente: Elaboración propia

3.2.3 Índice de Plasticidad (Malla n °40)

Se toma una muestra la Pasante del Tamiz N° 4.

Tabla 3.21: Resultados de índice de plasticidad malla n°40

MALLA # 40	
CODIGO DE MUESTRA	N.P
Nº DE TARRO	
P. TARRO + S. HUMEDO	
P. TARRO + S. SECO	
AGUA	
PESO DE TARRO	
SUELO SECO	
% DE HUMEDAD	
Nº DE GOLPES	
CODIGO DE MUESTRA	N.P
Nº DE TARRO	
P. TARRO + S. HUMEDO	
P. TARRO + S. SECO	
AGUA	
PESO DE TARRO	
SUELO SECO	
% DE HUMEDAD	
LIMITE LIQUIDO	
LIMITE PLASTICO	
INDICE PLASTICO	

Fuente: Elaboración propia

3.2.4 Durabilidad al Sulfato de Magnesio

De acuerdo al Ministerio de Transporte y Comunicaciones, la norma MTC E 209, que a su vez está basado en las normas ASTM C 88 y AASHTO T 104. Estas normas se han adecuado a condiciones que existen en nuestra realidad. Es preciso recalcar que este Modo Operativo es revisado y actualizado continuamente.

Para la arena procesada

Se toma una muestra cuarteada del Peso Retenido Nro. 4 y de la Pasante del Nro. 4.

Tabla 3.22: Resultados del ensayo de durabilidad

PASA	RETENIDO	Nº RECIPIENTE	PESO ANTES DE ENSAYO	PESO DESPUES DE ENSAYO	% PERD. DESP. DE ENSAYO	ESCALONADA ORIGINAL	% PERDIDAS CORREGIDAS
3/8"	Nº 4						
Nº 4	Nº 8	WT - 92	100	94.50	5.5	13.00	0.72
Nº 8	Nº 16	G-4	100	91.40	8.6	18.00	1.55
Nº 16	Nº 30	2	100	92.50	7.5	20.00	1.50
Nº 30	Nº 50	9	100	91.10	8.9	19.00	1.69
							5.45

Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de durabilidad es de 5.45 % el cual cumple con los requerimientos (según reglamento debe tener 18% máx.).

Figura 3.4a. Químico para el ensayo

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.4b. Agregado fino con el químico

Fuente: Elaboración propia

3.2.5 Índice de Plasticidad (Malla n °200)

Se toma una muestra la Pasante de la Nro. 4

Tabla 3.23: Resultados de índice de plasticidad malla n°200

MALLA # 200	
CODIGO DE MUESTRA N° DE TARRO P. TARRO + S. HUMEDO P. TARRO + S. SECO AGUA PESO DE TARRO SUELO SECO % DE HUMEDAD N° DE GOLPES	N.P
CODIGO DE MUESTRA N° DE TARRO P. TARRO + S. HUMEDO P. TARRO + S. SECO AGUA PESO DE TARRO SUELO SECO % DE HUMEDAD LIMITE LIQUIDO LIMITE PLASTICO INDICE PLASTICO	N.P

Fuente: Elaboración propia

3.2.6 Absorción y Peso Específico

De acuerdo al Ministerio de Transporte y Comunicaciones, la norma MTC E 206, que a su vez está basado en las normas ASTM C 127 y AASHTO T 85. Estas normas se han adecuado a condiciones que existen en nuestra realidad. Es preciso recalcar que este Modo Operativo es revisado y actualizado continuamente.

Para el agregado fino – arena procesada

Se toma una muestra de 300 g de la Pasante de la N 4 que fue puesto en un Tarro llevado al horno de un día al otro.

Tabla 3.24: Resultados del ensayo de peso específico y absorción

MATERIAL (en gramos)	300
PESO FIOLA (CALIBRADA CON AGUA)(en gramos)	664.5
PESO FIOLA (CALIBRADA CON AGUA) + PESO MATERIAL	964.5
PESO FIOLA + AGUA + MATERIAL S.S.S (EXTRAIDO EL AIRE)	852.7
VOLUMEN DE LA MASA + VOLUMEN DE VACIOS	111.8
PESO DE MATERIAL SECO	299.2
VOLUMEN DE LA MASA	111.00
PESO ESPECIFICO BULK (BASE SECA)	2.674
PESO ESPECIFICO BULK (BASE SATURADA)	2.68
PESO APARENTE (BASE SECA)	2.70
ABSORCION	0.27

Fuente: Elaboración propia

- El peso específico Bulk es de 2.674 ml/cm³ cumple con los requerimientos.
- La absorción es de 0.27% cumple con los requerimientos (según reglamento tiene que tener 0.5% máx.).

Figura 3.5a. Instrumento de ensayo o Fiola

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.5b. Absorción de oxígeno del contenido en la Fiola

Fuente: Elaboración propia

3.2.7 Sales Solubles Totales

Tabla 3.25: Resultados del ensayo de sales solubles

	AGREGADO FINO - ARENA PROCESADA
SALES SOLUBLES	0.012%

Fuente: Elaboración propia

3.3 GRANULOMETRIA DE LOS AGREGADOS GRUESOS Y FINOS

Tabla 3.26: Granulometría de los agregados

MALLA SERIE AMERICANA	CONFITILLO 1/4"	PIEDRA USO 6/7 - 1/2" y 3/8"	ARENA PROCESADA
-----------------------	-----------------	------------------------------	-----------------

PROFUNDIDAD	PESO RET	RET %	PASA%	PESO RET	RET %	PASA%	PESO RET	RET %	PASA%
3"									
2"									
1 1/2"									
1"									
3/4"						100			
1/2"			100	2531.4	52	48			
3/8"	694.9	15	85	2122.1	44	4			
1/4"	3083.9	67	18	213.6	4	0			
Nº4	810	18	0						100
Nº6							23.8	6	94
Nº8							28.3	7	86
Nº10							14.3	4	82
Nº16							52.4	14	69
Nº20							34.8	9	60
#30							40.3	11	49
#40							40.4	11	38
#50							30.1	8	30
#80							40.1	10	20
#100							13.6	4	17
#200							32.3	8	9
-200							28.6	8	1

Fuente: Elaboración propia

3.4 REQUERIMIENTOS DEL ASFALTO

Para esta investigación se decidió trabajar con un cemento asfáltico 120 – 150, para climas con temperaturas de entre 5 °C a 15 °C, según la EG 2013, Tabla 415-01.

Tabla 3.27: Selección del tipo de cemento asfáltico

TEMPERATURA MEDIA ANUAL			
24° C o MAS	24° C o 15° C	15° C o 5° C	MENOS DE 5° C
40 -50 o 60-70 o modificado	60-70	85-100 120-150	Asfalto Modificado

Fuente: Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2013)

El cemento asfáltico fue otorgado por el Laboratorio del Ministerio de Transporte y Comunicaciones, donde el producto es certificado cumpliendo con las normas establecidas en el Manual de Carreteras Especificaciones técnicas generales para construcción Eg-2013, (MTC, 2013).

En la siguiente tabla se describen las especificaciones del cemento asfáltico mediante penetración obtenidas del manual según el MTC (2013).

Tabla 3.28: Especificaciones del cemento asfáltico clasificado por penetración

TIPO		GRADO DE PENETRACION									
GRADO	ENSAYO	PEN 40-50		PEN 60-70		PEN 85-100		PEN 120-150		PEN 200-300	
		MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
PRUEBAS SOBRE EL MATERIAL BITUMINOSO											
PENETRACION A 25°C, 100 G, 5S, 0.1 MM	MTC E 304	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
PUNTO DE INFLAMACION °C	MTC E 312	232		232		232		218		177	
DUCTILIDAD, 25°C, 5 CM/MIN, CM	MTC E 306	100		100		100		100		100	

SOLUBILIDAD EN TRICLORO - ETILENO %	MTC E 302	99.0		99.0		99.0		99.0		99.0	
INDICE DE PENETRACION (SUSCEPTIBILIDAD TERMICA)	MTC E 304	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
ENSAYO DE LA MANCHA											
SOLVENTE NAFTA - ESTANDAR	AASHTO M20	NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO	
SOLVENTE NAFTA - XILENO %		NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO	
SOLVENTE HEPTANO - XILENO %		NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO		NEGATIVO	
PRUEBAS SOBRE LA PELICULA DELGADA A 163 °C, 3.2 MM, 5 H											
PERDIDA DE MASA, %	ASTM D 1754		0.8		0.8		1.0		1.3		1.5
PENETRACION RETENIDA DESPUES DEL ENSAYO DE PELICULA FINA, %	MTC E 304	55+		52+		47+		42+		37+	
DUCTILIDAD DEL RESIDUO A 25 ° C, 5 CM/MIN, CM	MTC E 306			50		75		100		100	

Fuente: Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2013)

La certificación del cemento asfáltico 120-150, tiene los siguientes resultados en la siguiente tabla:

Tabla 3.29: Reporte de resultados de ensayos

ENSAYOS REALIZADOS A LA MUESTRA ORIGINAL	NORMA	RESULTADOS	RESULTADO
PENETRACION, 25 C, 100 g, 5s, (0.1mm)	MTC E - 304	142	CUMPLE
PUNTO DE ABLANDAMIENTO, Anillo y bola (° C)	MTC E - 307	44	CUMPLE
VISCOSIDAD CINEMATICA a 135 °C	MTC E- 310	201.8	CUMPLE
PUNTO DE INFLAMACION, copa abierta Cleveland (° C)	MTC E - 303	290	CUMPLE
DUCTILIDAD, 25 °C, 5 cm/min (cm)	MTC E - 306	+ 100	CUMPLE

SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO (%)	MTC E - 302	99.87	CUMPLE
ENSAYO DE LA MANCHA	MTC E - 314	NEGATIVO	CUMPLE
Solvente Nafta Standard			
INDICE DE SUSCEPTIBILIDAD TERMICA	Heukelom	+ 0.1	CUMPLE
ENSAYOS REALIZADOS DESPUES DE PELICULA FINA, 3.2 mm, 163 °C, 5h			CUMPLE
PERDIDA DE MASA (%)	MTC E - 315	0,09	CUMPLE
PENETRACION, 25 C, 100 g, 5s, (% de la penetración original)	MTC E - 304	59	CUMPLE
DUCTILIDAD, 25 °C, 5 cm/min (cm)	MTC E - 306	+ 100	CUMPLE

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.6 a. Latas de asfalto 120 – 150

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.6 b. Muestras del asfalto

Fuente: Elaboración propia

3.5 REQUERIMIENTOS DEL CAUCHO

El polvo de caucho es proveniente del triturado de neumáticos usados y fue proporcionado por la empresa Caucho Perú. Para la obtención del caucho de neumático, este tiene que pasar por una trituradora, luego se separan del material ferroso. Los trozos de neumáticos usados tienen que pasar por un proceso de selección y posterior trituración para disminuir su tamaño en partículas más pequeñas e irregulares.

Para el seccionamiento (troceado) de los neumáticos usados se realiza a temperatura del ambiente y se pasa por la trituradora que se forman por ejes paralelos con cuchillas que giran en su propio eje y a velocidades variables. Las cuchillas son de gran espesor, sus bordes son de forma de garfios que apoyan a la inserción del neumático. Los ejes están separados de acuerdo al tamaño de las partículas obtenidas, este proceso se repite para obtener partículas más pequeñas.

Trituración de partículas de mayor tamaño de trozos de neumáticos usados.

Figura 3.7 a. Maquina moledora de caucho

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.7 b. Retazos de caucho

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.7 c. Caucho molido

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.7 d. Moledora de caucho más fina

Fuente: Elaboración propia

El polvo de caucho empleado para mejorar las propiedades del cemento asfáltico debe cumplir ciertas especificaciones que se encuentran establecidas en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2680:2013. En esta se recomienda que todas las partículas de caucho tengan un tamaño capaz de pasar a través del tamiz de 2.38 mm (N°8), (Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), 2013).

En el presente trabajo de investigación, el polvo de caucho se pasó por el tamiz de 0.84 mm (N°20), cumpliendo, ya que pasa en totalidad por el tamiz de 2.38 mm (N°8).

Figura 3.7 e. Tamices

Fuente: elaboración propia

Figura 3.7f. Tamizando el caucho

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.7 g. Tamizando

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.7 h. Tamizando

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.30: Reporte de resultados de ensayos con peso inicial de 200 gr

TAMIZES ASTM	PESO RETENIDO	RET %
Nro 16		
Nro 20		
Nro 30	7.5 g	3.7
Nro 40	29.7 g	14.9
Nro 50	79 g	39.5
Nro 80	68.2 g	34.1
Nro 100	12 g	6
Nro 200	1.8 g	0.9
-200	1.7 g	0.9

Fuente: Elaboración propia

- La granulometría del polvo del caucho para poder ponerlo en el diseño Marshall.
- El peso específico del caucho es 1.15 gr/ cm³.

3.6 REQUISITOS DE ADHERENCIA

Los agregados finos y gruesos deben cumplir con los requerimientos establecidos en el Manual de Carreteras Especificaciones técnicas generales para construcción Eg-2013, (MTC, 2013).

Tabla 3.31: Requisitos de adherencia

ENSAYOS	NORMA	REQUERIMIENTO	
		≤ 3000	> 3000
ADHERENCIA (AGREGADO GRUESO)	MTC E 517	+ 95	-
ADHERENCIA (AGREGADO FINO)	MTC E 220	4 min	-
ADHERENCIA (MEZCLA)	MTC E 521	-	+ 95
RESISTENCIA CONSERVADA EN LA PRUEBA DE TRACCION INDIRECTA	AASHTO T 283	-	80 min

Fuente: Elaboración propia

3.6.1 Requisitos de Adherencia del Agregado Grueso

De acuerdo al Ministerio de Transporte y Comunicaciones, la norma MTC E 517, que a su vez está basado en la norma AASHTO T 182. Esta norma se ha adecuando a condiciones que existen en nuestra realidad. Es preciso recalcar que este Modo Operativo es revisado y actualizado continuamente.

Se tomó una muestra cuarteada de los pesos retenidos de las mallas 3/4", 1/2", malla 3/8" y 1/4". La muestra para este ensayo (en seco) se pasara o lavara por agua destilada y eliminar el material fino que se encuentra adherido. Luego, se secaran en horno a una temperatura que estará entre los 135 y 149°C (peso constante) y a una temperatura del ambiente. Posteriormente, se pondrá en recipientes herméticos para su almacenaje hasta el ensayo.

Para el ensayo se realizó lo siguiente:

Se tomó 51g de asfalto 120/150 para incrementarle 0.7% de aditivo (aditivo mejorador Quimibond).

$(51 \text{ g} \times 0.7 \%) / 100\% = 0.357 \text{ g}$ seria la cantidad de aditivo a utilizar (se le añade al asfalto 120/150)

Luego se toma 2 recipientes de aluminio para separar el material de la siguiente manera:

Recipiente 1 = 100 g de piedra + 5.5 g con aditivo

Recipiente 2 = 100 g de piedra + 5.5 g sin aditivo

Figura 3.8 a. Retenido de la malla 1/4"

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.8 b. Pasante de la malla 3/8"

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.8 c. Aditivo Quimibond

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.8 d. Asfalto con aditivo y sin aditivo

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.8 e. Añadiendo asfalto

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.8 f. Mezclando asfalto

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.8 g. Muestras mezcladas con asfalto 120/150 con aditivo y sin aditivo

Fuente: elaboración propia

Luego se le agrega agua para ver el efecto de la acción del agua sobre la película asfáltica que recubre un agregado y así poder juzgar un agregado con respecto a un ligante asfáltico tipo o recíprocamente. Así mismo, se puede emplear para valorar la acción de los aditivos que se utilicen para mejorar la adhesividad (cubrimiento).

Figura 3.8 h. Adherencia que tiene el agregado mezclado con asfalto respecto al agua

Fuente: Elaboración propia

3.6.2 Requisitos de Adherencia del Agregado Fino

De acuerdo al Ministerio de Transporte y Comunicaciones, la norma MTC E 220, que a su vez está basado en la norma NLT 355/74. Esta norma se ha adecuado a condiciones que existen en nuestra realidad. Se toma una muestra cuarteada del peso de la Pasante de la malla 30 y del Retenido de la malla 70. Para el ensayo se realizó lo siguiente:

Se tomó 51g de asfalto 120/150 para incrementar 0.7% de aditivo (aditivo mejorador Quimibond).

$(51 \text{ g} \times 0.7 \%) / 100\% = 0.357 \text{ g}$ sería la cantidad de aditivo a utilizar (se le añade al asfalto 120/150)

Luego se toma 2 recipientes de aluminio para separar el material de la siguiente manera:

Recipiente 1 = 35.5g de piedra + 14.5 g con aditivo

Recipiente 2 = 35.5 g de piedra + 14.5 g sin aditivo

Figura 3.9a. Añadiendo el asfalto 120/150 con aditivo y sin aditivo a la muestra fina

Fuente: elaboración propia

Para proseguir con el ensayo se someten diferentes porciones de la muestra del árido envuelto con el ligante a la acción de soluciones de carbonato sódico de concentración molar creciente, se realizó 9 porciones en forma de esferas de 0.5 g cada una esfera.

Figura 3.9 b. Porciones en formas de esferas (9 porciones con aditivo y sin aditivo)

Fuente: Elaboración propia

Recipiente 1: Sin aditivo

1. Agua destilada = no hay desprendimiento
2. Solución 1 (1%) = no hay desprendimiento
3. Solución 2 (2%) = si hay desprendimiento
4. Solución 3 (3%) = si hay desprendimiento
5. Solución 4 (4%) = si hay desprendimiento
6. Solución 5 (5%) = si hay desprendimiento
7. Solución 6 (6%) = si hay desprendimiento
8. Solución 7 (7%) = si hay desprendimiento
9. Solución 8 (8%) = si hay desprendimiento
10. Solución 9 (9%) = si hay desprendimiento

Figura 3.9 c. Desprendimiento en la solución 2

Fuente: Elaboración propia

Recipiente 2: Con aditivo (0.7% de aditivo)

1. Agua destilada = no hay desprendimiento
2. Solución 1 (1%) = no hay desprendimiento
3. Solución 2 (2%) = no hay desprendimiento
4. Solución 3 (3%) = no hay desprendimiento
5. Solución 4 (4%) = no hay desprendimiento (costa)
6. Solución 5 (5%) = no hay desprendimiento
7. Solución 6 (6%) = no hay desprendimiento (sierra)
8. Solución 7 (7%) = si hay desprendimiento
9. Solución 8 (8%) = si hay desprendimiento
10. Solución 9 (9%) = si hay desprendimiento

Se puede observar que cumple con lo indicado, ya que no hay desprendimiento del agregado fino con el asfalto hasta la solución 6.

Figura 3.9 d. Desprendimiento en la solución 6

Fuente: Elaboración propia

3.7 DISEÑO DE MEZCLA

Para realizar la gradación de la mezcla asfáltica en caliente (MAC) se debe tener en cuenta los requerimientos establecidos e indicados en el Manual de Carreteras Especificaciones técnicas generales para construcción Eg-2013, (MTC, 2013).

Tabla 3.32: Gradación para mezcla asfáltica en caliente (MAC)

TAMIZ	PORCENTAJE QUE PASA		
	MAC-1	MAC-2	MAC-3
25.0 mm (1")	100		
19.0 mm (3/4")	80-100	100	
12.5 mm (1/2")	67-85	80-100	
9.5 mm (3/8")	60-77	70-88	100
4.75 mm (N 4)	43-54	51-68	65-87
2.00 mm (N 10)	29-45	38-52	43-61
425 um (N 40)	14-25	17-28	16-29
180 um (N 80)	8 - 17	8 - 17	9 - 19
75 um (N 200)	4 - 8	4 - 8	5 - 10

Fuente: Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2013)

Figura 3.10. Preparación de 20 tarros, según el diseño de mezcla para el ensayo Marshall

Fuente: Elaboración propia

Se realizó 4 diseños de mezcla: 1 diseño convencional sin considerar el polvo de caucho, 3 diseños convencionales considerando en cada uno de ellas 0.5%, 1% y 1.5% de polvo de caucho.

3.7.1 Diseño de Mezcla Convencional 120/150

Para el diseño de Mezcla convencional 120/150, se debe considerar los datos obtenidos de la tabla siguiente:

Tabla 3.33: Diseño de la mezcla bituminosa convencional 120/150

% DEAGREGADO GRUESO (En peso de los Agregados)	47.0 %
% DE AGREGADO FINO (En peso de los Agregados)	53.0 %
PORCENTAJE DE FILLER (En peso de los Agregados)	0.0 %
% DE C.A. TOTAL (EN PESO DE LA MEZCLA TOTAL)	6.50
PESO ESPECÍFICO DEL CEMENTO ASFÁLTICO - APARENTE	1.010
PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO GRUESO	2.673
PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO FINO	2.674
PESO ESPECÍFICO DEL FILLER	0.000
PESO ESPECÍFICO MÁXIMO (RICE) - ASTM D 2041	2.421
PESO ESPECÍFICO BULK DE LA BRIQUETA (gr./cm. ³)	2.298
PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO TOTAL (gr./cm. ³)	2.674
PORCENTAJE DE VACÍOS	5.100
V.M.A.	19.600
PORCENTAJE DE VACÍOS LLENADOS CON C. A.	74.200
PESO ESPECÍFICO EFECTIVO DEL AGREGADO TOTAL	2.681
ASFALTO ABSORVIDO POR EL AGREGADO TOTAL	0.100
PORCENTAJE DE ASFALTO EFECTIVO	6.400

Fuente: Elaboración propia

Se hizo el control de materiales para el diseño de la mezcla asfáltica convencional PEN 120/150

Tabla 3.34: Mezcla convencional con asfalto 120/150

MALLAS SERIE AMERICANA	GRANULOMETRÍA RESULTANTE					
	ABERTURA (mm)	RETIENE (%)	PASA (%)	GRADACIÓN MAC-2		
1 1/2"	38.100					
1"	25.400					
3/4"	19.050		100.0	100		
1/2"	12.700	8.8	91.2	80	-	100
3/8"	9.525	12.0	79.2	70	-	88
1/4"	6.350	20.8	58.4			
N° 4	4.760	5.4	53.0	51	-	68
N° 6	3.360	3.2	49.8			
N° 8	2.380	3.7	46.1			
N° 10	2.000	2.1	44.0	38	-	52
N°16	1.190	7.4	36.6			
N° 20	0.840	4.8	31.8			
N° 30	0.590	5.8	26.0			
N° 40	0.426	5.9	20.1	17	-	28
N° 50	0.297	4.2	15.9			
N° 80	0.177	5.3	10.6	8	-	17
N° 100	0.149	2.1	8.5			
N° 200	0.074	4.3	4.2	4	-	8
- N° 200		4.2	-			

RESUMEN DE ENSAYO	
PROPORCIONES DE MEZCLA DE AGREGADOS	
(1) CONFITILLO 1/4"	= 30%
(2) PIEDRA USO 6/7 - 1/2" y 3/8"	= 17%
(3) ARENA PROCESADA	= 53%
PROPORCIONES EN LA MEZCLA RESULTANTE	
- AGREGADO GRUESO	= 47%
- AGREGADO FINO	= 53%
OBSERVACIONES :	
- Especificaciones del MTC EG-2000	
Nota:	
- Eliminar Piedra > 3/4".	

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.11a. Curva granulométrica (Porcentajes que pasa (%) vs Abertura de malla (mm))

Fuente: Elaboración propia

Se realizó la granulometría de este diseño de mezcla que corresponde al MAC 2 de la Tabla 3.32, en la cual se tiene las proporciones en porcentaje de los materiales a utilizar.

3.7.2 Diseño de Mezcla Convencional 120/150 con 0.5% de caucho

En el anexo: Tabla 1 – donde se encuentra la curva granulométrica y los porcentajes de los materiales a utilizar para el diseño de mezcla convencional 120/150 con 0.5% de caucho.

3.7.3 Diseño de Mezcla Convencional 120/150 con 1% de caucho

En el anexo: Tabla 2 – donde se encuentra la curva granulométrica y los porcentajes de los materiales a utilizar para el diseño de mezcla convencional 120/150 con 1% de caucho.

3.7.4 Diseño de Mezcla Convencional 120/150 con 1.5% de Caucho

En el anexo: Tabla 3– donde se encuentra la curva granulométrica y los porcentajes de los materiales a utilizar para el diseño de mezcla convencional 120/150 con 1.5% de caucho.

3.8 DISEÑOS MARSHALL

Para poder realizar los ensayos Marshall se tiene que tener en cuenta los siguientes requerimientos establecidos del Manual de Carreteras Especificaciones técnicas generales para construcción Eg-2013, (MTC, 2013).

Figura 3.11 b. Incorporación de Quimibond al asfalto

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.11c. Calentamiento de los tarros a 145 °C

Fuente: Elaboración propia

Se le agrega al asfalto el aditivo Quimibond en 0.7% (el porcentaje de 0.7% se obtuvo del ensayo de adherencia) y posteriormente los tarros fueron calentados a 145°C.

Figura 3.11 d. Pesado de material

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.11 e. Preparación de la mezcla asfáltica

Fuente: Elaboración propia

Las gráficas siguientes muestran la medición de la proporción del cemento asfáltico.

Figura 3.11 f. Realizando los golpes

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.11g. Baño María de las briquetas a 60 °c

Fuente: Elaboración propia

En estas graficas se muestran la conformación de la briqueta a 75 golpes por cara y posteriormente las briquetas son sometidas a baño María a 60 °C.

Figura 3.11 h. Rompiendo las briquetas

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.11 i. Estabilidad y flujo

Fuente: Elaboración propia

Estas graficas muestran que las briquetas son sometidas a cargas axiales y la posterior falla del material.

En la tabla siguiente se muestra los requisitos para la mezcla bituminosa según lo indicado por el MTC (2013).

Tabla 3.35: Requisitos para mezcla bituminosa

PARAMETRO DE DISEÑO	CLASE DE MEZCLA		
	A	B	C
MARSHALL MTC E 504			
1. COMPACTACION, NUMERO DE GOLPES POR LADO	75	50	35
2. ESTABILIDAD (MINIMO)	8.15 KN	5.44 KN	4.53 KN
3. FLUJO 0.01" (10 $\wedge$ -2 Pulg) (0.25 MM)	0.08 pulg - 0.14 pulg 2mm - 3.6 mm	0.08 pulg - 0.16 pulg 2mm - 4.1 mm	0.08 pulg - 0.20 pulg 2mm - 5.1 mm
4. PORCENTAJE DE VACIOS CON AIRE (1) (MTC E 505)	3 - 5	3 - 5	3 - 5
5. VACIOS EN EL AGREGADO MINERAL	VER TABLA 423 -10		
INMERSION - COMPRESION (MTC E 518)			
1. RESISTENCIA A LA COMPRESION MPA MIN	2.1	2.1	1.4
2. RESISTENCIA RETENIDA % (MIN)	75	75	75
RELACION POLVO - ASFALTO (2)	0.6 - 1.3	0.6 - 1.3	0.6 - 1.3
RELACION ESTABILIDAD / FLUJO (KG/CM) (3)	1700 - 4000		
RESISTENCIA CONSERVADA EN LA PRUEBA DE TRACCION INDIRECTA AASHTO T 283	80 MIN		

Fuente: Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2013)

Para este trabajo se está tomando a 75 golpes la compactación debido a que es la condición de transito más pesada y por tanto la más crítica.

3.8.1 Diseño Marshall Convencional 120/150

En la siguiente tabla se muestran los resultados (Curvas) del ensayo Marshall aplicados a las mezclas convencionales con asfalto 120/150.

Tabla 3.36: Resultados del Marshall de la mezcla convencional con asfalto 120/150

Fuente: Elaboración propia

Estos son los resultados del ensayo con respecto a la estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos cumple dentro de los parámetros establecidos en la tabla 3.34. Y se puede apreciar que el porcentaje óptimo de asfalto es de 5.3%.

3.8.2 Diseño Marshall Convencional 120/150 con 0.5% de caucho

En el anexo: Tabla 04 – se encuentra los resultados del ensayo Marshall con 0.5% de caucho

3.8.3 Diseño Marshall Convencional 120/150 con 1% de caucho

En el anexo: Tabla 05 – se encuentra los resultados del ensayo Marshall con 1% de caucho

3.8.4 Diseño Marshall Convencional 120/150 con 1.5% de caucho

En el anexo: Tabla 06 – se encuentra los resultados del ensayo Marshall con 1.5% de caucho

3.9 ENSAYO DE RUEDA DE HAMBURGO

Los ensayos de Rueda de Hamburgo se realizaron en laboratorio de la empresa TDM, ubicado en la zona comercial de Las Praderas de Lurín-Lima. Para ello se hizo la recepción de los materiales en planta, para luego realizar el proceso de caracterización, cuarteo y calentamiento, tanto de los agregados gruesos y finos, del ligante asfáltico PEN 120/150 y del Polvo de caucho. El ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo se realiza ingresando especímenes (muestras) de dos núcleos cada uno y estarán bajo agua temperada a 50°C. Los cuerpos de prueba previamente deberán ser compactados en el Compactador Giratorio Superpave bajo los parámetros de porcentaje de vacíos establecidos tanto para mezcla asfáltica convencional como para mezcla asfáltica con 1 % de polvo de caucho. Luego de un periodo de temperado se ingresa en la máquina de Rueda Cargada de Hamburgo. El ensayo finaliza a las 20000 pasadas o 12.5 mm de ahuellamiento alcanzado por los cuerpos de prueba, mientras el software de la máquina procesará los datos durante todo el ensayo. Los cuerpos de prueba de 15 cm de diámetro y 6 cm de espesor deberán ser compactados en el Compactador Giratorio Superpave bajo los parámetros de porcentaje de vacíos establecidos tanto para mezcla asfáltica convencional como para mezcla asfáltica modificada con 1.2% de fibras PET.

Antes de realizar el ensayo se debe de sumergir las muestras en baño María a 50°C por un lapso de 30 minutos, para temperarlas. Finalmente el ensayo se realiza también bajo inmersión de agua temperada a 50°C, y el sistema computarizado determinará el número de pasadas y el ahuellamiento alcanzado.

3.9.1 Ensayo de la Rueda de Hamburgo a la mezcla asfáltica convencional 120/150

En el anexo: Tabla 7

3.9.2 Ensayo de la Rueda de Hamburgo a la mezcla asfáltica convencional 120/150 con 1% de caucho

En el anexo: Tabla 8

CAPITULO IV – ANALISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LOS AGREGADOS GRUESOS Y FINOS

Tabla 4.1: Resultados de los ensayos del agregado grueso

REQUERIMIENTOS PARA LOS AGREGADOS GRUESOS				
ENSAYOS	NORMA	REQUERIMIENTO		RESULTADOS
		ALTITUD (msnm)		
		≤ 3000	> 3000	
Durabilidad (al sulfato de magnesio)	MTC E 209	18% máx.	15% máx.	2.33%
Abrasión de los ángeles	MTC E 207	40% máx.	35% máx.	16.89%
Partículas chatas y alargadas	ASTM 4791	10% máx.	10% máx.	8.10%
Caras fracturadas	MTC E 210	(1 cara) 85/50 (2 caras)	(1 cara) 90/70 (2 caras)	56.19% / 60.40%
Absorción	MTC E 206	1% máx.	1% máx.	0.64%

Fuente: Elaboración propia

Peso específico = 2.67 gr/ cm³

Tabla 4.2: Resultados de los ensayos del agregado fino

REQUERIMIENTOS PARA LOS AGREGADOS FINOS				
ENSAYOS	NORMA	REQUERIMIENTO		RESULTADOS
		ALTITUD (msnm)		
		≤ 3000	> 3000	
Equivalente de arena	MTC E 114	60% min	70% min	71.00%
Índice de plasticidad (malla N° 40)	MTC E 111	NP	NP	NP
Índice de plasticidad (malla N° 200)	MTC E 111	4 máx.	NP	NP
Durabilidad (al sulfato de magnesio)	MTC E 209	-	18% máx.	5.45%
Absorción	MTC E 206	1% máx.	1% máx.	0.27%

Fuente: Elaboración propia

Peso específico = 2.674 gr/ cm³

En las tablas 4.1 y 4.2 se pueden apreciar los resultados del requerimiento que se necesita para los agregados gruesos y finos, las cuales cumplen con los parámetros establecidos en las tablas 3.2 y 3.18.

4.2. RESULTADOS DEL ENSAYO AL ASFALTO

En la tabla siguiente se obtienen los resultados del ensayo realizados al asfalto de acuerdo a lo indicados por las normas correspondientes.

Tabla 4.3: Resultados de los ensayos al asfalto

ENSAYOS REALIZADOS A LA MUESTRA ORIGINAL	NORMA	RESULTADOS	RESULTADO
PENETRACION, 25 C, 100 g, 5s, (0.1mm)	MTC E - 304	142	CUMPLE
PUNTO DE ABLANDAMIENTO, Anillo y bola (° C)	MTC E - 307	44	CUMPLE
VISCOSIDAD CINEMATICA a 135 °C	MTC E- 310	201.8	CUMPLE
PUNTO DE INFLAMACION, copa abierta Cleveland (° C)	MTC E - 303	290	CUMPLE
DUCTILIDAD, 25 °C, 5 cm/min (cm)	MTC E - 306	+ 100	CUMPLE
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO (%)	MTC E - 302	99.87	CUMPLE
ENSAYO DE LA MANCHA	MTC E - 314	NEGATIVO	CUMPLE
Solvente Nafta Standard			
INDICE DE SUSCEPTIBILIDAD TERMICA	Heukelom	+ 0.1	CUMPLE
ENSAYOS REALIZADOS DESPUES DE PELICULA FINA, 3.2 mm, 163 °C, 5h			CUMPLE
PERDIDA DE MASA (%)	MTC E - 315	0,09	CUMPLE
PENETRACION, 25 C, 100 g, 5s, (% de la penetración original)	MTC E - 304	59	CUMPLE
DUCTILIDAD, 25 °C, 5 cm/min (cm)	MTC E - 306	+ 100	CUMPLE

Fuente: Elaboración propia

El asfalto 120/150 proporcionado por el Ministerio de Transporte y Comunicaciones cumple con los parámetros establecidos en la tabla 3.28

4.3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS MARSHALL

Se propuso 4 diseños de mezcla: 1 diseño convencional sin considerar el polvo de caucho y 3 diseños convencionales considerando en cada uno de ellas 0.5%, 1% y 1.5% de polvo de caucho. Los cuales se realizaron los respectivos ensayos Marshall con los diseños de mezcla mencionados, a continuación los resultados de los 4 ensayos Marshall en la tabla siguiente.

Tabla 4.4: Resultados de los ensayos Marshall

CUADRO COMPARATIVO DE ENAYO MARSHALL CON MEZCLA ASFALTICA CONVENCIONAL Y MARSHALL CON MEZCLA ASFALTICA MODIFICADA					
	Mezcla Asfáltica con Asfalto 120-150	Mezcla Asfáltica con Asfalto 120-150 + 0.5 % Caucho	Mezcla Asfáltica con Asfalto 120-150 + 1 % Caucho	Mezcla Asfáltica con Asfalto 120-150 + 1.5 % Caucho	RANGO
75 golpes por cara	75	75	75	75	-
Contenido óptimo de cemento asfáltico, %	5.3	5.5	5.5	5.5	-
Peso específico bulk (Gr/cm ²)	2.448	2.427	2.398	2.338	-
Vacíos, %	3.3	3.4	3.6	5.7	[3% - 5%]
Vacíos llenos con cemento asfáltico %	75.5	74.5	73.1	63.2	-
V.M.A, %	13.4	13.8	14.3	15.9	-
Estabilidad, kg (KN)	1312	1090	1060	697	800 Kg (Min)
Flujo, mm (0.01 pulg)	3.1	3.3	3.3	3.4	[2mm - 3.6mm]

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados obtenidos se tomó que el porcentaje ideal de caucho es de 1%, esto es debido a que tiene mayor porcentaje de cemento asfáltico para evitar el deterioro, ya que en este trabajo de investigación está basado para climas fríos.

4.4. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LA RUEDA DE HAMBURGO

Tabla 4.5: Resultados de los ensayos de Rueda de Hamburgo

CUADRO COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE LA RUEDA DE HAMBURGO		
PARAMETROS	Mezcla Asfáltica con Asfalto 120-150	Mezcla Asfáltica con Asfalto 120-150 + 1 % Caucho
Contenido de Asfalto (%)	5.3	5.5
Vacíos (%)	7.1	7.1
# Pasadas alcanzadas	20000	20000

Profundidad de huella (mm)	12.53	12.53
Deformación Permanente (mm)	10.5	8.9

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados obtenidos se observa que la deformación permanente en la mezcla asfáltica con caucho es de 8.9 mm y sin caucho es de 10.5 mm. Esto nos indica que hay una disminución de la deformación permanente de 1.6 mm en relación de la mezcla asfáltica con 1% de caucho respecto a la mezcla asfáltica convencional.

CAPITULO V – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- En el ensayo Marshall se evidencia que la estabilidad de la mezcla asfáltica convencional es de 1312 Kg, su flujo de 3.1 mm y su porcentaje óptimo de caucho es de 5.3 %, cumpliendo con los requerimientos de la norma MTC E-504 del Manual de carreteras “especificaciones técnicas generales para construcción” Eg-2013.
- Además, en el ensayo Marshall se puede verificar que la estabilidad de la mezcla asfáltica con 0.5% de polvo de caucho es de 1090 Kg, su flujo de 3.3 mm y su porcentaje óptimo de caucho es de 5.5%, cumpliendo con los requerimientos de la norma MTC E-504.
- También, la estabilidad de la mezcla asfáltica con 1% de polvo de caucho es de 1060 Kg y su flujo de 3.3 mm y su porcentaje óptimo de caucho es de 5.5%, cumpliendo con los requerimientos de la norma MTC E-504. Por ello, se tomara en cuenta las briquetas con incorporación de caucho de 1%, ya que evitara el deterioro por humedad y desgaste por tránsito.
- Los resultados del Marshall muestran que la estabilidad de la mezcla asfáltica con 1.5% de polvo de caucho es de 697 Kg, su flujo de 3.4 mm, la cual la estabilidad no cumple con los requerimientos de la norma MTC E-504 del Manual de carreteras “especificaciones técnicas generales para construcción” Eg-2013. Por ende se descarta esta cantidad de porcentaje de caucho por no cumplir con la norma.
- En el Marshall realizados a las mezclas asfálticas incorporando 0.5%,1% y 1.5% de polvo de caucho, el porcentaje óptimo de caucho para añadir a la mezcla asfáltica seria de 1 %, ya que presentara un mayor desempeño de la capa de rodadura.
- La estabilidad y flujo son inversamente proporcionales, mientras más porcentaje de polvo de caucho se añade a la mezcla asfáltica su estabilidad bajara y su fluencia aumentara, por ende al aumentar el polvo de caucho aumenta el desempeño. Por otro

lado, su fluencia aumentara dándonos un indicador que el caucho brinda una mayor respuesta a recuperarse en el flujo.

- Respecto al ensayo de la rueda de Hamburgo realizada a la mezcla asfáltica convencional este soporto las 20000 pasadas, la cual cumplió con los requerimientos establecidos en la norma AASHTO T 324-14, de la gráfica (profundidad vs número de pasadas) se obtuvo un resultado de 10.5 mm de deformación permanente cumpliendo así con lo establecido en la norma donde indica que no debe de pasar los 12.5 mm, obteniendo así que la profundidad máxima de ahuellamiento no fue alcanzada.
- Respecto al ensayo de la rueda de Hamburgo realizada a la mezcla asfáltica con 1% de polvo de caucho este soporto las 20000 pasadas, la cual cumplió con los requerimientos establecidos en la norma AASHTO T 324-14, de la gráfica (profundidad vs número de pasadas) se obtuvo un resultado de 8.9 mm de deformación permanente cumpliendo así con lo establecido en la norma donde indica que no debe de pasar los 12.5 mm, obteniendo así que la profundidad máxima de ahuellamiento no fue alcanzada por ende mejora la fluencia de la mezcla asfáltica.
- Los resultados de la rueda de Hamburgo muestran que las mezclas asfálticas con caucho brindan una mayor estabilidad respecto a la deformación permanente, ya que estas briquetas están sometidas a condiciones reales de daño por humedad y tránsito. Concluyendo que la mezcla asfáltica con 1% de caucho aportara mayor vida útil en la capa de rodadura.
- Se pudo concluir que existe una disminución de la deformación permanente de 1.6 mm de la mezcla asfáltica con 1% de caucho con respecto a la mezcla asfáltica convencional. Concluyendo así que la mezcla asfáltica con caucho dará como resultado una disminución de la deformación permanente mejorando así la vida útil de la carpeta asfáltica.

5.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda continuar con la investigación, agregando el polvo de caucho ya no a los agregados por vía seca sino por vía húmeda al asfalto para poder así observar sus características en estabilidad, fluencia y deformación permanente.

- Se recomienda realizar otros tipos de ensayos para no solo poder observar fallas funcionales como el ahuellamiento, sino también para poder observar fallas estructurales como la piel de cocodrilo que afecta no solo a la carpeta asfáltica sino también a todo el paquete estructural del pavimento (carpeta asfáltica, base, sub base y sub rasante).

REFERENCIAS

- Aranguri, J. & Valverde, H. (2018). *Análisis Comparativo del Comportamiento Estructural de Mezclas Asfálticas en Caliente y Mezclas Asfálticas Emulsionadas en los Pavimentos*. (Tesis de licenciatura, Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo, Perú)
- Botasso, G., Rebollo, O., Cuattrocchio, A. & Soengas, C. (2012). Utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas densa en obras de infraestructuras. *Portal de Revistas Académicas*. Recuperado el 02 de agosto de 2019, de <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial/article/view/2028>
- Campaña, O., Galeas, S. & Guerrero, V. (2015). Obtención de asfalto modificado con polvo de caucho proveniente del reciclaje de neumáticos de automotores. *Revista Politécnica*. Recuperado el 09 de julio de 2019, de https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/513
- Carrizales, J. (2015). *Asfalto Modificado con Material Reciclado de Llantas para su Aplicación en Pavimentos Flexibles*. (Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ingeniería Civil y Arquitectura, Puno, Perú)
- Correa, C. (2016). *Diseño y Construcción de un Prototipo de un Equipo de Corte Tipo Torno para la Fabricación de Soportes Tipo Buje para Vehículos (LUV y MAZDA) en Caucho Reutilizado para la Empresa CAUCHOS BOSA*. (Tesis de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia)

- Del Val, M. (2010). Las necesidades de conservación de los firmes de las carreteras españolas. *SlideShare*. Recuperado el 02 de agosto de 2019, de <https://pt.slideshare.net/boixadors/estudio-carreteras>
- Fajardo, L. & Vergaray, D. (2014). *Efecto de la Incorporación por Vía Seca, del Polvo de Neumático Reciclado, como Agregado Fino en Mezclas Asfálticas*. (Tesis de licenciatura, Universidad San Martín de Porres, Lima, Perú)
- Huamán, N. (2011). *La Deformación Permanente en las Mezclas Asfálticas y el Consecuente Deterioro de los Pavimentos Asfálticos en el Perú*. (Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú)
- Huamán, N. & Chang, C. (2018). La deformación permanente en las mezclas asfálticas y el consecuente deterioro de los pavimentos asfálticos en el Perú. *Perfiles de Ingeniería*. Recuperado el 15 de julio de 2019, de http://revistas.urp.edu.pe/index.php/Perfiles_Ingenieria/issue/view/5
- Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2013). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2680:2013: productos derivados del petróleo. Asfalto modificado con caucho reciclado. Requisitos e inspección* (1ª ed.). Quito: INEN.
- Método de ensayo para probar mezclas asfálticas en caliente (MAC) en el equipo Rueda de Hamburgo. (s.f.). Recuperado 15 de junio 2019, de <https://es.scribd.com/document/372748210/asshto-t324>
- Moreno, E. (2016). *Estudio Comparativo de la Calidad del Asfalto Tradicional con la Inclusión de Caucho Reciclado*. (Tesis de Licenciatura, Universidad Cesar Vallejo, Facultad de Ingeniería, Lima, Perú)

Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2000). *Manual de Ensayo de Materiales (EM 2000): abrasión los ángeles (L.A.) al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 ½") MTC E 207-2000*. Lima: ICG.

Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2013). *Manual de Carreteras: especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013*. Lima: MTC.

Muñoz, H. (2013). *Análisis de Pavimentación (MDC-3) Mejoradas con Escorias (no ferrosas) de Fundición de Cobre (Ensayo Marshall INV-E 748-07)*. (Tesis de licenciatura, Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de Educación a Distancia, Bogotá D.C., Colombia)

Quezada, J. (2018). *Efecto del Porcentaje de Cemento Asfáltico en Pruebas de Desempeño Rueda de Hamburgo (HWT), Tracción Indirecta (TSR) y Adherencia Pasiva*. (Tesis de licenciatura, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile)

ANEXOS

TABLA 1 : DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL 120/150 CON 0.5% DE CAUCHO

% DEAGREGADO GRUESO (En peso de los Agregados)	47.0 %
% DE AGREGADO FINO (En peso de los Agregados)	52.5 %
PORCENTAJE DE FILLER (En peso de los Agregados)	0.5 %
% DE C.A. TOTAL (EN PESO DE LA MEZCLA TOTAL)	6.50
PESO ESPECÍFICO DEL CEMENTO ASFÁLTICO - APARENTE	1.010
PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO GRUESO	2.673
PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO FINO	2.674
PESO ESPECÍFICO DEL FILLER	1.200
PESO ESPECÍFICO MÁXIMO (RICE) - ASTM D 2041	2.408
PESO ESPECÍFICO BULK DE LA BRIQUETA (gr./cm. ³)	2.298
PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO TOTAL (gr./cm. ³)	2.657
PORCENTAJE DE VACÍOS	4.600
V.M.A.	19.100
PORCENTAJE DE VACÍOS LLENADOS CON C. A.	76.100
PESO ESPECÍFICO EFECTIVO DEL AGREGADO TOTAL	2.665
ASFALTO ABSORVIDO POR EL AGREGADO TOTAL	0.100
PORCENTAJE DE ASFALTO EFECTIVO	6.400

Fuente: Elaboración propia

Se hizo el control de materiales para el diseño de la mezcla asfáltica convencional 120/150 con 0.5% de caucho.

TABLA 1-A: MEZCLA CONVENCIONAL CON ASFALTO 120/150 CON 0.5% DE CAUCHO- MEZCLA DE AGREGADOS

MALLAS SERIE AMERICANA	GRANULOMETRÍA RESULTANTE				
	ABERTURA (mm)	RETIENE (%)	PASA (%)	GRADACIÓN	MAC-2
1 1/2"	38.100				
1"	25.400				
3/4"	19.050		100.0	100	
1/2"	12.700	8.8	91.2	80 - 100	
3/8"	9.525	12.0	79.2	70 - 88	
1/4"	6.350	20.8	58.4		
Nº 4	4.760	5.4	53.0	51 - 68	
Nº 6	3.360	3.1	49.9		
Nº 8	2.380	3.7	46.2		
Nº 10	2.000	2.1	44.1	38 - 52	
Nº 16	1.190	7.4	36.7		
Nº 20	0.840	4.7	32.0		

RESUMEN DE ENSAYO	
PROPORCIONES DE MEZCLA DE AGREGADOS	
(1) CONFITILLO 1/4"	= 30%
(2) PIEDRA USO 6/7 - 1/2" y 3/8"	= 17%
(3) ARENA PROCESADA	= 52.5%
(4) CAUCHO	= 0.5%
PROPORCIONES EN LA MEZCLA RESULTANTE	
- AGREGADO GRUESO	= 47%
- AGREGADO FINO	= 53%
OBSERVACIONES :	
- Especificaciones del MTC EG-2000	

N° 30	0.590	5.8	26.2	
N° 40	0.426	5.8	20.4	17 - 28
N° 50	0.297	4.4	16.0	
N° 80	0.177	5.5	10.5	8 - 17
N° 100	0.149	2.1	8.4	
N° 200	0.074	4.2	4.2	4 - 8
- N° 200		4.2	-	

Nota:
- Eliminar Piedra > 3/4".

Fuente: Elaboración propia

TABLA 1-B: RESULTADO DE LA CURVA GRANULOMETRICA

Fuente: Elaboración propia

Se realizó la granulometría para este diseño de mezcla que corresponde al MAC 2 de la tabla 3.32, en la cual se tiene las proporciones en porcentaje de los materiales a utilizar.

TABLA 2: DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL 120/150 CON 1% DE CAUCHO

% DE AGREGADO GRUESO (En peso de los Agregados)	47.0 %
% DE AGREGADO FINO (En peso de los Agregados)	52.0 %
PORCENTAJE DE FILLER (En peso de los Agregados)	1.0 %
% DE C.A. TOTAL (EN PESO DE LA MEZCLA TOTAL)	6.50
PESO ESPECÍFICO DEL CEMENTO ASFÁLTICO - APARENTE	1.010
PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO GRUESO	2.673
PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO FINO	2.674
PESO ESPECÍFICO DEL FILLER	1.200
PESO ESPECÍFICO MÁXIMO (RICE) - ASTM D 2041	2.396
PESO ESPECÍFICO BULK DE LA BRIQUETA (gr./cm. ³)	2.298
PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO TOTAL (gr./cm. ³)	2.641
PORCENTAJE DE VACÍOS	4.100
V.M.A.	18.600
PORCENTAJE DE VACÍOS LLENADOS CON C. A.	78.100
PESO ESPECÍFICO EFECTIVO DEL AGREGADO TOTAL	2.649
ASFALTO ABSORVIDO POR EL AGREGADO TOTAL	0.100

PORCENTAJE DE ASFALTO EFECTIVO

6.400

Fuente: Elaboración propia

Se hizo el control de materiales para el diseño de la mezcla asfáltica convencional 120/150 con 1% de caucho.

**TABLA 2-A: MEZCLA CONVENCIONAL CON ASFALTO 120/150 CON 1% DE CAUCHO-
MEZCLA DE AGREGADOS**

MALLAS SERIE AMERICANA	GRANULOMETRÍA RESULTANTE					MAC-2		RESUMEN DE ENSAYO	
	ABERTURA (mm)	RETIENE (%)	PASA (%)	GRADACIÓN					
1 1/2"	38.100							PROPORCIONES DE MEZCLA DE AGREGADOS (1) CONFITILLO 1/4" = 30% (2) PIEDRA USO 6/7 - 1/2" y 3/8" = 17% (3) ARENA PROCESADA = 52% (4) CAUCHO = 1%	
1"	25.400								
3/4"	19.050		100.0	100					
1/2"	12.700	8.8	91.2	80	-	100			
3/8"	9.525	12.0	79.2	70	-	88			
1/4"	6.350	20.8	58.4					PROPORCIONES EN LA MEZCLA RESULTANTE - AGREGADO GRUESO = 47% - AGREGADO FINO = 53%	
Nº 4	4.760	5.4	53.0	51	-	68			
Nº 6	3.360	3.1	49.9						
Nº 8	2.380	3.7	46.2						
Nº 10	2.000	2.0	44.2	38	-	52			
Nº 16	1.190	7.3	36.9					OBSERVACIONES : - Especificaciones del MTC EG-2000 Nota: - Eliminar Piedra > 3/4" .	
Nº 20	0.840	4.7	32.2						
Nº 30	0.590	5.7	26.5						
Nº 40	0.426	5.9	20.6	17	-	28			
Nº 50	0.297	4.6	16.0						
Nº 80	0.177	5.5	10.5	8	-	17			
Nº 100	0.149	2.2	8.3						
Nº 200	0.074	4.1	4.2	4	-	8			
- Nº 200		4.2	-						

Fuente: Elaboración propia

TABLA 2-B: RESULTADO DE LA CURVA GRANULOMETRICA

CURVA GRANULOMÉTRICA

Fuente: Elaboración propia

Se realizó la granulometría de este diseño de mezcla que corresponde al MAC 2 de la tabla 3.32, en la cual se tiene las proporciones en porcentaje de los materiales a utilizar.

TABLA 3: DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL 120/150 CON 1.5% DE CAUCHO

% DE AGREGADO GRUESO (En peso de los Agregados)	47.0 %
% DE AGREGADO FINO (En peso de los Agregados)	51.5 %
PORCENTAJE DE FILLER (En peso de los Agregados)	1.5 %
% DE C.A. TOTAL (EN PESO DE LA MEZCLA TOTAL)	6.50
PESO ESPECÍFICO DEL CEMENTO ASFÁLTICO - APARENTE	1.010
PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO GRUESO	2.673
PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO FINO	2.674
PESO ESPECÍFICO DEL FILLER	1.200
PESO ESPECÍFICO MÁXIMO (RICE) - ASTM D 2041	2.384
PESO ESPECÍFICO BULK DE LA BRIQUETA (gr./cm. ³)	2.298
PESO ESPECÍFICO BULK DEL AGREGADO TOTAL (gr./cm. ³)	2.625
PORCENTAJE DE VACÍOS	3.600
V.M.A.	18.100
PORCENTAJE DE VACÍOS LLENADOS CON C. A.	80.300
PESO ESPECÍFICO EFECTIVO DEL AGREGADO TOTAL	2.632
ASFALTO ABSORVIDO POR EL AGREGADO TOTAL	0.100
PORCENTAJE DE ASFALTO EFECTIVO	6.400

Fuente: Elaboración propia

Se hizo el control de materiales para el diseño de la mezcla asfáltica convencional 120/150 con 1.5% de caucho.

**TABLA 3-A: MEZCLA CONVENCIONAL CON ASFALTO 120/150 CON 1.5% DE CAUCHO-
MEZCLA DE AGREGADOS**

MALLAS SERIE AMERICANA	GRANULOMETRÍA RESULTANTE				RESUMEN DE ENSAYO	
	ABERTURA (mm)	RETIENE (%)	PASA (%)	GRADACIÓN	MAC-2	
1 ½"	38.100					
1"	25.400					
¾"	19.050		100.0	100		
½"	12.700	8.8	91.2	80	-	100
3/8"	9.525	12.0	79.2	70	-	88
¼"	6.350	20.8	58.4			
Nº 4	4.760	5.4	53.0	51	-	68
Nº 6	3.360	3.1	49.9			
Nº 8	2.380	3.6	46.3			
Nº 10	2.000	2.1	44.2	38	-	52
Nº 16	1.190	7.2	37.0			
Nº 20	0.840	4.6	32.4			
Nº 30	0.590	5.8	26.6			
Nº 40	0.426	5.8	20.8	17	-	28
Nº 50	0.297	4.7	16.1			

PROPORCIONES DE MEZCLA DE AGREGADOS (1) CONFITILLO ¼" = 30% (2) PIEDRA USO 6/7 – ½" y 3/8" = 17% (3) ARENA PROCESADA = 51.5% (4) CAUCHO = 1.5%	
PROPORCIONES EN LA MEZCLA RESULTANTE - AGREGADO GRUESO = 47% - AGREGADO FINO = 53%	
OBSERVACIONES : - Especificaciones del MTC EG-2000	
Nota: - Eliminar Piedra > ¾".	

N° 80	0.177	5.7	10.4	8	-	17
N° 100	0.149	2.2	8.2			
N° 200	0.074	4.1	4.1	4	-	8
- N° 200		4.1	-			

Fuente: Elaboración propia

TABLA 3-B: RESULTADO DE LA CURVA GRANULOMETRICA

Fuente: Elaboración propia

Se realizó la granulometría de este diseño de mezcla que corresponde al MAC 2 de la tabla 3.32, en la cual se tiene las proporciones en porcentaje de los materiales a utilizar.

TABLA 4: RESULTADOS DEL MARSHALL DE LA MEZCLA CONVENCIONAL CON ASFALTO 120/150 CON 0.5% DE CAUCHO

Fuente: Elaboración propia

Estos son los resultados del ensayo con respecto a la estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos cumple dentro de los parámetros establecidos en la tabla 3.34. Y se puede apreciar que el porcentaje óptimo de asfalto es de 5.5%.

TABLA 5: RESULTADOS DEL MARSHALL DE LA MEZCLA CONVENCIONAL CON ASFALTO 120/150 CON 1% DE CAUCHO

Fuente: Elaboración propia

Estos son los resultados del ensayo con respecto a la estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos cumple dentro de los parámetros establecidos en la tabla 3.34. Y se puede apreciar que el porcentaje óptimo de asfalto es de 5.5%.

TABLA 6: RESULTADOS DEL MARSHALL DE LA MEZCLA CONVENCIONAL CON ASFALTO 120/150 CON 1.5% DE CAUCHO

Fuente: Elaboración propia

Estos son los resultados del ensayo con respecto a la estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos cumple dentro de los parámetros establecidos en la tabla 3.34. Y se puede apreciar que el porcentaje óptimo de asfalto es de 5.5%.

TABLA 7: ENSAYO DE LA RUEDA DE HAMBURGO A LA MEZCLA ASFALTICA CONVENCIONAL 120/150

EXPEDIENTE R.H. / LMA 164-2019-LAB TDM ASFALTOS	
	REPORT DE ENSAYO DE RUEDA DE HAMBURGO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE COMPACTADAS AASHTO T - 324	
PROYECTO : TESIS UBICACIÓN : SOLICITANTE : BACH. CESAR CONTRERAS Y BACH. DIEGO MAMANI REFERENCIA : PROPORCIONES DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE SIN POLVO DE CAUCHO PROPORCIONADA POR EL SOLICITANTE F. DE RECEPCIÓN : 29/09/2019		
INFORMACIÓN DE LAS MUESTRAS O ESPECIMENES DE ENSAYO		
CANTERA : SANTA CRUZ DESCRIPCIÓN : PIEDRA CHANCADA - ARENA CHANCADA ASFALTO : PEN 120/150 PETROPERU ADITIVO : 0.5% QUIMIBOND 3000	TIPO DE COMPACTACIÓN : COMPACTADOR GIRATORIO PORCENTAJE DE VACIOS : 7.10 % CONTENIDO DE ASFALTO : 5.30 %	
DATOS INICIALES DE LA PRUEBA		
NÚMERO DE ENSAYO : 164 - 2019 TIPO DE MUESTRA : doble núcleos DIÁMETRO : 150 mm ESPESOR : 60 mm	TEMPERATURA DE ENSAYO : 50 °C NÚMERO MAX. PASADAS : 20000 pasadas PROFUNDIDAD MÁXIMA : 12.5 mm VELOCIDAD DE LA RUEDA : 52 pasadas / min OPERADOR : R.V.	
RESULTADOS FINALES		
PROFUNDIDAD FINAL RUT. : 12.53 mm TIPO DE MEDIO TÉRMICO : AGUA FEEDBACK UTILIZADO : EN EL TANQUE TEMPERATURA MÁXIMA : 50.8 °C TEMPERATURA MÍNIMA : 49.8 °C	PASADAS : 20000	
OBSERVACIONES ■ ESTA PRUEBA FUE REALIZADA EN CONCORDANCIA CON LA NORMA AASHTO T-324. ■ LA PRUEBA SE DETUVO AUTOMÁTICAMENTE EN LAS 20000 PASADAS DE LA RUEDA. ■ LA CONDICIÓN DE PROFUNDIDAD MÁXIMA DE AHUELLAMIENTO NO FUE ALCANZADA.

MÉTODOS DE ENSAYO

- AASHTO T 324 - 14 HAMBURG WHEEL-TRACK TESTING OF COMPACTED HOT MIX ASPHALT (HMA)
- AASHTO R 30 MIXTURE CONDITIONING OF HOT MIX ASPHALT (HMA)
- AASHTO T 312 PREPARING AND DETERMINING THE DENSITY OF ASPHALT MIXTURE SPECIMENS BY MEANS OF THE SUPERPAVE GYRATORY COMPACTOR
- ASTM D2726 PESO ESPECÍFICO APARENTE Y PESO UNITARIO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS EMPLEANDO ESPECÍMENES SATURADOS CON SUPERFICIE SECA
- ASTM D2041 PESO ESPECÍFICO TEÓRICO MÁXIMO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA PAVIMENTOS
- ASTM D3203 PORCENTAJE DE VACÍOS DE AIRE EN MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS DENSAS Y ABIERTAS

 Romel Vasquez Z.
 Laboratorista

 Wendy Herencia
 Jefe del Área Técnica

Fecha de reporte Lima, 03 de septiembre del 2019

EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES DE EXCLUSIVA RESPONSABILIDAD DEL USUARIO

REG-III-TEC-089.V01

ESPECIMEN DE ENSAYO

EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES DE EXCLUSIVA RESPONSABILIDAD DEL USUARIO

REG-III-TEC-089.V01

**TABLA 8: ENSAYO DE LA RUEDA DE HAMBURGO A LA MEZCLA ASFALTICA
CONVENCIONAL 120/150 CON 1% DE CAUCHO**

EXPEDIENTE R.H. / LMA 165-2019-LAB TDM ASFALTOS										
REPORTE DE ENSAYO DE RUEDA DE HAMBURGO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE COMPACTADAS AASHTO T - 324											
PROYECTO : TESIS UBICACION : SOLICITANTE : BACH. CESAR CONTRERAS Y BACH. DIEGO MAMANI REFERENCIA : PROPORCIONES DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON POLVO DE CAUCHO PROPORCIONADA POR EL SOLICITANTE F. DE RECEPCIÓN : 29/09/2019											
INFORMACIÓN DE LAS MUESTRAS O ESPECIMENES DE ENSAYO <table border="0"> <tr> <td>CANtera : SANTA CRUZ</td> <td>TIPO DE COMPACTACIÓN : COMPACTADOR GIRATORIO</td> </tr> <tr> <td>DESCRIPCIÓN : PIEDRA CHANCADA - ARENA CHANCADA</td> <td>PORCENTAJE DE VACÍOS : 7.10 %</td> </tr> <tr> <td>ASFALTO : PEN 120/150 PETROPERU</td> <td>CONTENIDO DE ASFALTO : 5.50 %</td> </tr> <tr> <td>ADITIVO : 0.5% QUIMIBOND 3000</td> <td></td> </tr> </table>		CANtera : SANTA CRUZ	TIPO DE COMPACTACIÓN : COMPACTADOR GIRATORIO	DESCRIPCIÓN : PIEDRA CHANCADA - ARENA CHANCADA	PORCENTAJE DE VACÍOS : 7.10 %	ASFALTO : PEN 120/150 PETROPERU	CONTENIDO DE ASFALTO : 5.50 %	ADITIVO : 0.5% QUIMIBOND 3000			
CANtera : SANTA CRUZ	TIPO DE COMPACTACIÓN : COMPACTADOR GIRATORIO										
DESCRIPCIÓN : PIEDRA CHANCADA - ARENA CHANCADA	PORCENTAJE DE VACÍOS : 7.10 %										
ASFALTO : PEN 120/150 PETROPERU	CONTENIDO DE ASFALTO : 5.50 %										
ADITIVO : 0.5% QUIMIBOND 3000											
DATOS INICIALES DE LA PRUEBA <table border="0"> <tr> <td>NÚMERO DE ENSAYO : 164 - 2019</td> <td>TEMPERATURA DE ENSAYO : 50 °C</td> </tr> <tr> <td>TIPO DE MUESTRA : doble nucleo</td> <td>NÚMERO MAX. PASADAS : 20000 pasadas</td> </tr> <tr> <td>DIÁMETRO : 150 mm</td> <td>PROFUNDIDAD MÁXIMA : 12.5 mm</td> </tr> <tr> <td>ESPEGOR : 60 mm</td> <td>VELOCIDAD DE LA RUEDA : 52 pasadas / min</td> </tr> <tr> <td></td> <td>OPERADOR : R.V.</td> </tr> </table>		NÚMERO DE ENSAYO : 164 - 2019	TEMPERATURA DE ENSAYO : 50 °C	TIPO DE MUESTRA : doble nucleo	NÚMERO MAX. PASADAS : 20000 pasadas	DIÁMETRO : 150 mm	PROFUNDIDAD MÁXIMA : 12.5 mm	ESPEGOR : 60 mm	VELOCIDAD DE LA RUEDA : 52 pasadas / min		OPERADOR : R.V.
NÚMERO DE ENSAYO : 164 - 2019	TEMPERATURA DE ENSAYO : 50 °C										
TIPO DE MUESTRA : doble nucleo	NÚMERO MAX. PASADAS : 20000 pasadas										
DIÁMETRO : 150 mm	PROFUNDIDAD MÁXIMA : 12.5 mm										
ESPEGOR : 60 mm	VELOCIDAD DE LA RUEDA : 52 pasadas / min										
	OPERADOR : R.V.										
RESULTADOS FINALES <table border="0"> <tr> <td>PROFUNDIDAD FINAL RUT. : 12.53 mm</td> <td></td> </tr> <tr> <td>TIPO DE MEDIO TÉRMICO : AGUA</td> <td></td> </tr> <tr> <td>FEEDBACK UTILIZADO : EN EL TANQUE</td> <td></td> </tr> <tr> <td>TEMPERATURA MÁXIMA : 50.8 °C</td> <td></td> </tr> <tr> <td>TEMPERATURA MÍNIMA : 49.8 °C</td> <td>PASADAS : 20000</td> </tr> </table>		PROFUNDIDAD FINAL RUT. : 12.53 mm		TIPO DE MEDIO TÉRMICO : AGUA		FEEDBACK UTILIZADO : EN EL TANQUE		TEMPERATURA MÁXIMA : 50.8 °C		TEMPERATURA MÍNIMA : 49.8 °C	PASADAS : 20000
PROFUNDIDAD FINAL RUT. : 12.53 mm											
TIPO DE MEDIO TÉRMICO : AGUA											
FEEDBACK UTILIZADO : EN EL TANQUE											
TEMPERATURA MÁXIMA : 50.8 °C											
TEMPERATURA MÍNIMA : 49.8 °C	PASADAS : 20000										
OBSERVACIONES ■ ESTA PRUEBA FUE REALIZADA EN CONCORDANCIA CON LA NORMA AASHTO T-324. ■ LA PRUEBA SE DETUVO AUTOMÁTICAMENTE EN LAS 20000 PASADAS DE LA RUEDA. ■ LA CONDICIÓN DE PROFUNDIDAD MÁXIMA DE AHUELLAMIENTO NO FUE ALCANZADA.

ESPECIMENES DE ENSAYO